



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

# **Automatización en sistema portuario de transporte de carbón**

**Juan Manuel Orozco Rojas**

Programa de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial  
Facultad de Ingeniería y Ciencias  
Pontificia Universidad Javeriana Santiago de  
Cali, Colombia

2025

# **Automatización en sistema portuario de transporte de carbón**

**Juan Manuel Orozco Rojas**

Director:

Ing. Hader Alberto Madera Bermeo

Línea de Investigación: Automatización

Programa de Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Pontificia Universidad Javeriana Santiago de Cali, Colombia

2025

## **Declaración de obra original**

Yo Juan Manuel Orozco declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 535 de 2010 del Consejo Directivo de la Pontificia Universidad Javeriana. «Política de Propiedad Intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Este proyecto representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en este proyecto, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Juan Manuel Orozco

Fecha 05/04/2025

# Resumen

## **Automatización en sistema portuario de transporte de carbón**

Este proyecto presenta una propuesta de diseño para la automatización del sistema de transporte de carbón en la empresa OPP Graneles, ubicada en el puerto de Buenaventura. Actualmente, el proceso opera mediante dos bandas transportadoras principales —**PIT PORTABLE FEED HOPPER** y **STACKER**— que funcionan de manera independiente, lo cual ha generado tiempos de inactividad mensuales significativos. Como resultado del análisis técnico, se estructuró una solución automatizada que funciona en paralelo al sistema existente, sin modificar el PLC Siemens original. La propuesta incluye la integración de sensores de nivel en la tolva de alimentación para monitorear el flujo de material y un PLC adicional con interfaz HMI para supervisión del proceso en tiempo real. Asimismo, se planteó un esquema de control y comunicación que permite la sincronización entre bandas y la gestión coordinada de paradas ante condiciones de fallo. Todo el diseño se fundamentó en criterios de ingeniería mecánica y normativa vigente, con el fin de mejorar la eficiencia operativa del sistema.

**Palabras clave:** automatización, control de bandas transportadoras, manejo de carbón, sensores de nivel, sistema HMI.

## **Abstract**

### **Automation in system coal transport port**

This project presents a design proposal for the automation of the coal transportation system at the OPP Graneles company, located in the port of Buenaventura. Currently, the process operates through two main conveyor belts—the PIT PORTABLE FEED HOPPER and STACKER—that operate independently, resulting in significant monthly downtime. As a result of the technical analysis, an automated solution was structured to operate in parallel with the existing system, without modifying the original Siemens PLC. The proposal includes the integration of level sensors in the feed hopper to monitor material flow and an additional PLC with an HMI interface for real-time process monitoring. A control and communication scheme was also proposed to enable synchronization between belts and coordinated management of shutdowns in the event of a fault. The entire design was based on mechanical engineering criteria and current regulations, with the aim of improving the system's operational efficiency.

Keywords: automation, conveyor belt control, coal handling, level sensors, HMI system.

# Contenido

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Resumen .....</b>                                    | <b>IV</b>   |
| <b>Lista de tablas.....</b>                             | <b>VII</b>  |
| <b>Introducción .....</b>                               | <b>8</b>    |
| <b>1. Planteamiento del problema .....</b>              | <b>10</b>   |
| 1.1. Causas de la problemática .....                    | 11          |
| 1.2. Grupos de Interés Afectados.....                   | 12          |
| 1.3. Recolección de datos .....                         | 12          |
| 1.4. Requerimientos y restricciones del diseño .....    | 14          |
| <b>2. Justificación .....</b>                           | <b>16</b>   |
| 2.1. Justificación técnica y operativa .....            | 17          |
| 2.2. Justificación normativa.....                       | 17          |
| 2.3. Aporte a la ingeniería mecánica .....              | 18          |
| <b>3. Objetivos.....</b>                                | <b>19</b>   |
| 3.1. Objetivo general .....                             | 19          |
| 3.2. Objetivos específicos.....                         | 19          |
| <b>4. Marco teórico.....</b>                            | <b>20</b>   |
| 4.1. Fundamentos de automatización industrial .....     | 20          |
| 4.2. Controladores lógicos programables (PLC) .....     | 20          |
| 4.3. Interfaz Hombre-Máquina (HMI) .....                | 21          |
| 4.4. Sensores industriales aplicados.....               | 21          |
| 4.5. Diagramas GRAFCET.....                             | 21          |
| 4.6. Normativas aplicables .....                        | 22          |
| <b>5. Estado del arte .....</b>                         | <b>23</b>   |
| 5.1. Casos de éxito en la Industria Portuaria .....     | 24          |
| <b>6. Resultados del diseño de automatización .....</b> | <b>25</b>   |
| 6.1. Requerimientos de diseño .....                     | 26          |
| 6.2. GRAFCET del sistema .....                          | 27          |
| 6.3. Selección de componentes para la propuesta .....   | 28          |
| 6.4. Valoración comparativa (matriz cualitativa).....   | 29          |
| 6.5. Ubicación de intervención.....                     | 29          |
| <b>7. Metodología .....</b>                             | <b>31</b>   |
| <b>8. Conclusiones .....</b>                            | <b>32</b>   |
| <b>9. Cronograma.....</b>                               | <b>33</b>   |
| <b>Bibliografía.....</b>                                | <b>34</b>   |
| <b>Anexos.....</b>                                      | <b>36</b>   |

## **Lista de tablas**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Tabla 1.</b> Normativa aplicable para el proyecto junto con su impacto..... | 17          |
| <b>Tabla 2.</b> Secuencia actual del proceso sin automatización.....           | 24          |
| <b>Tabla 3.</b> Secuencia del proceso automatizado.....                        | 25          |
| <b>Tabla 4.</b> Listado de componentes.....                                    | 25          |
| <b>Tabla 5.</b> Validación y evaluación de componentes.....                    | 26          |

## Introducción

La automatización industrial se ha consolidado como una herramienta clave para mejorar la eficiencia, la seguridad y la competitividad en operaciones logísticas complejas, como las que se desarrollan en terminales portuarios [1], [2]. En particular, el manejo de materiales a granel como el carbón coquizable requiere procesos coordinados que minimicen los tiempos de inactividad, reduzcan la intervención manual y garanticen la continuidad operativa. Diversos estudios han demostrado que la integración de tecnologías de control automatizado, monitoreo en tiempo real y sistemas de alerta temprana contribuye significativamente al rendimiento de este tipo de operaciones [3], [8].

Bajo este contexto, el presente trabajo se centró en el desarrollo de una propuesta de diseño para un sistema automatizado paralelo al actual proceso de transporte de carbón en OPP Graneles, empresa ubicada en el puerto de Buenaventura. Dicho sistema, compuesto por dos bandas transportadoras independientes (PIT Portable Feed Hopper y STACKER), no cuenta con una lógica de sincronización ni automatización conjunta, lo cual genera paradas no planificadas, intervención manual ante fallos y pérdida operativa por ineficiencias en la gestión. Estas bandas movilizan diariamente más de 50.000 toneladas de carbón, por lo que cualquier detención compromete la productividad de la operación [1].

La propuesta desarrollada se enfocó en el control de tres aspectos críticos del proceso: (1) sincronización del arranque y paro de ambas bandas, (2) monitoreo del nivel de material en la tolva de alimentación, y (3) detección de condiciones de falla como desalineamientos y sobrecalentamiento en los motores, mediante el aprovechamiento de sensores térmicos ya integrados. Para gestionar estas variables, se empleó un controlador lógico programable (PLC Allen-Bradley) en conjunto con una interfaz gráfica HMI, todo dentro de un entorno simulado. Este sistema fue planteado sin intervenir la lógica operativa existente basada en PLC Siemens.

Desde la perspectiva de la ingeniería mecánica, el proyecto contribuyó al estudio de soluciones de automatización aplicables al diseño de sistemas de transporte industrial. Se buscó reducir los riesgos asociados a la operación manual y el desgaste acelerado de componentes, mediante una propuesta de control más confiable y gestionable. La solución fue desarrollada bajo criterios normativos establecidos por estándares internacionales como ISO 12100, IEC 61508 e IEC 61131-2, los cuales guían el diseño seguro y funcional de sistemas automatizados [4], [6], [13].

En conclusión, se diseñó una solución simulada y técnicamente viable para la mejora del proceso portuario de transporte de carbón en OPP Graneles, enmarcada dentro de principios de automatización industrial y orientada a la mejora operativa, sin intervención física del sistema existente.

# 1. Planteamiento del problema

En la terminal portuaria de OPP Graneles, ubicada en el puerto de Buenaventura, el proceso de embarque de carbón coquizable se realiza mediante dos bandas transportadoras principales: la PIT PORTABLE FEED HOPPER (PIT) y la STACKER. La banda PIT recibe el carbón desde una tolva alimentadora, mientras que la STACKER se encarga de su transporte final hasta el buque. A través de visitas técnicas y observación directa en campo, se identificó que ambas bandas, aunque trabajan de forma secuencial, operan bajo un sistema independiente sin integración lógica ni comunicación entre sí.

Durante la recolección de datos y el análisis del proceso, se evidenció que el control actual se ejecuta de forma manual por parte de los operarios, quienes son responsables de accionar las bandas y de detectar visualmente posibles fallos operativos. Según el personal técnico consultado y el análisis del flujo operativo, las decisiones de parada ante fallos como sobrecalentamientos o atascos se toman de manera reactiva, y no existe un mecanismo automatizado que permita gestionar estos eventos de forma anticipada o coordinada.

Además, se identificaron las siguientes limitaciones:

- Ausencia de comunicación entre los controladores de ambas bandas, lo cual impide una respuesta sincronizada ante eventos críticos.
- Carencia de sensores de nivel en la tolva de alimentación, lo que impide un control eficiente del flujo de material.
- Falta de una lógica de control programada que defina acciones ante condiciones de operación no deseadas (alertas, paradas, reinicio de sistema).
- Inexistencia de una interfaz Hombre-Máquina (HMI) que permita supervisar el estado del sistema en tiempo real desde una estación central.

Estas deficiencias limitan la capacidad de respuesta ante fallos, incrementan la dependencia de la intervención humana y afectan la trazabilidad del proceso. Como resultado, se generan tiempos de inactividad significativos, pérdida de eficiencia operativa y un aumento en el riesgo de desgaste prematuro de componentes mecánicos.

## 1.1. Causas de la problemática

Las principales causas que afectan la eficiencia y confiabilidad del sistema de transporte de carbón en la terminal portuaria analizada se identificaron mediante observación directa del proceso y validación con personal técnico durante las visitas de campo. Estas causas están asociadas principalmente a deficiencias en automatización y supervisión del sistema:

1. **Falta de sincronización lógica entre bandas transportadoras:** La banda PIT y la STACKER operan de manera independiente, sin un sistema de comunicación entre sus controladores. Esta ausencia de integración impide coordinar respuestas ante eventos críticos, lo cual puede generar acumulación de material, sobrecarga o daños mecánicos, tal como se ha documentado en estudios sobre transporte industrial automatizado [2], [4].
2. **Carencia de sensores de nivel en la tolva primaria:** La tolva de alimentación carece de un sistema de monitoreo automático del nivel de material. Esta deficiencia ocasiona interrupciones en el flujo por desbordamientos o vacíos, ya que no se cuenta con una referencia en tiempo real para el control del suministro, una condición considerada crítica en procesos de carga continua [6], [7].
3. **Ausencia de monitoreo centralizado en tiempo real:** Aunque los motores integran sensores térmicos, sus señales no son procesadas ni visualizadas desde un sistema de control central. Esta situación impide una reacción rápida ante condiciones anómalas como sobrecalentamiento o desalineación de bandas, lo cual incrementa el riesgo de fallos operativos graves [5], [8].
4. **Dependencia total del control manual:** Las acciones operativas, como el encendido, parada y diagnóstico de fallos, se realizan de forma manual por parte de los operarios. Esta

dependencia genera respuestas tardías y aumenta la probabilidad de errores humanos, ya que no existen rutinas automatizadas ni alarmas visuales o auditivas que permitan una intervención anticipada [3], [9].

Estas condiciones limitan el desempeño del sistema, aumentan los tiempos de inactividad y reducen la capacidad de respuesta ante situaciones críticas, comprometiendo tanto la eficiencia del proceso como la seguridad operativa.

## 1.2. Grupos de Interés Afectados

Para garantizar una solución efectiva, es crucial identificar los grupos de interés involucrados en la operación y mejora del sistema:

- **Operarios de las bandas transportadoras:** Son los usuarios principales del sistema y quienes experimentan directamente las ineficiencias actuales.
- **Supervisores y jefes de turno:** Encargados de la coordinación operativa y de tomar decisiones ante fallos en el sistema.
- **Equipo de mantenimiento:** Responsable de corregir fallos mecánicos y el desgaste prematuro causado por la falta de sincronización.
- **Departamento de Ingeniería y Automatización:** Interesado en implementar tecnologías que mejoren la eficiencia y reduzcan costos.
- **Administración del puerto y gerencia de operaciones:** Encargados de la planificación estratégica y la inversión en mejoras tecnológicas para aumentar la competitividad del terminal portuario.

## 1.3. Recolección de datos

La recolección de datos para este proyecto se realizó utilizando las primeras fases de la metodología **Design Thinking: Empatizar y Definir**. Este enfoque permitió comprender la problemática del sistema de transporte de carbón en OPP Graneles desde las necesidades y limitaciones de los usuarios y del entorno operativo.

### **Fase 1: Empatizar**

El objetivo de esta fase fue sumergirse en las operaciones actuales del sistema y recopilar información directamente de las personas involucradas, para entender sus perspectivas, retos y necesidades. Las actividades realizadas fueron las siguientes:

**1. Entrevistas con usuarios clave:**

- Se entrevistó a operarios, supervisores y técnicos responsables de las bandas transportadoras para identificar sus principales desafíos.
- Las entrevistas revelaron que la falta de sincronización entre las bandas y la dependencia de controles manuales generan tiempos de inactividad prolongados y riesgos operativos.

**2. Observación en campo:**

- Se llevó a cabo una observación directa de las operaciones diarias en las bandas **PIT PORTABLE FEED HOPPER** y **STACKER**.
- Durante esta observación, se identificaron las carencias en el monitoreo del flujo de material y la ausencia de mecanismos automatizados para detener las bandas en caso de fallos.

**3. Revisión de datos históricos:**

- Se analizaron registros operativos relacionados con el tiempo promedio de inactividad, la frecuencia de fallos y los costos de mantenimiento correctivo.
- Los datos reflejaron que las interrupciones prolongadas en el sistema son una causa recurrente de pérdidas operativas.

El resultado de esta fase fue una comprensión profunda de los problemas reales que enfrentan los usuarios y de las limitaciones técnicas del sistema actual.

**Fase 2: Definir**

A partir de la información recopilada, se organizaron y estructuraron los datos para definir los problemas principales del sistema. Esto permitió establecer una declaración clara del problema que guiaría las siguientes etapas del proyecto.

**1. Identificación de los problemas clave:**

- Falta de comunicación entre las bandas transportadoras, lo que impide una operación sincronizada y eficiente.
- Ausencia de sensores de nivel en las tolvas, lo que genera desbordamientos o interrupciones en el flujo de material.
- Dependencia de controles manuales y ausencia de herramientas de monitoreo en tiempo real, lo que dificulta la identificación y resolución oportuna de fallos.

## 2. Declaración del problema:

Se formuló la siguiente declaración para encapsular los hallazgos: *"El sistema actual de transporte de carbón en OPP Graneles carece de sincronización automatizada entre las bandas transportadoras, monitoreo en tiempo real y sistemas de control efectivos, lo que genera tiempos de inactividad prolongados, aumenta los riesgos operativos y limita la eficiencia general del proceso."*

## 3. Priorización de necesidades:

- Las necesidades identificadas se clasificaron en términos de impacto operativo y viabilidad técnica, destacando la importancia de integrar sensores de nivel, sistemas de comunicación entre bandas y una interfaz HMI para monitoreo en tiempo real.

Estas fases iniciales de **Design Thinking** fueron fundamentales para recopilar datos relevantes, comprender la problemática desde una perspectiva centrada en el usuario y establecer una base sólida para las siguientes etapas del proyecto, enfocadas en la ideación y conceptualización de soluciones.

## 1.4. Requerimientos y restricciones del diseño

### Requerimientos funcionales:

- Sincronización lógica del arranque y parada de las bandas.
- Detección automática de fallas mediante sensores térmicos ya existentes.
- Alerta visual (HMI) del estado del sistema, incluyendo fallos.

- Lectura de nivel de la tolva mediante sensor ultrasónico.
- Posibilidad de reinicio seguro del proceso una vez corregido el fallo.

**Requerimientos no funcionales:**

- El sistema propuesto debe operar en paralelo, sin alterar los PLC Siemens existentes.
- La solución debe ser replicable a futuro en otras bandas.
- La interfaz debe ser visual, intuitiva y compatible con el ambiente operativo portuario.

**Restricciones:**

- Solo se podrá aprovechar el hardware existente (sensores térmicos integrados y motores instalados).
- No se modificará el código ni la arquitectura del PLC Siemens actual.
- El sistema debe cumplir las siguientes normas técnicas:
  - **ISO 5048** – Cálculo y diseño de transportadores de banda.
  - **IEC 62061** – Seguridad funcional de sistemas de control eléctrico.
  - **OSHA 1926.555** – Seguridad en bandas transportadoras.
  - **ISO 13849-1** – Requisitos para seguridad funcional de maquinaria.

## 2. Justificación

La automatización industrial se ha consolidado como una estrategia clave para mejorar la eficiencia, la seguridad y la confiabilidad en procesos mecánicos complejos, especialmente en el manejo de materiales a granel en entornos portuarios. Tecnologías como los controladores lógicos programables (PLC), sensores industriales y sistemas de supervisión HMI permiten reducir la intervención manual, aumentar la trazabilidad operativa y minimizar el riesgo de fallos humanos [1], [2], [3].

En el caso específico de OPP Graneles, el sistema de transporte de carbón coquizable depende de dos bandas transportadoras independientes (PIT y STACKER), que carecen de integración lógica y monitoreo automatizado. Esta situación ha derivado en tiempos de inactividad prolongados, errores por operación manual, y riesgos como el sobrellenado de la tolva, el sobrecalentamiento de motores y la posibilidad de desalineaciones mecánicas no detectadas oportunamente. Según estudios en entornos industriales comparables, la ausencia de sincronización y supervisión centralizada puede incrementar los costos de mantenimiento y los tiempos de parada en más de un 30% [4], [5].

Ante estas limitaciones, se diseñó una propuesta de automatización paralela al sistema existente, sin alterar los PLC Siemens instalados actualmente. La propuesta contempla la incorporación de sensores de nivel para la tolva, uso de los sensores térmicos ya integrados en los motores, y la implementación de un PLC Allen-Bradley conectado a una interfaz gráfica HMI. El objetivo es gestionar el arranque y paro coordinado de las bandas, supervisar condiciones críticas del proceso, activar alarmas ante eventos de riesgo y ofrecer retroalimentación visual en tiempo real, tal como lo recomiendan las mejores prácticas de diseño de sistemas automatizados [6], [7].

Desde la perspectiva de la Ingeniería Mecánica, este proyecto permite aplicar principios de diseño de sistemas mecatrónicos, integrar soluciones de automatización que reducen la carga operativa humana y mejorar la capacidad de diagnóstico y respuesta en procesos críticos de transporte industrial [8].

## 2.1. Justificación técnica y operativa

- **Mejora de la sincronización del sistema:** Un sistema lógico de control permitirá que las bandas respondan de forma coordinada, evitando fallas como sobrecargas o detenciones asimétricas.
- **Monitoreo de condiciones críticas:** Se integrará la lectura de sensores térmicos (ya instalados) y un sensor de nivel en la tolva primaria, garantizando el control continuo del proceso.
- **Reducción del riesgo humano:** La automatización de paradas por fallos disminuye la necesidad de intervención directa del operario, mejorando las condiciones de seguridad.
- **Compatibilidad y escalabilidad:** El diseño no interviene el sistema original, lo que facilita su implementación como módulo externo y replicable.

Desde el enfoque de la **ingeniería mecánica**, este proyecto representa una aplicación práctica de los principios de control, diseño de sistemas mecatrónicos y análisis de procesos industriales. El reto consiste en generar una propuesta técnicamente viable, segura, compatible con la infraestructura existente y alineada con las exigencias normativas del sector portuario.

## 2.2. Justificación normativa

La automatización propuesta deberá cumplir con estándares internacionales que garantizan la seguridad funcional, el diseño estructural de sistemas transportadores, y la operación segura en entornos industriales. A continuación, se resumen las principales normas aplicables al proyecto, y su impacto específico en el diseño:

**Tabla 1.** Normativa aplicable para el proyecto junto con su impacto.

| Norma         | Contenido relevante   | Implicación en el diseño  |
|---------------|---|---|
| ISO 5048      | Cálculo de potencias requeridas y condiciones de carga en transportadores de banda  | Condiciona el diseño del sistema a cargas admisibles por los motores existentes. El control debe adaptarse a su capacidad y velocidad.  |
| IEC 62061     | Seguridad funcional de sistemas de control eléctricos relacionados con la seguridad | Exige que los sistemas de control ante fallos (por ejemplo, paradas por sobrecalentamiento) sean verificados y diseñados con redundancia lógica y claridad en los modos de falla. |
| OSHA 1926.555 | Seguridad en bandas transportadoras en entornos laborales                           | Requiere la implementación de paradas de emergencia visibles, accesibles, y la desconexión automática del sistema ante condiciones de riesgo.                                     |
| ISO 13849-1   | Requisitos funcionales de seguridad de sistemas de control en maquinaria            | Obliga a evaluar el Performance Level (PL) de cada acción automatizada. Afecta la lógica de monitoreo continuo, alarmas visuales y validación del reinicio tras un fallo.         |

El cumplimiento de estas normas no solo es un requisito de seguridad y confiabilidad, sino que también representa una ventaja competitiva para la empresa, al permitir que su operación se alinee con estándares internacionales, facilitando auditorías, certificaciones y posibles expansiones tecnológicas futuras.

### 2.3. Aporte a la ingeniería mecánica

Este trabajo se enmarca en el campo de acción de la **ingeniería mecánica aplicada al control y automatización de sistemas de transporte**, permitiendo al estudiante integrar conocimientos en dinámica de sistemas, sensores, controladores, normativas industriales y diseño de sistemas integrados. La solución propuesta no es un sistema genérico, sino un modelo adaptado a un

entorno industrial real, con componentes existentes, limitaciones técnicas y requisitos normativos concretos, lo que fortalece su valor como propuesta académica y profesional.

## 3. Objetivos

### 3.1. Objetivo general

**Proponer un diseño de automatización para el sistema de transporte de carbón de OPP Graneles,** que funcione en paralelo al sistema actual y que permita sincronizar la operación de las bandas, monitorear condiciones críticas del proceso en tiempo real y responder automáticamente ante fallos operativos, cumpliendo con los requerimientos funcionales y normativos establecidos para garantizar una operación eficiente y segura.

### 3.2 Objetivos específicos

- **Analizar** el funcionamiento actual del sistema de transporte, identificando fallas operativas, condiciones de riesgo y oportunidades de mejora técnica desde un enfoque de ingeniería mecánica.
- **Diseñar** un esquema funcional del sistema automatizado, definiendo las entradas, salidas, sensores, actuadores, y dispositivos de comunicación necesarios para el control sincronizado de las bandas transportadoras.
- **Simular** el comportamiento del sistema propuesto mediante herramientas digitales, validando su lógica funcional y visualización HMI ante condiciones normales y fallos predefinidos.

## 4. Marco teórico

El presente capítulo establece los fundamentos conceptuales, técnicos y normativos que sustentan el diseño de una solución de automatización en sistemas portuarios de transporte de materiales a granel. Se abordan los principios básicos de la automatización, la función de los sensores y actuadores en sistemas mecánicos, los fundamentos de los PLC y HMI, y las normas internacionales aplicables a este tipo de instalaciones.

### 4.1. Fundamentos de automatización industrial

La automatización industrial comprende el uso de tecnologías electrónicas y sistemas de control para operar máquinas y procesos sin intervención humana directa. Este campo se fundamenta en la integración de **sensores, controladores y actuadores**, conectados mediante una lógica programada, con el objetivo de incrementar la eficiencia, seguridad y confiabilidad en procesos industriales [4].

En sistemas de transporte de materiales, como las bandas transportadoras utilizadas en terminales portuarios, la automatización permite controlar el flujo de carga, prevenir sobrecargas, sincronizar operaciones y mejorar la respuesta ante fallos, todo ello mediante la supervisión automática de variables clave del proceso [6].

### 4.2. Controladores lógicos programables (PLC)

Un **PLC (Programmable Logic Controller)** es un dispositivo electrónico diseñado para controlar procesos mediante instrucciones lógicas y señales de entrada/salida. Los PLC son ampliamente utilizados por su fiabilidad, facilidad de mantenimiento y adaptabilidad en entornos industriales exigentes [4].

En el contexto del presente proyecto, el uso de un **PLC Allen-Bradley programado con RSLogix500** permite gestionar las condiciones de arranque, paro, fallo y reinicio del sistema de transporte, así como monitorear variables críticas como el estado de motores o nivel de tolvas.

### 4.3. Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

La **HMI (Human-Machine Interface)** es el punto de interacción entre el operario y el sistema automatizado. A través de la HMI se visualiza información clave, se emiten alarmas, se registran fallos y se proporciona retroalimentación del sistema en tiempo real [9].

El diseño de la HMI debe ser intuitivo y responder a criterios de seguridad industrial, mostrando claramente los estados operativos, fallas activas, y permitiendo la validación segura del proceso antes de reiniciarlo.

### 4.4. Sensores industriales aplicados

El sistema automatizado propuesto contempla la integración de sensores de distintas tipologías, entre ellos:

- **Sensores térmicos integrados** en los motores, utilizados para detectar sobrecalentamientos y prevenir daños [6].
- **Sensores de nivel ultrasónicos**, que permiten medir el contenido en tolvas sin contacto físico con el material [8].
- **Sensores de desalineación**, que actúan como dispositivos de protección ante desplazamientos anómalos de las bandas transportadoras [6].

Estos sensores permiten crear condiciones de transición lógicas dentro del programa del PLC, y son fundamentales para garantizar una operación continua y segura.

### 4.5. Diagramas GRAFCET

El **GRAFCET (Grphe Fonctionnel de Commande Étape/Transition)** es una herramienta gráfica utilizada para representar el comportamiento secuencial de sistemas automatizados. Cada etapa del proceso

se asocia a una acción, y el paso de una etapa a otra está condicionado por eventos específicos (entradas, sensores, temporizadores, etc.) [4].

En este proyecto, el GRAFCET se emplea para definir la lógica del sistema en distintos escenarios: operación normal, sobrecalentamiento, desalineación y reinicio tras fallas. Su uso facilita la implementación lógica en lenguaje de escalera (ladder) dentro del software RSLogix500.

## 4.6. Normativas aplicables

Durante el desarrollo de la propuesta de automatización para el sistema de transporte de carbón en OPP Graneles, se tuvo en cuenta el cumplimiento de diversas normativas técnicas reconocidas internacionalmente, con el fin de garantizar criterios de seguridad, confiabilidad y compatibilidad en el diseño. A continuación, se describen las normas utilizadas y su aplicación específica en el diseño simulado:

- **ISO 5048 – Cálculo de transportadores de banda:**

Esta norma fue considerada para la validación de las condiciones de operación de las bandas transportadoras, especialmente en lo referente a cargas de trabajo, capacidad de transporte, y fuerzas actuantes. Si bien no se modificó físicamente el sistema mecánico, los parámetros definidos en la propuesta respetan las recomendaciones de diseño establecidas por esta norma para asegurar que el control planteado no supere las condiciones nominales de operación.

- **IEC 62061 – Seguridad funcional de sistemas eléctricos de control relacionados con la seguridad:**

Se aplicaron los lineamientos de esta norma para el diseño lógico de paradas de emergencia y la evaluación de fallos críticos. Particularmente, se definió un protocolo de detención automática mediante sensores térmicos y desalineamiento, con lógica programada para garantizar que la respuesta ante fallos preserve la integridad de los equipos y minimice riesgos para el personal, alineándose con los requerimientos de integridad funcional establecidos en IEC 62061.

- **OSHA 1926.555 – Normativa de seguridad para transportadores mecánicos:**

Esta regulación fue considerada al definir el entorno de operación del sistema y la lógica de control para la activación de alarmas en el HMI. Se contempló el diseño de paradas de emergencia

accesibles desde diferentes puntos del sistema, así como la señalización clara en el entorno simulado, como lo exige la norma para ambientes industriales que operan con sistemas de bandas transportadoras.

- **ISO 13849-1 – Seguridad de máquinas. Partes de sistemas de control relativas a la seguridad:**

La selección de componentes para el diseño, como sensores y PLC, se realizó teniendo en cuenta la categoría de seguridad funcional requerida. Se planteó una arquitectura que garantiza redundancia lógica en los eventos de parada y validación del restablecimiento del sistema por el operario, siguiendo los principios de diseño de seguridad establecidos por esta norma.

En conjunto, estas normas permitieron estructurar una propuesta técnica que no solo responde a las necesidades operativas del sistema actual, sino que también cumple con requisitos fundamentales de seguridad y diseño responsable, aún dentro de un entorno simulado.

## 5. Estado del arte

En el ámbito del transporte portuario, la automatización de sistemas de manejo de materiales a granel se ha convertido en una práctica común para mejorar la eficiencia, reducir los tiempos de inactividad y aumentar la seguridad operativa. Los avances en sensores, actuadores y sistemas de control han permitido el desarrollo de tecnologías especializadas que optimizan la manipulación de materiales como el carbón, minerales y granos en entornos portuarios complejos [5].

### **Tecnologías Aplicadas en Sistemas Portuarios:**

- **Sensores y dispositivos de monitoreo:**

Los sensores de nivel son herramientas clave para monitorear el flujo de materiales en las tolvas y garantizar una alimentación constante a las bandas transportadoras. Sensores ultrasónicos y capacitivos se utilizan ampliamente debido a su capacidad para medir con precisión niveles de materiales sólidos en entornos polvorientos y con alta vibración [6]. Además, los sensores térmicos

desempeñan un rol fundamental en la protección de motores eléctricos utilizados en bandas transportadoras, ya que permiten detectar incrementos anómalos de temperatura y prevenir daños críticos en los sistemas de accionamiento [3].

- **Actuadores y control de motores:**

En los sistemas portuarios, los motores eléctricos con variadores de frecuencia (VFD) han demostrado ser eficaces para regular la velocidad de las bandas transportadoras y adaptarse a las variaciones en la carga de material. Este control preciso no solo mejora la eficiencia energética, sino que también reduce el desgaste mecánico y optimiza el flujo de material [7].

- **Sistemas de comunicación y control:**

La implementación de redes de comunicación basadas en protocolos industriales como PROFINET o MODBUS permite la integración de sensores y actuadores en un sistema centralizado. Esto facilita la sincronización entre equipos y garantiza una respuesta coordinada ante fallos, lo cual es esencial en aplicaciones portuarias donde el tiempo es un factor crítico [9].

- **Monitoreo en tiempo real con HMI:**

Las interfaces hombre-máquina (HMI) se utilizan para supervisar el estado de los sistemas portuarios en tiempo real. Estas plataformas proporcionan información visual detallada sobre el flujo de materiales, la temperatura de los motores y las alertas de fallos, lo que permite a los operarios tomar decisiones rápidas y reducir los tiempos de inactividad [8].

## 5.1. Casos de éxito en la Industria Portuaria

Empresas líderes como **Rio Tinto** y **Vale** han implementado sistemas automatizados de transporte en sus terminales portuarias. Estas soluciones incluyen sensores avanzados de nivel, sistemas de control centralizados y plataformas HMI para optimizar el manejo de materiales a granel. En ambos casos, la automatización ha permitido reducir entre un 25 % y 30 % los tiempos de inactividad, además de mejorar la seguridad operativa al minimizar la intervención manual [4], [9].

Adicionalmente, el **Puerto de Bristol** desarrolló un sistema automatizado para su terminal de manejo de materiales a granel, integrando tecnologías de control distribuido y comunicación industrial. Este sistema

permitió centralizar el control de operaciones, gestionar eficientemente las actividades de carga y descarga, así como el almacenamiento en patios. Entre los logros destacados se incluyen la mejora en la precisión de los registros de carga y un incremento significativo en la seguridad operativa, reduciendo los incidentes relacionados con la intervención manual [18].

Por otro lado, terminales internacionales en países como **México** y **Japón** han implementado sistemas de descarga automatizada que utilizan sensores láser y tecnologías de radar para detectar la posición de las cargas y ajustar automáticamente los mecanismos de descarga. Estos sistemas permiten un manejo más preciso y seguro del material, optimizando el flujo operativo y reduciendo significativamente los tiempos de inactividad [19].

El diseño propuesto para **OPP Graneles** busca incorporar estas tecnologías comprobadas, adaptándolas a las condiciones específicas del transporte de carbón coquizable, con un enfoque en mejorar la sincronización entre bandas y proporcionar un monitoreo eficiente en tiempo real.

## 6. Resultados del diseño de automatización

Con base en el análisis funcional del sistema actual y la identificación de las principales limitaciones operativas, se desarrolló una propuesta de diseño para un sistema automatizado en paralelo. Esta propuesta buscó mejorar la capacidad de respuesta ante fallos, reducir la dependencia del control manual y proporcionar herramientas de supervisión técnica más robustas. El desarrollo se realizó en entorno simulado, empleando herramientas de modelado y programación para representar fielmente el comportamiento del sistema.

La solución planteada se basó en una arquitectura complementaria que no interfiere con el PLC Siemens original, lo cual permite mantener la integridad del sistema existente. El diseño conceptual contempló la incorporación de un segundo controlador lógico programable (PLC Allen-Bradley), la integración de un sensor de nivel ultrasónico en la tolva primaria, el aprovechamiento de los sensores térmicos ya integrados en los motores, y el diseño de una interfaz HMI única para supervisión y visualización del proceso.

El sistema propuesto se diseñó con los siguientes propósitos:

- Mejorar la sincronización lógica entre las bandas PIT y STACKER mediante control automático.
- Visualizar en tiempo real las condiciones operativas del sistema a través de una interfaz gráfica.
- Automatizar la respuesta ante condiciones de falla térmica o mecánica, utilizando sensores existentes.

Este enfoque permitió modelar un sistema autónomo de monitoreo y control que supervisa el comportamiento de las bandas sin modificar el esquema de automatización original, lo cual representa una solución viable para procesos donde no es posible intervenir directamente los sistemas en operación.

## 6.1. Requerimientos de diseño

Con base en el análisis del sistema y las normativas aplicables, se definen los siguientes requerimientos que el sistema propuesto debe cumplir:

### Requerimientos funcionales:

- Automatizar la detención de ambas bandas en condiciones críticas.
- Sincronizar el arranque y parada de las bandas.
- Visualizar en tiempo real el estado de la tolva, motores y alarmas.
- Detectar fallas por sobrecalentamiento o desalineación.
- Confirmar el restablecimiento del sistema antes de reiniciar operaciones.

### Requerimientos no funcionales:

- Operar en paralelo al sistema existente (sin modificar el PLC Siemens actual).
- Ser compatible con los sensores térmicos integrados y condiciones del entorno portuario.
- Seguir estándares normativos (ISO 5048, IEC 62061, ISO 13849-1, OSHA 1926.555).
- Ser implementable a través de simulación para su validación.

## 6.2. GRAFCET del sistema

Se desarrollaron cinco GRAFCET para representar los distintos modos de funcionamiento del sistema automatizado, incluyendo la operación normal, la gestión de fallos por sobrecalentamiento o desalineación, y el proceso de reinicio controlado tras la corrección de errores.

Los diagramas detallados pueden consultarse en el **Anexo C (GRAFCETs.pdf)**.

### 6.2.1. GRAFCET del proceso manual (estado actual)

A continuación, se presenta la secuencia actual del proceso operativo sin automatización, donde cada paso depende de la intervención directa del operario:

**Tabla 2.** Secuencia actual del proceso sin automatización.

| <b>Etapas</b> | <b>Acción</b>                | <b>Condición de transición</b> |
|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| E0            | Sistema en espera            | Start manual por operario      |
| E1            | Encendido PIT                | Manual                         |
| E2            | Encendido STACKER            | Manual                         |
| E3            | Alimentación de tolva        | Visual por operador            |
| E4            | Proceso de carga en buque    | Manual                         |
| E5            | Detención por fallo (manual) | Falla observada por operador   |

### 6.2.2. GRAFCET del proceso automatizado (estado propuesto)

**Tabla 3.** Secuencia del proceso automatizado.

| <b>Etapas</b> | <b>Acción</b>                       | <b>Condición de transición</b>               |
|---------------|-------------------------------------|--|
| E0            | Sistema en espera                   | Pulsador Start                               |
| E1            | Verifica conexión entre PLCs        | Establecida la comunicación                  |
| E2            | Verifica nivel de tolva             | Sensor de nivel detecta material             |
| E3            | Arranque sincronizado PIT y STACKER | Confirmación de nivel positivo               |
| E4            | Monitoreo de sensores térmicos      | Proceso activo                               |
| E5            | Falla por sobrecalentamiento        | Sensor térmico activo → parar ambos          |
| E6            | Falla por desalineación PIT         | PIT para / STACKER evacúa → luego se detiene |
| E7            | Confirmación de corrección de fallo | Reset manual desde HMI                       |
| E8            | Reinicio seguro                     | Condición de arranque restablecida           |

### 6.2.3. Lógica de control y programación Ladder

La lógica de control fue implementada en lenguaje Ladder en RSLogix 500. El código incluye:

- Encendido sincronizado de las bandas
- Verificación del nivel de la tolva antes de arrancar
- Activación automática de alarmas ante fallas
- Secuencia lógica para reiniciar el sistema tras una falla

*El código completo, junto con capturas de pantalla de la programación, puede consultarse en el **Anexo A (LADDER & HMI.pdf)**.*

### 6.3. Selección de componentes para la propuesta

La siguiente tabla resume los componentes tentativos seleccionados para la automatización propuesta:

**Tabla 4.** Listado de componentes.

| Componente                                  | Función del sistema             | Proveedor          | Costo estimado | Justificación técnica                                  |
|---|---------------------------------|--------------------|----------------|--|
| Sensor de nivel ultrasónico (SITRANS LU150) | Detección de nivel en tolva     | Siemens            | USD 220        | Precisión sin contacto, ideal para materiales a granel |
| PLC MicroLogix 1400                         | Lógica de control, comunicación | Rockwell           | USD 480        | Compatible con RSLogix 500, I/O suficientes            |
| Pantalla HMI PanelView 800                  | Visualización y control         | Allen-Bradley      | USD 350        | Interfaz amigable, compatible con PLC seleccionado     |
| Módulo de comunicación Ethernet/IP          | Comunicación entre PLCs         | Rockwell           | USD 150        | Integración entre controladores                        |
| Relé para paro de emergencia programable    | Desactivación de bandas         | Schneider Electric | USD 90         | Permite activar paros desde la lógica del PLC          |

## 6.4. Valoración comparativa (matriz cualitativa)

Para validar la selección de los principales dispositivos, se aplicó una matriz de valoración cualitativa considerando criterios como: compatibilidad, costo, facilidad de implementación, durabilidad y disponibilidad.

**Tabla 5.** Validación y evaluación de componentes.

| Componente                 | Compatibilidad (0-5) | Costo (0-5) | Implementación (0-5) | Total |
|----------------------------|----------------------|-------------|----------------------|-------|
| PLC MicroLogix 1400        | 5                    | 3           | 5                    | 13    |
| PLC Siemens S7-1200        | 2                    | 2           | 2                    | 6     |
| Sensor ultrasónico SITRANS | 5                    | 4           | 4                    | 13    |
| Sensor de nivel capacitivo | 2                    | 5           | 2                    | 9     |

Con base en la evaluación, se seleccionaron las opciones de mayor puntaje técnico y compatibilidad.

## 6.5. Ubicación de intervención

La intervención del sistema se realiza **en paralelo al proceso existente**, sin modificar su lógica original.

Las acciones automatizadas actuarán sobre:

- **Lectura del sensor de nivel en la tolva primaria**
- **Detección de fallos por sensores térmicos en motores**
- **Comando de arranque y parada sincronizada entre PIT y STACKER**
- **Visualización del sistema mediante HMI**

Todas las señales y controladores serán integrados a través de un nuevo PLC, sin alterar el PLC Siemens original. El diseño permite una futura implementación física con intervención mínima.

El diseño del sistema a su vez fue representado gráficamente mediante un plano de tuberías e instrumentación (P&ID), elaborado con simbología técnica estandarizada. Este documento incluye:

- Disposición de los sensores y actuadores
- Interconexión entre los dos PLC
- Interfaz HMI
- Rutas de señal entre elementos clave del sistema

*El plano completo puede consultarse en el **Anexo B (P&ID.pdf)**.*

## 7. Metodología

Para asegurar la coherencia entre los objetivos y la metodología utilizada en este trabajo, se han definido actividades alineadas con cada objetivo específico. La siguiente tabla muestra la relación entre cada fase metodológica y su vinculación con los objetivos planteados:

| <b>Objetivo específico</b>                    | <b>Actividad metodológica</b>              | <b>Descripción</b>   |
|---|--|--|
| Analizar el funcionamiento actual del sistema | Recolección de datos en campo              | Observación directa de la operación de las bandas transportadoras, recopilación de datos técnicos y entrevistas con operarios. |
|   | Evaluación de desempeño del sistema actual | Análisis de tiempos de inactividad, fallos recurrentes y eficiencia de transporte.   |
| Diseñar el esquema funcional del sistema      | Modelado del sistema automatizado          | Elaboración de diagramas funcionales del sistema, incluyendo sensores y componentes mecánicos.                                 |
|   | Selección preliminar de componentes        | Identificación de sensores, actuadores y sistemas de control adecuados.  |
| Evaluar la factibilidad técnica del diseño    | Simulación del sistema                     | Validación del diseño mediante herramientas de simulación, análisis de viabilidad técnica.                                     |
|   | Análisis de compatibilidad con normativas  | Verificación del cumplimiento de estándares como ISO 5048, IEC 62061, OSHA 1926.555.   |

## 8. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió plantear una propuesta de diseño para la automatización del sistema de transporte de carbón en la terminal portuaria OPP Graneles, con base en el análisis técnico de su estado actual. Se identificaron y documentaron fallos relacionados con la ausencia de sincronización entre bandas, la falta de sensores de nivel en la tolva primaria y la inexistencia de un sistema de monitoreo centralizado. A partir de estos hallazgos, se diseñó una solución que contempla la incorporación de sensores estratégicos, lógica de control programada en lenguaje Ladder y una interfaz HMI para visualización del proceso en tiempo real, sin intervenir la infraestructura existente.

Los objetivos planteados fueron abordados de manera estructurada a través de la definición de requerimientos funcionales, la selección de componentes compatibles, y la validación del diseño mediante diagramas GRAFCET y simulaciones en software especializado. Si bien no se realizó una implementación física, la simulación permitió establecer el funcionamiento secuencial del sistema ante distintos escenarios operativos, como el arranque sincronizado, el monitoreo de tolva y la gestión de fallas.

Durante el diseño surgieron limitaciones asociadas a la disponibilidad de información técnica completa sobre algunos componentes y a la necesidad de compatibilidad con los PLC Siemens existentes, que no podían ser modificados. Estos desafíos fueron resueltos mediante la configuración de un sistema de control paralelo y la definición de variables internas que permitirían una futura integración sin alteración del sistema operativo.

El proyecto representa un aporte concreto desde la ingeniería mecánica, al aplicar principios de automatización industrial, diseño de sistemas de control y análisis funcional, enfocados en la mejora de un proceso logístico de alto impacto operativo. La documentación técnica generada ofrece una base sólida para una futura fase de implementación y demuestra la aplicabilidad del conocimiento mecánico en la mejora de procesos industriales mediante soluciones de control inteligentes.

## 9. Cronograma

| Fase   | Actividad  | Duración  | Fecha de Inicio | Fecha de Finalización |
|--|--|-----------|-----------------|-----------------------|
| <b>Análisis del sistema actual</b>               | Recopilación de datos y observación en campo   | 1 semana  | 24 de enero     | 30 de enero           |
|  | Evaluación de desempeño del sistema actual   | 1 semana  | 31 de enero     | 6 de febrero          |
| <b>Diseño del sistema</b>                        | Elaboración del esquema funcional  | 2 semanas | 7 de febrero    | 20 de febrero         |
|  | Selección de sensores y dispositivos de control                                      | 2 semanas | 21 de febrero   | 5 de marzo            |
|  | <b>Selección de componentes y listado de proveedores</b>                             | 2 semanas | 6 de marzo      | 19 de marzo           |
| <b>Prueba de concepto a través de simulación</b> | <b>Desarrollo de los Grafcet (manuales y automáticos)</b>                            | 1 semana  | 20 de marzo     | 26 de marzo           |
| <b>Entrega del 70%</b>                           | <b>Fecha límite del 70% del proyecto</b>   | —         |                 | <b>26 de marzo</b>    |
| <b>Validación y ajustes</b>                      | Validación y ajuste de los grafcet, modelado computacional del sistema en RSLogix500 | 2 semanas | 27 de marzo     | 9 de abril            |
|  | Evaluación del desempeño y validación de resultados                                  | 2 semanas | 10 de abril     | 23 de abril           |
| <b>Finalización del proyecto</b>                 | ajustes finales  | 2 semanas | 24 de abril     | 7 de mayo             |
| <b>Entrega del 100%</b>                          | <b>Fecha límite del 100% del proyecto</b>  | —         |                 | <b>7 de mayo</b>      |

## Bibliografía

- [1] García, P., & Ramírez, A. (2020). *Automatización en el transporte de materiales pesados*. Journal of Industrial Processes, 15(2), 34-40.
- [2] Castillo, P. Rodríguez, y G. Pérez, “Optimización de sistemas de transporte en puertos mediante automatización,” *International Logistics Review*, vol. 22, no. 1, pp. 78-85, 2019.
- [3] W. C. Dunn, *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*, McGraw-Hill, 2018. Bolton, *Programmable Logic Controllers*, 6th ed., Newnes, 2015.
- [4] Bolton, W. (2015). *Programmable logic controllers* (6th ed.). Newnes.
- [5] Lipták, B. G. (2006). *Instrument engineers' handbook: Volume one: Process measurement and analysis* (4th ed.). CRC Press.
- [6] Dunn, W. C. (2018). *Fundamentals of industrial instrumentation and process control*. McGraw-Hill.
- [7] Molnar, L., & Borlea, N. S. (2020). *The application of automation and digital control in industrial conveyor systems*. Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, 14(1), 51-59.
- [8] Siemens. (2020). *SIMATIC HMI: Operator panel basics and configuration*. Siemens AG.
- [9] Rao, S. S. (2004). *Mechanical vibrations* (5th ed.). Pearson Education.
- [10] Sinnott, R. K. (2005). *Chemical engineering design: Principles, practice, and economics of plant and process design* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- [11] Considine, D. M., & Considine, G. D. (1999). *Process instruments and controls handbook* (5th ed.). McGraw-Hill.
- [12] Doughty, H. R. (2015). *Industrial automation and control system security: Principles and techniques*. ISA.
- [13] Webb, P. (2019). *Automatic control of atmospheric and space flight vehicles*. Springer.
- [14] Edwards, J. D. (2005). *Industrial control electronics: Devices, systems, and applications* (3rd ed.). Cengage Learning.
- [15] Yates, G. W. (2015). *The design and implementation of industrial control systems*. CRC Press.
- [16] Telestack Ltd. (2023). *Bulk Material Handling Ports & Terminals Case Studies*. Recuperado de [Telestack](#).
- [17] Newton, M.J. (2024). *Control and Management of Bristol Port Company's New Bulk Handling Terminal*. *Bulk Solids Handling Journal*, Vol. 13 (3).
- [18] Port Technology International. (2023). *Research and Development of Automatic Bulk Cargo Equipment*. Recuperado de [Port Technology](#).

- [19] Rockwell Automation. (2024). *Procesadores PLC-5/SLC 500: Fundamentos de RSLogix 500*. Recuperado de [Rockwell Automation](#)
- [20] Rockwell Automation. (2024). *Manual de referencia de RSLogix 5000 y sistemas Logix5000*. Recuperado de Rockwell Automation
- [21] Rockwell Automation. (2024). *Sistemas de control programables Allen-Bradley: PLCs y software RSLogix 500*. Recuperado de [Rockwell Automation](#)

## Anexos

A continuación, se presenta la documentación complementaria que respalda el desarrollo del diseño de automatización propuesto. Cada uno de los documentos fue referenciado a lo largo del informe en los capítulos correspondientes.

### Anexo A – Código de programación Ladder

Este anexo contiene el desarrollo completo de la lógica de automatización en lenguaje Ladder, implementada en el software RSLogix 500. Incluye las rutinas de encendido sincronizado, detección de fallos térmicos y desalineación, así como el sistema de alarmas y reinicio controlado.

- **Referencia en el texto:** Capítulo 6.6 – Lógica de control y programación Ladder
- **Archivo:** *LADDER & HMI.pdf*
- **Fuente:** Rockwell Automation, RSLogix 500 [20]

### Anexo B – Diagrama P&ID del sistema automatizado

Se muestra el plano técnico del sistema propuesto utilizando simbología normalizada para identificar sensores, actuadores, controladores y conexiones del sistema automatizado. Este diagrama es fundamental para la interpretación del flujo de señales y el diseño del cableado.

- **Referencia en el texto:** Capítulo 6.5 – Plano P&ID del sistema propuesto
- **Archivo:** *P&ID.pdf*
- **Fuente:** Elaboración propia con base en normativa ISA S5.1 e ISO 1219.

### Anexo C – Diagramas GRAFCET del sistema

Contiene los diagramas secuenciales GRAFCET del proceso automatizado en distintos escenarios: funcionamiento normal, parada manual, falla térmica y falla por desalineación. Cada uno define las condiciones de transición y acciones del sistema automatizado.

- **Referencia en el texto:** Capítulo 6.4 – GRAFCET de la solución automatizada
- **Archivo:** *GRAFCETs.pdf*
- **Fuente:** Elaboración propia según normas IEC 60848 y metodología aplicada al proyecto.