

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**DISEÑO DE SISTEMA PARA AUTOMATIZAR LA DOSIFICACIÓN DEL LÍQUIDO SUPRESOR DE
POLVO EN CORREAS TRANSPORTADORAS DE APILADOR RADIAL EN CENTRAL
TERMOELÉCTRICA**

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniero de Ejecución en
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:

Eduardo Elían Muñoz Bravo

Profesor Guía:

Martín José García Gutiérrez

Profesor correferente:

Franz Max Yurjevic Perin



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE
MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: DISEÑO DE SISTEMA PARA AUTOMATIZAR LA DOSIFICACIÓN DEL LÍQUIDO SUPRESOR DE POLVO EN CORREAS TRANSPORTADORAS DE APILADOR RADIAL EN CENTRAL TERMOELÉCTRICA

Nombre del candidato(a): Eduardo Elián Muñoz Bravo

Carrera / Grado: Ingeniería de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial

Campus: Sede Viña del Mar Departamento: Electrotecnia e Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Martín García Gutiérrez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

X El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 9/07/2024 Firma: [Firma]

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21/07/2024 Firma: [Firma]

RESUMEN

KEYWORDS: Carbón, PLC, Líquido, Supresor.

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo principal diseñar un sistema de dosificación de líquido supresor de polvo automatizado en las correas de transporte de carbón de una central termoeléctrica. Su finalidad es lograr un mejor confinamiento y aglomeración en las zonas críticas donde se genera polvo. Este diseño está pensado especialmente para ser activo en el control de polvo micrométrico, al capturar el polvo en su origen, se evita su liberación en las correas de transporte y la contaminación de la atmósfera respirable circundante.

En primer lugar, se realiza un estudio de requerimientos de ingeniería, en donde se detallan las necesidades generales del proyecto, las áreas de aplicación del líquido supresor y detalles técnicos del proyecto mismo.

Indicados los requerimientos, se procedió a desarrollar los cálculos de ingeniería referentes a la caída de tensión en el tendido eléctrico del cable de control, los cálculos de pérdidas de carga hidráulica del líquido que transitará en las tuberías para transportar el líquido supresor, además de diseñar un plano isométrico de tuberías en donde se detallan las pérdidas de presión.

Posterior a los cálculos en base a requerimientos, se realiza un estudio de costos en función de los dispositivos utilizados para una posible implementación del proyecto en el futuro.

Por último, se desarrolló una arquitectura de control en donde se detallan las variables contenidas en el proyecto, tanto las entradas como salidas digitales, además de las variables analógicas que serán procesadas por el PLC. Posterior a este reconocimiento, se plantea la lógica de control para el sistema, considerando los elementos utilizados, desde válvulas eléctricas, transmisores de presión, entre otros elementos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	3
1.1.1 Funcionamiento general	3
1.1.2 Contexto operacional y descripción del terreno	5
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	6
1.2.1 Importancia de resolverlo	6
1.2.2 Involucrados	7
1.2.3 Diagrama de Ishikawa	8
1.3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3.1 Requerimientos	10
1.4 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.....	11
1.4.1 Alternativa N°1: Sistema automatizado de rociadores utilizando tres celdas de carga	11
1.4.2 Alternativa N°2: Sistema automatizado de dosificación con agua y Dustreat mediante una celda de carga.....	12
1.4.3 Alternativa N°3: Sistema automatizado de dosificación con agua y sensores de perfil láser	12
1.5 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	13
1.5.1 Alternativa seleccionada	14
1.6 OBJETIVOS.....	15
1.6.1 Objetivo general	15
1.6.2 Objetivos específicos.....	15
CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN.....	16
2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	17
2.1 INGENIERIA CONCEPTUAL DEL SISTEMA	17
2.1.1 Descripción General del Funcionamiento	17
2.1.2 Condiciones Operacionales y Limitaciones	19
2.1.3 Requerimientos del Líquido Supresor	21
2.2 INGENIERÍA DEL SISTEMA DE CONTROL, SOFTWARE Y HARDWARE.....	22
2.2.1 Selección del Controlador (PLC)	22
2.2.2 Software utilizado.....	23
2.2.3 TIA Portal versión 16	23
2.2.4 Instrumentación de campo	24
2.2.5 Definición de DI/DO y AI	29
2.2.6 Arquitectura de Control y Lógica de Funcionamiento:	31
2.3 OPERACIÓN DEL SISTEMA.....	32
2.3.1 Modo Automático.....	32
2.3.2 Modo Manual	34

2.4	INTEGRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO	37
2.4.1	Consideraciones de Mantenimiento y Operabilidad	37
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA		39
3	EVALUACIÓN ECONÓMICA	40
3.1	CARTA GANTT	40
3.2	MANO DE OBRA	41
3.3	COSTO DE MATERIALES.....	42
3.3.1	Costos materiales eléctricos.....	43
3.3.2	Costos materiales mecánicos e hidráulicos.....	44
3.3.3	Costos adicionales.....	45
3.3.4	Costos totales de materiales	45
3.4	COSTOS FINALES DEL PROYECTO.....	46
3.5	CÁLCULO DE AHORROS DEL PROYECTO.....	47
3.5.1	Cálculo de ahorro en recuperación de carbón	47
3.5.2	Cálculo de ahorro en Horas-Hombre	48
3.5.3	Resumen de beneficios económicos anuales.....	49
3.6	FLUJO DE CAJA.....	50
3.7	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	51
CONCLUSIÓN.....		53
BIBLIOGRAFÍA.....		54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema de central térmica.....	4
Figura 1-2. Patio de carbón central termoeléctrica.....	5
Figura 1-3. Diagrama de Ishikawa de la problemática.....	9
Figura 2-1. Resumen de la solución.....	19
Figura 2-2. Puntos de aplicación de supresor.....	20
Figura 2-3. Diagrama P&ID general del sistema automatizado de dosificación.....	26
Figura 2-4. Diagrama P&ID, sección control de bombas del sistema automatizado de dosificación.....	27
Figura 2-5. Diagrama P&ID, sección control de válvulas del sistema automatizado de dosificación.....	28
Figura 2-6. Diagrama de flujo modo automático.....	34
Figura 2-7. Diagrama de flujo modo manual.....	35
Figura 2-8. Puerta gabinete de control sistema de dosificación.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Requerimientos del proyecto.....	10
Tabla 1-2. Tabla de ponderación de calificación.	13
Tabla 1-3. Resultados de las alternativas.....	14
Tabla 2-1. Entradas digitales del sistema.....	29
Tabla 2-2. Salidas digitales del sistema.....	30
Tabla 2-3. Entradas analógicas del sistema.	30
Tabla 2-4. Matriz de activación.....	32
Tabla 3-1. Carta Gantt del proyecto.....	41
Tabla 3-2. Tabla de costos H-H.....	42
Tabla 3-3. Tabla de costos materiales eléctricos.	43
Tabla 3-4. Tabla de costos materiales.....	44
Tabla 3-5. Tabla de costos adicionales.....	45
Tabla 3-6. Tabla resumen costo total de materiales.	45
Tabla 3-7. Tabla costos totales del proyecto.....	46
Tabla 3-8. Cálculo de ahorros de carbón.....	48
Tabla 3-9. Cálculo de ahorros en Horas-Hombre.....	49
Tabla 3-10. Ahorro total anual.....	50
Tabla 3-11. Flujo de caja del proyecto.....	51
Tabla 3-12. Análisis de sensibilidad de carbón	52

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

A. SIGLAS:

PLC	: Programmable Logic Controller.
TIA Portal	: Totally Integrated Automation Porta.
HDPE	: High Density Polyethylene
DI	: Digital Input
DO	: Digital Output
AI	: Analog Input
P&ID	: Piping and Instrumentation Diagram
UF	: Unidad de Fomento
VAN	: Valor Actual Neto
TIR	: Tasa Interna de Retorno
TMAR	: Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento
HMI	: Human Machine Interface
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
LAD	: Ladder Logic
SCL	: Structured Control Language
NC	: Normal cerrado
NA	: Normal abierto
SW	: Switch
CT	: Cinta transportadora
TT	: Torre de transferencia

B. SIMBOLOGÍA

t/h	: Toneladas por hora.
CLP	: Pesos Chilenos.
PSI	: Pound-force per square inch
Bar	: Unidad de medida de presión.
mA	: Miliamperio.
Vcc	: Voltaje de corriente continua.
Vac	: Voltaje de corriente alterna.
°C	: Grados Celsius.
μs	: Microsegundos.
KB	: Kilobytes.
m	: Metros.
cm	: Centímetros.
mm	: Milímetros.

INTRODUCCIÓN

En los procesos industriales de manejo y transporte de carbón a granel, la generación de material particulado en suspensión es una problemática recurrente que afecta la operatividad, el medio ambiente y la seguridad. Durante el traslado del material en las correas transportadoras, las partículas finas se liberan por el viento, la caída libre o la vibración estructural, creando una nube de polvo que reduce la visibilidad, aumenta la contaminación local y expone a los trabajadores a riesgos de salud.

Este polvo de carbón puede permanecer suspendido por largos periodos, dispersándose tanto en el entorno industrial como en el urbano. Dicho fenómeno compromete la seguridad operacional y genera impactos ambientales negativos, tales como la contaminación de suelos y cuerpos de agua, el deterioro progresivo de equipos electromecánicos y el potencial incumplimiento de las normativas vigentes sobre emisiones.

Ante la creciente exigencia de los estándares de higiene y control ambiental, resulta fundamental desarrollar soluciones técnicas para minimizar estas emisiones. Resolver esta problemática permite mejorar la calidad del aire y la seguridad laboral, a la vez que optimiza la eficiencia operativa al reducir las pérdidas de material, contribuyendo así a la sostenibilidad del proceso productivo y al cumplimiento regulatorio.

En este contexto, el presente trabajo de título tiene como propósito diseñar una red de tuberías en la zona de transporte de las correas de una central termoeléctrica. El sistema integrará componentes eléctricos para automatizar el uso de rociadores que aplicarán un líquido supresor, con el fin de reducir significativamente las emisiones de polvo provocadas por el movimiento del carbón.

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se describe una problemática recurrente en la zona de acopio de una central termoeléctrica a carbón. Durante el traslado de este combustible a través de las correas transportadoras de la planta, se genera una alta polución. Este movimiento de material produce contaminación ambiental, reduce la visibilidad en el espacio de trabajo y dificulta las labores de los operadores y contratistas en el lugar. Por consiguiente, se busca implementar una solución robusta a este problema con el fin de reducir la cantidad de material particulado suspendido en el aire.

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

Con el objetivo de facilitar la comprensión del presente trabajo de título y de la problemática que se pretende resolver, resulta imperativo exponer los aspectos generales y el funcionamiento básico de una central termoeléctrica, enfocándose específicamente en el proceso de generación eléctrica a partir del carbón.

1.1.1 Funcionamiento general

El funcionamiento general de una central termoeléctrica de carbón se articula a través de diversas etapas, las cuales se detallan a continuación.

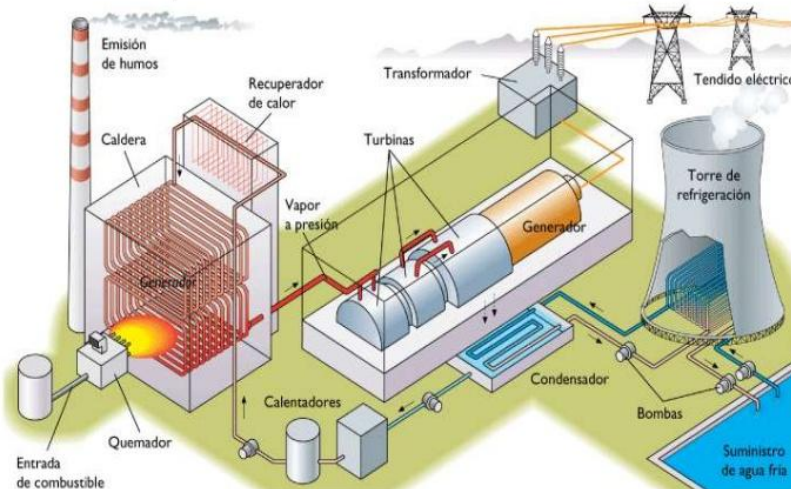
En primera instancia, el combustible ingresa a la planta mediante trenes o camiones para ser almacenado en silos o canchas de acopio. Antes de su utilización, este se somete a procesos de trituración y molienda con el fin de reducir su tamaño hasta obtener un polvo fino o carbón pulverizado; esta condición incrementa la superficie de contacto para la combustión y optimiza la eficiencia térmica.

Posteriormente, en la etapa de combustión, el carbón pulverizado es inyectado en una caldera junto con aire precalentado. En la cámara de combustión, el material se incinera a altas temperaturas, típicamente entre 1200 °C y 1500 °C, liberando energía calórica. Durante este ciclo, el flujo de aire se regula estrictamente para maximizar el rendimiento y mitigar las emisiones contaminantes.

El calor generado por la combustión se transfiere a las tuberías que transportan agua desmineralizada, transformándola en vapor sobrecalentado que alcanza temperaturas de 500 °C a 600 °C y presiones de 150 a 250 bar. Este vapor se acumula en un domo antes de ser dirigido hacia la unidad de turbina.

Tras el sobrecalentamiento, el vapor ingresa a la turbina de alta presión, donde se expande y transfiere energía cinética a los álabes. Este movimiento rotacional se transmite mediante un eje hacia un generador eléctrico que, al girar, produce la energía eléctrica. Finalmente, dicha energía se conduce a un transformador para su posterior distribución a la red eléctrica. Un esquema resumido de este funcionamiento se presenta en la Figura 1-1.

Esquema de central térmica.



Fuente: <https://educando.edu.do/porta/centrales-termicas/>

Figura 1-1. Esquema de central térmica.

1.1.2 Contexto operacional y descripción del terreno

Con el propósito de situar el diseño propuesto en un entorno operacional específico, resulta necesario detallar las características del área de trabajo, dado que las condiciones físicas y estructurales varían entre las distintas centrales termoeléctricas. En este caso particular, el estudio se centra en la cancha de acopio de carbón, cuya disposición general se ilustra en la Figura 1-2. Tal como se observa en la imagen, el flujo del combustible transita inicialmente por la cinta transportadora CT-01 hasta ingresar a la torre de transferencia TT-01. Desde ese punto, el material continúa su recorrido a través de la cinta CT-02 hacia la torre TT-02, para finalmente ser trasladado por la cinta CT-03 hasta el chute de traspaso (ST-01) del apilador radial. Durante esta trayectoria a la intemperie, el carbón queda expuesto a la fricción, a la degradación mecánica en los puntos de caída y a las condiciones climáticas del entorno. La interacción de estos factores facilita la emisión de material particulado fugitivo y la consecuente pérdida de masa del combustible a lo largo del proceso de transporte.



Fuente: Fotografía de Google Earth.

Figura 1-2. Patio de carbón central termoeléctrica.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La problemática central reside en la elevada suspensión de material particulado generado durante el transporte de carbón en las correas transportadoras. Esta dispersión de partículas reduce significativamente la visibilidad de los operadores y del personal que transita por el área, incrementando simultáneamente el riesgo de inhalación de polvo de carbón por parte de los trabajadores expuestos.

1.2.1 Importancia de resolverlo

La elevada suspensión de material particulado, derivada de la manipulación y transporte de carbón en las correas, constituye una problemática de alto impacto operativo y ambiental. La presencia constante de partículas finas reduce significativamente la visibilidad en las zonas de trabajo, lo cual dificulta la ejecución segura de maniobras y genera riesgos que pueden derivar en accidentes laborales o interrupciones en la continuidad operativa.

Desde la perspectiva de la salud ocupacional, la exposición continua a este polvo representa un riesgo de afecciones respiratorias y oculares para el personal, lo que deteriora su bienestar y productividad. Esta condición no solo vulnera la seguridad y el cumplimiento de las normativas laborales vigentes, sino que también conlleva costos asociados a licencias médicas, rotación de personal y pérdida de eficiencia.

En términos ambientales, la propagación de material particulado hacia el entorno degrada la calidad del aire y del suelo, afectando el ecosistema local y la percepción pública sobre la responsabilidad social de la empresa. Las emisiones no controladas pueden, asimismo, derivar en sanciones económicas o requerimientos de fiscalización por parte de las autoridades competentes.

Finalmente, el problema presenta una arista económica directa: la dispersión atmosférica implica una reducción del volumen útil de combustible transportado, lo que se traduce en un aprovechamiento inadecuado de los recursos energéticos. En conjunto, estos factores evidencian la necesidad de abordar con prioridad la mitigación de material particulado, dado su impacto transversal sobre la seguridad, la economía y la sostenibilidad del proceso industrial.

1.2.2 Involucrados

En el desarrollo del presente proyecto participan directamente dos áreas fundamentales de la planta: el Departamento de Combustible y el Departamento de Instrumentación.

El primero desempeña un rol esencial en la supervisión de las operaciones asociadas al manejo, transporte y almacenamiento del carbón. Su responsabilidad radica en garantizar la continuidad y eficiencia del proceso productivo, además de velar por las condiciones operativas de seguridad en las zonas de carga y descarga.

Por su parte, el Departamento de Instrumentación interviene activamente en la definición, instalación y configuración de los dispositivos de medición, control y automatización requeridos. Su gestión asegura la correcta integración de los equipos, la precisión de las señales y el cumplimiento de los estándares técnicos establecidos por la organización. La coordinación entre ambas unidades resulta fundamental para la ejecución del proyecto, ya que permite alinear los requerimientos operacionales con las soluciones técnicas y de control necesarias para lograr un funcionamiento eficiente, seguro y confiable del sistema implementado.

1.2.3 Diagrama de Ishikawa

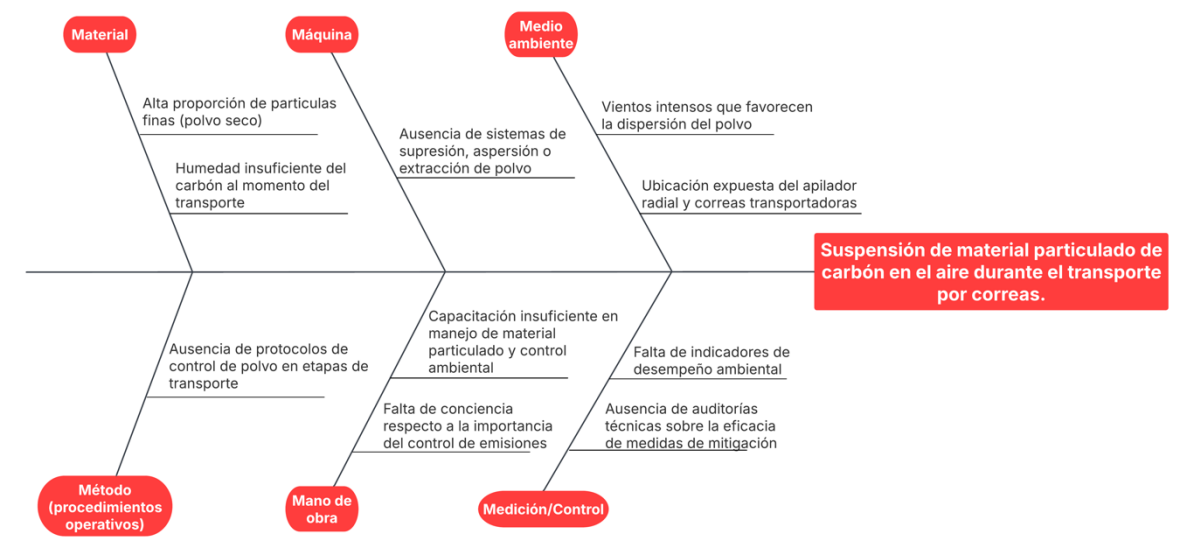
Para comprender a cabalidad las causas raíz que originan la suspensión de material particulado en las áreas de acopio y transporte, se elabora un diagrama de causa-efecto (Ishikawa). Este análisis permite desglosar los factores contribuyentes en categorías principales, facilitando la identificación de las áreas críticas donde el proyecto debe intervenir.

A continuación, se detalla el análisis de las causas agrupadas en el diagrama de la Figura 1-3:

- **Maquinaria:** Se identifica como factor crítico la ausencia de sistemas de supresión activos o de extracción de polvo en las correas. La infraestructura actual carece de tecnologías capaces de mitigar la nube de polvo en el momento de su generación, lo que valida la necesidad de implementar el diseño propuesto en este trabajo.
- **Medio ambiente:** Las condiciones del entorno actúan como un factor amplificador del problema. La ubicación expuesta del apilador radial y la presencia de vientos intensos favorecen la dispersión de las partículas una vez liberadas de la correa, extendiendo la contaminación hacia áreas aledañas.
- **Material:** La naturaleza intrínseca del carbón, específicamente su baja humedad y alta proporción de partículas finas, lo hace altamente volátil y difícil de contener sin un agente humectante externo que aumente su densidad o aglomere las partículas.
- **Medición y control:** Existe una carencia de indicadores de desempeño ambiental en tiempo real. Al no contar con sistemas que monitoreen la polución o la efectividad de las medidas actuales, la gestión operativa se vuelve reactiva en lugar de preventiva.
- **Mano de obra:** El factor humano presenta brechas importantes, destacándose una capacitación insuficiente del personal en el manejo de material particulado.

Asimismo, se detecta una falta de conciencia respecto a la relevancia del control de emisiones para la seguridad y el medio ambiente.

- **Método:** Se observa una falencia en la estandarización operativa, marcada por la ausencia de protocolos de control de polvo definidos para las etapas de transporte. La falta de procedimientos estandarizados impide asegurar una operación uniforme y controlada ante eventos de alta polución.



Fuente: Creación propia en Lucidchart.

Figura 1-3. Diagrama de Ishikawa de la problemática.

Conclusión del análisis: El diagrama de Ishikawa evidencia que, si bien existen factores ambientales y materiales inherentes al proceso que son difícilmente controlables, la causa raíz sobre la cual es posible intervenir técnicamente reside en las categorías de maquinaria y medición. Por consiguiente, la propuesta de diseño de un sistema automatizado de dosificación representa la solución tecnológica adecuada para subsanar estas deficiencias, proporcionando la infraestructura necesaria para abatir el polvo y las herramientas técnicas para el control efectivo del proceso.

1.3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

La solución consiste en proyectar un sistema que permita el confinamiento efectivo de las partículas de carbón en suspensión, con el fin de reducir significativamente su propagación atmosférica y garantizar una mayor visibilidad para el personal operativo.

1.3.1 Requerimientos

Con el propósito de asegurar el éxito técnico y operacional del proyecto, se ha definido una serie de requerimientos que el diseño debe satisfacer según el departamento de combustible de la central termoeléctrica, los cuales se presentan de forma detallada en la Tabla 1-1. Estos se clasifican en tres categorías principales: requerimientos funcionales, relacionados con la capacidad del sistema para ejecutar la dosificación variable; requerimientos técnicos, asociados a la resistencia de los materiales y los estándares de comunicación; y requerimientos de seguridad, orientados a la protección del personal y de los activos físicos de la planta.

Tabla 1-1. Requerimientos del proyecto.

Ítem	Requerimiento	Descripción	Criterio de aceptación
1	Diseño de un nuevo sistema para aplicar un supresor de polvo en las correas de apilador radial durante las descargas de carbón.	Automatizar la dosificación del agente supresor en las correas transportadoras en central termoeléctrica, atacando directamente la emisión de material particulado al ambiente	El diseño debe ajustarse a los criterios y requerimientos únicos del proyecto.
			El diseño debe ajustarse al presupuesto entregado por el mandante.
			El diseño debe proporcionar una disminución significativa en material particulado.
			El diseño debe proporcionar la documentación del proyecto.

Fuente: Creación propia.

1.4 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Con el objetivo de resolver la problemática identificada, se proponen tres alternativas de solución. Estas propuestas deben someterse a un proceso de evaluación basado en las especificaciones del proyecto, integrando criterios técnicos y económicos que permitan determinar la solución óptima para su implementación.

1.4.1 Alternativa N°1: Sistema automatizado de rociadores utilizando tres celdas de carga

Con el fin de resolver la problemática planteada, se propone el diseño de un sistema automatizado capaz de humectar el carbón durante todo su trayecto. El proyecto contempla la instalación de un conjunto de rociadores conectados en paralelo al inicio y término de cada torre de transferencia, de acuerdo con la disposición ilustrada en la Figura 1-2. El sistema aplicará una nebulosa de agua sobre el material para mitigar la dispersión de polvo.

En esta primera alternativa, el accionamiento de los rociadores se gestiona mediante válvulas eléctricas comandadas por un controlador centralizado en un gabinete de control. La dosificación se ejecuta de forma escalonada, vinculada al peso registrado en el transporte del combustible a través de la integración de tres celdas de carga instaladas en cada cinta transportadora. La decisión de ubicar un sensor en cada sección se fundamenta en la necesidad de obtener una mayor exactitud en la medición del flujo másico entrante y saliente del circuito. De esta manera, se optimiza el control del proceso, permitiendo identificar la merma de carbón durante el recorrido y facilitando la elaboración de planes de acción basados en dicha información.

1.4.2 Alternativa N°2: Sistema automatizado de dosificación con agua y Dustreat mediante una celda de carga

La segunda alternativa, de manera análoga a la primera, tiene como objetivo la reducción significativa de la polución generada por el transporte de carbón. Para ello, se plantea el diseño de un sistema automatizado de rociadores dispuestos al inicio y término de cada torre de transferencia dentro del proceso de transporte.

En esta solución, la nebulosa aplicada consiste en una mezcla de agua blanda y un agente supresor especializado denominado Dustreat 9138E, diseñado para el confinamiento de partículas. El sistema es gestionado por un controlador que opera la apertura y cierre de los rociadores mediante válvulas eléctricas. Como mecanismo de detección de carga en las correas, se utiliza una única celda de carga instalada en la cinta transportadora central **CT-02**. Este dispositivo registrará el peso del combustible, permitiendo activar la dosificación de los rociadores de acuerdo con los valores obtenidos y la lógica de control programada en el PLC.

1.4.3 Alternativa N°3: Sistema automatizado de dosificación con agua y sensores de perfil láser

Al igual que las propuestas anteriores, la tercera alternativa plantea el diseño de un sistema automatizado mediante rociadores destinados a la humectación del carbón en los puntos de inicio y término de cada torre de transferencia. No obstante, en esta solución se contempla la implementación de sensores de perfil láser en cada cinta transportadora como método de medición.

Bajo este esquema, el control de carga se realiza mediante la instalación transversal del sensor respecto al material; al integrar esta lectura con la velocidad de la correa, el controlador es capaz de calcular con precisión el flujo volumétrico de los montículos de carbón. Esta configuración representa una solución tecnológica avanzada para el control del

proceso. La información recolectada es procesada por un controlador que gestiona el funcionamiento de los rociadores, cuya dosificación consistirá en una mezcla de agua blanda y el agente supresor Dustreat 9138E.

1.5 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

A continuación, se presenta la metodología de evaluación para determinar la alternativa idónea a implementar en el diseño del sistema de supresión de polvo para las correas transportadoras.

A partir de las soluciones propuestas, se realiza un análisis con base en criterios específicos que permitan determinar su nivel de factibilidad. Cada parámetro es evaluado mediante una escala de calificación de 1 a 3, donde el valor 1 corresponde a un nivel Aceptable, el 2 se considera Bueno y el 3 se define como Óptimo, tal como se ilustra en la Tabla 1-2. La ponderación de estos criterios arroja un puntaje total para cada propuesta, de modo que la alternativa que obtenga la mayor puntuación será la seleccionada para su ejecución en el proyecto.

Tabla 1-2. Tabla de ponderación de calificación.

Tabla de ponderación de alternativas de solución		
Aceptable	Bueno	Óptimo
1	2	3

Fuente: Creación propia.

Para la selección de la alternativa idónea, los criterios de decisión se estructuran en cuatro componentes fundamentales. En primer lugar, se considera el plazo de aplicación, el cual evalúa el tiempo requerido desde la etapa de diseño y planificación hasta la puesta en marcha del sistema. El segundo criterio corresponde a la factibilidad económica, factor determinante que analiza la viabilidad del proyecto en función del capital disponible.

Como tercer punto, se evalúa la factibilidad técnica, considerando la complejidad de la implementación y el nivel de especialización necesario para su desarrollo. Finalmente, se contempla la escalabilidad, referida a la capacidad de la solución para adaptarse a futuros requerimientos y extender su alcance operativo.

En la Tabla 1-3 se presentan los resultados obtenidos tras la evaluación de cada alternativa. Dichas calificaciones, junto con la puntuación ponderada final, permiten determinar de manera objetiva la solución más favorable para la ejecución del proyecto.

Tabla 1-3. Resultados de las alternativas.

Resultado de soluciones							
Ponderación	Característica/Alternativa	Alternativa 1	Ponderado 1	Alternativa 2	Ponderado 2	Alternativa 3	Ponderado 3
30%	Plazo de aplicación	1	0,3	2	0,6	3	0,9
25%	Factibilidad económica	1	0,25	3	0,75	1	0,25
25%	Factibilidad técnica	1	0,25	3	0,75	2	0,5
20%	Escalabilidad	2	0,4	2	0,4	3	0,6
	Puntuación total	5	1,2	2,5	2,5	2,25	2,25

Fuente: Creación propia

1.5.1 Alternativa seleccionada

Tras el análisis cuantitativo detallado en la Tabla 1-3, se determina que la alternativa 2 constituye la solución más idónea para abordar la problemática de la propagación de material particulado en el transporte de carbón. Si bien no representa la opción de mayor innovación tecnológica entre las propuestas, presenta un desempeño superior en términos de factibilidad económica, garantizando una inversión eficiente.

Asimismo, esta alternativa destaca por su alta viabilidad técnica, fundamentada en una complejidad moderada para su instalación y puesta en marcha. Adicionalmente, posee un elevado potencial de escalabilidad hacia diversas áreas de la cancha de acopio y un plazo de ejecución acotado, condicionado al cumplimiento de los procedimientos establecidos en la carta Gantt y las especificaciones del diseño propuesto en este trabajo.

1.6 OBJETIVOS

En esta sección se describe el objetivo general y el objetivo específico orientado al desarrollo del proyecto, con el fin de demostrar la factibilidad técnica y operativa del diseño propuesto.

1.6.1 Objetivo general

Diseñar un sistema automatizado para el proceso de supresión de polvo mediante rociadores que mejore la efectividad operativa.

1.6.2 Objetivos específicos

Con el propósito de dar cumplimiento al objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar las condiciones actuales del terreno y la infraestructura disponible en la planta para la integración del sistema.
- Desarrollar una solución de ingeniería que cumpla con los parámetros de eficiencia de la planta.
- Realizar una evaluación económica para determinar la rentabilidad del proyecto.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

El presente capítulo detalla el proceso mediante el cual se da cumplimiento a los objetivos definidos anteriormente. Se describe, desde una perspectiva de ingeniería, la solución seleccionada y su correspondiente justificación en la etapa de diseño.

2.1 INGENIERIA CONCEPTUAL DEL SISTEMA

El diseño del sistema de abatimiento de polvo se fundamenta en la necesidad de controlar las emisiones de material particulado en la fuente, específicamente en los puntos de transferencia del apilador radial, evitando saturar el carbón con un exceso de humedad que afecte su poder calorífico. Para ello, se establece una estrategia de control por lazo abierto, donde se mide inicialmente el peso del combustible a través de una celda de carga. Con base en este registro, se gestiona la liberación del líquido supresor mediante válvulas ON/OFF, permitiendo que el rociador aplique el fluido sobre el material transportado.

2.1.1 Descripción General del Funcionamiento

El sistema opera bajo una lógica de dosificación variable escalonada. Esta solución automatizada modula la inyección del agente supresor y el agua blanda basándose en la carga real de las correas transportadoras, medida en toneladas por hora (t/h).

El funcionamiento se estructura en los siguientes bloques principales:

- 1. Adquisición de Datos:** El sistema recibe una señal analógica proveniente de la celda de carga de la correa principal (CT-02), la cual indica el flujo másico instantáneo del carbón en un rango de 0 a 1500 t/h. Esta señal es procesada por un Controlador Lógico Programable (PLC). Para este proyecto, se ha definido el uso de una CPU

Siemens S7-1200 (1214C AC/DC/RLY), capaz de procesar señales analógicas de 0-10 V y gestionar las salidas de relé necesarias para la activación de válvulas eléctricas.

2. Lógica de Control Escalonada: El algoritmo de control divide la operación en cuatro rangos de tonelaje. A medida que aumenta la carga de carbón, el PLC activa secuencialmente cuatro puntos de aplicación independientes. Cada punto aporta un 25% del caudal total requerido, logrando así una dosificación precisa según los siguientes parámetros:

- **0 - 200 t/h:** Sistema en *stand-by* (0% dosificación).
- **201 - 500 t/h:** Activación del primer punto (25% del caudal).
- **501 - 800 t/h:** Activación del segundo punto (50% del caudal total).
- **801 - 1100 t/h:** Activación del tercer punto (75% del caudal total).
- **1101 - 1500 t/h:** Activación del cuarto punto (100% del caudal total).

3. Actuación Hidráulica: La ejecución se realiza mediante un sistema de bombeo presurizado. Tras pasar por un mezclador estático para incorporar homogéneamente el agua y el líquido supresor Dustreat en proporciones de 90% y 10% respectivamente, la mezcla se dirige a las boquillas pulverizadoras. Estas se encuentran ubicadas estratégicamente en los chutes de traspaso colindantes a las correas CT-01, CT-02 y CT-03. La activación del flujo se gestiona mediante válvulas ON/OFF comandadas por la lógica de control escalonada.

A modo de resumen del funcionamiento general del sistema, la Figura 2-1 expone de manera gráfica la arquitectura de la solución propuesta. Este diagrama esquematiza las tres etapas fundamentales del proceso: la adquisición de datos mediante la lectura analógica de la celda de carga, el procesamiento de dicha señal a través de la lógica de

control escalonada del PLC S7-1200, y la consiguiente actuación hidráulica que acciona las válvulas eléctricas en función de los rangos de operación previamente definidos.

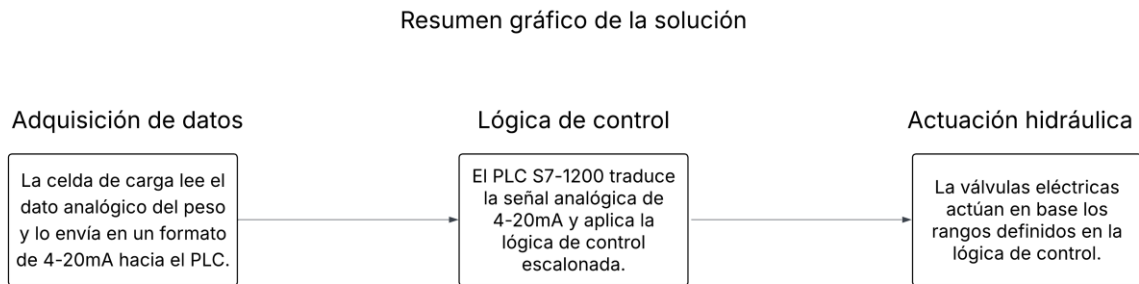


Figura 2-1. Resumen de la solución.

2.1.2 Condiciones Operacionales y Limitaciones

El diseño del sistema está condicionado por la geometría de la estructura del apilador radial y las características del entorno operativo. Las restricciones físicas y operacionales que rigen el dimensionamiento son las siguientes:

- **Geometría de la correa y espacio disponible:** Las mediciones en terreno indican que la correa transportadora posee un ancho útil aproximado de 80 cm. No obstante, la limitante más crítica es la altura disponible bajo la cubierta (cúpula) de la correa, la cual es de 50 cm. Esta restricción es determinante para la selección de las boquillas y el cálculo del ángulo de aspersión, con el fin de garantizar la cobertura total del material sin exceder la altura de montaje permitida.
- **Variabilidad de carga:** El sistema debe responder dinámicamente a variaciones de flujo que fluctúan entre 0 y 1500 t/h. El diseño hidráulico debe asegurar una presión constante, independientemente de la cantidad de líneas de aspersión que se encuentren abiertas simultáneamente.

- **Puntos críticos de emisión:** Se han identificado zonas de alta turbulencia donde el carbón se disgrega, específicamente en los traspasos entre correas y en el sector del tambor de cola de la correa **CT-03**. El sistema focaliza la aplicación en estas áreas para capturar el polvo en su origen, siguiendo los principios de control mediante aglomeración.

Con base en los alcances señalados, se determinan los puntos de aplicación óptimos ilustrados en la Figura 2-2. En dicha imagen se destacan los tramos por donde transita el combustible, situando los puntos de aspersion (representados con iconos azules) en las caídas de material desde las torres de transferencia hacia las cintas transportadoras, zonas donde se genera la mayor polución del área.



Fuente: Creación propia.

Figura 2-2. Puntos de aplicación de supresor.

2.1.3 Requerimientos del Líquido Supresor

El agente químico seleccionado para la supresión es el **Dustreat DC9138E**. Este compuesto actúa mediante la reducción de la tensión superficial del agua, lo que optimiza la humectación de las partículas finas de carbón y fomenta su aglomeración, evitando así su suspensión en la atmósfera.

Las propiedades fisicoquímicas del supresor imponen los siguientes requerimientos técnicos al sistema:

- **Dosificación objetivo:** Se establece una tasa de dosificación de 15 gramos por tonelada de carbón transportado.
- **Densidad y mezcla:** El producto posee una densidad relativa de 1,01 (a 21 °C). El sistema operará con una solución diluida en una proporción de 90% agua y 10% supresor, factor determinante para el cálculo de viscosidad y la selección de las unidades de bombeo.
- **Compatibilidad de materiales:** Debido a que el sistema manipulará una solución química, es imperativo el uso de materiales resistentes a la corrosión en todos los componentes en contacto con el fluido.
 - **Boquillas:** Se seleccionaron boquillas de la serie **Turbo TeeJet** fabricadas en polímero (VP), las cuales ofrecen una excelente resistencia a soluciones corrosivas y una durabilidad superior. Su diseño de inducción de aire genera gotas de mayor tamaño diseñadas para reducir la deriva, optimizando la llegada del producto al carbón y minimizando las pérdidas por efectos del viento.
 - **Tuberías:** Se utilizará Polietileno de Alta Densidad (**HDPE**) para todas las líneas de transporte de fluido, garantizando la resistencia química y mecánica necesaria para la operación.

2.2 INGENIERÍA DEL SISTEMA DE CONTROL, SOFTWARE Y HARDWARE

El sistema de control constituye el núcleo inteligente del proyecto, encargado de orquestar la activación de los elementos hidráulicos en función de las lecturas de la celda de carga ubicada en la correa CT-02. El diseño se orienta hacia una arquitectura centralizada, robusta y escalable, priorizando la seguridad operativa y la facilidad de mantenimiento.

Con el objetivo de detallar los componentes del sistema, a continuación, se describen los elementos seleccionados para el diseño.

2.2.1 Selección del Controlador (PLC)

Para la unidad central de procesamiento, se selecciona un Controlador Lógico Programable (PLC) de la serie SIMATIC S7-1200 de Siemens, específicamente la CPU 1214C AC/DC/RLY. Este elemento es el encargado de gestionar los procesos mediante el procesamiento de señales de campo y el accionamiento de los elementos finales de control.

La justificación técnica de su selección se detalla a continuación:

- **Capacidad de DI/DO:** La CPU dispone de 14 entradas digitales (24 V DC) y 10 salidas digitales a relé. Para cubrir la demanda total de señales del proyecto, se complementa esta capacidad mediante el uso de un módulo de expansión de entradas y salidas digitales.
- **Capacidad de AI:** El modelo incluye dos entradas analógicas integradas de 0-10 V. Esta característica es fundamental para recibir la señal directa de la celda de carga (tonelaje) y la lectura del transmisor de presión.

- **Salidas a relé:** Las salidas tipo relé, con una capacidad de conmutación de 2 A, permiten accionar directamente las válvulas eléctricas y contactores de las bombas, simplificando el cableado del tablero de control.
- **Comunicación:** Dispone de una interfaz PROFINET integrada, lo que facilita la programación, el monitoreo remoto y la futura integración a sistemas SCADA o HMI de la planta.
- **Memoria y velocidad:** Con 100 KB de memoria de trabajo y un tiempo de ejecución de 0,08 μ s por operación de bits, el controlador supera los requerimientos de velocidad necesarios para la lógica de comparación de rangos propuesta.

2.2.2 Software utilizado

En este apartado se describen las herramientas de software empleadas en el desarrollo de la solución, abarcando desde la programación del controlador y la gestión de bases de datos, hasta las aplicaciones complementarias utilizadas para la ejecución del presente trabajo de título.

2.2.3 TIA Portal versión 16

Para el desarrollo del sistema de automatización, se empleó el entorno TIA Portal en su versión 16, desarrollado por Siemens. Esta plataforma de ingeniería integral centraliza la programación, configuración y diagnóstico de sistemas de control industrial, permitiendo unificar bajo una misma interfaz la gestión de Controladores Lógicos Programables (PLC), interfaces hombre-máquina (HMI), accionamientos y topologías de red.

En el contexto de este proyecto, TIA Portal V16 utiliza para la programación de la lógica de control del sistema de supresión de polvo y la configuración de hardware del controlador. Mediante esta herramienta, se estructuraron los algoritmos encargados de

procesar las señales de los sensores ubicados en las correas transportadoras y de comandar el accionamiento de los rociadores, además de parametrizar las variables de instrumentación de campo.

La relevancia de este software en el diseño radica en la versatilidad operativa de los controladores Siemens y la robustez de su entorno de programación. Estos factores facilitan el desarrollo de una solución idónea para el proyecto, destacando la implementación de la lógica mediante lenguaje de contactos o escalera (**LAD**) y texto estructurado (**SCL**).

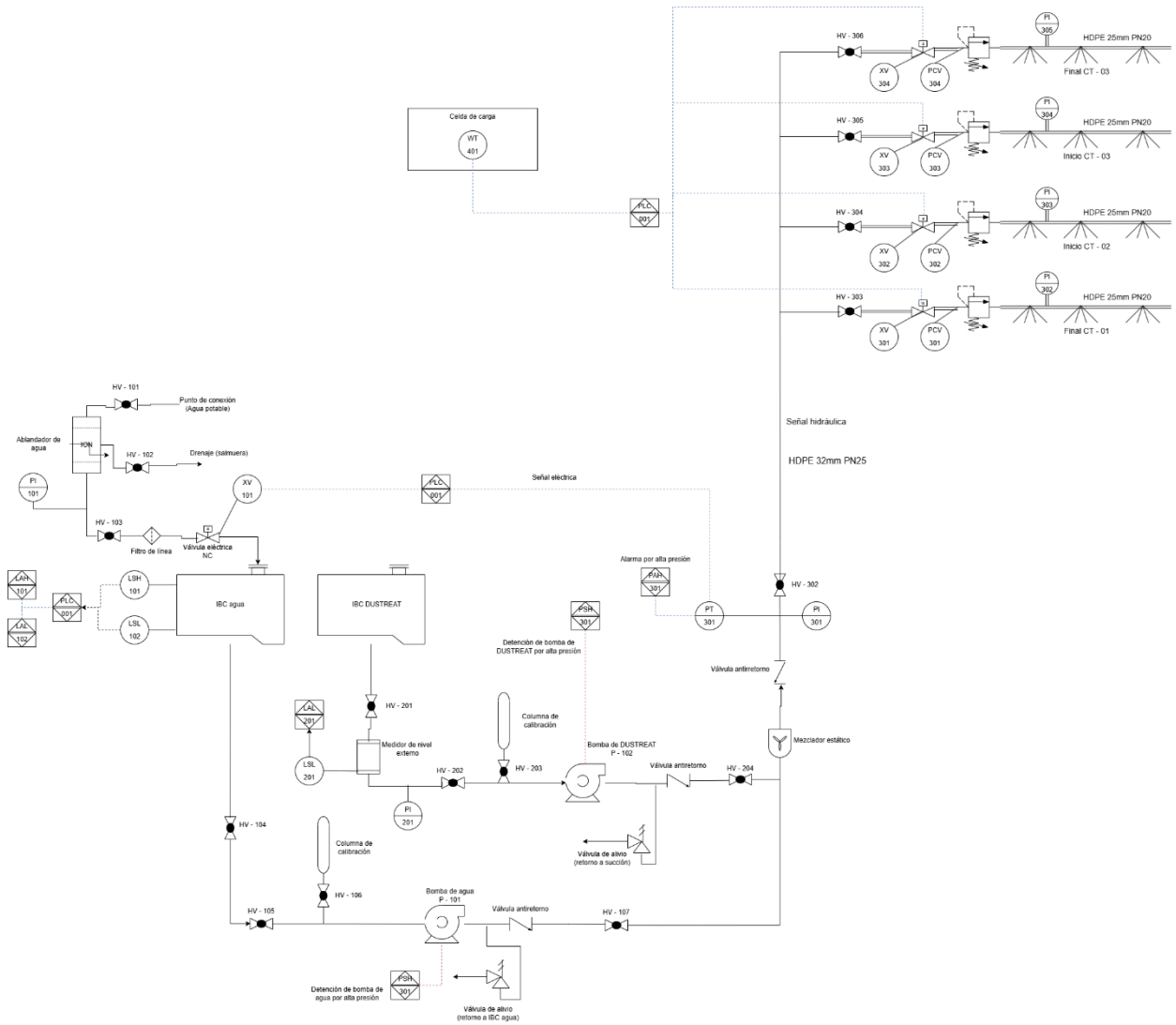
2.2.4 Instrumentación de campo

A continuación, se describen los instrumentos y actuadores seleccionados para el control y monitoreo del sistema:

1. **Celda de carga (Pesómetro):** Como elemento principal de medición, se utiliza un integrador de pesaje electrónico marca Thermo Scientific, modelo Micro-Tech 9301. Este equipo se encuentra instalado en la cinta transportadora de la central termoeléctrica y tiene la función de registrar el flujo másico dinámico del carbón. Transmite la información al PLC mediante una señal analógica de 4-20 mA y opera con una alimentación de 100-240 Vac o 24 Vcc.
2. **Transmisor de presión:** Se selecciona un transductor de presión Danfoss modelo MBS 3000 (0-16 bar). Opera con una alimentación de 24 Vcc y envía una señal analógica de 4-20 mA al controlador. Su función principal es el monitoreo continuo de la presión en la línea principal (HDPE 32 mm), permitiendo el diagnóstico de posibles fugas o caídas de presión en el sistema.
3. **Sensor de nivel de agua:** Consiste en un interruptor de nivel tipo flotador utilizado para automatizar el llenado y vaciado del estanque de agua filtrada. Opera con una alimentación de 24 Vcc y se conecta al PLC como una entrada digital, comandando la apertura o cierre de la válvula solenoide de llenado.

4. **Válvulas solenoides (ON/OFF):** Constituyen los elementos finales de control que permiten o interrumpen el paso del fluido hacia los rociadores y en la línea de llenado de agua. Se utilizan válvulas Normalmente Cerradas (NC) de dos vías, con voltaje de accionamiento de 24 Vac, conectadas como salidas digitales (a relé) desde el PLC.
5. **Bombas dosificadoras y de impulsión:** El diseño contempla dos equipos de bombeo. La primera es una bomba dosificadora marca Dosivac, modelo DDI60, encargada de inyectar el químico supresor (Dustreat). La segunda es una bomba centrífuga de flujo constante (modelo DDI150), responsable de impulsar el agua filtrada hacia el mezclador estático. Ambas operan con motores trifásicos.
6. **Torreta indicadora LED (Baliza):** Se implementa una baliza tricolor con sirena acústica para la señalización del estado operativo del sistema:
 - **Verde:** Indica que el sistema se encuentra operando en modo automático.
 - **Amarillo:** Indica que el sistema está en modo manual, habilitado para labores de mantenimiento.
 - **Rojo (con sirena acústica):** Advierte sobre condiciones de falla en la lógica de control, tales como presiones anormales (alta/baja) o niveles críticos en los estanques de agua o químico.

En la Figura 2-3 se presenta el diagrama P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) del diseño desarrollado, el cual ilustra la integración de los componentes mencionados junto con las líneas de tuberías y elementos mecánicos auxiliares requeridos para el correcto funcionamiento del sistema.



Fuente: Creación propia en draw.io.

Figura 2-3. Diagrama P&ID general del sistema automatizado de dosificación.

Debido a la cantidad de elementos presentes en la figura 2-3, se fragmentó el diagrama en dos partes, donde se puede apreciar en la figura 2-4 el diagrama P&ID correspondiente al sistema de preparación y dosificación de solución Dustreat, donde se representan los principales elementos hidráulicos, de instrumentación y control involucrados en el proceso. En el esquema se identifican los estanques IBC de agua y Dustreat, las bombas centrífugas tanto de agua, como de Dustreat, válvulas manuales y eléctricas, válvulas antirretorno, mezclador estático e instrumentos de presión y nivel

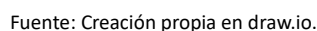
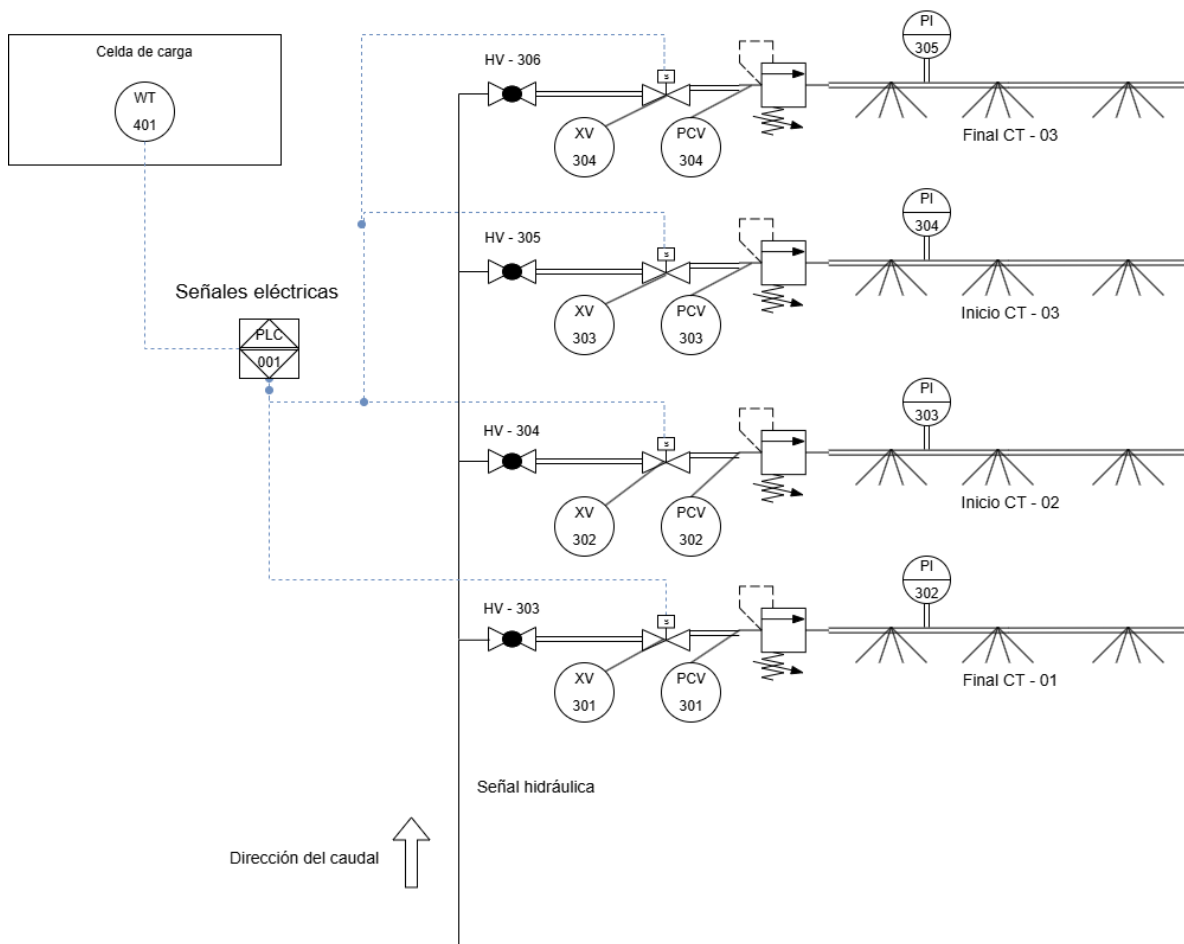


Figura 2-4. Diagrama P&ID, sección control de bombas del sistema automatizado de dosificación.

Por otra parte, la figura 2-5 presenta el diagrama P&ID correspondiente a los puntos de aplicación ubicados en las cintas transportadoras del sistema de supresión de polvo. En el esquema se observa la integración entre la celda de carga WT-401, el controlador PLC-001 y las válvulas eléctricas ON/OFF instaladas en cada línea asociada a las correas CT-01,

CT-02 y CT-03. Asimismo, se representan las señales eléctricas utilizadas para la activación escalonada de las válvulas en función del flujo másico de carbón transportado, permitiendo modular la dosificación del agente supresor según los rangos de operación definidos en la lógica de control del sistema. Además, se incluyen los instrumentos de presión instalados en cada línea de pulverización, utilizados para supervisar el correcto funcionamiento hidráulico de los puntos de aplicación.



Fuente: Creación propia en draw.io.

Figura 2-5. Diagrama P&ID, sección control de válvulas del sistema automatizado de dosificación.

2.2.5 Definición de DI/DO y AI

A modo de síntesis, se presentan todos los elementos implementados en el diseño y programación del sistema automatizado de supresión de polvo mediante rociadores. En primer lugar, en la Tabla 2-1 se detallan las entradas digitales configuradas en el controlador.

Tabla 2-1. Entradas digitales del sistema.

Entradas digitales			
Ítem	Elemento	Uso	Señal
1	Pulsador START	Iniciar el proceso	12-24VCC
2	Pulsador STOP	Detener el proceso	12-24VCC
3	Parada de emergencia	Detención forzada del proceso	12-24VCC
4	Switch general automático	Funcionamiento modo automático	12-24VCC
5	Switch general manual	Funcionamiento modo manual	12-24VCC
6	Switch válvula on/off 1 automático	Seteo SW modo automático	12-24VCC
7	Switch válvula on/off 1 manual	Seteo SW modo manual	12-24VCC
8	Switch válvula on/off 2 automático	Seteo SW modo automático	12-24VCC
9	Switch válvula on/off 2 manual	Seteo SW modo manual	12-24VCC
10	Switch válvula on/off 3 automático	Seteo SW modo automático	12-24VCC
11	Switch válvula on/off 3 manual	Seteo SW modo manual	12-24VCC
12	Switch válvula on/off 4 automático	Seteo SW modo automático	12-24VCC
13	Switch válvula on/off 4 manual	Seteo SW modo manual	12-24VCC
14	Switch de peras IBC agua	Sensor de nivel alto tanque IBC agua	12-24VCC
15	Switch de peras IBC agua crítico	Sensor de nivel bajo tanque IBC agua	12-24VCC
16	Switch de peras IBC DUSTREAT	Medidor de nivel indirecto tanque DUSTREAT	12-24VCC

Fuente: Elaboración propia del alumno en base a requerimientos del sistema.

En segundo lugar, se tiene en la tabla 2-2 las salidas digitales programadas en el PLC para realizar la actuación en el sistema.

Tabla 2-2. Salidas digitales del sistema.

Salidas digitales			
Ítem	Elemento	Uso	Señal
1	Relé Bomba 1	Accionamiento bomba 1	12-24VCC
2	Relé Bomba 2	Accionamiento bomba 2	12-24VCC
3	Relé válvula on/off 1	Apertura/cierre válvula on/off 1 CT01	12-24VCC
4	Relé válvula on/off 2	Apertura/cierre válvula on/off 2 CT02	12-24VCC
5	Relé válvula on/off 3	Apertura/cierre válvula on/off 3 CT03	12-24VCC
6	Relé válvula on/off 4	Apertura/cierre válvula on/off 4 ST01	12-24VCC
7	Relé válvula on/off 5	Apertura/cierre válvula on/off 5 llenado de tanque agua IBC	12-24VCC
8	Luz válvula on/off 1	Indicación luz verde apertura/cierre válvula on/off 1	12-24VCC
9	Luz válvula on/off 2	Indicación luz verde apertura/cierre válvula on/off 2	12-24VCC
10	Luz válvula on/off 3	Indicación luz verde apertura/cierre válvula on/off 3	12-24VCC
11	Luz válvula on/off 4	Indicación luz verde apertura/cierre válvula on/off 4	12-24VCC
12	Baliza 3 colores verde	Funcionamiento modo automático	12-24VCC
13	Baliza 3 colores amarillo	Funcionamiento modo manual	12-24VCC
14	Baliza 3 colores rojo	Indicación alarmas/fallas	12-24VCC
15	Parlante 24VDC	Indicación alarmas/fallas	12-24VCC

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se tienen las entradas analógicas del sistema, siendo el transmisor de presión y la celda de carga del sistema adjunta en la tabla 2-3.

Tabla 2-3. Entradas analógicas del sistema.

Entradas analógicas			
Item	Elemento	Uso	Señal
1	Transmisor de presión	Sensar caídas de presión en la línea y reportar fallas	4-20mA
2	Celda de carga	Sensar tonelaje en cinta transportadora de combustible	4-20mA

Fuente: Elaboración propia.

2.2.6 Arquitectura de Control y Lógica de Funcionamiento:

Se propone una estrategia de control de lazo abierto automatizado que actúa sobre la salida del sistema de supresión en función de la carga másica transportada. El controlador recibe la señal analógica de la celda de carga en un rango de 4-20 mA para procesar dicha información y, mediante la lógica programada, ejecutar acciones sobre los elementos finales de control (bombas y válvulas).

El sistema contempla una matriz de activación automática diseñada para optimizar el consumo de agua y agente químico, evitando el sobre humedecimiento del combustible. Esta lógica escalonada divide la operación en cuatro rangos de flujo másico:

- **Rango 0 - 200 t/h (Estado OFF):** El sistema permanece en estado de espera (*stand-by*) para evitar el desperdicio de recursos durante el funcionamiento en vacío de las correas transportadoras.
- **Rango 201 - 500 t/h (Nivel 1):** Se activa el primer punto de aplicación, suministrando el 25% del caudal total.
- **Rango 501 - 800 t/h (Nivel 2):** Se activan simultáneamente el primer y segundo punto, alcanzando el 50% del caudal.
- **Rango 801 - 1100 t/h (Nivel 3):** Se activan tres puntos de inyección, lo que representa el 75% del caudal.
- **Rango 1101 - 1500 t/h (Nivel 4):** El sistema opera a plena capacidad con los cuatro puntos activos (100% de dosificación).

En la Tabla 2-4 se presenta el resumen de la matriz de activación conforme a los rangos de operación definidos anteriormente, detallando el estado de cada punto de aplicación según la carga detectada.

Tabla 2-4. Matriz de activación

	Activación puntos de aplicación			
	1er punto	2do punto	3er punto	4to punto
Toneladas transportadas				
0t - 200t	OFF	OFF	OFF	OFF
200t - 500t	ON	OFF	OFF	OFF
500t - 800t	ON	ON	OFF	OFF
800t - 1100t	ON	ON	ON	OFF
1100t - 1500t	ON	ON	ON	ON

Fuente: Elaboración propia.

2.3 OPERACIÓN DEL SISTEMA

Tal como se detalló previamente, el sistema automatizado de supresión de polvo mediante rociadores dispone de dos modalidades principales de trabajo: modo manual y modo automático. A continuación, se describe el propósito y el funcionamiento técnico de cada modo de operación.

2.3.1 Modo Automático

El modo automático permite la operación autónoma e integral del sistema. En esta modalidad, el PLC gestiona de forma independiente las válvulas eléctricas, las bombas y la torreta indicadora, basándose en el estado de los selectores de posición, sensores de nivel, transmisores de presión y, fundamentalmente, la celda de carga. Al procesar la señal analógica de esta última, el controlador determina el rango de carga actual para habilitar el paso de la mezcla de agua y Dustreat sobre el combustible.

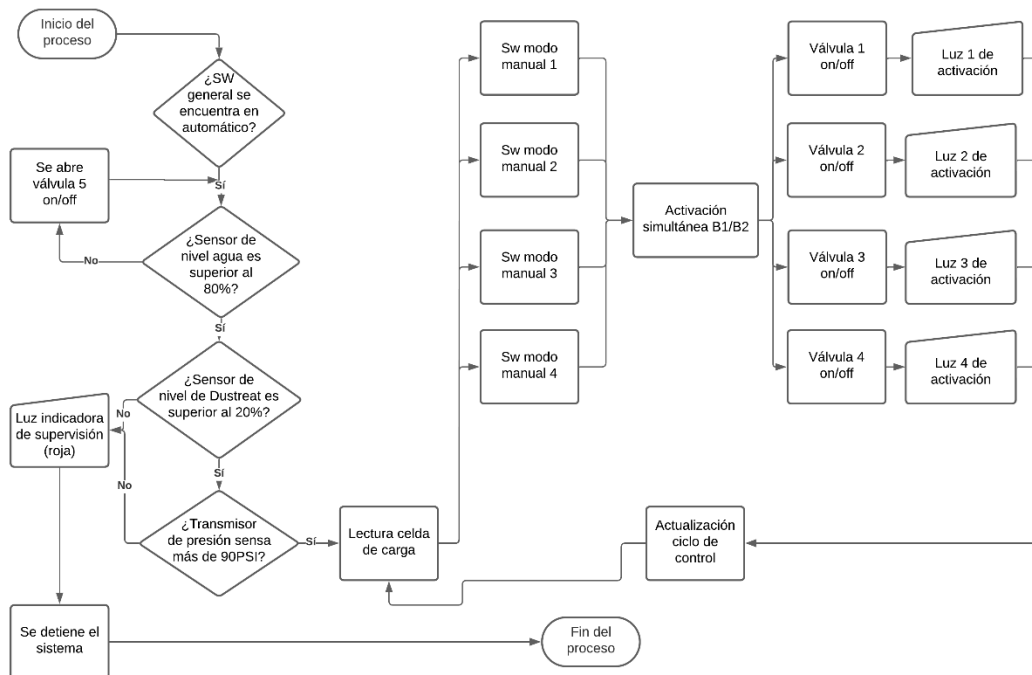
Para habilitar esta operación, el interruptor general y los cuatro selectores de posición deben situarse en la configuración de automático. Simultáneamente, el sistema verifica condiciones críticas de seguridad y suministro: el nivel del estanque de agua filtrada

debe superar el 80% de su capacidad; de lo contrario, se activa una quinta válvula solenoide para el llenado automático, abriéndose y permitiendo el paso del agua, una vez superado este nivel, el sensor de nivel acusa esta información y la válvula 5 se cierra. Asimismo, se supervisa que el nivel del tanque de Dustreat sea superior al 20%; en caso de ser inferior, se activa la señal luminosa roja y la sirena acústica para alertar al personal operativo. A estas condiciones se suma el monitoreo de la presión del sistema, generándose una alarma si los valores exceden los 90 PSI o descienden de los 30 PSI.

Una vez validadas estas condiciones, el PLC ejecuta la lectura analógica de la celda de carga y clasifica el tonelaje en los rangos definidos en la tabla 2-4. Tras identificar el rango correspondiente, se activan las bombas de impulsión y se procede a la apertura de la válvula ON/OFF respectiva, acción que es secundada por una luz indicadora en el tablero de control. Este ciclo operativo se mantiene de forma continua durante la descarga de combustible y finaliza cuando la celda de carga deja de registrar peso en la cinta transportadora.

A continuación, en la Figura 2-6 se presenta el diagrama de flujo que describe de manera gráfica el funcionamiento general del modo automático.

Funcionamiento modo automático



Fuente: creación propia en programa Lucidchart.

Figura 2-6. Diagrama de flujo modo automático.

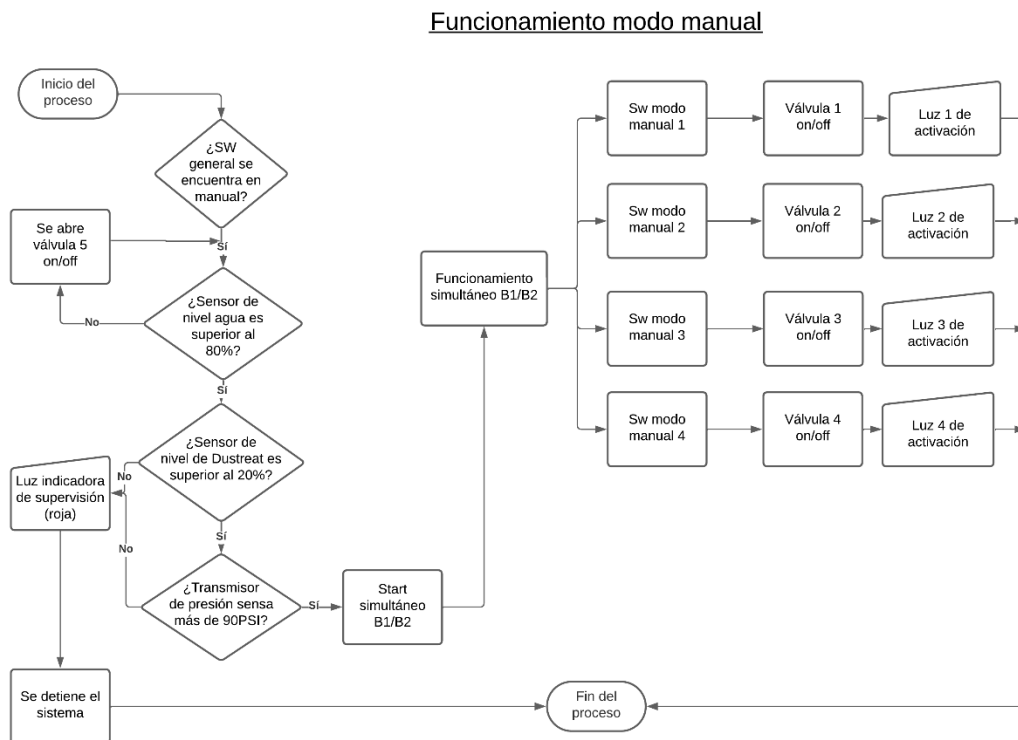
2.3.2 Modo Manual

Por otra parte, se dispone del **modo manual**, cuyo propósito principal es facilitar las labores de mantenimiento del sistema. Esta modalidad permite purgar la línea presurizada, realizar el retiro de boquillas o ejecutar el mantenimiento preventivo de los rociadores instalados en terreno. Dichas acciones son fundamentales debido a la posible cristalización de la mezcla de agua y químico, así como a la acumulación de sedimentos derivada de las condiciones ambientales adversas en la cancha de carbón.

En esta modalidad, a diferencia del modo automático, el selector principal debe fijarse en la posición de manual. Una vez validadas las condiciones de seguridad y niveles descritas anteriormente, el funcionamiento de las bombas de impulsión no depende de la

señal de la celda de carga, sino que se gestiona a través de los pulsadores ubicados en el gabinete de control. Asimismo, el operador puede accionar de forma independiente cada válvula solenoide según se requiera, permitiendo un mantenimiento expedito y controlado de cada punto de aplicación.

A continuación, en la Figura 2-7 se presenta el diagrama de flujo que describe gráficamente la lógica de operación del modo manual.



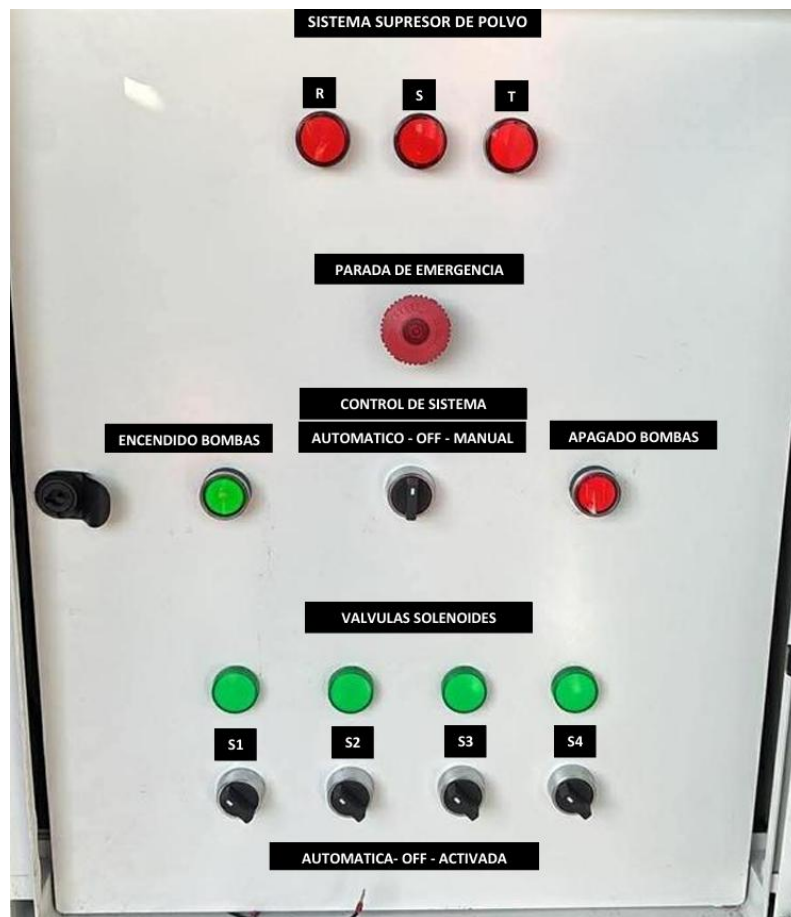
Fuente: creación propia en programa Lucidchart.

Figura 2-7. Diagrama de flujo modo manual.

Finalmente, en la figura 2-8 se presenta la interfaz del gabinete de control del sistema automatizado. En la parte superior, se ubican tres luces piloto de color rojo que indican la presencia de fase (R-S-T) para los motores de las bombas de impulsión. Bajo estas, se

dispone de un pulsador de parada de emergencia para el corte inmediato del suministro en condiciones críticas.

El control operativo se compone de dos pulsadores destinados al encendido y apagado manual de las bombas, flanqueando un selector central de tres posiciones que permite conmutar entre los estados Automático, OFF y Manual. En la sección inferior, se encuentran cuatro luces piloto verdes que señalizan la activación de cada válvula solenoide, junto con sus respectivos selectores de tres posiciones; estos últimos permiten definir el estado de cada punto de aplicación de forma independiente (Automática, OFF o Activada/Manual).



Fuente: Fotografía tomada por alumno.

Figura 2-8. Puerta gabinete de control sistema de dosificación.

2.4 INTEGRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO

La etapa final del desarrollo de la solución consiste en la articulación de los subsistemas hidráulico y de control en una unidad funcional coherente. Esta integración se representa mediante el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) detallado anteriormente, el cual valida que la interacción entre los dispositivos de campo y la lógica del controlador cumpla con los objetivos de supresión de polvo establecidos.

2.4.1 Consideraciones de Mantenimiento y Operabilidad

Para garantizar la sostenibilidad del sistema a lo largo del tiempo, se ha definido un protocolo de operabilidad y mantenimiento basado en las especificaciones técnicas de los componentes seleccionados.

- **Operabilidad del sistema:** El diseño contempla una operación autónoma supervisada. El operador dispone de selectores para conmutar entre el modo «Automático» (regido por la celda de carga) y el modo «Manual» (destinado a pruebas y mantenimiento). Además, se ha integrado una línea de lavado dedicada que permite purgar el sistema con agua limpia al finalizar turnos prolongados o antes de paradas de planta, evitando la cristalización del agente supresor en el interior de las tuberías y boquillas.
- **Plan de mantenimiento preventivo:** Basado en la propuesta técnica y las condiciones operacionales del patio de carbón, se establecen las siguientes tareas críticas:
 - **Limpieza de boquillas:** Se programa una inspección visual y limpieza periódica para asegurar que el patrón de aspersión se mantenga uniforme y sin obstrucciones.

- **Verificación de filtros:** Limpieza semanal de los filtros tipo «Y» y retrolavado del filtro de arena para evitar caídas de presión que afecten el caudal de dosificación.
- **Ajuste de bombas:** Verificación mensual de las bombas dosificadoras, inspeccionando el estado de los diafragmas y reajustando el caudal de inyección en caso de detectar variaciones en la mezcla.
- **Calibración de instrumentos:** Contrastación semestral de la señal del pesómetro y del punto de disparo de los presostatos, asegurando que la matriz de activación (0-1500 t/h) mantenga su precisión.

Estas consideraciones garantizan que el diseño sea efectivo en su implementación inicial y mantenga su confiabilidad operativa, minimizando las paradas no programadas y maximizando la vida útil de los activos.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA

3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En el presente capítulo, se describe el cronograma requerido para la ejecución del proyecto y se detallan los costos asociados a materiales, gastos operacionales, mano de obra, ahorros y contribuciones derivadas de la implementación del sistema automatizado de supresión de polvo.

Cabe destacar que los valores económicos presentados han sido convertidos a la Unidad de Fomento (**UF**) con fecha 27-03-2026, considerando un valor de **39.841,72 CLP**.

3.1 CARTA GANTT

La carta Gantt es una herramienta de gestión que permite visualizar las tareas, su duración y el cronograma del proyecto mediante barras horizontales. Esta metodología facilita la planificación, coordinación y el seguimiento de las actividades, permitiendo identificar las responsabilidades y las dependencias críticas entre cada etapa.

En la Tabla 3-1 se expone la carta Gantt del proyecto, donde se detalla el desarrollo secuencial de las actividades, los plazos asignados para cada tarea y la duración total del proceso hasta la entrega final de la solución.

Tabla 3-1. Carta Gantt del proyecto.

Nº	Actividades	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Levantamiento de información sobre control de polvo																								
2	Evaluación de soluciones y definición de requerimientos																								
3	Desarrollo de planos P&ID																								
4	Selección de hardware en proyecto																								
5	Programación de lógica de control																								
6	Montaje tuberías HDPE																								
7	Creación tablero de control																								
8	Cableado válvulas eléctricas																								
9	Prueba tablero eléctrico																								
10	Prueba de funcionamiento y afinación																								
11	Entrega de documentos generales del proyecto																								
12	Consolidación del documento y entrega final del proyecto																								

Ingeniero
 Técnico 1
 Técnico 2

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

Como se puede apreciar en la tabla 3.1, el cronograma se desglosa en un periodo de **6 meses**, donde los números del 1 al 4 en cada sección representan las semanas de trabajo. Respecto a la asignación de recursos, el color verde identifica las tareas bajo la responsabilidad del **Ingeniero**, las cuales abarcan desde el levantamiento de información y programación de la lógica hasta las pruebas funcionales. Por otro lado, los colores azul y celeste representan al **Técnico 1** y **Técnico 2**, respectivamente, quienes ejecutan las labores de montaje de tuberías HDPE, armado del tablero de control y cableado de válvulas en terreno.

3.2 MANO DE OBRA

Para el estudio económico del proyecto, los costos asociados a la mano de obra directa se estimaron con base en las tarifas por hora de un ingeniero (**\$30.000 CLP**) y personal técnico (**\$18.000 CLP**). Las actividades se estructuraron en cinco etapas principales: levantamiento y evaluación de soluciones, desarrollo de ingeniería (planos P&ID y programación de lógica), implementación, pruebas funcionales y capacitación del sistema.

De acuerdo con la planificación operativa, el costo total de la mano de obra proyectada asciende a **28.464.000 CLP**, lo que equivale a **714,43 UF**. Cabe destacar que la fase de implementación es la que concentra la mayor cantidad de recursos, al requerir el trabajo conjunto de ingeniería y dos técnicos especializados.

La distribución temporal de estas labores, así como la asignación de los responsables mencionados, se encuentran detalladas en la Tabla 3-2, donde se visualiza el cronograma de ejecución y la secuencia de actividades que justifican el cálculo de los costos de personal presentados.

Tabla 3-2. Tabla de costos H-H.

		Horas Hombre	Pesos Chilenos	
		Ingeniero	\$ 30.000	
		Técnico	\$ 18.000	27/03/2026
	Responsable	Horas Hombre	Costo en Pesos Chilenos	Costo en UF (39841,72)
Levantamiento	Ingeniero	176	\$ 5.280.000	132,52
Evaluar soluciones	Ingeniero	176	\$ 5.280.000	132,52
Desarrollo planos P&ID	Ingeniero	132	\$ 3.960.000	99,39
Programación de lógica	Técnico 1	396	\$ 7.128.000	178,91
Implementación	Técnico 2	132	\$ 2.376.000	59,64
Pruebas funcionales	Ingeniero	132	\$ 3.960.000	99,39
Capacitación del sistema	Ingeniero	16	\$ 480.000	12,05
		TOTAL	\$ 28.464.000	714,43

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

3.3 COSTO DE MATERIALES

En este apartado se detallan los costos asociados a los componentes mecánicos, hidráulicos y eléctricos. Debido a la magnitud del proyecto, la cuantificación de los insumos se ha estructurado por áreas principales, identificando los elementos críticos en los ámbitos de electricidad, mecánica e hidráulica. Adicionalmente, se consideran

costos complementarios tales como el arriendo de maquinaria y equipos de elevación necesarios para el montaje en terreno.

3.3.1 Costos materiales eléctricos

En este punto se describen los insumos fundamentales empleados en la fabricación del gabinete de control para las bombas de impulsión. En la Tabla 3-3 se presenta el desglose detallado de estos materiales, especificando cantidades, valores unitarios y el costo total expresado tanto en pesos chilenos como en Unidades de Fomento (UF). Según este registro, el costo neto total de los materiales eléctricos asciende a **3.574.260 CLP**, lo cual equivale a **89,71 UF**.

Tabla 3-3. Tabla de costos materiales eléctricos.

Item	Insumo	Cantidad	Valor unitario	Valor total	Costo en UF (39841,72)
1	Placa de montaje	1	\$ 120.500	\$ 120.500	3,02
2	Tablero eléctrico poliester	1	\$ 258.804	\$ 258.804	6,50
3	Repartidor 4 polos 100A	1	\$ 27.149	\$ 27.149	0,68
4	Luz piloto verde 24VDC con base	6	\$ 9.704	\$ 58.224	1,46
5	Torreta tricolor LED con sirena	1	\$ 255.106	\$ 255.106	6,40
6	Fuente de poder 24VDC	1	\$ 99.682	\$ 99.682	2,50
7	Fusibles	7	\$ 4.866	\$ 34.062	0,85
8	Borne portafusible SFR 4mm 1A	7	\$ 5.608	\$ 39.256	0,99
9	Disyuntor 4Px10A	1	\$ 23.530	\$ 23.530	0,59
10	Disyuntor 3Px6A	2	\$ 23.055	\$ 46.110	1,16
11	Disyuntor 2Px6A	1	\$ 21.000	\$ 21.000	0,53
12	Disyuntor 1Px6A	2	\$ 4.454	\$ 8.908	0,22
13	Relé termico	2	\$ 34.618	\$ 69.236	1,74
14	Contactador trifásico	2	\$ 30.925	\$ 61.850	1,55
15	Pulsador verde NA con base 22mm	1	\$ 6.539	\$ 6.539	0,16
16	Pulsador roja NA 22mm	1	\$ 6.960	\$ 6.960	0,17
17	Pulsador parada de emergencia NC 22mm	1	\$ 8.032	\$ 8.032	0,20
18	Selector 3 posiciones 22mm	5	\$ 12.599	\$ 62.995	1,58
19	Base relé 14 pines	7	\$ 3.295	\$ 23.065	0,58
20	Relé miniatura 14 pines	7	\$ 6.137	\$ 42.959	1,08
21	Cable amarillo 1,5mm	100	\$ 396	\$ 39.600	0,99
22	Cable negro 2,5mm	50	\$ 669	\$ 33.450	0,84
23	Cable azul 2,5mm	50	\$ 669	\$ 33.450	0,84
24	Cable rojo 2,5mm	50	\$ 669	\$ 33.450	0,84
25	Cable cordón 4x12 AWG	400	\$ 2.729	\$ 1.091.600	27,40
26	Riel DIN 7,5x35mm	4	\$ 4.247	\$ 16.988	0,43
27	Canaleta ranurada 42x60mm	4	\$ 20.082	\$ 80.328	2,02
28	Prensa estopa 22-32mm	10	\$ 1.740	\$ 17.400	0,44
29	Borne de conexión 2,5mm	60	\$ 649	\$ 38.940	0,98
30	Transformador de 380V-24V	1	\$ 45.682	\$ 45.682	1,15
31	PLC Siemens 1214C AC/DC/RLY	1	\$ 745.753	\$ 745.753	18,72
32	Módulo de expansión DI/DO SM1223 DC/DC	1	\$ 123.652	\$ 123.652	3,10
			Total neto	\$ 3.574.260	89,71

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

3.3.2 Costos materiales mecánicos e hidráulicos

En este apartado se describen los insumos principales empleados para la implementación de los subsistemas mecánico e hidráulico. Entre los componentes más significativos se encuentran las tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE), bombas dosificadoras, válvulas de control, unidades de filtrado y sistemas de ablandamiento automático.

En la tabla 3-4 se presenta el desglose detallado de estos dispositivos, especificando las cantidades requeridas, los valores unitarios y los costos totales expresados en pesos chilenos y Unidades de Fomento (UF). Según este registro, el costo neto total de los materiales mecánicos e hidráulicos asciende a **31.532.543 CLP**, lo cual equivale a **791,45 UF**.

Tabla 3-4. Tabla de costos materiales.

Item	Cantidad	Dispositivo	Valor unitario	Total	Costo en UF (39841,72)
1	13	Válvula de bola	\$ 105.386	\$ 1.370.018	34,39
2	5	Válvula solenoide	\$ 100.000	\$ 500.000	12,55
4	1	Tanque para agua plástico	\$ 400.000	\$ 400.000	10,04
5	4	Válvula reguladora de presión	\$ 150.000	\$ 600.000	15,06
6	4	Boquilla pulverizadora	\$ 30.000	\$ 120.000	3,01
7	4	Manómetro 1/4"	\$ 20.849	\$ 83.396	2,09
8	1	Manómetro 1/2"	\$ 27.408	\$ 27.408	0,69
9	2	Bomba dosificadora	\$ 1.548.500	\$ 3.097.000	77,73
10	1	Mezclador estático HDPE	\$ 1.190.000	\$ 1.190.000	29,87
11	2	Válvula check HDPE	\$ 50.000	\$ 100.000	2,51
12	1	Filtro en línea HDPE	\$ 40.280	\$ 40.280	1,01
13	300	Tubería HDPE rígida	\$ 2.338	\$ 701.400	17,60
14	100	Tubería HDPE rígida	\$ 790	\$ 79.000	1,98
15	1	Sistema de control	\$ 2.776.945	\$ 2.776.945	69,70
16	400	Canalización eléctrica	\$ 5.800	\$ 2.320.000	58,23
17	4	Cable cordón	\$ 183.916	\$ 735.664	18,46
18	1	Accesorios de canalización eléctrica	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000	25,10
19	1	Accesorios de canalización HDPE	\$ 500.000	\$ 500.000	12,55
20	1	Accesorios de canalización HDPE	\$ 500.000	\$ 500.000	12,55
21	1	Máquina de electrofusion	\$ 1.744.432	\$ 1.744.432	43,78
22	1	Sistema de medición de nivel externo	\$ 300.000	\$ 300.000	7,53
23	1	Sistema de medición de nivel interno	\$ 100.000	\$ 100.000	2,51
24	1	Válvula de corte automático de agua	\$ 150.000	\$ 150.000	3,76
25	1	Sistema ablandador automático	\$ 4.000.000	\$ 4.000.000	100,40
26	1	Insumos varios	\$ 4.000.000	\$ 4.000.000	100,40
27	1	Gabinete albergue para equipos	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	50,20
28	2	Bombas dosificadoras Dosivac	\$ 1.548.500	\$ 3.097.000	77,73
Total neto			\$	31.532.543	791,45

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

3.3.3 Costos adicionales

Finalmente, se detallan los costos derivados del arriendo de maquinaria especializada, tales como grúas alza hombres y herramientas eléctricas de especialidad necesarias para las labores de montaje e instalación en altura.

En la tabla 3-5 se desglosan estos servicios, especificando la cantidad de días de uso, los valores unitarios y el costo total del ítem. Según los registros, el monto neto por concepto de costos adicionales asciende a **1.552.500 CLP**, lo que representa un valor de **38,97 UF**.

Tabla 3-5. Tabla de costos adicionales.

Item	Insumo	Cantidad (días)	Valor unitario	Valor total	Costo en UF (39841,72)
1	Arriendo de grúa	5	\$ 175.500	\$ 877.500	22,02
2	Arriendo máquinas eléctricas de especialidad	5	\$ 135.000	\$ 675.000	16,94
			Total neto	\$ 1.552.500	38,97

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

3.3.4 Costos totales de materiales

A modo de cierre de esta sección, en la tabla 3-6 se presenta el resumen consolidado del costo total de los materiales e insumos utilizados en el proyecto, integrando además los valores correspondientes al arriendo de herramientas y equipos especializados. Según esta síntesis, la inversión neta total en suministros y equipos asciende a **36.659.303 CLP**, equivalente a **881,16 UF**.

Tabla 3-6. Tabla resumen costo total de materiales.

Total neto	\$ 36.659.303	881,16
-------------------	----------------------	---------------

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

3.4 COSTOS FINALES DEL PROYECTO

En la fase final del estudio económico se consolidaron todos los gastos requeridos para la ejecución del proyecto, desglosados principalmente en la adquisición de materiales y el pago de mano de obra. La suma de ambos ítems genera un costo base inicial de **65.123.303 CLP**. Con el objetivo de garantizar la viabilidad financiera ante posibles eventualidades o fluctuaciones de precios durante la implementación, se incorporó un margen de imprevistos correspondiente al 20% del costo base, equivalente a **13.024.661 CLP**.

Al integrar estos factores, el presupuesto total neto general asciende a **\$78.147.964 CLP**. Finalmente, considerando el Impuesto al Valor Agregado (IVA) del 19% sobre el monto neto, la inversión total bruta para la ejecución del proyecto se estima en **92.996.077 CLP**, lo cual representa un total de **2278,50 UF** (valor referencial al 27 de marzo de 2026).

Esta información se presenta de forma detallada en la tabla 3-7, donde se resume la estructura de costos finales del diseño propuesto.

Tabla 3-7. Tabla costos totales del proyecto.

Detalle	Total Pesos Chilenos	Total UF 39841,72
Materiales	\$ 36.659.303	881,16
Mano de obra	\$ 28.464.000	714,43
Costo total	\$ 65.123.303	1595,59
Imprevistos 20% del total	\$ 13.024.661	319,12
Total neto general	\$ 78.147.964	1914,70
IVA sobre neto general (19%)	\$ 14.848.113	363,79
Total neto general	\$ 92.996.077	2278,50

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

3.5 CÁLCULO DE AHORROS DEL PROYECTO

La implementación del sistema de supresión de polvo no solo cumple con normativas ambientales y de salud ocupacional, sino que también genera un beneficio económico directo mediante la recuperación de combustible. Al aglomerar el material particulado que antes se perdía en la atmósfera o se dispersaba en el entorno, el sistema permite reintegrar este material al proceso productivo, reduciendo las mermas operacionales de la planta.

3.5.1 Cálculo de ahorro en recuperación de carbón

Para cuantificar este beneficio, se realizó un análisis comparativo entre la situación base (sin proyecto) y el escenario con la solución implementada. Se estima un transporte anual de 1.000.000 t de carbón, con una pérdida por dispersión del 0,1%, lo que equivale a 1.000 toneladas anuales. Con un costo de mercado de **100.000 CLP** por tonelada, esta merma representa una pérdida económica de **100.000.000 CLP** al año.

Gracias a la eficiencia del sistema de rociadores, se proyecta una captura del 80% del material particulado, logrando recuperar 800 toneladas de carbón anualmente. Como se detalla en la tabla 3-8, esta recuperación se traduce en un ahorro anual de **80.000.000 CLP**, equivalente a **2007,94 UF**. Este ingreso por recuperación de combustible contribuye significativamente a la amortización de la inversión inicial del proyecto.

Tabla 3-8. Cálculo de ahorros de carbón.

Ítem de ahorro	Situación base (sin proyecto)	Situación con proyecto	Ahorro mensual	Ahorro anual	Total en UF
1. Recuperación de merma de combustible	Se estima un transporte anual de 1.000.000 toneladas al año, y una pérdida imprevista de carbón estimada de 0.1% del total transportado, siendo 1.000 t/año, donde el costo por tonelada de carbón circula los \$100.000/t. el costo total anual de esta pérdida son	El sistema de dosificación automatizado con rociadores aglomera el material particulado, logrando una eficiencia de captura del 80% del total de las pérdidas mencionadas (800 Ton recuperadas)	Representa un ahorro mensual de 6.666.666 CLP	A su vez, presenta un ahorro anual de 80.000.000 CLP	Este valor ahorrado anual transformado en la Unidad de fomento es 2007,94 UF

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

3.5.2 Cálculo de ahorro en Horas-Hombre

Además de la recuperación de material, la implementación del sistema genera un impacto positivo directo en la optimización de los recursos humanos destinados al mantenimiento y limpieza de las cintas transportadoras. Antes de la ejecución del proyecto, estas labores exigían una dedicación de 100 horas mensuales por parte del operador de la cancha de carbón, lo que representaba un total de 1.200 horas anuales y un costo operativo de **16.800.000 CLP**.

Con la puesta en marcha del sistema de supresión de polvo, la necesidad de limpieza manual se reduce drásticamente a 20 horas mensuales (240 horas anuales), disminuyendo el costo asociado a **3.360.000 CLP**. En consecuencia, el proyecto permite un ahorro neto anual de **13.440.000 CLP** (equivalente a **337,34 UF**), liberando un total de 960 horas-hombre al año que pueden ser reasignadas a tareas de mayor valor estratégico para la planta.

Este análisis comparativo de eficiencia operativa se resume detalladamente en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Cálculo de ahorros en Horas-Hombre.

Plan de mantención antes de la mejora						
Ítem de ahorro	Encargado de maniobra en terreno	Valor Hora-Hombre	Horas trabajadas en mantenimiento de cintas (mensual)	Horas trabajadas en mantenimiento de cintas (anual)	Costo total (pesos chilenos)	Costo total en UF (39.841,72)
Mantenimiento y limpieza de cintas transportadoras (antes)	Operador de cancha de carbón	\$ 14.000	100	1200	\$ 16.800.000	\$ 421,67
Plan de mantención después de la mejora						
Ítem de ahorro	Encargado de maniobra en terreno	Valor Hora-Hombre	Horas trabajadas en mantenimiento de cintas (mensual)	Horas trabajadas en mantenimiento de cintas (anual)	Costo total (pesos chilenos)	Costo total en UF (39841,72)
Mantenimiento y limpieza de cintas transportadoras (después)	Operador de cancha de carbón	\$ 14.000	20	240	\$ 3.360.000	\$ 84,33

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

3.5.3 Resumen de beneficios económicos anuales

Para cuantificar el impacto económico final del proyecto, se consolidaron los beneficios anuales proyectados en sus dos frentes principales. La recuperación de combustible representa la mayor fracción de las ganancias operativas, con un aporte de **80.000.000 CLP** al año. Por su parte, la optimización de los recursos destinados a limpieza genera un ahorro en horas-hombre de **13.440.000 CLP**.

En conjunto, la implementación del sistema automatizado de supresión de polvo genera un ahorro total anual de **93.440.000 CLP**, cifra que equivale a **2.344,33 UF**. Estos resultados demuestran la alta rentabilidad de la solución y el beneficio directo que aporta a la eficiencia operativa de la planta.

En la Tabla 3-10 se presenta la síntesis de los ahorros anuales calculados, consolidando el beneficio económico total del diseño propuesto.

Tabla 3-10. Ahorro total anual.

Ahorro anual	Total pesos chilenos	Total UF (39.841,72
Carbón	\$ 80.000.000	\$ 2.007,00
Horas-hombre	\$ 13.440.000	\$ 337,33
Total ahorro	\$ 93.440.000	\$ 2.344,33

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

3.6 FLUJO DE CAJA

Para evaluar la viabilidad financiera de la solución, se elaboró un flujo de caja proyectado a un horizonte de cinco años. La inversión inicial requerida en el Año 0 asciende a **92.996.077 CLP**, monto que consolida los costos de adquisición de hardware, materiales, mano de obra e impuestos asociados (IVA).

Durante la fase operativa (Años 1 al 5), el sistema genera beneficios anuales constantes de **93.440.000 CLP**, derivados de la recuperación de combustible y la optimización de horas-hombre. Tras deducir los egresos operativos por mantenimiento, repuestos y costos operacionales (**53.760.000 CLP** anuales), se obtiene un flujo de caja neto operativo de **39.680.000 CLP**.

Al aplicar una Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (**TMAR**) del 12%, la evaluación económica arroja indicadores altamente favorables: un Valor Actual Neto (**VAN**) de **\$50,04 millones** y una Tasa Interna de Retorno (**TIR**) del **32%**. Estos resultados, detallados en la **Tabla 3-11**, junto con un periodo de recuperación de la inversión

(**Payback**) que se sitúa entre el segundo y tercer año de operación, validan la sólida rentabilidad y conveniencia económica de la implementación del sistema.

Tabla 3-11. Flujo de caja del proyecto.

	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
Ingresos						
Ahorro Carbón		\$ 80.000.000	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000
Ahorro Horas Hombre		\$ 13.440.000	\$ 13.440.000	\$ 13.440.000	\$ 13.440.000	\$ 13.440.000
Total Ingresos	\$ -	\$ 93.440.000	\$ 93.440.000	\$ 93.440.000	\$ 93.440.000	\$ 93.440.000
Egresos						
Costo del proyecto	-\$ 92.996.077					
Costos operacionales	\$ -	-\$ 22.800.000	-\$ 22.800.000	-\$ 22.800.000	-\$ 22.800.000	-\$ 22.800.000
Mantenimiento	\$ -	-\$ 20.560.000	-\$ 20.560.000	-\$ 20.560.000	-\$ 20.560.000	-\$ 20.560.000
Repuestos	\$ -	-\$ 10.400.000	-\$ 10.400.000	-\$ 10.400.000	-\$ 10.400.000	-\$ 10.400.000
Total egresos	\$ -	-\$ 53.760.000	-\$ 53.760.000	-\$ 53.760.000	-\$ 53.760.000	-\$ 53.760.000
Flujo de caja neto	-\$ 92.996.077	\$ 39.680.000	\$ 39.680.000	\$ 39.680.000	\$ 39.680.000	\$ 39.680.000
Flujo de caja corregido	-\$ 92.996.077	\$ 35.428.571	\$ 31.632.653	\$ 28.243.440	\$ 25.217.357	\$ 22.515.498
Flujo de Caja acumulado	-\$ 92.996.077	-\$ 57.567.506	-\$ 25.934.853	\$ 2.308.588	\$ 27.525.945	\$ 50.041.443
	0	1	2	3	4	5

TMAR	12%
VAN	\$ 50.041.443
TIR	32%
PAYBACK	Año 2

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

3.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para fortalecer la evaluación financiera, se realizó un análisis de sensibilidad bidimensional sobre las dos variables con mayor impacto en el flujo de ingresos: el precio de mercado del carbón y la cantidad de toneladas recuperadas. Este análisis permite identificar los límites de rentabilidad de la ingeniería ante escenarios de volatilidad económica o variaciones en la eficiencia de captura del sistema.

Como se observa en la Tabla 3-12, el proyecto presenta una alta resiliencia. En el escenario base, con un precio de 100.000 CLP/t de carbón y una recuperación de 800 t/año después de implementar el proyecto, el VAN se sitúa en **\$50,04 millones**. El análisis demuestra que el sistema sigue siendo rentable (VAN positivo) incluso si el precio del carbón

disminuye hasta un **20%** (manteniendo la cantidad) o si la recuperación de material cae hasta un **20%** (manteniendo el precio).

La zona crítica o punto de equilibrio se identifica cuando ambas variables sufren una caída combinada superior al 30%, escenario en el cual el VAN se torna negativo. No obstante, dada la estabilidad histórica del precio del combustible y la eficiencia probada de la tecnología de aspersión seleccionada, la probabilidad de ocurrencia de dicho escenario es mínima, lo que ratifica al proyecto como una inversión de bajo riesgo operativo.

Tabla 3-12. Análisis de sensibilidad de carbón.

		Precio											
		140%	130%	120%	110%	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Cantidad	\$ 50.041.443												
	140%	\$ 326.888.255	\$ 286.514.762	\$ 246.141.268	\$ 205.767.775	\$ 165.394.281	\$ 125.020.788	\$ 84.647.294	\$ 44.273.801	\$ 3.900.307	\$ -36.473.186	\$ -76.846.680	\$ -117.220.173
	130%	\$ 286.514.762	\$ 249.025.089	\$ 211.535.417	\$ 174.045.744	\$ 136.556.072	\$ 99.066.399	\$ 61.576.727	\$ 24.087.054	\$ -13.402.618	\$ -50.892.291	\$ -88.381.963	\$ -125.871.636
	120%	\$ 246.141.268	\$ 211.535.417	\$ 176.929.565	\$ 142.323.713	\$ 107.717.862	\$ 73.112.010	\$ 38.506.159	\$ 3.900.307	\$ -30.705.544	\$ -65.311.396	\$ -99.917.247	\$ -134.523.099
	110%	\$ 205.767.775	\$ 174.045.744	\$ 142.323.713	\$ 110.601.683	\$ 78.879.652	\$ 47.157.622	\$ 15.435.591	\$ -16.286.439	\$ -48.008.470	\$ -79.730.501	\$ -111.452.531	\$ -143.174.562
	100%	\$ 165.394.281	\$ 136.556.072	\$ 107.717.862	\$ 78.879.652	\$ 50.041.443	\$ 21.203.233	\$ -7.634.977	\$ -36.473.186	\$ -65.311.396	\$ -94.149.605	\$ -122.987.815	\$ -151.826.025
	90%	\$ 125.020.788	\$ 99.066.399	\$ 73.112.010	\$ 47.157.622	\$ 21.203.233	\$ -4.751.156	\$ -30.705.544	\$ -56.659.933	\$ -82.614.322	\$ -108.568.710	\$ -134.523.099	\$ -160.477.488
	80%	\$ 84.647.294	\$ 61.576.727	\$ 38.506.159	\$ 15.435.591	\$ -7.634.977	\$ -30.705.544	\$ -53.776.112	\$ -76.846.680	\$ -99.917.247	\$ -122.987.815	\$ -146.058.383	\$ -169.128.950
	70%	\$ 44.273.801	\$ 24.087.054	\$ 3.900.307	\$ -16.286.439	\$ -36.473.186	\$ -56.659.933	\$ -76.846.680	\$ -97.033.426	\$ -117.220.173	\$ -137.406.920	\$ -157.593.667	\$ -177.780.413
	60%	\$ 3.900.307	\$ -13.402.618	\$ -30.705.544	\$ -48.008.470	\$ -65.311.396	\$ -82.614.322	\$ -99.917.247	\$ -117.220.173	\$ -134.523.099	\$ -151.826.025	\$ -169.128.950	\$ -186.431.876
	50%	\$ -36.473.186	\$ -50.892.291	\$ -65.311.396	\$ -79.730.501	\$ -94.149.605	\$ -108.568.710	\$ -122.987.815	\$ -137.406.920	\$ -151.826.025	\$ -166.245.129	\$ -180.664.234	\$ -195.083.339
	40%	\$ -76.846.680	\$ -88.381.963	\$ -99.917.247	\$ -111.452.531	\$ -122.987.815	\$ -134.523.099	\$ -146.058.383	\$ -157.593.667	\$ -169.128.950	\$ -180.664.234	\$ -192.199.518	\$ -203.734.802
	30%	\$ -117.220.173	\$ -125.871.636	\$ -134.523.099	\$ -143.174.562	\$ -151.826.025	\$ -160.477.488	\$ -169.128.950	\$ -177.780.413	\$ -186.431.876	\$ -195.083.339	\$ -203.734.802	\$ -212.386.265

Fuente: Elaboración propia creada en Excel.

CONCLUSIÓN

La ejecución de este proyecto de ingeniería permite concluir que la automatización no es solo una mejora técnica, sino una respuesta estratégica a los desafíos críticos de la industria térmica. El diseño del sistema de supresión de polvo para las correas transportadoras de la planta Quintero logra un equilibrio eficiente entre la operatividad mecánica y la responsabilidad ambiental.

La lógica de control propuesta, basada en una dosificación proporcional escalonada mediante un PLC Siemens S7-1200, resuelve eficazmente la complejidad del terreno. El entorno industrial exigía una solución capaz de resistir condiciones hostiles y de actuar con precisión ante el flujo variable de carbón. Al utilizar señales de 4-20 mA proveniente de la celda de carga existente, el sistema garantiza la aplicación exacta de supresor, evitando el desperdicio de recursos y el exceso de humedad en el combustible.

La viabilidad del proyecto no solo se respalda en la mejora de la calidad del aire y la reducción de 960 horas-hombre de limpieza, sino que se corrobora con un robusto estudio económico. Con una Inversión Inicial de 92.996.077 CLP, el proyecto alcanza su punto de equilibrio (Payback) en el segundo año, una cifra excepcional para inversiones en infraestructura.

Finalmente, el análisis de sensibilidad aporta la capa de seguridad necesaria para la toma de decisiones, demostrando que incluso ante caídas drásticas del 40% en el precio del carbón o en la eficiencia de recuperación, el proyecto mantiene un VAN positivo y una TIR del 61%. Esto confirma que la ingeniería propuesta es altamente resiliente a la volatilidad del mercado, garantizando que los beneficios ambientales se traduzcan en una rentabilidad sólida y sostenible en el tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- Funcionamiento general de una termoeléctrica de carbón y sus características, de <https://chilesustentable.net/2019/10/termoelectricas-a-carbon-como-funcionan-cuanto-contaminan-y-que-hacer-con-ellas/>
- Cableado PLC Siemens S7-1200 1214C AC/DC/RLY, de <https://support.industry.siemens.com/cs/mdm/107623221?c=71995742347&dl=es&lc=en-BD>