UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE DE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA E INFORMÁTICA

SISTEMA INTELIGENTE DE LLANADO: CONTROL Y ESTUDIO DE LA GENERACION DE ESPUMA EN PROCESOS INDUSTRIALES.

Trabajo de titulación para optar al título profesional de **INGENIERO DE EJECUCIÓN EN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL**

Alumno:

Paulo Roberto González Saravia.

Profesor Guía:

Nelson Vásquez Concha.

2026

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: Sistema Inteligente de Llenado: Control y Estudio de Espuma en Procesos Industriales.

Nombre del candidato(a): Paulo Roberto González Saravia

Carrera / Grado: Ingeneria E. Control e Instrumentacion Industrial

Campus: Concepcion ; **Departamento**: ELECTRONICA E INFORMATICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Nelson Vasquez, 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

☒ 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:

☐ 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: 04/11/2026 ; **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04/11/2026 ; **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

En el ámbito industrial, el proceso de llenado de camiones con productos líquidos o semilíquidos implica desafíos específicos debido a la generación de espuma, el cual puede llevar a rebalses y desperdicios de producto si no es adecuadamente controlado. Esta situación ocurre frecuentemente cuando el material transportado a través de tuberías cae desde una altura considerable a un camión de carga, generando burbujas y espuma que ocupan espacio; si se acumulan en exceso, pueden desbordarse. El monitoreo actual de este fenómeno depende en gran medida de la supervisión humana, lo que no solo representa una limitación de eficiencia, sino que también aumenta los riesgos de error y genera costos adicionales asociados con la interrupción del proceso y la necesidad de un operador constante en la supervisión del producto en los camiones.

Este trabajo de título estudia y analiza la generación de espuma en estos procesos industriales y plantea el desarrollo de un sistema de llenado inteligente como una solución automatizada para el control y estudio de la espuma. Este sistema incorpora un sensor de nivel capacitivo que permite diferenciar entre el producto y la espuma, detectando los niveles en tiempo real y activando los mecanismos de cierre cuando se alcanza el límite establecido. Gracias a su precisión, este sensor puede contribuir a una regulación exacta del flujo, evitando rebalses y mejorando la seguridad. De igual forma, se complementa con un sensor de visión inteligente, el cual verifica si el camión está correctamente alineado con la escotilla antes de iniciar el proceso, y un sensor de flujo que mide la cantidad de producto cargado. Esta medición permite dosificar con precisión un agente antiespumante en función del volumen (por litros), optimizando su uso y evitando exceso de aditivos en el producto final.

Finalmente, con el propósito de demostrar y validar la lógica de diseño de la estación de carga antes de invertir en la implementación física pesada, este proyecto incorpora el desarrollo de un entorno de simulación 3D interactiva. Este Gemelo Digital (Digital Twin), ejecutado en un navegador web, permite probar el comportamiento dinámico del sistema y evaluar respuestas ante contingencias u operaciones de emergencia. Para dotar a esta herramienta de validez industrial, se implementó una comunicación bidireccional mediante el protocolo Modbus TCP. De esta manera, el sistema virtual es capaz de enviar señales y recibir permisos o alarmas directamente desde un controlador lógico (PLC) programado, garantizando que los interbloqueos de seguridad funcionen correctamente y minimizando los riesgos antes de avanzar a la construcción en terreno.

GLOSARIO

- **Antiespumante:** Agente químico diseñado para prevenir la formación de espuma o eliminarla una vez generada, actuando sobre la tensión superficial de las burbujas.
- **ATEX (Atmósferas Explosivas):** Directiva europea que regula los equipos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- **EtherNet/IP:** Protocolo de comunicación industrial basado en el estándar Ethernet que permite la transmisión de datos en tiempo real y el control de dispositivos dentro de una red automatizada.
- **Feed-Forward (Control Anticipativo):** Estrategia de control que mide las perturbaciones (como el caudal de flujo) antes de que afecten la variable del proceso, permitiendo ajustar la dosificación de manera proactiva.
- **Gateway:** Dispositivo que actúa como puerta de enlace o convertidor de protocolos, permitiendo la comunicación entre redes o dispositivos con tecnologías diferentes (ej. HART a IO-Link).
- **HART (Highway Addressable Remote Transducer):** Protocolo de comunicación digital híbrido que opera sobre la señal analógica de 4-20 mA, permitiendo la configuración y diagnóstico remoto de instrumentos.
- **IO-Link:** Protocolo de comunicación digital punto a punto estandarizado (IEC 61131-9) que conecta sensores y actuadores inteligentes al sistema de automatización, permitiendo parametrización y diagnóstico.
- **PLC (Programmable Logic Controller):** Controlador Lógico Programable; computadora industrial utilizada para la automatización de procesos electromecánicos.
- **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition):** Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos que permite monitorear y controlar procesos industriales a distancia.
- **Sensor Capacitivo:** Dispositivo que detecta cambios en la capacitancia provocados por la presencia de un material (líquido o espuma) sin necesidad de contacto físico directo en algunos casos.
- **Skid de Dosificación:** Sistema modular integrado que incluye bombas, válvulas, instrumentación y control, diseñado para inyectar productos químicos con precisión.
- **TIS-382:** Agente antiespumante específico basado en organosilicona seleccionado para este proyecto por su compatibilidad agroindustrial.
- **VDF (Variador de Frecuencia):** Dispositivo electrónico que controla la velocidad de un motor eléctrico ajustando la frecuencia de la energía suministrada.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN 3
GLOSARIO 4
INDICE DE CONTENIDOS 5
ÍNDICE DE FIGURAS 8
ÍNDICE DE TABLAS 9
CAPITULO N°1: INTRODUCCION 10
1.1 CONTEXTUALIZACION 11
1.2 DEFINICION DEL PROBLEMA 12
1.3 SOLUCION A LA PROBLEMATICA 13
1.4 ALCANCE 14
1.5 OBJETIVO GENERAL 15
CAPITULO N°2: ESTUDIO Y MARCO TEORICO DEL PROBLEMA 16
2.1 GENERACION TDE ESPUMAS EN PROCESOS INDUSTRIALES 17
2.1.1 Naturaleza y Formación de la Espuma 17
2.1.2 Causas Principales de la Formación de Espuma 18
2.2 AGENTES ANTI-ESPUMANTES 19
2.2.1 Definición y Principio de Funcionamiento 19
2.2.2 Tipos de Agentes Antiespumantes 20
2.2.3 Criterios de Selección de un Antiespumante 21
2.2.4 Aplicación de Antiespumantes en la Industria Agropecuaria 21
2.2.5 ¿Qué elementos debo considerar al momento de adquirir un antiespumante? 21
2.2.6 Consideraciones en alteración del producto final. 22
2.3 TIPOS DE SENSORES E INSTRUMENTACION NECESARIA PARA EL CONTROL DE SISTEMA DE LLENADO 24
2.3.1 ¿Qué es un Sensor y Cuál es su Función? 24
2.3.2 ¿Qué sensores se necesita para el sistema inteligente de llenado? 25
2.3.3 Necesidad de Detectar Espuma en la Industria Agropecuaria 26
2.3.4 Alternativas Adicionales 27
2.4 METODOS DE DOSIFICACION PARA AGENTES ANTIESPUMANTES 28
2.4.1 Métodos de Dosificación en Procesos Industriales. 28
2.4.2 Sistemas de Dosificación Automática Integrada (Skid de Dosificación) 29
2.4.3 Dosificación por Control en Lazo Cerrado (Sistema con Sensor de Espuma) 30
2.5 SISTEMA DE COMUNICACIÓN Y CONTROL EN PLANTA TERRAMAR. 31
2.5.1 Comunicación Industrial mediante EtherNet/IP 32
2.5.2 Tarjetas de Entradas y Salidas en el Sistema de Control 33

2.6 INTEGRACION DE IO-LINK PARA LA INDUSTRIA 4.0 34
2.6.1 ¿Qué es IO-Link? 34
2.6.2 ¿Cómo funciona la tecnología IO Link? 35
2.6.3 Tipos de Cables para IO-LINK 37
2.6.4 Beneficios de IO-Link en el sistema de llenado autónomo 38
2.6.5 Aporte estratégico de IO-Link en Terramar SBH: 39
2.6.6 Lógica de Control para la Dosificación Automática 40
CAPITULO N°3: SELECCIÓN DE TECNOLOGIAS PARA MEJORA DEL SISTEMA. . 43
3.1 SOLUCION AL PROBLEMA DE LA ESPUMA. 44
3.1.1 Selección final del antiespumante Compatible con el Producto Industrial. 44
3.1.2 Aplicación Técnica del Antiespumante: 44
3.1.3 Acerca de la Empresa Desarrolladora del Anti-Espumante TIS 47
3.2 SOLUCION AL CORRECTO POSICIONAMIENTO DEL CAMIÓN. 48
3.2.1 Acerca del visor inteligente SICK Lector62x con I.A y IO-Link. 49
3.2.2 Instalación y Configuración del Lector62x mediante su Software “SOPAS Engineering Tool” 50
3.2.3 Especificaciones Técnicas del Visor Inteligente Sick. 51
3.3 CONTROL DE REBALSE DE LA ESPUMA: SENSOR UWT SERIE CN 7000 .. 52
3.3.1 Selección definitiva del sensor de Nivel: UWT CN 7150 con Cable de Extensión54
3.3.2 Certificaciones y Aplicaciones del Sensor UWT. 55
3.3.3 Conexiones eléctricas del Sensor UWT. 57
3.3.4 Opción de Integración de Módulos POINT I/O | Allen-Bradley 62
3.4 MEDICION DE FLUJO ELECTROMAGNETICO EN PLANTA. 64
3.4.1 Características técnicas del Caudalímetro Yokogawa AXG. 65
3.4.2 Consideraciones para el Caudalímetro Yokokawa AXG. 66
3.4.3 Integración del caudalímetro mediante Gateway para IO-Link. 70
3.4.4 Componentes necesarios para configurar la instalación del Gateway el Caudalímetro AXG. 72
3.4.5 Beneficios de la Integración Digital (HART a IO-Link) 73
3.5 Integración del skid de dosificación de Terramar en el sistema de llenado Autónomo. 75
3.5.1 Automatización del proceso para la emisión del Anti-Espumante. 76
3.5.2 Integración y Requerimientos de Entradas y Salidas (I/O) en el PLC. 79
3.5.3 Lógica de Seguridad y Mantenimiento Predictivo. 80
3.5.4 Impacto Operacional y de Sustentabilidad del Sistema Integrado 81
CAPITULO N°4: CONCLUSIONES Y ANEXOS. 83
4.1 Conclusiones Generales del Proyecto 84

4.2 Guion Operativo: El Ciclo de Carga Inteligente 87
4.3 Validación Digital del Sistema mediante Simulación 3D 89
4.4 Conclusiones Técnicas del Proyecto. 91
4.5 Recomendaciones a considerar. 94
4.6 Bibliografía del Proyecto. 96
4.7 ANEXOS. 98
4.8 AGRADECIMIENTOS. 101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1: Empresa Terramar SBH en Coronel. *11*
Figura 1.2.1:Camión en Rebalse de Espuma. *12*
Figura 1.3.1: Problemáticas a Solucionar en Terramar *13*
Figura 2.1.1:Simulación numérica multiescala de las burbujas en la Espuma. *17*
Figura 2.2.1: Ejemplo de Agentes Anti-Espumantes. *19*
Figura 2.3.1: sensores capacitivos de VCD y VCA *25*
Figura 2.3.2: Ejemplos de detección sensor capacitivo. *26*
Figura 2.4.1: Ejemplo de Skid de dosificación *29*
Figura 2.5.1: Flexibilidad Ethernet/IP en la Industria. *32*
Figura 2.5.2: POINT I/O-Module | Allen-Bradley *33*
Figura 2.6.1 Esquema representativo de IO-LINK *35*
Figura 2.6.2: Protocolos de Comunicación vs IO-LINK *36*
Figura 2.6.3: Ejemplo de Esquema para Terramar con IO-LNK. *39*
Figura 3.1.1: Formato de venta del anti-espumante. *46*
Figura 3.2.1: Datos técnicos del Lector 62x *51*
Figura 3.3.1: Imagen representativa de camión cisterna llenándose. *53*
Figura 3.3.2: Detalles Técnicos del Sensor Seleccionado. *54*
Figura 3.3.3: Conexionado con electrónica 8-16 mA. *57*
Figura 3.3.4: Figura 3.3.4: Conmutación del equipo con electrónica 8-16 mA. *59*
Figura 3.3.5: Allan-Bradley Point I/O *62*
Figura 3.4.1: Tipos Caudalímetros de la Serie AXG *66*
Figura 3.4.2: Modelos de Gateway en el mercado. *70*
Figura 3.4.3: Diagrama de Conexión HART a IO-LINK. *73*
Figura 3.4.4: componentes para configurar Caudalimetro AXG. *74*
Figura 3.5.1: Diagrama conceptual de lógica de control. *77*
Figura 3.5.2: Mapa conceptual de la Sustentabilidad *82*
Figura 4.2.1: Imagen representativa del Proyecto. *88*
Figura 4.4.1 Ejemplo de un fragmento del código. *99*
Figura 4.4.2: Arquitectura del Sistema. *100*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.3.1.1: Tabla comparativa de Sensores en la Industria *24*
Tabla 2.4.3.1:Tabla de Comparación entre métodos de dosificación. *30*
Tabla 2.6.6.1 : Componentes necesarios para el proyecto. *40*
Tabla 3.1.2.1: Especificaciones Técnicas del Producto. *45*
Tabla 3.3.2.1: Especificaciones Técnicas del Sensor de espuma UWT. *56*
Tabla 3.4.4.1: Componentes necesarios para la medición. *72*
Tabla 3.4.5.1: Componentes del Sistema de Skid de dosificación. *75*
Tabla 3.5.1.1: Diferencia de control on/off y PID *78*
Tabla 3.5.2.1: Entradas requeridas para el control Skid. *79*
Tabla 3.5.2.2: Salidas requeridas para actuación del Skid. *79*

CAPITULO N°1: INTRODUCCION

1.1 CONTEXTUALIZACION

En la actualidad, la automatización industrial ha revolucionado la manera en que las industrias gestionan sus procesos, brindando no solo mayor precisión y eficiencia, sino también mejoras en seguridad y reducción de costos operativos. La automatización permite reducir la dependencia de la supervisión humana en tareas repetitivas y mejorar la capacidad de respuesta en tiempo real, lo cual resulta fundamental en sectores como el transporte y manipulación de productos líquidos, donde los errores pueden tener repercusiones importantes en términos de seguridad, calidad y costos. Las innovaciones en sensores y tecnologías de control permiten implementar soluciones que se ajusten dinámicamente a las condiciones operativas, eliminando riesgos y optimizando recursos.

En algunas industrias agropecuarias como por ejemplo es el caso de Terramar SBH, empresa ubicada en el sector parque industrial de Coronel, donde el proceso de carga de camiones, plantea un reto particular debido a la generación de espuma cuando el producto mezclado es transferido desde los estanques a través de tuberías hacia los camiones de carga.

La historia de Terramar SBH comienza en 2019 como una empresa chilena que se dedica a la fabricación de mezclas homogéneas de aceites para la industria acuícola, específicamente para alimentar peces. El objetivo principal de Terramar SBH es apoyar a la industria chilena, proporcionando productos que faciliten la producción de alimento balanceado para peces. La empresa se encuentra en el Parque Empresarial Escuadrón en Coronel, Región del Biobío, Chile.

Aspectos destacados de la historia de Terramar SBH:

- **Fundación:** 2019.
- **Ubicación:** Coronel, Región del Biobío, Chile.
- **Actividad:** Producción de mezclas homogéneas de aceites para alimento para peces.
- **Objetivo:** Apoyar a la industria acuícola chilena, ofreciendo soluciones que simplifiquen la formulación de alimentos y la cadena de suministro.
- **Servicios:** La empresa busca complementar y apoyar en la reducción de costos de formulación de alimentos, la incorporación de nuevos ingredientes líquidos y la simplificación de procesos de producción.
- **Localización:** Calle B Lote 12, Parque Empresarial Escuadrón.

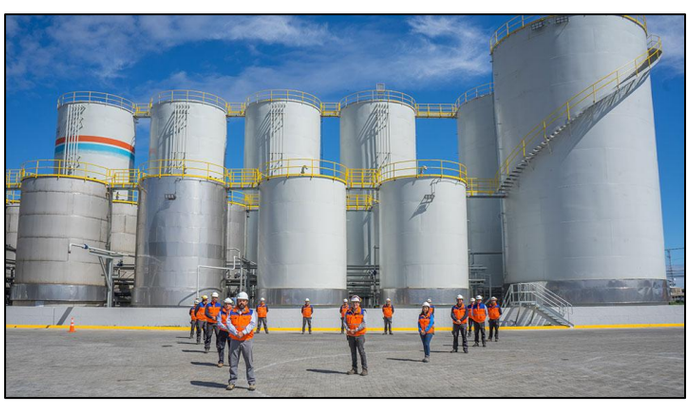


Figura 1.1-1: Empresa Terramar SBH en Coronel.

1.2 DEFINICION DEL PROBLEMA

Hoy en día existe un problema en el proceso de carga de camiones con productos líquidos o semilíquidos el cual presentan un gran desafío significativo debido a la generación de espuma durante el llenado de sus materias primas. Este fenómeno ocurre cuando el producto, al ser transportado por tuberías y descargado en los camiones, forma burbujas y espuma debido a la turbulencia del flujo y las propiedades del material. La acumulación de este burbujeo puede provocar rebalses, lo que resulta en pérdidas de producto, contaminación del entorno de trabajo, tiempos muertos en el proceso y mayores costos operativos.

Actualmente, la supervisión de este fenómeno depende principalmente de operadores humanos, quienes deben estar atentos para interrumpir manualmente el flujo de producto al detectar un riesgo de rebalse. Este método no solo es ineficiente, sino que también introduce riesgos asociados a errores humanos, tiempos de respuesta inadecuados y fatiga del operador. Además, el monitoreo constante incrementa los costos laborales y limita la capacidad de optimización en plantas con altos volúmenes de carga o múltiples estaciones de llenado.

Por tanto, es necesario desarrollar un sistema que permita controlar y mitigar de manera eficiente y automatizada la generación de espuma durante el llenado. Un sistema de llenado inteligente con capacidad para detectar tanto el nivel del producto como el de la espuma podría eliminar la dependencia de supervisión constante, reducir los riesgos de rebalse y optimizar el proceso en términos de tiempo, seguridad y costos. Este problema plantea la necesidad de una solución tecnológica que permita abordar estas limitaciones en el contexto industrial.



Figura 1.2-1:Camión en Rebalse de Espuma**.**

1.3 SOLUCION A LA PROBLEMATICA

Para resolver el problema de la generación y rebalse de espuma durante la carga de camiones en determinado proceso industrial agropecuario, se propone un enfoque sistemático que incluye un análisis y estudio de la generación de espuma, buscando lograr así una solución con las tecnologías que existen hoy en día para una implementación exitosa como lo podría ser un agente antiespumante. La solución, combinar un sistema de llenado inteligente basado en sensores y un sistema de control el cual permita cumplir los objetivos establecidos.

El primer paso es analizar las causas de la formación de espuma, comprendiendo los factores que contribuyen a este fenómeno, como las propiedades físicas del producto, la velocidad de flujo y la geometría de las tuberías y estanques. Este análisis permitirá identificar patrones y situaciones críticas para proponer soluciones específicas de la industria propiamente tal.

A partir del análisis, se realizará la selección de sensores adecuados para el proceso de carga, capaz de leer y diferenciar entre el líquido y la espuma. Estos sensores serán elegidos en función de su sensibilidad, precisión, compatibilidad con los productos manejados y su capacidad para funcionar en entornos industriales. La incorporación de estas tecnologías permitirá monitorear los niveles de espuma y líquido en tiempo real, brindando datos confiables para el control del proceso.

Con base a los sensores seleccionados, se diseñará un sistema automático de llenado, compuesto por una unidad de control conectada a válvulas neumáticas. Este sistema interrumpirá el flujo de forma autónoma cuando los niveles de espuma o líquido alcancen el límite establecido, eliminando la necesidad de supervisión manual. Además, el sistema estará programado para optimizar el flujo de producto, reduciendo la turbulencia que genera espuma.

Finalmente, se dará a conocer un producto químico específico para el control de agentes espumantes en conjunto con sistema de dosificación, dando así una solución alternativa para los procesos señalados, prometiendo una mejora significativa para el llenado de camiones sin ningún tipo de rebalse.

Con estas soluciones, se espera lograr un control efectivo del rebalse por espuma, reduciendo pérdidas de producto, optimizando la eficiencia operativa y mejorando la seguridad en los procesos industriales. Además, esta implementación proporcionará una base tecnológica adaptable a otros contextos industriales, promoviendo la automatización y la sostenibilidad.



Figura 1.3-1: Problemáticas a Solucionar en Terramar.

1.4 ALCANCE

El alcance de este estudio se centra en el estudio teórico de la generación de espuma en procesos industriales durante la carga de camiones y en el diseño conceptual de una solución automatizada basada en un sistema de llenado inteligente. Cabe señalar, que en la industria existen muchos procesos de llenado de camiones pero que, en este caso, se basa en productos agropecuarios, por ende, puede variar a los cientos de procesos que se viven día a día en cada sector industrial.

Para lograr este objetivo, se realizará un análisis detallado de las condiciones particulares de la operación en la empresa seleccionada, tomando en cuenta las características del producto a cargar, las condiciones de las instalaciones y las limitaciones tecnológicas actuales. Además, la propuesta se orientará a identificar las mejores prácticas y tecnologías que puedan ser adaptadas a esta empresa, sin necesariamente generalizar la solución a otras compañías del sector.

Por un lado, se presentará un innovador producto químico, el cual ha sido analizado y desarrollado específicamente para el control de la formación de espuma en determinado proceso industrial. Este producto actúa como un agente anti-espumante y se puede dosificar mediante pequeñas micro-dosis, asegurando un control preciso. Para su aplicación, se incorpora un sistema de dosificación tipo skid, que ofrece una solución alternativa y eficiente para el manejo de agentes espumantes en los productos agropecuarios.

Por otro lado, el alcance práctico de este trabajo abarca la validación digital de la arquitectura de control mediante el desarrollo de un Gemelo Digital (Digital Twin) interactivo. Esta herramienta emula la estación de carga en un entorno web 3D y establece una comunicación bidireccional en tiempo real mediante el protocolo Modbus TCP con un controlador lógico programable (PLC) simulado. Esto limita la fase de pruebas a una validación del tipo "Software in the Loop" (Simulación Integrada), lo que permite comprobar las reglas de seguridad, los interbloqueos y las respuestas ante contingencias operativas de forma completamente virtual, sin abarcar la compra de instrumentación física, el montaje de tableros o el comisionamiento en terreno.

Con esta propuesta, se busca proporcionar una solución profesional, respaldada por las bases teóricas adecuadas y validada digitalmente de forma rigurosa, que sirva como fundamento seguro y libre de riesgos para la futura implementación y construcción física del sistema en el ámbito industrial.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de llenado autónomo y seguro que permita mitigar la generación y el rebalse de espuma durante la carga de camiones en procesos industriales agropecuarios, mediante la integración de sensores capacitivos, control de flujo y la dosificación de agentes antiespumantes, optimizando así la eficiencia operativa y reduciendo las pérdidas de producto.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- **Analizar** los factores que influyen en la formación de espuma durante el llenado de camiones en la industria agropecuaria, considerando las propiedades físicas del producto, la velocidad de flujo y las condiciones operativas.
- **Seleccionar** un sensor adecuado capaz de diferenciar entre líquido y espuma, considerando su sensibilidad, como así también otros sensores de flujo y posición para así lograr la precisión y compatibilidad con el entorno industrial.
- **Diseñar** un sistema de control automatizado que regule el flujo de producto en función de los niveles detectados de espuma y líquido, minimizando la intervención humana.
- **Evaluar** el impacto de la incorporación de un agente anti-espumante en la reducción de la generación de espuma, considerando su compatibilidad con el producto y su eficiencia en dosis controladas.
- **Proponer** un modelo conceptual de implementación de la solución en la empresa seleccionada, considerando las condiciones operativas, las tecnologías disponibles y las mejores prácticas del sector.
- **Demostrar** la viabilidad del sistema de llenado inteligente mediante un análisis comparativo con los métodos actuales, evaluando su efectividad en la reducción de rebalses, tiempos muertos y costos operativos.
- **Simular** la lógica de control y los interbloqueos de seguridad del sistema diseñado mediante el uso de un Gemelo Digital (Digital Twin) interactivo en entorno web, utilizando comunicación Modbus TCP para simular el proceso de llenado y contingencias de forma segura previo a su implementación física.

CAPITULO N°2: ESTUDIO Y MARCO TEORICO DEL PROBLEMA

2.1 GENERACION TDE ESPUMAS EN PROCESOS INDUSTRIALES

En la industria agropecuaria moderna, los procesos industriales juegan un rol fundamental para asegurar la eficiencia, calidad y seguridad en la producción y distribución de diversos productos líquidos, tales como fertilizantes, alimentos líquidos para animales, aditivos nutricionales o subproductos agrícolas. Un problema recurrente en estos procesos es la formación de espuma, especialmente durante el llenado de camiones cisterna. Este fenómeno no solo reduce la eficiencia del proceso, sino que también puede provocar pérdidas económicas, riesgos operativos y la necesidad de intervención manual no planificada.

La espuma es una estructura coloidal compleja, compuesta por una fase gaseosa dispersa en una fase líquida continua. Se forma cuando el gas queda atrapado en burbujas separadas por delgadas películas líquidas, generalmente estabilizadas por la presencia de tensioactivos. En la práctica industrial agropecuaria, la espuma suele generarse durante la transferencia de fluidos mediante tuberías, donde la agitación, el bombeo y otros factores físicos propician la incorporación de aire en el líquido.

2.1.1 Naturaleza y Formación de la Espuma

Desde un punto de vista físico-químico, la espuma se forma cuando un gas (usualmente aire), es dispersado en un líquido bajo condiciones que permiten la estabilidad de las burbujas. Esta estabilidad está fuertemente influenciada por la presencia de tensioactivos, que reducen la tensión superficial del líquido, permitiendo que las burbujas persistan por más tiempo antes de colapsar. En la industria agropecuaria, muchos productos líquidos contienen compuestos orgánicos naturales como proteínas, lípidos o aditivos que actúan como estabilizadores de espuma.

Además, la formación de espuma se ve favorecida por las condiciones de flujo y transferencia. La turbulencia generada por bombas, válvulas o codos en las tuberías puede atrapar aire dentro del líquido. Si a esto se suman temperaturas elevadas o presiones bajas comunes en procesos al aire libre o durante etapas de transferencia, la formación de espuma se intensifica considerablemente.

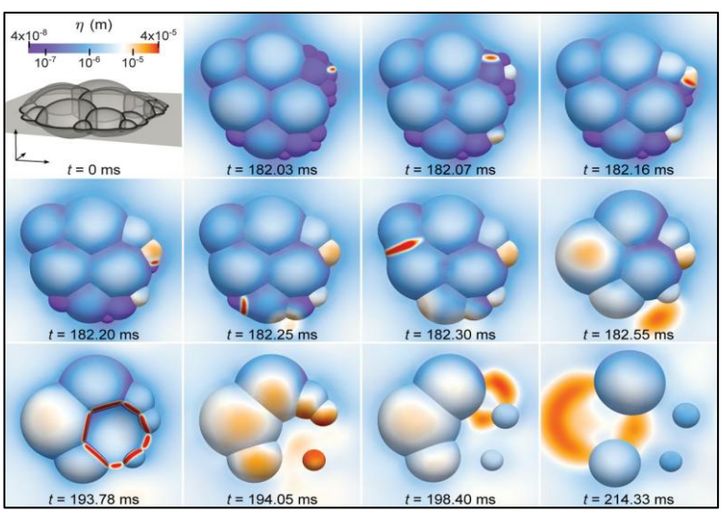


Figura 2.1-1:Simulación numérica multiescala de las burbujas en la Espuma.

2.1.2 Causas Principales de la Formación de Espuma

Los factores que contribuyen a la formación de espuma en contextos agroindustriales pueden agruparse en tres categorías principales:

1. **Propiedades del Producto:**

   - Tensioactivos naturales o añadidos: Los compuestos presentes en los productos agropecuarios (como proteínas, emulsionantes o agentes de conservación) actúan como estabilizadores de espuma.
   - Viscosidad del fluido: Líquidos más viscosos tienden a formar burbujas más estables, dificultando el colapso de la espuma.

2. **Condiciones de operación:**

   - Velocidad y turbulencia del flujo: Flujos rápidos y con cambios bruscos de dirección inducen la formación de burbujas por arrastre de aire.
   - Temperatura y presión: Altas temperaturas disminuyen la tensión superficial, mientras que presiones bajas facilitan la expansión del aire en el líquido.

3. **Diseño del sistema de transferencia:**

   - Geometría de las tuberías: Codos, válvulas de cierre rápido y reducciones de diámetro promueven la turbulencia.
   - Configuración del estanque de destino: El ángulo y la altura de entrada del líquido pueden impactar significativamente la generación de espuma.

4. **Métodos de Control de Espuma:**

Para mitigar los efectos negativos de la espuma en la industria agropecuaria, se han desarrollado diferentes estrategias de control, tanto a nivel químico como tecnológico:

- ✓ Ajuste de parámetros operativos
  La regulación de variables como la velocidad de bombeo, la presión de operación y la temperatura del proceso puede reducir significativamente la formación de espuma. Esto requiere un análisis previo de cada línea de carga, identificando los puntos críticos donde se produce mayor agitación.

- ✓ Uso de agentes antiespumantes
  Los antiespumantes son productos químicos diseñados para romper las burbujas o evitar su formación. Su eficacia depende del tipo de producto líquido, la temperatura, y la compatibilidad con el resto del proceso. En el sector agropecuario, su uso debe estar cuidadosamente regulado para evitar contaminaciones o efectos indeseados en el producto final.

2.2 AGENTES ANTI-ESPUMANTES

En numerosos procesos industriales, la formación de espuma es un fenómeno indeseado que puede interferir significativamente con la eficiencia operativa, la calidad del producto final y la seguridad del proceso. La espuma suele formarse cuando se introducen gases (como aire) en líquidos que contienen compuestos estabilizantes, como tensioactivos, proteínas o ciertos aditivos químicos. Este fenómeno es especialmente común en industrias que procesan productos líquidos, tales como la alimentaria, farmacéutica, papelera, petroquímica y agropecuaria.

Una de las estrategias más efectivas para combatir la formación excesiva de espuma es el uso de agentes antiespumantes, también conocidos como defoaming agents o espumocidas. Estos compuestos químicos están diseñados para prevenir la formación de espuma o para eliminarla una vez que se ha generado, contribuyendo así al control eficiente del proceso.

2.2.1 Definición y Principio de Funcionamiento

Un antiespumante es una sustancia química que reduce o elimina la espuma presente en sistemas líquidos. Actúa interfiriendo con la estabilidad de las burbujas que componen la espuma, rompiendo las películas líquidas que las rodean o impidiendo su formación desde el inicio.

El mecanismo de acción se basa en varios principios físicos:

- Reducción de la cohesión de la película líquida que forma la burbuja.
- Desplazamiento del agente estabilizante (como tensioactivos) en la superficie de la burbuja.
- Creación de una diferencia de tensión superficial que favorece el colapso de la burbuja.
- Aumento del drenaje de líquido en la pared de la burbuja, debilitándola y haciéndola más propensa a romperse.

Estos mecanismos pueden actuar de manera individual o combinada, dependiendo del tipo de antiespumante utilizado y de las condiciones del proceso.

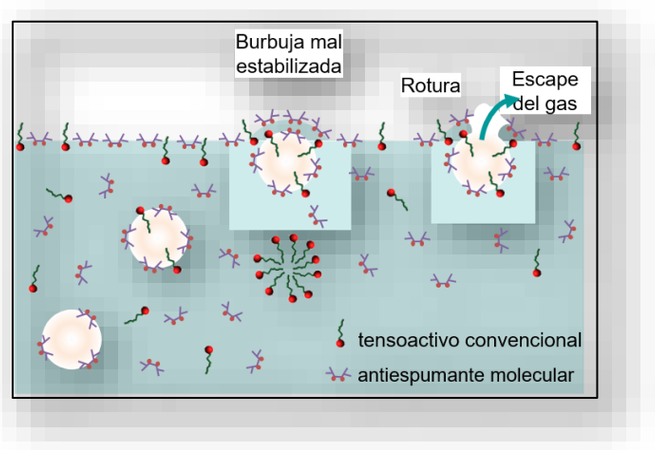


Figura 2.2-1: Ejemplo de Agentes Anti-Espumantes.

2.2.2 Tipos de Agentes Antiespumantes

Existen diversos tipos de antiespumantes, clasificados según su composición química y su aplicación específica. A continuación, se detallan los principales grupos:

a) Antiespumantes a base de aceite:

Son mezclas de aceites (como aceite mineral, vegetal o de silicona) con partículas hidrofóbicas dispersas. Son ampliamente utilizados por su alta eficacia y bajo costo.

- Ejemplos: Aceite mineral con sílice hidrofóbico.
- Ventajas: Buena estabilidad, efecto inmediato.
- Uso común: Industrias de tratamiento de aguas, papel y agroindustria.

b) Antiespumantes de silicona

Contienen polímeros de silicona como el polidimetilsiloxano, con partículas finamente dispersas que desestabilizan las burbujas.

- Alta eficacia a bajas concentraciones.
- Compatibles con diversos medios líquidos.
- Tienen acción prolongada.

c) Antiespumantes a base de agua

Son emulsiones que contienen pequeñas cantidades de aceites, ceras o siliconas dispersas en una base acuosa. Son menos agresivos y más seguros en aplicaciones alimentarias o medioambientales.

- Ejemplos: Emulsiones de siliconas o aceites vegetales en agua.
- Uso común: Procesos donde se requiere bajo impacto ambiental.

d) Antiespumantes sólidos

Utilizados en formulaciones secas o donde se aplican en polvo. Actúan por contacto directo con la superficie espumosa.

- Uso: Fertilizantes granulados, alimentos secos, detergentes en polvo.

e) Antiespumantes naturales o biológicos

Basados en sustancias de origen vegetal o microbiano. Aunque su uso es más limitado, son importantes en procesos donde se requiere certificación ecológica u orgánica.

- Ejemplos: Aceites esenciales, extractos vegetales.

2.2.3 Criterios de Selección de un Antiespumante

Elegir el antiespumante adecuado depende de múltiples factores:

- Naturaleza del producto procesado: pH, viscosidad, temperatura, compatibilidad química.
- Tipo de espuma: persistente, transitoria, estable.
- Condiciones del proceso: velocidad de flujo, tipo de agitación, presión, temperatura.
- Regulación y toxicidad: en industrias alimentarias, farmacéuticas o agropecuarias, los antiespumantes deben ser seguros y cumplir normativas locales e internacionales.
- Impacto ambiental: biodegradabilidad y toxicidad acuática son aspectos relevantes, especialmente en plantas de tratamiento de efluentes o industrias con compromiso sustentable.

2.2.4 Aplicación de Antiespumantes en la Industria Agropecuaria

En el sector agropecuario, el uso de antiespumantes es especialmente importante en procesos de formulación, almacenamiento y transporte de productos líquidos, como fertilizantes líquidos, bioestimulantes, mezclas nutricionales y aditivos.

Uno de los principales problemas operativos en este entorno ocurre durante el llenado de camiones cisterna, donde la agitación del producto durante la carga, junto con la presencia de compuestos orgánicos, genera una gran cantidad de espuma. Esta situación puede llevar al rebalse del estanque, pérdida de producto y detenciones en el proceso.

El uso de antiespumantes en estos casos se ha vuelto una práctica común para:

- Prevenir la formación de espuma durante la transferencia.
- Asegurar una medición precisa del nivel de producto en estanques.
- Disminuir la necesidad de intervención manual, mejorando la seguridad operativa.
- Optimizar los tiempos de carga y aumentar la eficiencia general del sistema.

2.2.5 ¿Qué elementos debo considerar al momento de adquirir un antiespumante?

En términos generales, se deben considerar los siguientes puntos al elegir un fabricante de antiespumantes:

1. Calidad del producto: en primer lugar, debe considerar si la calidad del producto de la fábrica de agentes antiespumantes cumple con sus requisitos. Puede comprobar si el fabricante tiene certificaciones de calidad relevantes y si hay comentarios de otros clientes.

2. Servicio posventa: un buen servicio posventa puede ayudarlo a resolver los problemas encontrados durante el uso y brindarle el soporte técnico necesario.

3. Precio: El precio también es uno de los factores a considerar. Por supuesto, no es que cuanto más bajo sea el precio, mejor, pero la rentabilidad debe considerarse de manera integral.

Además, algunos sistemas automatizados permiten la dosificación controlada de antiespumante mediante sensores que detectan la presencia de espuma, activando válvulas o bombas dosificadoras solo cuando es necesario. Esto reduce el consumo de producto químico y mejora la sustentabilidad del proceso.

2.2.6 Consideraciones en alteración del producto final.

Aunque los agentes antiespumantes son ampliamente utilizados y altamente efectivos para controlar la formación de espuma en procesos industriales, su uso inadecuado o excesivo puede provocar alteraciones en el producto final, afectando su calidad, funcionalidad o cumplimiento normativo. Esta preocupación es especialmente relevante en industrias sensibles como la agropecuaria, alimentaria, farmacéutica y cosmética, donde la integridad del producto es esencial.

1) **Alteraciones Físicas**

- Cambios en la viscosidad: Algunos antiespumantes, en especial los de base oleosa o silicona, pueden modificar la reología del producto, haciéndolo más viscoso o afectando su comportamiento de flujo, lo que influye en su aplicación o manejo posterior.
- Modificación del aspecto: El uso excesivo puede generar turbidez, separación de fases, sedimentos o capas flotantes en productos líquidos, lo cual puede ser percibido como un defecto visual o de calidad.
- Incompatibilidad con otras sustancias: En formulaciones complejas, el antiespumante puede reaccionar con ciertos aditivos, emulsionantes o nutrientes, disminuyendo su efectividad o causando precipitados.

2) **Alteraciones Químicas**

Contaminación cruzada: Si el antiespumante contiene sustancias no compatibles con el producto o residuos industriales, puede contaminar la mezcla, especialmente en procesos de grado alimentario o agrícola certificado.

- Descomposición o degradación: A temperaturas elevadas o en presencia de agentes oxidantes, algunos antiespumantes pueden degradarse y liberar compuestos no deseados, afectando la estabilidad del producto final.

3) Alteraciones Funcionales

- Pérdida de propiedades del producto: En productos agropecuarios como bioestimulantes, fertilizantes líquidos o suplementos nutricionales, la interacción con antiespumantes puede alterar el pH, la solubilidad de los nutrientes o la biodisponibilidad de ciertos compuestos.
- Inhibición de microorganismos beneficiosos: En productos con cultivos vivos (como biofertilizantes o inoculantes), ciertos antiespumantes pueden actuar como biocidas, afectando la viabilidad de microorganismos esenciales para la función del producto.

4) Alteraciones Normativas y Comerciales

- Problemas de etiquetado o certificación: En productos destinados a la agricultura orgánica o bajo certificaciones específicas, el uso de antiespumantes no autorizados puede hacer que el producto final pierda su estatus regulado, generando problemas comerciales y legales.
- Rechazo del cliente o consumidor: La presencia de residuos visibles, mal olor o textura alterada debido al uso inadecuado de antiespumantes puede provocar el rechazo por parte del consumidor final o del operador agrícola.

5) Prevención de Alteraciones

Para minimizar los riesgos de alteración en el producto final, se deben considerar las siguientes recomendaciones:

- Ensayos previos de compatibilidad: Probar el antiespumante en condiciones reales del proceso para verificar su comportamiento en la formulación.
- Uso de dosis mínimas efectivas: Dosificar solo la cantidad necesaria para controlar la espuma sin exceder los límites recomendados por el fabricante.
- Selección adecuada del tipo de antiespumante: Elegir productos formulados específicamente para el tipo de industria y aplicación.
- Verificación de normativas: Asegurarse de que el antiespumante esté aprobado por las autoridades sanitarias o agrícolas correspondientes, según la aplicación del producto.
- Automatización del proceso: Integrar sistemas de detección de espuma con dosificación automática permite controlar con precisión el uso de antiespumantes, evitando excesos y asegurando la uniformidad del proceso.

2.3 TIPOS DE SENSORES E INSTRUMENTACION NECESARIA PARA EL CONTROL DE SISTEMA DE LLENADO

2.3.1 ¿Qué es un Sensor y Cuál es su Función?

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar cambios físicos, químicos o biológicos en su entorno y convertirlos en señales eléctricas que pueden ser interpretadas por un sistema de control, una interfaz humana o un proceso automatizado. Su función principal es medir una variable específica (como temperatura, presión, nivel, flujo, humedad, etc.) y traducir esa información en datos útiles para monitoreo, control o toma de decisiones.

En los sistemas industriales, los sensores son componentes fundamentales de la automatización, ya que permiten:

- ✓ Detectar condiciones específicas del proceso.
- ✓ Activar o desactivar equipos (válvulas, bombas, alarmas).
- ✓ Aumentar la seguridad operativa.
- ✓ Mejorar la eficiencia y calidad del producto final.
- ✓ Disminuir la intervención manual
- ✓ Sensores más usados en la Industria.

En la industria moderna, los sensores juegan un papel fundamental en la automatización, el control de procesos y la mejora de la eficiencia. Existen muchos tipos de sensores, pero algunos son especialmente comunes debido a su versatilidad, confiabilidad y bajo costo. A continuación, se describen los tipos de sensores más utilizados:

Tipo de Sensor	Que mide o Detecta	Aplicación Típica
Sensor Inductivo	Presencia de objetos metálicos.	Posición de piezas, automatización.
Sensor Capacitivo	Presencia de objetos (metálicos o no), líquidos o polvos.	Nivel en tanques, presencia de materiales.
Sensor Fotoeléctrico	Presencia de Luz.	Conteo de cintas, detección sin contacto.
Sensor Ultrasónico	Distancia / Nivel mediante sonido.	Medición de nivel de líquidos o sólidos.
Sensor de temperatura (termopar / RTD)	Temperatura de procesos.	Calderas, hornos, monitoreo de equipos.
Sensor de Presión	Presión de gases o líquidos.	Hidráulica, neumática, procesos industriales
Sensor de flujo (caudal)	Flujo de líquidos o gases.	Control de dosificación, tuberías.
Sensor de Nivel	Nivel de líquidos o solidos en estanques.	Control de llenado y vaciado.
Sensor de proximidad. (hall)	Campo Magnético /posición.	Motores, cilindros neumáticos.

Tabla 2.3.1.1: Tabla comparativa de Sensores en la Industria

2.3.2 ¿Qué sensores se necesita para el sistema inteligente de llenado?

Para implementar un sistema inteligente de llenado en camiones cisterna que garantice seguridad, eficiencia y control ante posibles rebalses, se requiere la integración de tres sensores clave. Cada uno cumple una función específica dentro del proceso automatizado, permitiendo al sistema tomar decisiones en tiempo real:

1. Sensor de Visión inteligente (posición del camión cisterna)

Este sensor tiene como objetivo detectar si el camión cisterna está correctamente alineado con la válvula de carga y con su escotilla abierta. Funciona mediante una señal digital o con el protocolo de comunicación IO-link y al detectar la presencia del camión en la posición correcta, puede activar un semáforo en verde**,** por ejemplo, para que el operador sepa que puede abrir la escotilla de forma segura. Solo cuando este sensor esté en estado ON, se permitirá al sistema iniciar el proceso de carga, lo cual evita errores operativos y posibles derrames desde el inicio.

2. Sensor capacitivo (detección de espuma)

Este es el sensor principal del sistema, ya que cumple la función crítica de detectar la presencia de espuma en el interior del camión durante el llenado. A diferencia de sensores tradicionales, el modelo capacitivo de UWT puede diferenciar entre producto líquido (aceite u otro) y espuma, lo que permite un control mucho más preciso del nivel real del contenido. Cuando detecta espuma en el límite preestablecido, envía una señal al sistema de control que activa el cierre de una válvula neumática, deteniendo automáticamente el flujo del producto y evitando el rebalse. Esto elimina la necesidad de supervisión manual y mejora la seguridad del proceso.

- ¿Qué es un Sensor Capacitivo?

Un sensor capacitivo mide la capacitancia (capacidad de almacenar carga eléctrica) de un objeto cercano o en contacto. Esta propiedad cambia según el tipo de material, su densidad y su proximidad al sensor.

- Cuando el sensor está en contacto con aire, registra una capacitancia baja.
- Cuando detecta un líquido, la capacitancia aumenta debido a la mayor constante dieléctrica del líquido.
- La espuma, al ser una mezcla aire-líquido, tiene una capacitancia intermedia, lo cual puede ser detectado y diferenciado del producto líquido puro.

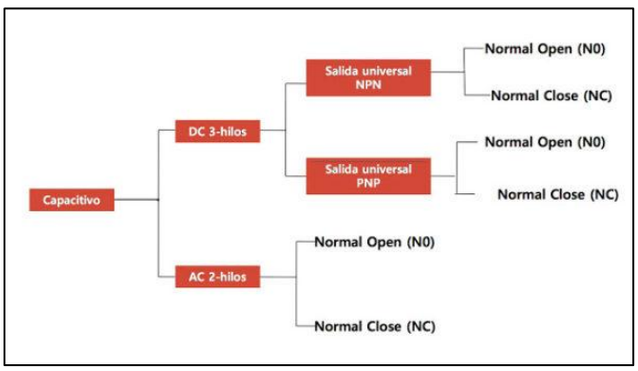


Figura 2.3-1: sensores capacitivos de VCD y VCA

3. Sensor de flujo o Caudalímetro (medir la cantidad de producto vs antiespumante)

Este sensor se encarga de medir en tiempo real la cantidad de producto que está siendo transferido al camión, expresada caudal, toneladas y litros. Esta información no solo permite monitorear el volumen cargado, sino que también sirve como base para una posible dosificación automática de agentes antiespumantes, el cual puede ser aplicado según una fórmula predefinida (por ejemplo, cierta cantidad de antiespumante por litro cargado). De este modo, se optimiza el uso de aditivos y se contribuye aún más a evitar la generación excesiva de espuma.

En conjunto, estos tres sensores conforman un sistema de control robusto, automatizado y confiable, capaz de prevenir rebalses, reducir la intervención humana y mejorar la trazabilidad del proceso de carga en la industria agropecuaria e industrial.

2.3.3 Necesidad de Detectar Espuma en la Industria Agropecuaria

Durante el llenado de camiones en plantas agroindustriales, se generan condiciones de agitación que favorecen la formación de espuma. Esta puede causar rebalses, errores en la medición de niveles, pérdida de producto y tiempos de espera en la operación. La detección manual no siempre es efectiva, por lo que se requiere una solución automatizada que permita:

- Detectar la presencia de espuma en tiempo real.
- Activar sistemas de corte de flujo o dosificación de antiespumante.
- Minimizar errores humanos y pérdidas materiales.

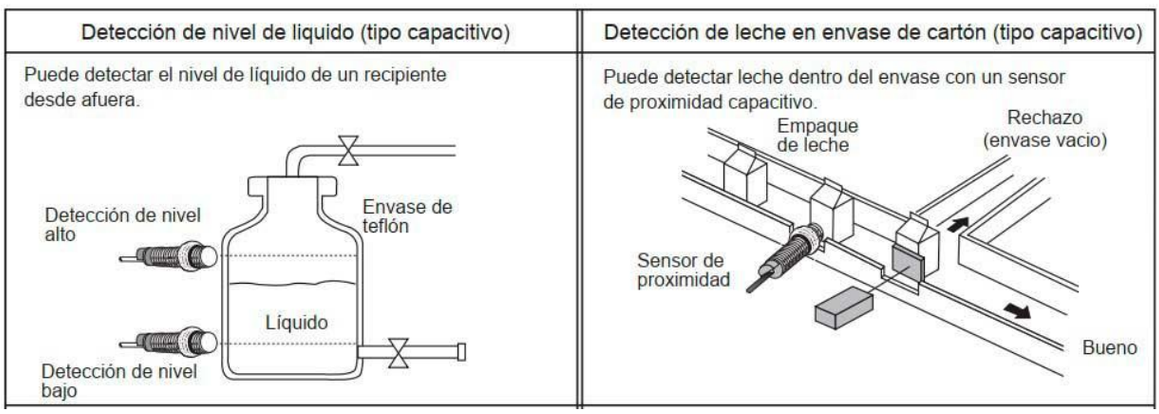


Figura 2.3-2: Ejemplos de detección sensor capacitivo.

✓ **Ventajas del Sensor Capacitivo para Detección de Espuma UWT.**

- Sin contacto físico directo (opcional): se pueden instalar en el exterior de tuberías o tanques.
- Alta sensibilidad a cambios dieléctricos, lo que permite diferenciar entre líquido, aire y espuma.
- Versatilidad: funcionan en líquidos conductivos o no conductivos, y en entornos con presencia de químicos o variaciones de temperatura.

- Respuesta rápida: útil para aplicaciones en tiempo real, como detener el flujo en un sistema de carga de camiones.
- Bajo mantenimiento: no tienen partes móviles, lo que los hace duraderos en ambientes industriales.

✓ **Aplicación del Sensor Capacitivo en la Planta Agropecuaria**

En este contexto, el sensor capacitivo puede ser instalado en el cuello de carga del estanque o en una zona crítica de rebalse. Su función sería:

a) Monitorear continuamente el nivel del producto y la presencia de espuma.

b) Detectar anticipadamente la llegada de espuma al punto de referencia.

c) Enviar una señal al sistema de control o a una válvula automática para detener la carga.

d) Opcionalmente activar una bomba dosificadora de antiespumante si el sistema lo requiere.

2.3.4 Alternativas Adicionales

Aunque el sensor capacitivo es la opción más recomendada, existen otras tecnologías que podrían considerarse, dependiendo de las características del proceso:

- Sensores ópticos: Detectan espuma por reflexión o dispersión de luz. Requieren línea de visión limpia, lo cual lo hace difícil por las características contaminantes del aceite.
- Sensores ultrasónicos: Miden el nivel y pueden detectar interferencias causadas por espuma, pero no la diferencian con alta precisión.
- Sensores de conductividad: Útiles si el líquido base es conductor, pero no siempre detectan espuma con certeza.

2.4 METODOS DE DOSIFICACION PARA AGENTES ANTIESPUMANTES

La correcta dosificación de agentes antiespumantes es fundamental para asegurar su eficacia en el control de espuma, evitando tanto el subdosificado (que podría no eliminar la espuma) como el sobredosificado (que puede alterar el producto final o incrementar innecesariamente los costos operativos).

En entornos industriales, especialmente en plantas agropecuarias donde el llenado de estanques o camiones genera una formación intensa de espuma, es esencial implementar sistemas de dosificación que sean precisos, automáticos y seguros.

A continuación, se presentan los principales métodos de dosificación utilizados para aplicar antiespumantes de forma controlada y eficiente.

2.4.1 Métodos de Dosificación en Procesos Industriales.

a) Dosificación Manual

Consiste en la adición del antiespumante de forma directa por parte del operador, generalmente vertiéndolo en el estanque o línea de proceso.

- Ventajas:
    - Económico y simple de implementar.
    - Útil en procesos esporádicos o de baja escala.
- Desventajas:
    - Riesgo de error humano (sobredosificación o insuficiencia).
    - No permite una respuesta inmediata a cambios de espuma.
    - No recomendable en procesos automatizados o continuos.

b) Dosificación por Bomba Dosificadora (individual)

Este método utiliza una bomba dosificadora eléctrica o neumática, que introduce el antiespumante al sistema en caudales definidos y regulables.

- Ventajas:
    - Mayor precisión en la cantidad dosificada.
    - Control automático mediante señal de sensores o PLC.
    - Puede programarse en función del volumen del proceso.
- Aplicaciones típicas:
    - Líneas de llenado continuo.
    - Sistemas con control de nivel o presión.

2.4.2 Sistemas de Dosificación Automática Integrada (Skid de Dosificación)

Un skid de dosificación es un sistema modular completamente integrado, diseñado para dosificar uno o varios productos químicos de manera precisa y segura. Incluye todos los componentes necesarios: bomba(s), tanque(s), válvulas, sensores, caudalímetros, PLC, sistema de agitación y panel de control.

- Componentes típicos:
    - Tanque de almacenamiento del antiespumante.
    - Bomba dosificadora de caudal regulable.
    - Tuberías y válvulas de seguridad.
    - Sensores de nivel, presión o flujo.
    - Sistema de control automático (PLC o panel HMI).
- Ventajas:
    - Alta precisión y repetibilidad.
    - Automatización total del proceso de dosificación.
    - Seguridad operativa (control de fugas, bloqueos, alarmas).
    - Capacidad de integración con sistemas SCADA o de monitoreo remoto.
    - Reducción significativa de errores humanos.
- Aplicaciones ideales:
    - Plantas agroindustriales con procesos continuos o por lotes.
    - Estaciones de carga de camiones con riesgo de rebalse por espuma.
    - Sistemas que requieren trazabilidad de consumo de productos químicos.



Figura 2.4-1: Ejemplo de Skid de dosificación

c) Dosificación por Inyección Directa en Línea

En este método, el antiespumante se inyecta directamente en la línea de proceso utilizando una boquilla o inyector, generalmente conectado a una bomba dosificadora.

- Ventajas:
    - Aplicación localizada en zonas críticas de formación de espuma.
    - Rápida respuesta y buena eficiencia con bajo consumo.
- Consideraciones:
    - Requiere estudiar el punto óptimo de inyección.
    - Puede combinarse con sensores de espuma para activación automática.

2.4.3 Dosificación por Control en Lazo Cerrado (Sistema con Sensor de Espuma)

Se trata de una dosificación completamente automatizada, activada solo cuando el sensor detecta presencia de espuma en el sistema. El sensor (capacitivo, óptico u otro) envía una señal al controlador, que activa la bomba dosificadora.

- Beneficios:
    - Máxima eficiencia: se dosifica solo cuando se necesita.
    - Evita sobredosificación y reduce el costo de insumos.
    - Permite el control en tiempo real del proceso.
- Requiere:
    - Sensor de detección de espuma confiable.
    - Sistema de control (PLC o relé lógico programable).
    - Integración con bomba dosificadora.

➢ Comparación entre Métodos de Dosificación.

Método	Precisión	Automatización	Costo	Aplicación Recomendada
Manual	Baja	No	Bajo	Procesos
Bomba Dosificadora	Media	Parcial	Medio	Llenado semiautomático
Skid de Dosificación	Alta	Completa	Alto	Plantas industriales
Inyección directa en línea	Alta	Parcial	Medio	Líneas continuas
Control en lazo cerrado (sensor)	Media	Completa	Medio-Alto	Sistemas críticos

Tabla 2.4.3.1:Tabla de Comparación entre métodos de dosificación.

2.5 SISTEMA DE COMUNICACIÓN Y CONTROL EN PLANTA TERRAMAR.

El sistema de control de la planta está diseñado para garantizar una operación eficiente, segura y automatizada del proceso. Este sistema se compone principalmente de un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) y de módulos de seguridad Allen Bradley POINT Guard I/O, que en conjunto permiten la supervisión, adquisición de datos y el control de las variables críticas de proceso.

El sistema SCADA actúa como interfaz principal entre los operadores y el proceso, permitiendo visualizar en tiempo real el estado de la planta, registrar datos históricos, generar alarmas y ejecutar comandos de control. A través de este sistema, se pueden monitorear parámetros como nivel de llenado, presión, temperatura y estado de los dispositivos de campo, facilitando la toma de decisiones operacionales.

Por otro lado, el sistema Allen Bradley POINT Guard I/O cumple un rol fundamental en la capa de seguridad y control físico. Este módulo de entradas y salidas digitales está diseñado específicamente para aplicaciones de seguridad funcional, permitiendo la conexión directa con sensores de nivel, interruptores de emergencia y válvulas de cierre rápido. La señal captada por estos dispositivos es enviada al POINT Guard I/O, el cual procesa y comunica dicha información al sistema SCADA mediante una red industrial (como EtherNet/IP), permitiendo así una respuesta oportuna ante condiciones de riesgo.

Esta arquitectura de control permite que cualquier evento, como la detección de espuma o niveles no deseados, pueda ser automáticamente gestionado, ya sea deteniendo el llenado, generando alarmas visuales y sonoras, o activando válvulas de cierre, todo sin necesidad de intervención manual inmediata. De esta forma, se mejora la seguridad del proceso, se reduce el riesgo de rebalses y se optimiza la eficiencia operativa.

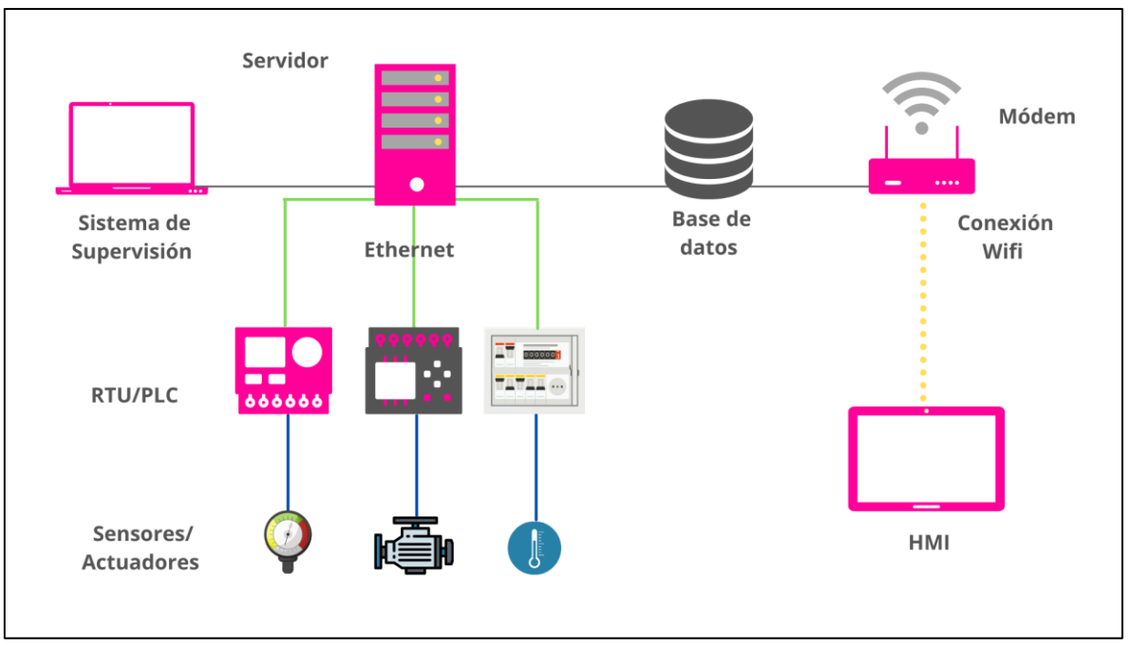


Figura 2.5 : Esquema de un sistema SCADA.

2.5.1 Comunicación Industrial mediante EtherNet/IP

El sistema de control de la planta utiliza EtherNet/IP como protocolo principal de comunicación entre los dispositivos de campo, los módulos de entradas/salidas y el sistema SCADA. EtherNet/IP es un protocolo industrial basado en el estándar Ethernet (IEEE 802.3) que permite la transmisión de datos en tiempo real y el control de dispositivos dentro de una red automatizada.

A diferencia del Ethernet convencional, que está diseñado para redes de oficina o internet, EtherNet/IP está optimizado para aplicaciones industriales, donde se requiere confiabilidad, velocidad y determinismo en la comunicación. Este protocolo pertenece a la familia de protocolos CIP (Common Industrial Protocol), lo que garantiza su compatibilidad con una amplia gama de dispositivos de automatización, incluyendo los fabricados por Rockwell Automation, como el POINT Guard I/O.

Dentro de la arquitectura de la planta, EtherNet/IP permite la conexión directa entre:

- El módulo Allen Bradley POINT Guard I/O, que recibe señales digitales de sensores y actuadores críticos del proceso.
- El sistema SCADA, que recopila esta información para su visualización, almacenamiento y análisis.
- Controladores lógicos programables (PLC) u otros dispositivos intermedios que procesan y ejecutan acciones en base a las señales recibidas.

Entre las ventajas principales de EtherNet/IP se encuentran:

- Alta velocidad de transferencia de datos, ideal para aplicaciones en tiempo real.
- Facilidad de integración con sistemas SCADA y HMI.
- Diagnóstico avanzado, que permite detectar fallas en dispositivos, cables o nodos de red.
- Flexibilidad en topología, permitiendo configuraciones en estrella, línea o anillo.

Gracias a EtherNet/IP, el sistema de control puede garantizar una comunicación eficiente entre todos los componentes, lo que permite la supervisión y control en tiempo real del proceso, así como una respuesta inmediata ante eventos críticos como rebalses por espuma o fallas en válvulas de cierre.

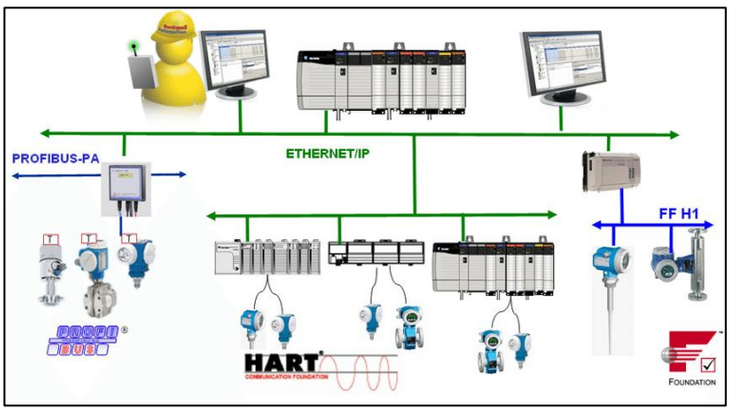


Figura 2.5-1: Flexibilidad Ethernet/IP en la Industria.

2.5.2 Tarjetas de Entradas y Salidas en el Sistema de Control

En el sistema de control de una planta industrial, las tarjetas de entradas y salidas (I/O) cumplen la función de interfaz entre el mundo físico (sensores y actuadores) y el sistema de control (PLC, SCADA). Estas tarjetas son dispositivos electrónicos que permiten captar señales provenientes del proceso (entradas) y enviar comandos de control hacia equipos o instrumentos (salidas).



Figura 2.5-2: POINT I/O-Module | Allen-Bradley

Tipos de señales:

1. Entradas digitales (DI): Detectan estados binarios, como encendido/apagado o abierto/cerrado. Por ejemplo, interruptores de nivel, sensores de posición o botones de parada de emergencia.
2. Entradas analógicas (AI): Capturan valores continuos como temperatura, presión o nivel, a través de señales en rangos típicos de 4-20 mA o 0-10 V.
3. Salidas digitales (DO): Activan dispositivos como válvulas solenoides, relés o alarmas.
4. Salidas analógicas (AO): Envían señales proporcionales a dispositivos que requieren un control continuo, como variadores de frecuencia o válvulas proporcionales.

Aplicación en el sistema

En esta planta, el módulo Allen Bradley POINT Guard I/O actúa como una tarjeta de entradas y salidas especializada en seguridad. Este módulo se comunica con el sistema SCADA y el PLC a través del protocolo EtherNet/IP y cumple funciones como:

- Recepción de señales desde sensores de nivel o detectores de espuma.
- Activación de salidas digitales para detener bombas, cerrar válvulas o activar alarmas.
- Supervisión continua del estado de los dispositivos de campo.

Estas tarjetas I/O permiten una conexión distribuida, es decir, se pueden ubicar físicamente cerca del proceso para reducir cableado y mejorar el tiempo de respuesta. Además, su integración con sistemas SCADA permite visualizar el estado de cada señal y realizar diagnósticos en tiempo real.

Ventajas de su uso:

- Flexibilidad en configuración: se pueden combinar módulos de DI, DO, AI y AO según la necesidad del proceso.
- Diagnóstico avanzado: en caso de fallos en cableado, sensores o actuadores, el sistema detecta y reporta la falla al operador.
- Seguridad: en el caso del POINT Guard I/O, se cumple con normativas de seguridad funcional (como SIL o PL), reduciendo el riesgo de fallos peligrosos.

2.6 INTEGRACION DE IO-LINK PARA LA INDUSTRIA 4.0

Introducción

La eficiencia y confiabilidad en los procesos industriales dependen en gran medida de la capacidad de monitorear y controlar con precisión cada etapa del sistema. En este sentido, el protocolo de comunicación IO-Link ha ganado relevancia en la automatización moderna, gracias a su capacidad para mejorar la interoperabilidad, reducir tiempos de instalación y facilitar el mantenimiento. Este capítulo describe el funcionamiento de IO-Link, sus beneficios y la justificación de su integración en el sistema de control de llenado autónomo propuesto para evitar el rebalse por espuma en el proceso de carga de camiones cisterna.

2.6.1 ¿Qué es IO-Link?

IO-Link es un protocolo de comunicación digital punto a punto estandarizado internacionalmente (IEC 61131-9) para conectar sensores y actuadores inteligentes a sistemas de automatización. A diferencia de las señales digitales convencionales (ON/OFF), IO-Link permite una comunicación bidireccional que transfiere no solo señales de control, sino también datos de diagnóstico, parámetros de configuración y monitoreo en tiempo real.

Aclamado como la columna vertebral de la Industria 4.0 y la fábrica inteligente. El maestro IO-Link puede transmitir estos datos a través de varios buses de campo, como Profibus, Profinet o Ethernet IP, haciendo que los datos sean accesibles para una acción inmediata o un análisis a largo plazo a través diferentes sistemas como PLC, HMI, etc.

Los parámetros de los sensores y actuadores son únicos para cada dispositivo y cada tecnología y estos están almacenados en un archivo de IODD (IO Device Description) en el formato estándar XML.

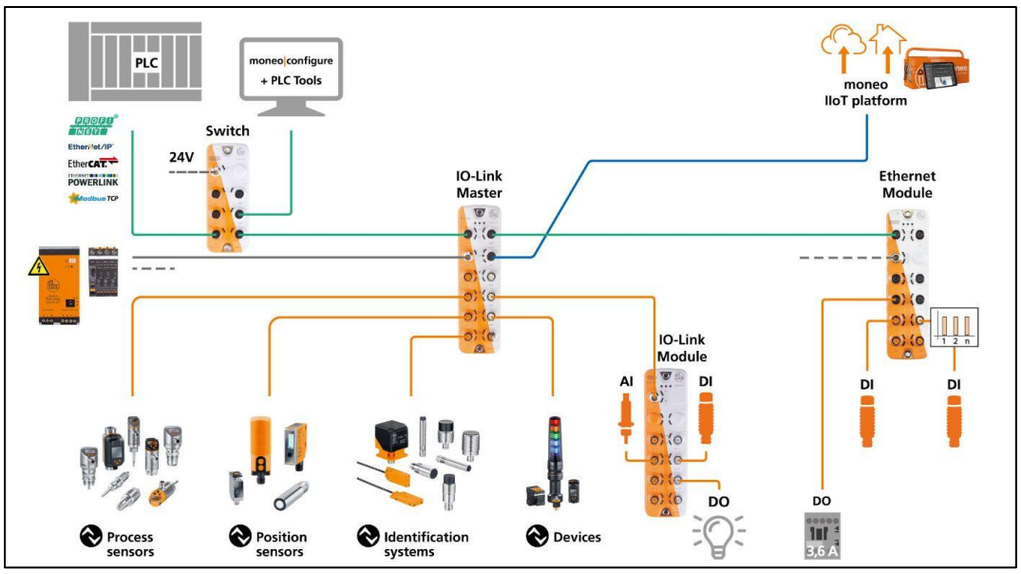


Figura 2.6-1 Esquema representativo de IO-LINK

2.6.2 ¿Cómo funciona la tecnología IO Link?

Para entender para qué sirve IO Link, es importante conocer cómo es su funcionamiento. La alimentación del sensor (pines 1 y 3) y la transmisión de la señal (pin 4) se realiza mediante un cable que hace parte de un standard en las instalaciones de campo para sensores de 3 hilos. Inicialmente la comunicación se lleva a cabo de forma convencional, sin IO-Link. Pasado un periodo de tiempo determinado, se ejecuta un "wake up" (despertador), el cual es emitido por el maestro IO Link y es ahí donde se establece la comunicación IO-Link. Este impulso de activación o Wake up es un impulso de corriente de cortocircuito de 500 mA con una duración de 75 a 85 µs.

Una vez se ha establecido comunicación entre el maestro y el esclavo, el siguiente paso es el arranque donde se validan números de serie, modelos, compatibilidad, y se establece la velocidad de comunicación para dar cabida al paso de preoperación donde se validan eventos, diagnósticos, estado de alarmas y parámetros.

Por último, la fase de operación se lleva a cabo la transferencia de datos acíclica del estado del proceso desde el esclavo hacia el maestro y los datos entre el maestro y el esclavo.

- **Funcionamiento básico del sistema IO-Link**

La arquitectura de IO-Link se basa en una comunicación punto a punto entre un dispositivo esclavo (por ejemplo, un sensor) y un maestro IO-Link (IO-Link Master). Esta comunicación se realiza mediante un cableado estándar de tres hilos, sin necesidad de cables especiales ni

blindados. El dispositivo esclavo transmite datos cíclicos (como medidas de temperatura, presión o flujo) y datos acíclicos (como parámetros de configuración o mensajes de diagnóstico) al maestro. Este último actúa como intermediario entre los sensores/actuadores y el sistema de control superior, permitiendo que la información llegue al PLC o sistema SCADA de forma estructurada y confiable.

- **Integración con otros protocolos de comunicación industrial**

Uno de los principales beneficios de IO-Link es su capacidad para integrarse con múltiples protocolos industriales de alto nivel, tales como PROFINET, EtherNet/IP, EtherCAT, Modbus TCP, entre otros. Esta integración se logra gracias al IO-Link Master, que cumple la función de interfaz entre los dispositivos IO-Link y la red de comunicación del sistema de automatización. Así, un sensor conectado mediante IO-Link puede ser supervisado y controlado desde un PLC de cualquier fabricante, siempre que se utilice un master compatible con el protocolo correspondiente. Esto facilita la interoperabilidad entre equipos de diferentes marcas y mejora la escalabilidad de los sistemas.

- **Ventajas técnicas y operativas**

El uso de IO-Link ofrece múltiples ventajas frente a las soluciones tradicionales de automatización. Entre ellas destacan la capacidad de parametrización remota de los dispositivos, la detección temprana de fallas mediante diagnósticos inteligentes, y la posibilidad de cambiar sensores sin necesidad de reconfiguración manual, gracias a la copia automática de parámetros desde el PLC. Estas características no solo reducen el tiempo de inactividad en procesos productivos, sino que también contribuyen a un mantenimiento predictivo más eficiente. En conjunto, IO-Link permite aumentar la transparencia del sistema y mejorar la toma de decisiones operativas.

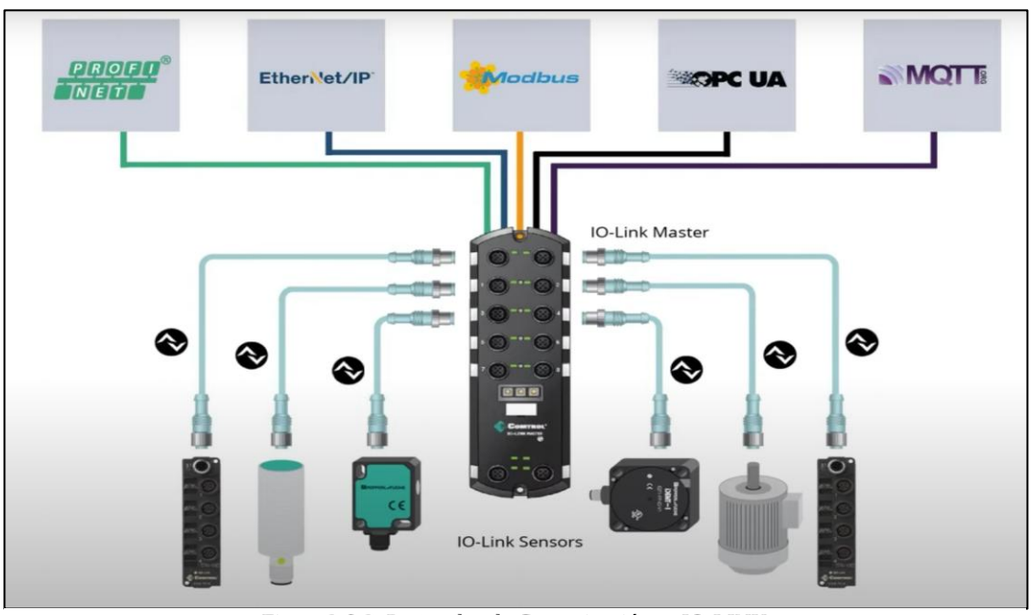


Figura 2.6-2: Protocolos de Comunicación vs IO-LINK

2.6.3 Tipos de Cables para IO-LINK

1. Cables estándar de 3 hilos (para dispositivos Clase A)

- Uso: Sensores o actuadores con bajo consumo de energía.
- Conector típico: M8 o M12.
- Hilos:
    - Marrón (Pin 1): Alimentación positiva (+24 V DC)
    - Azul (Pin 3): Alimentación negativa (0 V)
    - Negro (Pin 4): Línea de comunicación IO-Link / señal digital estándar (si no está en modo IO-Link)

2. Cables de 5 hilos (para dispositivos Clase B)

- Uso: Dispositivos que requieren una fuente de energía separada, por ejemplo, actuadores o válvulas con mayor consumo.
- Conector típico: M12 de 5 pines.
- Hilos adicionales:
    - Gris (Pin 2): Alimentación adicional
    - Blanco (Pin 5): Retorno de alimentación adicional

➢ Longitud máxima del cable: Hasta 20 metros entre el maestro y el dispositivo IO-Link, sin necesidad de apantallamiento, siempre que se utilicen cables de buena calidad con sección mínima de 0.34 mm² (AWG 22) o superior.

Importante: IO-Link funciona con cables sin apantallar, lo que reduce costos de instalación y mantenimiento.

3. Conectores comunes

- M8 (3 pines): Usados en sensores pequeños.
- M12 (4 o 5 pines): Usados en la mayoría de sensores y actuadores industriales.

4. Ventajas del cableado IO-Link

- Estandarización: Menor variedad de cables.
- Reducción de costos: No requiere apantallamiento ni cables especiales.
- Menor complejidad: Simplifica el diseño del sistema eléctrico.
- Facilidad de instalación y reemplazo.

2.6.4 Beneficios de IO-Link en el sistema de llenado autónomo

En el proyecto de automatización del proceso de llenado de camiones cisterna, donde se utilizan sensores capacitivos para la detección de producto y espuma, y una cámara inteligente SICK Lector62x para verificar la alineación de la escotilla, IO-Link ofrece los siguientes beneficios clave:

1) Diagnóstico en tiempo real

La capacidad de IO-Link para proporcionar diagnóstico continuo del sensor, como pérdida de señal, suciedad en la lente, sobre-temperatura o fallo de comunicación, permite detectar problemas antes de que afecten el funcionamiento del sistema. Esto es crucial para garantizar que el sistema no opere con una mala lectura del sensor o una cámara desalineada.

2) Configuración remota y flexible

IO-Link permite la parametrización remota de sensores y actuadores. En este proyecto, esto significa que el sensor capacitivo puede ser calibrado a distancia para distinguir con mayor precisión entre producto líquido y espuma, sin necesidad de intervención manual directa, lo cual mejora la seguridad y reduce tiempos de parada.

3) Trazabilidad y mantenimiento predictivo

El sistema puede almacenar los parámetros y configuraciones del sensor y la cámara, lo que facilita su reemplazo en caso de fallas. Además, se puede programar mantenimiento predictivo basado en el ciclo de vida del dispositivo o en condiciones de operación (como número de ciclos o nivel de suciedad).

4) Reducción del cableado y mayor estandarización

Con IO-Link, se eliminan múltiples tipos de cables y conectores específicos, utilizando una única interfaz estandarizada. Esto facilita la integración y reduce errores de instalación.

5) Integración con sistemas de control existentes

Gracias a su compatibilidad con PLCs modernos, IO-Link se puede integrar fácilmente con sistemas SCADA o plataformas de IoT industrial, permitiendo que los datos obtenidos del proceso de llenado estén disponibles para análisis, registro y optimización.

6) Aplicación práctica en el proyecto

En el diseño del sistema de llenado autónomo propuesto, IO-Link se emplea en dos componentes principales:

- Sensor capacitivo inteligente: Con IO-Link se puede ajustar la sensibilidad del sensor para discriminar entre producto líquido y espuma, asegurando que la válvula de corte cierre solo cuando la espuma alcance cierto nivel. Además, se puede registrar el número de ciclos de llenado y las condiciones de operación para análisis histórico.
- Sensor de visión inteligente: Gracias a IO-Link, es posible obtener información precisa del estado de la cámara, asegurar su alineación con la escotilla y realizar ajustes de enfoque o iluminación en remoto, mejorando la precisión y confiabilidad del sistema de verificación previa al llenado.

- Sensor de Flujo Inteligente: A través de IO-Link, el sensor entrega en tiempo real el caudal y volumen en movimiento del producto, lo que permite activar la dosificación automática de antiespumante según la cantidad transferida. También proporciona datos de temperatura y estado del sistema, mejorando el control y la trazabilidad del proceso de llenado.

2.6.5 Aporte estratégico de IO-Link en Terramar SBH:

Más allá de su función técnica, IO-Link representa una plataforma de transformación digital para las operaciones de Terramar. Su adopción permite evolucionar desde una automatización tradicional basada en señales analógicas hacia una infraestructura inteligente, donde cada sensor se convierte en una fuente de datos clave para la toma de decisiones operativas. En el contexto del llenado de camiones cisterna, IO-Link permite que sensores como los capacitivos, de visión y de flujo, no solo actúen como dispositivos de control, sino como nodos de información que alimentan sistemas SCADA, MES o incluso plataformas de mantenimiento predictivo.

Esta capacidad de recopilar y gestionar datos de forma estandarizada abre oportunidades para optimizar recursos, reducir tiempos muertos, anticipar fallas y mantener trazabilidad completa del proceso de carga. Así, IO-Link no solo mejora la eficiencia inmediata, sino que posiciona a la empresa en un camino claro hacia la digitalización industrial 4.0 de forma radical y sostenible.

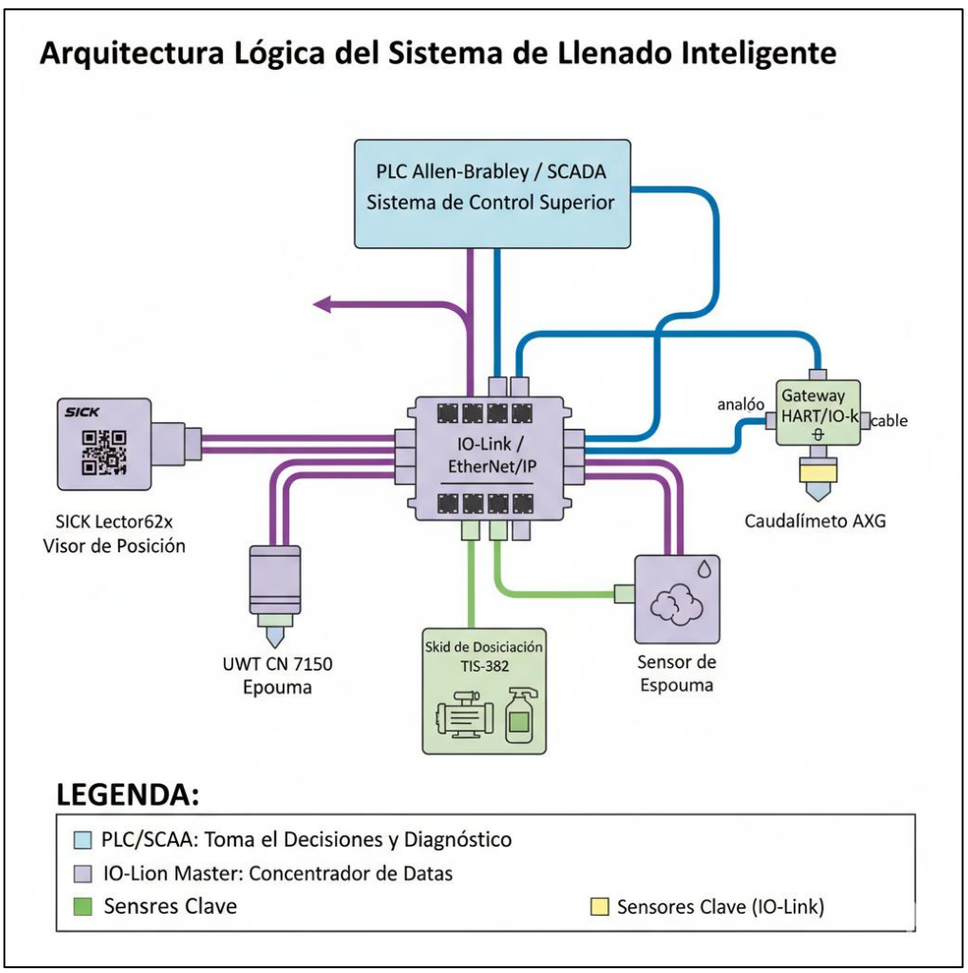


Figura 2.6-3: Ejemplo de Esquema para Terramar con IO-LNK.

2.6.6 Lógica de Control para la Dosificación Automática

La solución de control propuesta debe asegurar dos objetivos primarios: el control preciso de la espuma y la dosificación exacta del aditivo TIS-382. Se utilizará la salida de pulsos del caudalímetro Yokogawa AXG y la señal de detección de espuma del UWT CN 7150, centralizando la lógica en el PLC (Allen-Bradley) a través de la comunicación IO-Link/EtherNet/IP.

1. Variables de Entrada (Input)

Tabla 2.6.6.1 : Componentes necesarios para el proyecto.

Sensor Clave	**Origen de la Señal**	**Tipo de Señal / Protocolo**	**Variable en el PLC**	**Función y Detalle.**
Caudalímetro (Yokogawa AXG)	Salida de Pulso (P+/P-) del transmisor	Digital (Totalizador por pulsos)	AXG.Pulses	Contador de pulsos, donde cada pulso es calibrado para representar un volumen exacto (ej. 1 pulso = 10 Litros). Es la base para el cálculo de la dosificación.
Sensor de Espuma (UWT CN 7150)	Detección Capacitiva	Digital (IO-Link o 1734-IB8)	CN7150.Espuma_ON	Salida digital (TRUE / ON) que se activa cuando el sensor detecta espuma en el nivel crítico preestablecido.
Visor (SICK Lector62x)	Verificación de Alineación	Digital (IO-Link)	Lector62x.Alineado	Condición de habilitación (TRUE / ON) que permite iniciar el proceso de llenado solo si el camión está correctamente posicionado y la escotilla abierta.

2. Variables de Salida (Output)

Dispositivo Controlado	**Tipo de Señal / Módulo**	**Variable en el PLC**	**Función y Detalle**
Válvula de Corte Principal	Digital (Módulo DO) [cite: 451]	VLV.Carga_Abierta	Abre o cierra el flujo de producto. Se cierra automáticamente al detectar espuma o al finalizar la carga.

Dispositivo Controlado	Tipo de Señal / Módulo	Variable en el PLC	Función y Detalle
Skid de Dosificación (Bomba)	Digital (Módulo DO).	SKID.Bomba_Activada	Activa la bomba dosificadora del TIS-382. Se energiza bajo la lógica de control del PLC.
Electroválvula (Skid).	Digital (Módulo DO).	SKID.Valvula_Aditivo	Habilita el paso del antiespumante hacia la línea de carga.

3. Lógica de Control Principal (Flujo y Dosificación)

La lógica central en el PLC se basará en un Control en Lazo Cerrado y Dosificación Proporcional, ejecutándose en dos rutinas principales:

Rutina	Condición de Ejecución	Lógica de Acción (Ladder / Texto Estructurado)
A. Control de Flujo (Habilitación)	Lector62x.Alineado **Y** VLV.Carga_Abierta **Y** CN7150.Espuma_ON = **FALSE**	**IF** CN7150.Espuma_ON **THEN** Cierra VLV.Carga_Abierta. **ELSE** Mantiene VLV.Carga_Abierta abierta y permite el conteo de pulsos del AXG[13].
B. Dosificación (Proporcional por Volumen)	AXG.Pulses alcanza el valor equivalente a la **Dosis Mínima** (ej. 1000 kg o 100 pulsos)	**IF** (AXG.Pulses $\ge$ Pulsos_Por_Dosis) **THEN** Activa SKID.Valvula_Aditivo y SKID.Bomba_Activada por un tiempo T_Inyección. **Y** Reinicia contador AXG.Pulses a cero.

El PLC calcula la cantidad de TIS-382 a inyectar por cada tonelada de producto transferido, garantizando que el consumo del aditivo esté estrictamente dentro de la concentración recomendada (0.1% - 0.5%).

4. Lógica de Seguridad (Detección Crítica de Espuma).

Prioridad	Evento Detectado (Input)	Acción de Salida (Output)	Tiempos/Parámetros
Alta	Detección de Espuma en nivel crítico (CN7150.Espuma_ON = TRUE).	Cierre Inmediato de la VLV.Carga_Abierta. Activación de Alarma SCADA.	Tiempo de respuesta debe ser < 100 ms (limitado por velocidad de IO-Link/EtherNet/IP).

Prioridad	Evento Detectado (Input)	Acción de Salida (Output)	Tiempos/Parámetros
Media	Fallo de Comunicación con el AXG (Gateway).	Reducción de Flujo al 50%. Alarma Diagnóstico SCADA.	Se puede usar la salida 4-20 mA analógica como *backup* si el protocolo HART falla.

CAPITULO N°3: SELECCIÓN DE TECNOLOGIAS PARA MEJORA DEL SISTEMA.

3.1 SOLUCION AL PROBLEMA DE LA ESPUMA.

Luego de analizar los antecedentes generales sobre la generación de espuma en procesos industriales y sus consecuencias en la industria agropecuaria, se identificó la necesidad de implementar un sistema que permita controlar de manera eficiente este fenómeno, especialmente durante la etapa de carga de camiones.

En este capítulo se detalla el proceso de investigación y selección de los componentes críticos necesarios para el desarrollo de la solución propuesta: un agente antiespumante adecuado para el tipo de producto manipulado y un sensor capaz de detectar la presencia de espuma en tiempo real.

El objetivo principal es identificar tecnologías que no solo sean compatibles con las características físicas y químicas del producto, sino que también mejoren la eficiencia operativa, minimicen las pérdidas de producto y aseguren un control automático confiable durante la operación de carga.

3.1.1 Selección final del antiespumante Compatible con el Producto Industrial.

Durante la etapa de investigación, se exploraron diversas alternativas de antiespumantes disponibles en el mercado. Se constató que la mayoría de estos productos están orientados principalmente a la industria química y el sector agrícola, siendo menos frecuentes aquellos diseñados específicamente para aplicaciones agropecuarias.

Esta situación representó un desafío importante, ya que la implementación de un antiespumante inadecuado podría alterar las propiedades físicas y químicas del producto final, afectando su calidad y su aceptación en el mercado.

A pesar de esta dificultad, se logró identificar una opción adecuada que cumple con los requisitos técnicos y de compatibilidad exigidos por el proceso agroindustrial.

En la búsqueda de un agente antiespumante compatible con las características del producto final de Terramar SBH, se seleccionó el producto denominado TIS-382, un aditivo antiespumante líquido basado en organosilicona. Esta elección se fundamentó tanto en su alta efectividad en el control de espuma como en su compatibilidad química con formulaciones de tipo agropecuario.

El TIS-382 ha sido específicamente formulado para aplicaciones en la industria agrícola y agropecuaria, donde la formación de espuma puede afectar negativamente procesos como la mezcla, transporte y aplicación de productos líquidos. Entre sus principales ventajas se encuentran su rápida dispersión en sistemas acuosos, su baja dosificación requerida para alcanzar resultados óptimos y su estabilidad en un amplio rango de pH y temperaturas de operación.

3.1.2 Aplicación Técnica del Antiespumante:

El producto se utiliza en concentraciones recomendadas entre 0,1% y 0,5%, dependiendo de las condiciones específicas del proceso. Se trata de una mezcla que puede presentar estratificación o separación tras un periodo de reposo, lo cual es un comportamiento normal y no afecta su eficacia. Posee una excelente capacidad antiespumante, siendo eficaz tanto en la

prevención como en la eliminación de espuma. Se recomienda no exceder la dosis indicada, ya que una cantidad moderada es suficiente para lograr el efecto deseado. El producto puede diluirse previamente en agua, y se sugiere aplicarlo directamente una vez diluido, preferentemente en forma de solución, para asegurar un desempeño óptimo.

- **Especificaciones Técnicas:**

Apariencia:	Emulsión de color blanco a amarillo claro.
Contenido Solido:	27%
Viscosidad:	1900-1400 mm^2/s
Valor pH:	6.0 - 8.5

Tabla 3.1.2.1: Especificaciones Técnicas del Producto.

De esta forma, para mitigar este problema de los rebalses y espuma, se ha definido la aplicación del antiespumante TIS-382 directamente en el punto de ingreso del fluido agropecuario en la escotilla del camión cisterna, utilizando un sistema automatizado de dosificación proporcional al volumen de producto cargado.

- **Relación de Dosificación Técnica**

La dosificación recomendada por el fabricante del antiespumante TIS-382 es entre 0,1% y 0,5% Lts del volumen total del aceite cargado. Considerando que:

- 1 tonelada de aceite ≈ 1000 litros (Lts)
- Cada camión que ingresa a la planta tiene un tonelaje contratado de 28 toneladas, equivalente a 28.000 litros de aceite.

Con estos datos de base, la dosificación esperada para un camión completo seria:

- Volumen de aceite: 28 TON (28.0000 Lts).
- Dosificación Mínima (0,1%): 28 Lts de TIS-382.
- Dosificación Máxima (0,5%): 140 Lts de TIS-382.
- Promedio por Camión aprox: 70-80 Lts.

Este cálculo aproximado permite establecer una referencia para que, al momento en que el sensor de flujo registre el volumen cargado (en toneladas), el sistema dosifique automáticamente el antiespumante en la escotilla del camión. Esto garantiza un control efectivo de la espuma, facilitando tanto el pesaje como la entrega del producto final en condiciones óptimas.

Características Positivas del TIS-382:

- ✓ Composición: Formulado a base de polisiloxano, surfactantes de silicona y agentes dispersantes de carbono blanco y negro.
- ✓ Efectividad: Alta capacidad antiespumante, incluso a bajas concentraciones, gracias a su baja solubilidad.
- ✓ Compatibilidad: Funciona de manera estable en un amplio rango de valores de pH, siendo aplicable en diferentes formulaciones acuosas.

- ✓ Aplicaciones: Ideal para ser utilizado en formulaciones agroquímicas y agropecuarias, así como en mezclas en estanques.
- ✓ Propiedades adicionales: Alta eficiencia en el control de espuma sin generar residuos de aceite flotante o películas superficiales.

- ➢ **Formato de Venta:**



Figura 3.1-1: Formato de venta del anti-espumante.

- ➢ Valor Del Antiespumante **$4,96 USD/kg FOB Shanghai** por contenedor IBC de 1 tonelada métrica / 1.000 kg)

Concepto	Valor en USD	Valor en CLP (1 USD = 920 CLP) JPG
Precio por Kg / Litro (FOB Shanghai)	4,96 USD/kg JPG	$4.563 CLP/kg
Precio 1 Contenedor IBC (1.000 kg FOB)	4.960 USD JPG	$4.563.200 CLP
Precio Puesto en Planta (Est. +18% CIF/Logística)	5,85 USD/kg	$5.382 CLP/kg (~$5,38M *por IBC*)

Figura 3.1-2: Valores del antiespumante por contendor IBC de 1 Ton aprox.

3.1.3 Acerca de la Empresa Desarrolladora del Anti-Espumante TIS

Este producto es desarrollado y comercializado por Jiangxi Tianshen Ltd, una empresa china con más de dos décadas de experiencia en la producción de aditivos especializados para la industria agrícola. Jiangxi Tianshen Ltd es reconocida internacionalmente por su innovación en la formulación de surfactantes, antiespumantes, emulsificantes y agentes humectantes, asegurando altos estándares de calidad y cumplimiento de normativas internacionales.

Durante la fase de evaluación preliminar, el TIS-382 demostró una excelente compatibilidad con los componentes del producto Terramar SBH, no alterando sus propiedades físico-químicas ni su eficacia final. Además, sus características permiten su integración directa en el proceso de producción sin necesidad de modificaciones importantes en la formulación base ni en los protocolos de fabricación existentes.

En resumen, el TIS-382 ha sido seleccionado oficialmente como el agente antiespumante para ser utilizado durante la carga diaria de los camiones cisterna que ingresan a las instalaciones de Terramar SBH para el transporte y descarga de aceites. Su aplicación se realizará mediante bombas dosificadoras instaladas en un skid de dosificación, las cuales permitirán la incorporación controlada del producto en micro-dosis mientras se lleva a cabo el proceso de carga. La dosificación se efectuará aplicando la fórmula correspondiente, con una concentración recomendada entre 0,1% y 0,5%, según las condiciones específicas del proceso. Esta estrategia garantiza un control eficiente y seguro de la formación de espuma, optimizando así las operaciones de llenado, transporte y almacenamiento, y asegurando la calidad del producto final en el contexto industrial.

3.2 SOLUCION AL CORRECTO POSICIONAMIENTO DEL CAMIÓN.

Para garantizar un proceso de descarga seguro, eficiente y libre de incidentes en los camiones cisterna, es esencial verificar cuidadosamente la alineación de la escotilla de carga con la tubería de conexión antes de iniciar cualquier transferencia de producto.

Una desalineación, incluso mínima, puede generar derrames, fugas o una conexión deficiente, lo que no solo compromete la seguridad del personal operativo, sino que también puede provocar pérdidas económicas, contaminación ambiental y daños en los equipos.

Identificación y Posicionamiento Asistido con Tecnología de Visión:

Se propone la instalación de un sensor de visión inteligente con capacidad de lectura de códigos y formas denominado SICK Lector62x, este será ubicado en una posición fija sobre la escotilla del camión. Este sensor cumplirá una doble función:

1. Lectura de un código QR adherido a la escotilla del camión, que contendrá información como:

- Identificación del camión (patente o número interno).
- Nombre del chofer o Empresa.
- Nacionalidad.
- Lote del producto a cargar o descargar.

2. Verificación de la posición y forma visual de la escotilla, comparando lo que ve con una imagen de referencia preconfigurada en el sistema. De esta forma, el sistema podrá:

- Confirmar que la escotilla está visible y correctamente alineada
- Detectar si el camión está desplazado o mal estacionado
- Autorizar o bloquear el inicio del proceso de descarga

3. Integración con el Sistema de Control en Planta.

La idea es que el visor inteligente SICK Lector62x sea implementado como parte del sistema de llenado inteligente, donde este pueda alinear los camiones cisternas en la zona de carga. De esta forma, el dispositivo de visión compacta leerá un código QR adherido a la escotilla del camión, donde podrá leer información relevante como los datos del camión y el tipo de producto a cargar. Además, el Lector62x realizará un análisis visual de la forma de la escotilla del tanque, asegurando que esté correctamente alineada con la cañería de descarga.

La comunicación del Lector62x se realiza mediante IO-Link hacia un maestro IO-Link, el cual a su vez está conectado al PLC y al sistema SCADA, permitiendo una integración fluida en la arquitectura de automatización existente. Este sistema no solo mejora la precisión del posicionamiento, sino que también reduce errores operativos, mejora la trazabilidad y aumenta la seguridad del proceso de carga.



Figura 3.2: Imagen representativa del Sensor QR.

3.2.1 Acerca del visor inteligente SICK Lector62x con I.A y IO-Link.

Funcionamiento del Lector Inteligente SICK Lector62x

1. Captura de imagen:

El Lector62x, equipado con sensores de alta resolución y luz integrada, toma una imagen del área objetivo, por ejemplo, un QR pegado en la escotilla del camión.

2. Procesamiento de imagen:

Internamente, el dispositivo procesa la imagen capturada mediante algoritmos integrados que identifican:

- ✓ Códigos QR, DataMatrix y de barras.
- ✓ Contornos, formas o alineaciones (por ejemplo, la forma de la escotilla del camión).

3. Decodificación y verificación

El lector extrae la información del código QR (como patente, conductor y producto) y verifica la alineación física del camión con la cañería mediante análisis de forma.

4. Comunicación con IO-Link

La información procesada se transmite por medio de IO-Link a un maestro IO-Link, que traduce y envía los datos al PLC y al SCADA, integrando el lector en el sistema de automatización de la planta.

5. Rango típico de lectura del SICK Lector62x:

- Distancia mínima: aprox. 50 mm (5 cm)
- Distancia máxima: entre 200 mm y 1.200 mm (1,2 metros), dependiendo del modelo y lente.

Para códigos QR medianos (ej. 20x20 mm), el rango óptimo está entre 150 mm y 600mm.

Recomendación para este proyecto: Dado que el objetivo implica leer un QR en la escotilla de los camiones que ingresen a cargar en la empresa, una distancia recomendada para su correcta lectura es de entre 50 cm a 1m, con esta información se debe entonces poder realizar la instalación del Lector62x, el cual es perfectamente adecuado. Resulta necesario asegurar que:

- Usar un código QR de buen tamaño y contraste.
- Montar el visor a una distancia fija y bien alineado.
- Elegir la variante del Lector62x con lente ajustado a esa distancia.

3.2.2 Instalación y Configuración del Lector62x mediante su Software "SOPAS Engineering Tool"

A continuación, se detallan los pasos necesarios para instalar y configurar el sensor de visión SICK Lector62x utilizando el software oficial SOPAS Engineering Tool, el cual permite cargar patrones personalizados como códigos QR y formas específicas, por ejemplo, la escotilla del camión.

1. Descarga e instalación del software "SOPAS Engineering Tool".

- Acceder al sitio oficial de SICK AG (www.sick.com).
- Buscar "SOPAS Engineering Tool" y descargar la última versión compatible con el sistema operativo del PC.
- Ejecutar el instalador y seguir las instrucciones en pantalla para completar la instalación.

2. Conexión del Lector62x al PC.

- Conectar el Lector62x al computador mediante cable Ethernet o USB (si está disponible).
- Asegurarse de que ambos dispositivos estén en la misma red o rango IP.
- En el caso de Ethernet, configurar la dirección IP estática del PC de acuerdo al rango del lector (por ejemplo, 192.168.1.xxx).

3. Iniciar SOPAS y detectar el dispositivo.

- Abrir el software SOPAS Engineering Tool.
- Hacer clic en el botón "Scan" para detectar dispositivos conectados.
- Seleccionar el Lector62x de la lista y establecer la conexión.

4. Carga y configuración del patrón de escaneo.

- Dentro del menú de configuración, acceder a la opción "Device Functions" > "Image-based Code Reading".
- Cargar una imagen de referencia que contenga el código QR y la forma de la escotilla del camión.
- Definir zonas de escaneo y parámetros de lectura como:
    - Tipo de código (QR, Data Matrix, etc.)
    - Iluminación interna del lector
    - Tolerancias de posición y orientación
    - Activación de filtros de imagen si es necesario

5. Guardar configuración y pruebas.

- Guardar los parámetros en la memoria del dispositivo.
- Realizar pruebas con imágenes reales del entorno para verificar la detección del patrón cargado.
- Ajustar valores si es necesario para asegurar una lectura precisa y confiable.

6. Integración con el sistema de control.

- Establecer la comunicación del lector con el sistema maestro (PLC o SCADA) mediante IO-Link, Ethernet/IP o Profinet, según corresponda.
- Configurar las salidas digitales o la transmisión de datos para activar procesos automáticos una vez que se detecte correctamente el patrón.

3.2.3 Especificaciones Técnicas del Visor Inteligente Sick.

Lector62x



Resumen de los datos técnicos

Escáner lineal	Enfoque automático basado en aprendizaje / Enfoque ajustable (eléctrico) (Según modelo)
Tipo sensor	Sensor matricial CMOS, escala de grises
Resolución del sensor	1.280 px x 1.024 px
Frecuencia de exploración	50 Hz / 25 Hz (Según modelo)
Distancia de lectura	70 mm ... 1.500 mm (Según modelo)
Grado de protección	IP65
Ethernet	✓, TCP/IP
PROFINET	✓ / ✓, opcional a través de módulo de bus de campo externo (Según modelo)
EtherNet/IP™	✓
EtherCAT	✓, opcional a través de módulo de bus de campo externo
Serie	✓, RS-232, RS-422
CAN	✓
IO-Link	✓
PROFIBUS DP	✓, opcional a través de módulo de bus de campo externo
Peso	170 g

Descripción del producto

El Lector62x es un lector de códigos basado en cámara compacto para el registro fiable de códigos 1D y 2D, así como de códigos stacked y de escritura legible. Su decodificador DPM de gran rendimiento es capaz de leer también sin errores códigos impresos a láser o punzonados incluso en caso de contraste bajo, suciedad o calidad deficiente. Gracias al concepto de iluminación de alta intensidad con LED bicolores, el Lector62x apenas se ve afectado por la luz artificial. Incluso en condiciones lumínicas cambiantes se garantiza una lectura fiable de los códigos. La carcasa compacta con conector giratorio le convierte en el lector de códigos perfecto para líneas de producción con un espacio de montaje limitado.

Resolución del sensor	1.280 px x 1.024 px (1,3 Mpixel)
Iluminación	Integrado
Color de iluminación	Rojo, LED, visible, 617 nm, ± 15 nm Azul, LED, visible, 470 nm, ± 15 nm
Clase de LED	1 (IEC 62471:2006-07, EN 62471:2008-09)
Punto de respuesta	LED, visible, Verde, 525 nm, ± 15 nm
Ayuda de alineación	Láser, rojo, 630 nm ... 680 nm
Clase de láser	1, Se corresponde con 21 CFR 1040.10 y 1040.11 a excepción de la conformidad con IEC 60825-1 ed. 3., como se describe en el Laser Notice n.º 56 del 8 de mayo de 2019. (IEC 60825-1:2014, EN 60825-1:2014+A11:2021)
Lente	
Longitud focal	9,6 mm
Distancia de lectura	70 mm ... 1.500 mm [1) 2)]
Frecuencia de exploración	50 Hz
Resolución de código	≥ 0,05 mm [2)]
Rendimiento	70 mm ... 1.500 mm [2)]

Figura 3.2-1: Datos técnicos del Lector 62x

3.3 CONTROL DE REBALSE DE LA ESPUMA: SENSOR UWT SERIE CN 7000

Retomando lo expuesto anteriormente, si bien se ha seleccionado oficialmente el agente antiespumante TIS-382 como la solución química para controlar la generación de espuma durante la carga de camiones cisterna en las instalaciones de Terramar SBH, es importante señalar que esta elección fue el resultado de un proceso riguroso de investigación y validación orientado a su aplicación en la industria agropecuaria.

No obstante, la incorporación del antiespumante por sí sola no garantiza la total prevención de eventos críticos como el rebalse de producto durante el llenado. Por ello, se planteó la necesidad de complementar esta solución con un sistema automatizado de detección de espuma, que permita actuar de forma preventiva y precisa ante la presencia de espuma en niveles críticos.

Con este objetivo, se llevó a cabo un análisis comparativo de distintas tecnologías de detección, evaluando su compatibilidad con el proceso, sensibilidad, resistencia a condiciones extremas y facilidad de integración. Como resultado, se definió que la opción más adecuada corresponde al sensor capacitivo de nivel de la marca UWT, serie CN 7000.

Capanivo®

Interruptor de nivel
Series CN 7000
Configuración del producto - Notas técnicas

UWT LEVEL CONTROL

Especificaciones

- Medición de nivel en líquidos y sólidos
- Detección de fugas
- Medición de la interfase (agua/aceite o líquido/espuma)
- Unidad compacta
- Amplio campo de aplicaciones
- Detector de nivel lleno, vacío o intermedio
- Tecnología capacitiva con compensación activa de adherencias
- Sensibilidad: constante dieléctrica ≥1,5
- La calibración de fábrica permite medir la mayoría de aplicaciones sin calibración in situ
- Libre de mantenimiento
- Carcasa de plástico o de acero inoxidable
- Construcción resistente a la corrosión
- Varias conexiones de proceso: rosca (incl. G½" higiénico), brida (atornillada) o Triclamp
- 4-Hilos DC con salida de señal de relé
- 2-Hilos 8/16 mA o 4-20mA, incluida la prueba remota
- IO-Link con señal de salida PNP, NPN, Push Pull
- Aprobaciones para zonas explosivas
- Certificaciones higiénicas, Materiales compatibles para la industria alimentaria
- Conforme 2011/65/EU RoHS

Aprobaciones	CE, FM, CSA, TR-CU, UKCA	Uso general
	ATEX, IEC-Ex, TR-CU, INMETRO, KC, CCC, UKCA	Zona 0, 0/1, 20/21 Intrínsecamente seguro
	FM, CSA	Clase I, II, III, Div. 1, Gr. A-G Intrínsecamente seguro
	EHEDG	Higiénico
	WHG, VLAREM	Protección contra el sobrellenado y las fugas
Electrónica	4-Hilos 2-Hilos	DC con relé / relé de estado sólido Salida de señal 8/16 mA o 4-20 mA, incluida la prueba remota
	3/4-Hilos	IO-Link con salida de señal PNP, NPN, Push Pull
Carcasa	Ø65mm (2.56")	Material termoplástico
	Ø35mm (1.38")	CN 7120: 1.4404 (316L) CN 7121: Material termoplástico
	Tipo de protección	Tipo 4X / IP68

Ilustración 3.3: Tabla de Especificaciones UWT Serie 7000

Este dispositivo no solo permite detectar con alta fiabilidad la presencia de producto o espuma en distintos puntos del sistema de carga, sino que también es capaz de emitir una señal automática que puede ser integrada directamente a un sistema de control, permitiendo por ejemplo el cierre inmediato de la válvula de llenado para evitar el rebalse.

Es así como su integración en el sistema permitiría una automatización inteligente del proceso de carga, eliminando la necesidad de supervisión manual constante y asegurando un mayor control operativo.

Este capítulo presenta las características técnicas y ventajas del sensor CN 7000, así como su integración positiva en el sistema de trabajo que posee la empresa agropecuaria.

Entre sus principales características se incluyen:

- Detección de nivel lleno o intermedio, tanto en montaje vertical como horizontal.
- Sensibilidad ajustada de fábrica, para medios con constante dieléctrica ≥1.5, lo cual elimina la necesidad de calibración in situ en la mayoría de los casos.
- Salida de señal configurable (relé, 8/16 mA, 4–20 mA, IO-Link con PNP/NPN/Push-Pull), lo que permite su integración en diversos sistemas de automatización.
- Libre de mantenimiento, gracias a su diseño resistente a la corrosión y a las incrustaciones.
- Aplicable en interfase líquido/líquido o líquido/espuma, así como en detección de fugas.

El sensor CN 7000 está especialmente indicado para industrias alimentarias, químicas y de tratamiento de aguas, y ha sido aprobado por entidades como EHEDG para aplicaciones higiénicas, cumpliendo además con la directiva RoHS.

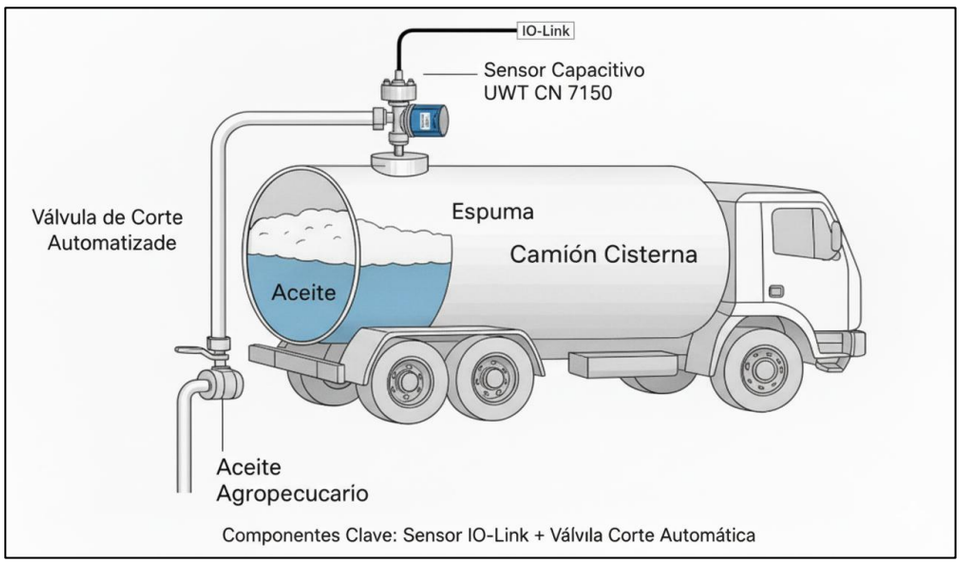


Figura 3.3-1: Imagen representativa de camión cisterna llenándose.

3.3.1 Selección definitiva del sensor de Nivel: UWT CN 7150 con Cable de Extensión

Luego de un análisis técnico comparativo entre distintas alternativas de sensores, considerando factores como compatibilidad con el producto, precisión, confiabilidad en condiciones adversas y facilidad de integración, se seleccionó el modelo CN 7150 de la serie 7000 por la marca UWT, el cual cuenta con extensión de cable especialmente diseñada para aplicaciones en tanques de gran profundidad o geometrías complejas.

Este sensor opera mediante tecnología capacitiva y permite detectar tanto producto líquido como espuma, generando una señal eléctrica autónoma que puede ser conectada directamente a un sistema de control, permitiendo acciones inmediatas como el cierre automático de la válvula de carga al alcanzar niveles críticos.

En este capítulo se detallarán las características técnicas del modelo CN 7150, su principio de funcionamiento y su aplicabilidad dentro del sistema de control propuesto para optimizar la seguridad y eficiencia del proceso de carga

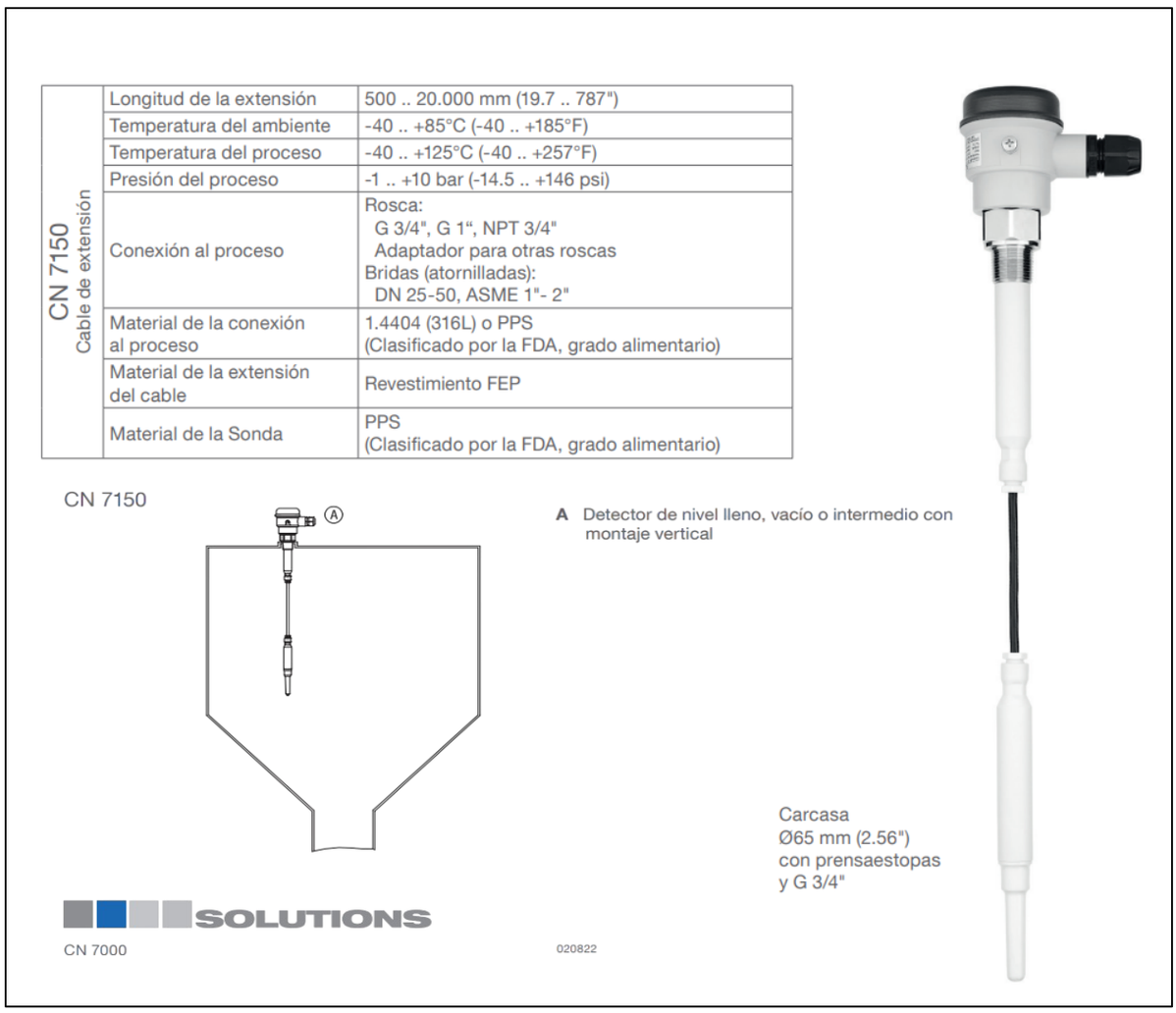


Figura 3.3-2: Detalles Técnicos del Sensor Seleccionado.

3.3.2 Certificaciones y Aplicaciones del Sensor UWT.

El sensor CN 7000, en sus variantes CN 7120, CN 7121, CN 7130 y CN 7150, cuentan con una amplia gama de certificaciones internacionales que garantizan su seguridad y confiabilidad en entornos industriales exigentes, particularmente en áreas clasificadas con riesgo de explosión.

Entre las certificaciones más destacadas se incluyen:

- ATEX (Europa): El sensor está certificado según la directiva ATEX II 1 G y II 1/2 D, clasificándolo como adecuado para atmósferas explosivas de gases (IIC) y polvos (IIIC), con niveles de protección tipo “Ex ia” (seguridad intrínseca) y grados de protección Ga y Da/Db.
- IECEx (Internacional): Cumple con los estándares IEC Ex ia IIC T1 y T4, lo que lo habilita para operar con seguridad en atmósferas con presencia de gases explosivos, tanto en zonas 0, 1 y 2, como en polvorientas.
- FM/CSA (América del Norte): Certificaciones FM y CSA para Clase I, II, III, División 1, Grupos A-G, lo que respalda su uso en aplicaciones industriales severas en EE. UU. y Canadá.
- TR-CU (Eurasia): Aprobaciones TR-CU Ex ia IIC T1 Ga y Da/Db, permitiendo su utilización en la Unión Económica Euroasiática, incluyendo Rusia, Bielorrusia y Kazajistán.
- INMETRO (Brasil): El sensor está homologado por INMETRO bajo la normativa Ex ia IIC T1 Ga, válida para ambientes con riesgo de explosión en el mercado brasileño y con reconocimiento creciente en otros países de América Latina.
- KC (Corea del Sur), CCC (China) y UKCA (Reino Unido): Certificaciones que habilitan su aplicación global en zonas peligrosas según normativas locales.

En el contexto latinoamericano, y particularmente en Chile, no existe una entidad local exclusiva encargada de certificar equipos para atmósferas explosivas. Sin embargo, las autoridades nacionales permiten el uso de dispositivos que cuenten con certificaciones internacionales reconocidas, como IECEx, ATEX o INMETRO, siempre que provengan de organismos acreditados. Por lo tanto, el uso del sensor CN 7150 en procesos industriales en Chile es totalmente factible, ya que cumple con las exigencias normativas y de seguridad establecidas por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) y otros entes reguladores del país.

Además, este sensor es distribuido en todo Chile por Veset, empresa líder a nivel nacional en soluciones de instrumentación, accionamiento, automatización y control industrial. Esta empresa no solo ofrece el producto con garantía, sino también con respaldo técnico y certificaciones válidas, lo que garantiza una implementación segura y confiable en cualquier proyecto industrial.

❖ **Aplicaciones Idóneas para el uso de este Sensor UWT.**

El sensor CN 7150 está diseñado para operar en entornos industriales exigentes, especialmente aquellos donde se requiere un alto nivel de seguridad por la presencia de atmósferas explosivas o productos peligrosos. Gracias a su robustez, precisión y certificaciones internacionales, es ideal para las siguientes aplicaciones:

- Industria química y petroquímica: monitoreo y control de nivel en tanques de almacenamiento que contienen solventes, combustibles u otros líquidos inflamables. Su resistencia a condiciones extremas lo hace confiable incluso en entornos corrosivos.
- Plantas de tratamiento de aguas y residuos industriales: detección de niveles en estanques que pueden contener líquidos con riesgo de explosión por acumulación de gases o vapores.
- Industria minera: supervisión de procesos donde se manejan sustancias químicas o combustibles, tanto en superficie como en áreas subterráneas clasificadas como zonas con riesgo de explosión.
- Industria alimentaria y farmacéutica: medición de nivel en depósitos que contienen alcoholes u otros líquidos volátiles utilizados en procesos de producción, con la seguridad necesaria para operar en zonas clasificadas.
- Sector energético: control de nivel en subestaciones, estaciones de carga o plantas generadoras que almacenan combustibles o aceites dieléctricos.

En todas estas aplicaciones, el sensor CN 7150 no solo garantiza una medición precisa y confiable, sino que también contribuye a mantener altos estándares de seguridad operativa y cumplimiento normativo. A continuación, veremos según el fabricante sus aplicaciones más comunes:

Medio / Ejemplos		Idoneidad
Medios finos, conductores o no conductores Espesor de la capa restante en el sensor, normalmente < 0,2mm (0.008")		•
Agua / aguas residuales	Agua del grifo, agua salada, agua de enjuague	•
Cervecería, bebidas, lácteos	Cerveza, limonada, aguardiente, vino, zumo de naranja, leche	•
Ácidos, álcalis	Ácido acético, ácido clorhídrico, solución de hidróxido de sodio	•
Productos de limpieza	Alcohol, limpiador de vinagre, limpiador de cloro, descalcificador	•
Gasolina, disolventes (hidrocarburos)	Gasolina, diesel, nitro diluyente, acetona	•
Medios viscosos y adhesivos, no conductores (normalmente no con base de agua) Espesor de la capa restante en el sensor, normalmente > 0,2mm (0.008")		•
Alimentos	Aceite de girasol, aceite de oliva, miel, chocolate, melaza de azúcar, jarabe	•
Aceites (hidrocarburos)	Aceite mineral, pintura al óleo	•
Varios	Crema de manos	•
Medios viscosos y adhesivos, conductores (normalmente a base de agua) Espesor de la capa restante en el sensor, normalmente > 0,2mm (0.008")		–
Productos de limpieza	Gel lavavajillas, limpiador de WC, gel anticalcáreo, detergente líquido	–
Alimentos	Mostaza, ketchup, mayonesa	–
Varios	Pasta de dientes, pintura de emulsión	–
Sólidos ligeros (polvo, gránulos)		•

• Medición con CN 7000 adecuada – Medición con CN 7000 no adecuada

Tabla 3.3.2.1: Especificaciones Técnicas del Sensor de espuma UWT.

3.3.3 Conexiones eléctricas del Sensor UWT.

1. Comparación entre Conexionado con Relé DC y Electrónica IO-Link

En sistemas de automatización industrial, la elección del tipo de conexionado entre los sensores y el sistema de control resulta fundamental para garantizar un funcionamiento confiable, flexible y adecuado a las necesidades del proceso. En este estudio se consideran dos alternativas: el conexionado con relé DC y la electrónica con IO-Link**, c**ada una con características particulares.

El conexionado con relé DC representa una solución clásica y ampliamente utilizada por su simplicidad. Este tipo de sensor entrega una salida digital mediante contacto seco (SPST)**,** libre de potencial, que puede ser interpretada fácilmente por cualquier sistema SCADA o PLC como una señal de encendido o apagado. Requiere una alimentación de corriente continua (DC) y utiliza un cableado de cuatro hilos (dos para alimentación y dos para la señal).

A continuación, el conexionado con Rele DC y electrónica 8-16 mA:

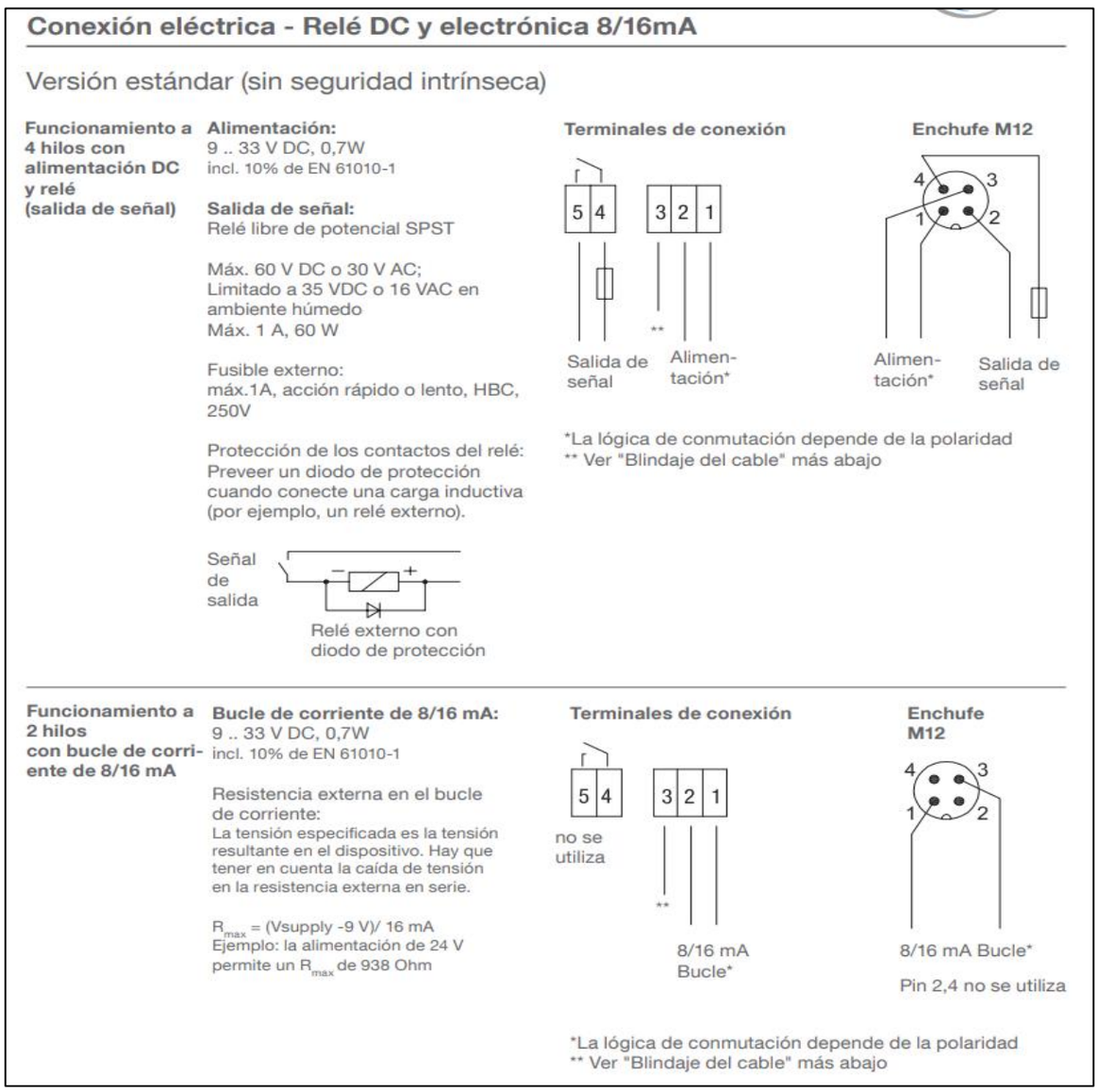


Figura 3.3-3: Conexionado con electrónica 8-16 mA.

Entre sus ventajas se encuentran la compatibilidad universal, la aislación galvánica natural mediante el contacto del relé y la facilidad de integración en sistemas existentes sin necesidad de hardware adicional. No obstante, sus limitaciones incluyen la imposibilidad de monitoreo del estado del sensor y la ausencia de funciones de diagnóstico o ajuste remoto.

Cómo funciona:

- Salida SPST (relé libre de potencial): Un contacto seco que cierra o abre cuando el sensor detecta espuma.
- Electrónica 8 / 16 mA (si dispones de esta variante): Una salida de corriente fija (por ejemplo 8 mA para “no espuma”, 16 mA para “espuma”) que puede leerse en un módulo de entradas analógicas.

Ventajas

- Simplicidad total: Sólo necesitas un cableado de 4 hilos (2 de alimentación + 2 de señal para el relé o la corriente).
- Aislamiento galvánico natural: El relé separa completamente el sensor del sistema de control.
- Compatibilidad casi universal: Tanto los PLC clásicos como los sistemas SCADA pueden leer entradas digitales o 4–20 mA (o 8/16 mA con escala adaptada) sin hardware extra.

Inconvenientes

- Sin diagnóstico remoto: No hay información de estado del sensor (p. ej. rotura de cable, sobrecorriente, nivel de batería).
- Umbral fijo: La histéresis / punto de conmutación viene de fábrica y sólo se cambia ajustando potenciómetros manualmente.

Blindaje del Cable:

Según el manual del equipo, para obtener lecturas estables, se recomienda utilizar un cable aislado. Con terminales de conexión, es decir, La pantalla del cable puede conectarse a tierra en el terminal 3 o en el otro extremo del cable. Ambos lados de la pantalla no deben estar conectados a tierra.

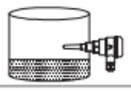
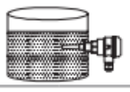
Nota: El terminal 3 está conectado internamente en el dispositivo al terminal de conexión equipotencial externo. Con enchufe M12: Cuando se utilizan enchufes/cables M12 disponibles en el mercado, el blindaje del cable se conecta a la rosca M12. Dado que la rosca M12 del CN7 es de plástico, el revestimiento del cable no está conectado al CN7 en la rosca M12 y, por lo tanto, debe conectarse a tierra en el otro extremo del cable.

Lógica de Conmutación:

Conexión eléctrica - Relé DC y electrónica 8/16mA

Lógica de conmutación

Terminales de conexión

					Error
LED blanco	●		☼		◐ 2Hz
Ajuste	FSL	FSH	FSL	FSH	cualquier
Suministro de Polaridad Terminal 1 Terminal 2	L+ L-	L- L+	L+ L-	L- L+	cualquier
LED amarillo	●	☼	☼	●	●
Relé (Terminal 4+5)					
Bucle de 8/16 mA (Terminal 1+2)	8 mA	16 mA	16 mA	8 mA	3,6 mA

FSL = Pruebas de fallas baja (Fail safe low) FSH = Pruebas de fallas alta (Fail safe high)

Enchufe M12

					Error
LED blanco	●		☼		◐ 2Hz
Ajuste	FSL	FSH	FSL	FSH	cualquier
Suministro de Polaridad M12, Pin 1 M12, Pin 3	L+ L-	L- L+	L+ L-	L- L+	cualquier
LED amarillo	●	☼	☼	●	●
Relé (M12, Pin 2+4)					
Bucle de 8/16 mA (M12, Pin 1+3)	8 mA	16 mA	16 mA	8 mA	3,6 mA

FSL = Pruebas de fallas baja (Fail safe low) FSH = Pruebas de fallas alta (Fail safe high)

Figura 3.3-4: Figura 3.3.4: Conmutación del equipo con electrónica 8-16 mA.

2. Conexión Electrónica – IO Link.

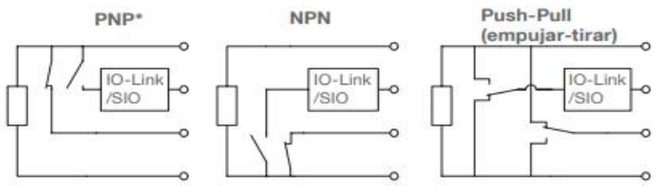
Por otro lado, la electrónica con IO-Link se basa en una interfaz de comunicación digital punto a punto que permite el intercambio bidireccional de datos entre el sensor y un maestro IO-Link conectado al sistema de control. Este tipo de conexionado ofrece una serie de beneficios como la configuración remota de parámetros, la selección de tipo de salida (PNP, NPN, Push-Pull), y la recepción de información de diagnóstico en tiempo real**.** Además, permite implementar estrategias de mantenimiento predictivo, ya que el sistema puede advertir fallos eléctricos, desgaste del sensor o condiciones anómalas del proceso. IO-Link utiliza también un cableado estándar de 3 o 4 hilos, pero requiere un IO-Link Master adicional para su integración en redes industriales.

Conexión eléctrica - Electrónica - IO-Link

Parámetros eléctricos

Alimentación (L+, L-):	10 .. 30 V DC incl. 10% de EN 61010-1 El funcionamiento con IO-Link requiere un mínimo de 18V <55mA
Salida de señal (Out1, Out2):	Una salida activa: máx. 200 mA Ambas salidas activas: máx. 100 mA cada una

Tipo de salida



	Asignación de pines: Enchufe M12	Asignación de pines: Terminales de conexión
L+	1	1
Out 1	4	4
Out 2	2	5
L-	3	2

*Ajuste de fábrica

Cambio a NPN o Push-Pull posible a través del registro.

Fusible externo en L+:
máx. 0,5A, acción rápido o lento, HBC, 250V
Terminal 3 ver "Blindaje del cable" más abajo

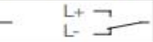
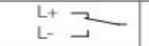
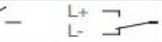
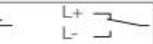
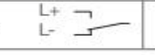
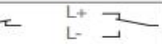
Blindaje del cable

Para obtener lecturas estables, se recomienda utilizar un cable aislado.

Con enchufe M12:
Cuando se utilizan enchufes/cables M12 disponibles en el mercado, el blindaje del cable se conecta a la rosca M12. Dado que la rosca M12 del CN7 es de plástico, el revestimiento del cable no está conectado al CN7 en la rosca M12 y, por lo tanto, debe conectarse a tierra en el otro extremo del cable.

Con terminales de conexión:
La pantalla del cable puede conectarse a tierra en el terminal 3 o en el otro extremo del cable. Ambos lados de la pantalla no deben estar conectados a tierra. Nota: El terminal 3 está conectado internamente en el dispositivo al terminal de conexión equipotencial externo.

Lógica de conmutación

Lógica de conmutación (ajuste de fábrica)						Error	
LED blanco		●		☼		2Hz ◐	
LED amarillo		●		☼		●	
Tipo de salida		PNP/NPN	Push-Pull	PNP/NPN	Push-Pull	PNP/NPN	Push-Pull
Out 1	FSL						
Out 2	FSH						

FSL = Prueba de fallas baja (Fail safe low)
FSH = Prueba de fallas alta (Fail safe high)

Lógica de conmutación ajustada en fábrica: salida 1 ajustada como FSL, salida 2 ajustada como FSH.
La lógica de conmutación puede cambiarse a través del registro IO-Link.

Electrónica IO-Link:

Cómo funciona

- Comunicación digital punto a punto: El sensor habla con un "IO-Link Master" (montado en riel DIN o en el gabinete), que a su vez se conecta al PLC/SCADA por un bus (ProfiNet, EtherNet/IP, Modbus TCP…).
- 2 salidas transistoras (PNP, NPN o Push-Pull): Configurables por software vía el maestro IO-Link.
- Diagnósticos integrados: Informe de fallo de sensor, temperatura, nivel de señal, recuento de conmutaciones, etc.

Ventajas

- Totalmente paramétrico: Ajustas umbrales de espuma, retardo, modos FSL/FSH, etc., desde la HMI o el software de control.
- Mantenimiento predictivo: Alertas de degradación, fallo de cable, sensor contaminado, sin interrumpir la línea.
- Reducción de cableado: Un solo par de hilos ("Daisy-Chain") para varios sensores si tu maestro lo permite.

Inconvenientes

- Requiere hardware extra: Necesitas un IO-Link Master compatible y configuración en el PLC.
- Coste inicial mayor: Sensor + Master + licencias/software de configuración.
- Complejidad de puesta en marcha: Programación y parametrización en la red de automatización.

¿Cuál nos conviene con la integración al sistema SCADA?

En el contexto del presente estudio., donde se busca detectar la presencia de espuma durante el llenado de camiones y enviar esta señal a un sistema SCADA, ambas opciones son viables. Sin embargo, si el objetivo incluye aumentar la confiabilidad operativa, permitir ajustes sin intervención física y anticiparse a posibles fallos, la electrónica IO-Link representa una alternativa más avanzada y funcional, especialmente en entornos industriales con visión hacia la digitalización e Industria 4.0.

La idea de usar IO-Link es mejor, pues permitirá:

- Ajustar on-line el punto de conmutación de espuma.
- Recibir alarmas de estado y diagnósticos.
- Integrar fácilmente en SCADA.

3.3.4 Opción de Integración de Módulos POINT I/O | Allen-Bradley

Allen-Bradley POINT I/O es un sistema modular de entradas y salidas distribuidas, compacto y flexible, diseñado para conectarse a PLCs a través de redes industriales como Ethernet/IP. El 1734-IB8 es un módulo clásico que ofrece 8 entradas digitales tipo sink (24VDC), utilizado para recibir señales desde sensores y dispositivos de campo.



Figura 3.3-5: Allan-Bradley Point I/O

De esta forma, con el fin de integrar esta funcionalidad al sistema de control existente de la empresa, se ha incorporado un sensor capacitivo de espuma de tipo PNP con EyS al módulo 1734-IB8, que permite recibir señales digitales provenientes de la detección de la espuma en los camiones cisterna. La comunicación entre los módulos POINT I/O y el PLC se realiza a través del protocolo industrial EtherNet/IP, que garantiza una transmisión rápida, confiable y estandarizada de datos en tiempo real. El adaptador de red 1734-AENTR actúa como intermediario entre el bus de módulos y la red Ethernet, facilitando la integración directa al sistema de control basado en plataformas como CompactLogix o ControlLogix.

Por otro lado, mediante la plataforma de programación Studio 5000, se configura y programa la lógica necesaria para que, al detectar espuma, el sistema cierre automáticamente la válvula correspondiente por un tiempo definido o de forma permanente. Esta integración no solo permite una respuesta automática y confiable ante la detección de espuma, sino que también fortalece la seguridad operacional y genera una automatización más tecnológica al proceso de carga.

- ❖ **Pasos para agregar el Sensor al sistema:**

1. Verificar el tipo de sensor:

Hay que asegurar que el sensor de espuma que estamos trabajando sea tipo PNP, como ya mencionamos.

- Marrón → +24VDC
- Azul → 0V (GND)
- **Negro** → Salida digital PNP (se activa con +24V cuando detecta espuma)

2. Conexión física al módulo 1734-IB8

Esquema de cableado básico**:**

- Sensor marrón → Fuente de alimentación +24VDC
- Sensor azul → 0VDC (GND) de la misma fuente
- Sensor negro (salida) → IN0 del módulo 1734-IB8 (por ejemplo)
- Conecta también GND de la fuente al COM del módulo de entrada (muy importante para referencia común)

Detalle de pines (ejemplo base 1734-TB):

Pin	Conexión
0	Entrada 0 (IN0)
8	Común (COM0)

3. Configuración en Studio 5000 (Rockwell / Allen-Bradley)

Paso a paso:

1. Abrir Studio 5000 y cargar un nuevo proyecto del PLC.
2. En el árbol del proyecto, ir a I/O Configuration.
3. Si no está agregado aún, agrega el:
    - Adaptador POINT I/O (por ejemplo, 1734-AENTR) con su IP.
    - Módulo 1734-IB8 como hijo del adaptador (elige el slot correcto).
4. Asigna un nombre claro al módulo, por ejemplo: Entrada_Espuma.

4. Acceder a la entrada en el programa

5. Una vez configurado el módulo, podrás ver la estructura:
6. *Entrada_Espuma.Data.0* → corresponde a IN0 del módulo, donde conectaste el sensor.

5. Programar la lógica en lenguaje Ladder.

Ejemplo básico: al detectar espuma, activa salida Q0.0 (válvula) por 10 segundos.

```
ladder
// Detectar espuma
|----[ Entrada_Espuma.Data.0 ]----[TON T4:0, PT=10s]----|

// Activar válvula mientras temporizador esté corriendo
|----[ T4:0/DN ]---------------------------( ) Salida_Valvula.Data.0
```

6. Verificación

- ✓ Usar "Monitor Tags" en Studio 5000 para ver si Entrada_Espuma.Data.0 cambia a 1 cuando hay espuma.
- ✓ Asegurar de que la lógica funcione correctamente y active la salida como se espera.

3.4 MEDICION DE FLUJO ELECTROMAGNETICO EN PLANTA.

La selección del sensor de flujo adecuado es un factor clave para asegurar la automatización eficiente del proceso de llenado, tanto del producto agropecuario como del aditivo antiespumante TIS-382. En este proyecto, se requiere un caudalímetro capaz de medir con alta precisión el flujo del producto que se transfiere al camión cisterna, y de transmitir esta información en tiempo real a un sistema de control automatizado.

Una medición precisa del volumen cargado resulta fundamental, ya que la dosificación del aditivo depende directamente de dicho valor, garantizando así una aplicación exacta y eficiente del TIS-382 durante cada ciclo de carga.

Entre las opciones evaluadas, se ha considerado el caudalímetro magnético AXG de la serie ADMAG TI**,** desarrollado por Yokogawa, el cual ya está disponible en la empresa Terramar SBH, es decir, ya se encuentra en planta, donde una empresa externa (KEISO) realiza las mantenciones cada año de estos equipos y de la instrumentación en general, lo que elimina costos adicionales de adquisición. Este equipo está diseñado específicamente para medir líquidos conductivos, como aceites, emulsiones o fertilizantes líquidos, entregando alta precisión y confiabilidad incluso en ambientes industriales exigentes. Su diseño robusto, sin partes móviles, asegura una operación estable y con bajo requerimiento de mantenimiento.

Ahora bien, aunque este modelo no cuenta con interfaz IO-Link nativa**,** su señal de salida analógica estándar (4-20 mA) puede ser adaptada mediante un convertidor externo, para ello necesitamos un Gateway, ya que según el manual de Yokogawa, este cuenta con 3 modos de comunicación, las cuales son Hart, Modbus y Brain (propia de Yokogawa) y la conexión para salida de corriente de 4–20 mA se realiza con dos hilos principales, correspondientes a los terminales (Iout+) e (Iout-).

En ese caso, podemos utilizar un convertidor de señal, de 4–20 mA a IO-Link como el modelo DP1213 de la marca IFM, lo que permite su integración dentro de una arquitectura de control basada en IO-Link. Esta solución posibilita el monitoreo del caudal en tiempo real, así como una integración simplificada con el PLC maestro, manteniendo la trazabilidad del proceso y la flexibilidad en la configuración.



Ilustración 3.4: Sensor AXG en Planta SBH.

Características importantes a considerar del equipo:

- Cantidad de hilos de señal (4–20 mA): 2 hilos
- Terminales de conexión: Iout+ y Iout-
- Compatibilidad con el convertidor IO-Link: total, conectando la salida de 4–20 mA del AXG al convertidor IO-Link analógico.

Es por eso que la elección del caudalímetro AXG responde a una combinación de criterios técnicos —por su precisión, confiabilidad y compatibilidad con productos agropecuarios— y logísticos, al tratarse de un recurso ya existente en la planta. Su integración mediante un Gateway IO-Link permite alinearlo con los requerimientos del sistema automatizado de dosificación propuesto, sin necesidad de reemplazar el equipo original.

3.4.1 Características técnicas del Caudalímetro Yokogawa AXG.

El sistema de medición de caudal se basa en un medidor de flujo magnético Yokogawa AXG (serie ADMAG TI). Esta familia se ofrece en versiones integrales y remotas, con diámetros de 2,5 a 500 mm y diferentes tipos de conexión (wafer, brida, higiénico). Para este proyecto se selecciona la configuración DN100 tipo brida con sensor remoto AXG y transmisor AXG4A, que entrega señal analógica 4–20 mA y comunicación HART. Dado que el dispositivo no dispone de IO-Link nativo, se integra a la arquitectura mediante un convertidor analógico–IO-Link, lo que permite aprovechar las ventajas de este protocolo sin cambiar el equipo ya existente

Modelos principales según el manual del AXG ADMAG TI

1. Medidor de flujo integral (AXG)
    - El sensor y el transmisor están en un solo cuerpo.
    - Se utiliza en instalaciones más simples o cuando el punto de medición está accesible.
    - Ideal para tuberías de tamaño estándar (desde DN2.5 hasta DN500).

2. Sensor remoto (AXG) + Transmisor remoto
    - El sensor se instala en la línea de proceso y se conecta a un transmisor externo mediante cableado.
    - Transmisores compatibles:
        - AXG4A
        - AXFA11G
    - Ventaja: el transmisor puede instalarse en un lugar seguro, protegido de vibraciones, altas temperaturas o atmósferas agresivas

3. Versiones por tipo de montaje

- Tipo unión conjunta: DN2,5 a DN10.
- Tipo wafer: DN2,5 a DN200.
- Tipo brida: DN2,5 a DN500.
- Tipo higiénico: DN15 a DN125, diseñado para la industria alimentaria o farmacéutica

4. Versiones por comunicación

- BRAIN (protocolo propietario de Yokogawa).
- HART (protocolo estándar ampliamente usado).
- Modbus TCP/IP (para integración industrial).
- No incluye IO-Link de fábrica, por eso se recomienda integrar un Gateway analógico o de pulsos → IO-Link.



Figura 3.4-1: Tipos Caudalímetros de la Serie AXG

3.4.2 Consideraciones para el Caudalímetro Yokokawa AXG.

Para garantizar mediciones confiables en la línea de descarga de camiones cisterna, el medidor de flujo magnético AXG Serie ADMAG TI se instalará en configuración DN100 tipo brida, siguiendo las recomendaciones del fabricante. Se dispondrá de tramos rectos de al menos 5D aguas arriba y 2D aguas abajo para estabilizar el flujo y se asegurará que la tubería permanezca completamente llena. La flecha del sensor se orientará en el sentido del flujo y las juntas se seleccionarán de acuerdo con los recubrimientos del sensor. La salida analógica 4–20 mA se conectará a un Gateway analógico→IO-Link, y de éste al IO-Link Master y al PLC/SCADA. Esta disposición permite mantener las ventajas del instrumento instalado y, al mismo tiempo, digitalizar la variable de caudal para la dosificación automática del antiespumante TIS-382.

Lo que dice el Manual:

El Yokogawa AXG ADMAG TI trae 3 modos de comunicación digital:

- BRAIN
- HART
- Modbus (RS-485)

Pero todos (menos Modbus) trabajan sobre la señal de corriente 4-20 mA. Es decir, el 4-20 mA siempre está presente y encima de él viaja el protocolo BRAIN o HART.

Diferencias claras:

1. BRAIN
    - Protocolo propietario de Yokogawa.
    - Se transmite superpuesto en la señal 4-20 mA.
    - Cada vez menos usado porque está limitado solo a Yokogawa.
2. HART
    - Estándar abierto y muy común en la industria.
    - También viaja sobre 4-20 mA (tienes el valor analógico + datos digitales simultáneos).
    - Compatible con Gateway multiprotocolo, y muchos IO-Link Gateway aceptan módulos HART.
3. Modbus (RS-485)
    - Comunicación digital pura, ya no hay 4-20 mA.
    - Necesita un Gateway que soporte Modbus RTU ↔ IO-Link.
    - Es robusto, pero tu Gateway IFM DP1213 (modelo seleccionado) no soporta Modbus RTU, solo HART/4-20.

Actualmente, el sistema requiere hacer un proceso base el cual cada X toneladas contabilizadas por el caudalímetro → que el SCADA/PLC active una bomba dosificadora de antiespumante.

1) Solución recomendada (más fiable y simple)

Usar la salida de pulso / totalizador del Yokogawa AXG como detector de "incrementos de caudal" y envíar esos pulsos al IO-Link master (entrada digital) o directamente al PLC. Luego el PLC / SCADA hace el conteo y, al alcanzar el número de pulsos equivalentes a la tonelada configurada, mandar la salida digital que habilita el contactor de la bomba de antiespumante.

Porque:

- Es robusto (no dependes de paquetes Modbus/HART que puedan retrasarse).
- Se evita convertir volumen → masa dentro del transmisor (se puede hacer en PLC con lógica clara y trazable).
- Es fácil de cablear y probar en campo.
- Determinístico y en tiempo real (actúa al instante en cada conteo).
- (El manual del AXG describe la salida de pulsos P+/P- y su cableado; además HART/Modbus existen, pero son mejores como redundancia/historización).

2) Cómo cablearlo (conectando AXG → IO-Link Master → SCADA/PLC)

A. Del caudalímetro (AXG) — señales físicas

- Buscar los bornes de P+ y P- (Pulse / Pulse output) en el transmisor (AXG / AXG4A / AXFA11).

- Tipo de salida: normalmente transistor / colector abierto o pulsos S0 (configurable). Confirmar en el parámetro de salida del AXG y configurarlo como “pulso por volumen”.

B. Cableado hasta el IO-Link Master o PLC digital input

- Si se lee la entrada digital desde un IO-Link Master:
    - Conectar P+ → DI+ del canal digital del IO-Link master (entrada digital comúnmente 24 V DC).
    - Conectar P- → DI− (o 0 V / GND compartido).
    - Usar cable apantallado (M12 si es conector) y conecta el blindaje a tierra en un extremo (preferiblemente en el lado de la alimentación/PLC).

Nota: en el manual del AXG se muestran las conexiones P+/P- y recomendaciones de apantallamiento y separación de hojas de excitación/SE/SA — cuidar el apantallado y la separación de pares (ver diagrama de bornes del manual).

Instalación y montaje del medidor de flujo AXG ADMAG TI

1. Preparación previa

- Personal: La instalación debe realizarla personal técnico cualificado, siguiendo las normas eléctricas y de seguridad vigentes.
- Inspección: Verificar modelo, diámetro nominal, código de recubrimiento, juntas y dispositivos de centrado antes de instalar
- Condiciones del lugar:
    - Evitar exposición directa al sol y fuentes de calor.
    - Evitar atmósferas corrosivas y vibraciones.
    - Mantener humedad <95 % de forma continua.

2. Diseño de tuberías

- Tramos rectos: Proveer mínimo 5D aguas arriba y 2D aguas abajo del medidor para estabilizar el flujo (D = diámetro de la tubería)
- Tubería llena: Instalar en posición que asegure que el tubo de medición esté siempre lleno de líquido (montaje vertical recomendado para evitar burbujas y sedimentos)
- Ubicación de inyección de químicos: Colocar la alimentación de aditivos aguas abajo del medidor, o a ≥50D si es inevitable ubicarla aguas arriba

3. Montaje mecánico (DN100 tipo brida)

- Dispositivos de centrado: Usar los centradores suministrados para mantener la concentricidad sensor–tubería
- Juntas: Seleccionar juntas con diámetros interior y exteriores correctos, que no sobresalgan dentro de la tubería. Para recubrimientos PFA/cerámica usar juntas libres de asbesto o PTFE según manual

- Orientación: Flecha del sensor en dirección del flujo; si se instala invertido, cambiar el parámetro “Dirección de flujo” en el transmisor
- Apretado: Apretar los pernos de brida de manera uniforme siguiendo el par de torsión recomendado en las tablas del manual, para no dañar recubrimientos ni juntas
- Soporte: No fijar el sensor por separado; fijar primero la tubería y luego soportar el medidor con ella para absorber dilataciones

4. Cableado y conexión eléctrica

- Protección y puesta a tierra: Conectar el borne de tierra de protección antes de energizar el equipo para evitar descargas eléctricas
- Cables: Para >50 °C usar cable resistente al calor (≥70 °C). Usar prensaestopas impermeables en entradas para evitar filtraciones
- Salida 4–20 mA: Conectar Iout+ / Iout– del medidor de flujo al Gateway analógico→IO-Link (por ej. IFM DP1213). Del Gateway al IO-Link Master mediante cable estándar M12
- Alimentación: Confirmar tensión (24 VDC en la mayoría de versiones) antes de conectar. Instalar interruptor/disyuntor externo de 15 A para desconexión rápida

5. Ajuste y verificación inicial

- Ajuste de cero: Realizar ajuste de cero desde la unidad de pantalla antes de la operación (Sección 6.1 del manual)
- Protección contra escritura: Activar la función para evitar sobreescritura de parámetros una vez calibrado
- Pruebas: Comprobar lectura de caudal y totalizador en el PLC vía IO-Link. Verificar que la lógica de dosificación del TIS-382 responda correctamente a los caudales medidos.

Nota: El presente resumen recopila las principales características técnicas y consideraciones de instalación del medidor de flujo magnético AXG de Yokogawa. Sin embargo, para profundizar en aspectos específicos tales como valores de torque de apriete, dimensiones exactas, combinaciones de materiales, precauciones de seguridad detalladas y procedimientos de cableado, se recomienda consultar directamente el Manual de Usuario e Instalación (Yokogawa, Serie ADMAG TI**)**. Dicho documento constituye la fuente oficial y completa de referencia técnica para garantizar una correcta instalación, operación y mantenimiento del equipo. Este último, se encontrará en el Capítulo 4 en manuales y anexos.

3.4.3 Integración del caudalímetro mediante Gateway para IO-Link.

Uno de los desafíos identificados en la implementación del sistema inteligente de llenado corresponde a la integración del caudalímetro electromagnético Yokogawa AXG dentro de la arquitectura de comunicación estandarizada con IO-Link. A diferencia de otros sensores seleccionados en este proyecto, este instrumento no dispone de compatibilidad nativa con IO-Link, limitando la posibilidad de transmitir datos de diagnóstico y parametrización de manera directa.

Para la aplicación con el caudalímetro AXG ADMAG TI (salida 4-20 mA) y la integración IO-Link, estas son las características mínimas imprescindibles que debe tener el Gateway:

Característica	Motivo / por qué es importante
✓ Soporte de señales analógicas 4-20 mA (y/o pulsos si usas totalizador) como entrada	✓ Para leer directamente la salida del AXG sin modificar el sensor.
✓ Salida IO-Link (clase A o B) compatible	✓ Para integrarlo al maestro IO-Link que va al PLC.
✓ Alimentación 24 VDC (o rango industrial)	✓ Compatibilidad con la planta, ya que usualmente se usa 24 V.
✓ Aislamiento eléctrico / protección IP adecuada	✓ Para evitar ruidos eléctricos, sobretensiones, proteger contra ambientes húmedos/polvo.
✓ Conectores industriales tipo M12 o similares, cableado robusto	✓ Para durabilidad, facilidad de montaje y mantenimiento.
✓ Diagnósticos (estado del Gateway, fallo de señal, corte de cable, etc.)	✓ Permite mantenimiento predictivo, algo que ya quieres usar.
✓ Precio accesible dentro del mercado local + soporte local	✓ Evita tiempos largos de importación o costos altos de aranceles.

Algunos modelos y opciones del mercado para algunos Gateway serian:



Figura 3.4-2: Modelos de Gateway en el mercado.

- IFM DP1213 Convertidor Analógico→IO-Link: Este es uno de los más recomendados. Convierte señal 4-20 mA a IO-Link. Marca de prestigio, existe soporte de IFM en Chile. Estimación de costo al extranjero ~$190-250 USD (depende importación).
- ULK-1616P-M2P6 Hub/IO-Link 16 I/O: Permite más I/Os, ideal si en el futuro quieres tener más sensores o señales. Pero cuesta más, y generalmente sobredimensionado para sólo una señal de 4-20 mA hoy.
- IFM 0-10V Convertidor IO-Link (señal múltiple): Si tu sensor cambiara salida a 0-10V (o tienes otros sensores), este convertidor puede servir. Menos común pero útil en casos mixtos.

Aunque el mercado global ofrece una vasta gama de convertidores y sensores de otros fabricantes, esta selección limitada y enfocada asegura que los dispositivos sugeridos no solo son técnicamente robustos, sino también logísticamente viables y sustentables para su uso en el entorno industrial chileno manteniendo la esencia de IO-Link como principal lenguaje.

Consideraciones / trade-offs

1. El Gateway introduce un punto adicional de falla / mantenimiento. Se Debe contar esto en el análisis de fiabilidad al momento de hacer más exacto las mediciones o calibraciones.

2. Latencia: normalmente es mínima, pero entre sensor → Gateway → maestro IO-Link → PLC hay más pasos que una salida directa 4-20 mA. Ver si eso afecta la sincronización de la dosificación automática.

3. Disponibilidad de repuestos en Chile; que haya soporte técnico local.

4. Costos de envío/aduana si lo importas: transporte, aranceles, IVA, y posiblemente certificaciones si lo exigen.

Otro punto importante a destacar, son las estimaciones de precio en Chile:

- El **IFM DP1213** suele importar bien; sumando aranceles + transporte + IVA, podría costar entre CLP 250.000 a 400.000 dependiendo distribuidor, aduana y stock.

- Gateway multi-I/O o hubs con muchos puertos (como ULK) podrían subir al rango CLP 400.000–800.000 o más, si son marcas premium con certificaciones IP altas.

- Verifica con distribuidores locales de IFM, Phoenix Contact, Balluff, Turck, etc., porque a veces ofrecen precios más competitivos e importan directamente.

3.4.4 Componentes necesarios para configurar la instalación del Gateway el Caudalímetro AXG.

El caudalímetro Yokogawa AXG Serie ADMAG TI representa el equipo clave para la medición del flujo másico del producto. Este dispositivo de campo utiliza el estándar industrial 4-20 mA para la transmisión de la Variable Primaria (PV: Caudal instantáneo), y el protocolo HART (Highway Addressable Remote Transducer) para la gestión de variables secundarias, diagnóstico y configuración remota.

Dado que la arquitectura de control propuesta para el nuevo sistema de carga se basa en la digitalización y el diagnóstico avanzado proporcionados por la tecnología IO-Link y la comunicación robusta EtherNet/IP hacia el PLC/SCADA, es indispensable la integración de un Gateway Específico.

Para ello el Componente Clave es: Gateway HART/4-20 mA a IO-Link

Para lograr la transición de un equipo analógico y HART a la red IO-Link, se propone la utilización de un módulo IO-Link Master o Gateway diseñado específicamente para la conectividad de dispositivos *legacy* con capacidad HART.

- **Dispositivo Propuesto: IFM AL1102 IO-Link Master (o similar, como el IFM DP1213)**.

Característica	**Detalle de la Función**	**Impacto en el Diseño**
Interfaz Física	El módulo posee puertos de entrada que aceptan la señal combinada 4-20 mA/HART proveniente del caudalímetro Yokogawa.	Permite la conexión directa sin *splitters* ni conversores adicionales.
Función de Conversión	Actúa como un *Gateway* que lee la señal analógica (4-20 mA) y la convierte en un valor digital de alta resolución, y simultáneamente extrae la información digital de HART.	Digitalización de la medición de caudal y acceso a variables secundarias como el totalizador.
Protocolo IO-Link	Empaqueta todos los datos (caudal, totalizador, diagnósticos HART) en el Telegrama IO-Link (IODD). Esta información viaja por un cable industrial estándar no apantallado.	Facilita la integración y reduce costos de cableado comparado con cables de instrumentación de alta calidad para 4-20 mA.
Comunicación *Top-Level*	El Gateway (IO-Link Master) se comunica directamente con el PLC (Controlador Allen-Bradley) mediante el protocolo EtherNet/IP.	Asegura que los datos digitalizados lleguen al SCADA/PLC con la velocidad y fiabilidad requerida por la red de control de la planta.

Tabla 3.4.4.1: Componentes necesarios para la medición.

3.4.5 Beneficios de la Integración Digital (HART a IO-Link)

La decisión de usar un Gateway para extraer los datos HART/4-20 mA en lugar de solo la señal 4-20 mA pura, entrega tres beneficios críticos:

1. Diagnóstico Avanzado: Se accede a las variables de estado y alarmas del caudalímetro Yokogawa (como fallas de bobina, *noise* excesivo o problemas de puesta a tierra), que son vitales para el mantenimiento predictivo y se pierden en una conexión puramente analógica 4-20 mA.

2. Multivariable: Permite la transmisión de múltiples parámetros (caudal instantáneo, totalizador de volumen, temperatura) en un único cable IO-Link, simplificando la lógica de control.

3. Configuración Remota: Es posible enviar comandos HART al caudalímetro (como cambiar el *span*, las unidades o realizar una verificación) de forma remota desde el SCADA, lo que reduce la necesidad de intervenciones en campo.

Esta solución garantiza que un equipo de alto desempeño como el Yokogawa AXG se integre por completo en la nueva arquitectura de Industria 4.0, proporcionando la trazabilidad y la información necesaria para el cálculo preciso de la dosificación del agente antiespumante TIS-382.

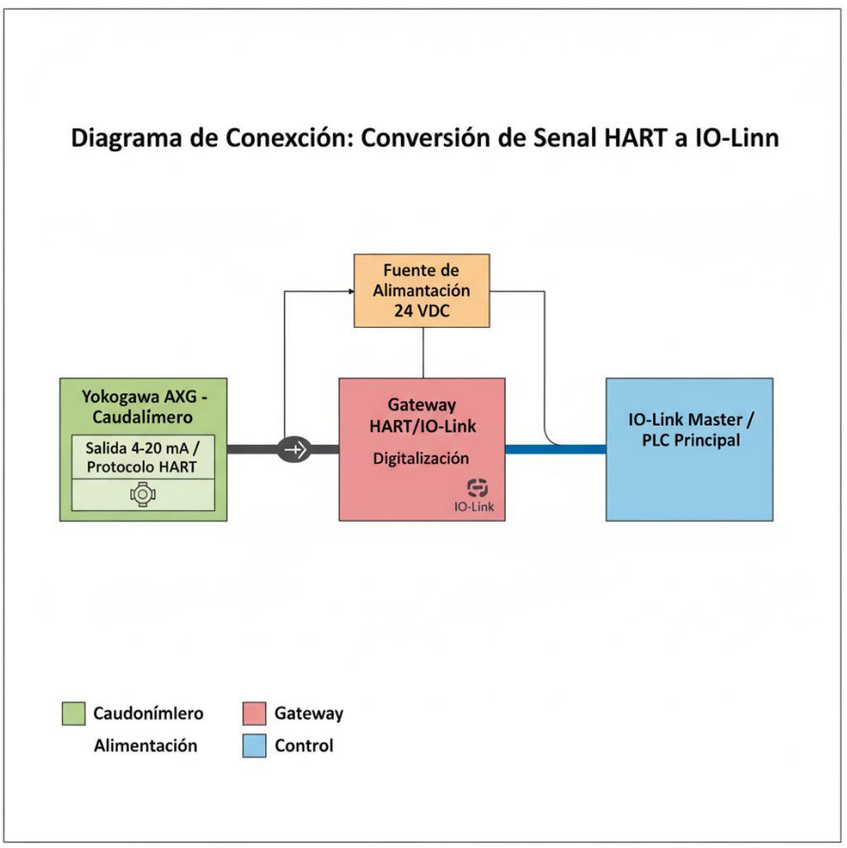


Figura 3.4-3: Diagrama de Conexión HART a IO-LINK.

c) Cableado y conexiones

Para realizar la instalación y conexión entre los componentes se requiere:

- Cable 2 hilos (par trenzado, blindado) para la señal 4-20 mA/HART entre el caudalímetro AXG y el Gateway.
- Conector M12 de 3 hilos (IO-Link estándar) entre el Gateway y el maestro IO-Link (PLC o módulo de entrada/salida inteligente).
- Fuente de alimentación de 24 VDC, necesaria para alimentar tanto el caudalímetro como el Gateway.
- Adaptador o módem HART USB opcional, utilizado durante la etapa de configuración inicial con software de diagnóstico (p. ej., PACTware o FieldMate).

d) Proceso de configuración y comunicación

1. Configuración HART: mediante software especializado y el módem HART, se parametriza el caudalímetro AXG (unidad de medida, rango, tipo de fluido).
2. Interconexión física: se conecta el lazo 4-20 mA con comunicación HART al Gateway IFM DP1213.
3. Conversión al sistema IO-Link: el Gateway convierte los datos HART recibidos a variables IO-Link legibles por el PLC.
4. Integración al PLC maestro: el controlador IO-Link actúa como maestro, mientras que el Gateway opera como dispositivo esclavo dentro de la red, entregando datos en tiempo real del caudalímetro AXG.
5. Supervisión y control: el PLC recibe y procesa las variables de caudal, permitiendo activar la lógica de control, como la dosificación de antiespumante o el cierre automático de válvulas de llenado.

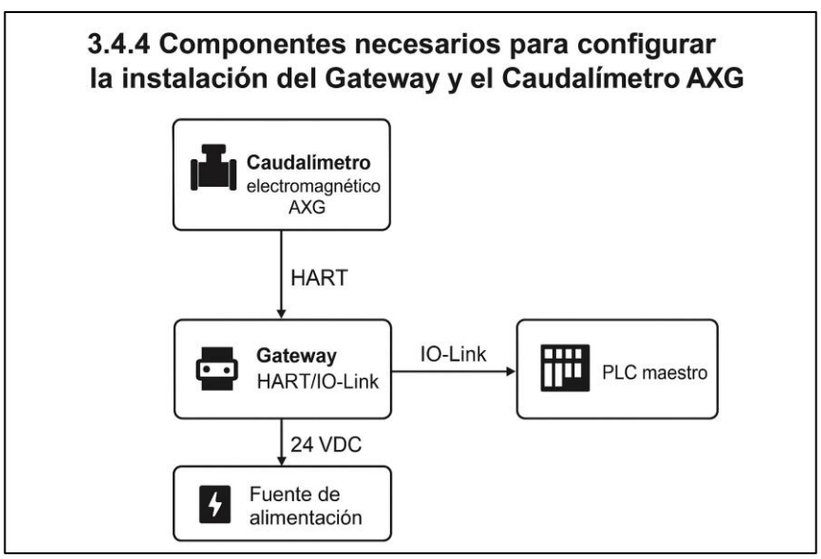


Figura 3.4-4: componentes para configurar Caudalimetro AXG.

3.5 Integración del skid de dosificación de Terramar en el sistema de llenado Autónomo.

1. Objetivo del skid de dosificación con IO-Link.

El objetivo del skid de dosificación es automatizar la inyección precisa del antiespumante TIS-382 en la línea de carga hacia el camión cisterna, con el fin de evitar la formación excesiva de espuma durante el proceso de llenado. Esta inyección debe realizarse en función de la cantidad de producto que fluye, la cual es medida en tiempo real por el sensor de flujo IO-Link. Para ello, es fundamental que el sistema respete estrictamente la fórmula de dosificación establecida por el fabricante, que indica la cantidad exacta de TIS-382 a aplicar por cada tonelada de producto transferido. Esto garantiza una dosificación eficiente, evita el uso excesivo del aditivo, y asegura el correcto desempeño del proceso sin comprometer la calidad del producto final ni los estándares de seguridad operativa.

2. Funcionamiento general del sistema

1. El producto Agropecuario fluye desde los estanques hacia el camión cisterna.
2. El sensor de flujo inteligente (IO-Link) mide el caudal del producto en tiempo real (por ejemplo, en toneladas/minuto).
3. Al superar un cierto umbral de caudal (o al detectar espuma), el sensor de espuma, manda una señala al PLC Maestro y activa la señal ejecutar el skid de dosificación.
4. El skid al recibir la señal, activa el motor y bombea automáticamente una cantidad dosificada de TIS-382 hacia las líneas de carga del camión.
5. Una vez controlada la espuma o finalizado el evento de flujo, el sistema detiene la dosificación, para luego dar luz verde al camión y pueda continuar con su pesaje.

3. Componentes del skid de dosificación

Componente	Función
Estanque de TIS-382	Contiene el antiespumante a inyectar.
Motor y Bomba dosificadora.	Inyecta el TIS-382 con precisión según una señal de control.
Caudalímetro o contador volumétrico	Verifica la cantidad dosificada para trazabilidad.
Electroválvula	Habilita o interrumpe el paso del antiespumante hacia la línea de descarga.
Variador de Frecuencia. (V.D.F)	Comanda el motor y activa/desactiva la bomba.
Tablero de Control y Energía.	Tablero con control Manual y donde se energiza el Skid.
Piping de inyección (Mangueras de impulsión del producto)	Conecta el skid a la línea principal donde se inyectará el TIS-382.

Tabla 3.4.5.1: Componentes del Sistema de Skid de dosificación.

3.5.1 Automatización del proceso para la emisión del Anti-Espumante.

La existencia de un Skid de Dosificación en la planta, que ya incluye motores y Variadores de Frecuencia (VDF) para el control de las bombas, es una ventaja operativa inmensa. Este activo no necesita ser reemplazado; solo requiere una actualización de su capa de comunicación para integrarlo a la inteligencia del sistema propuesto.

Actuadores Críticos y Requerimientos de Salida del PLC

Los elementos de actuación (bombas y válvulas) deben responder a comandos analógicos y discretos del PLC con alta fiabilidad.

1. Módulo de Control de la Bomba Dosificadora (Habilitación Proporcional Avanzada)

- El control de la bomba dosificadora se fundamenta en la capacidad de modulación dinámica de su caudal para inyectar el aditivo TIS-382 en una proporción exacta al flujo de aceite principal, implementando una estrategia de control de Feed-Forward (anticipación).
- Implementación de Modulación y Control de Velocidad (VDF):
- Este VDF ajustará las Revoluciones Por Minuto (RPM) del motor de manera continua y precisa.
- El ajuste de RPM permitirá implementar un Control Proporcional por Caudal (Feed-Forward) que se adaptará dinámicamente al flujo de aceite cargado, cuya medición de caudal es provista por el caudalímetro AXG (elemento de campo de alta precisión).
- Beneficio Clave: Esta implementación garantiza que la concentración de TIS-382 en el flujo principal sea constante e independiente de las variaciones en el caudal de aceite, logrando una optimización crítica del uso del aditivo y eliminando el sobredosificado o subdosificado.

Interfaz de Control Analógico del PLC:

- El PLC enviará una Salida Analógica (AO) de 4-20 mA al VDF.
- Esta señal AO no solo habilita el VDF, sino que se escala directamente para representar el SetPoint de caudal instantáneo del TIS-382 necesario.
- La lógica de control en el PLC calculará este SetPoint utilizando la relación de concentración deseada y la medición en tiempo real del caudalímetro AXG.
- Requisito de la Señal: El PLC debe garantizar una resolución mínima de 12 bits en la salida analógica para asegurar la granularidad del control de velocidad y caudal.

2. Electroválvula de Aislamiento (Corte Rápido y Sincronizado)

La electroválvula de aislamiento actúa como un guardián de la precisión, asegurando que la inyección comience y termine exactamente en el momento requerido.

- Requerimiento de Salida Digital (DO):
    - Una Salida Digital de Alto Rendimiento (DO) del PLC (con un tiempo de respuesta de conmutación rápido) activará la bobina de la electroválvula.
    - El módulo de salida digital debe ser compatible con la tensión y corriente nominales de la bobina de la electroválvula y debe estar equipado con supresores de picos de tensión (Snubbers) para proteger los componentes del PLC.
- Función Sincrónica Crítica (On/Off Precision):
    - La secuencia de operación debe ser estrictamente sincrónica para evitar cualquier inyección no deseada:
        - Apertura: La apertura de la electroválvula debe ocurrir inmediatamente previa a la habilitación y rampa de arranque del VDF de la bomba dosificadora.
        - Cierre: El cierre debe ser simultáneo y abrupto al envío de la señal de paro o de deshabilitación al VDF de la bomba.
    - Objetivo de la Sincronización: Esta coordinación garantiza que la inyección sea precisa en duración y termine de forma instantánea, eliminando la posibilidad de goteos residuales o inyecciones fuera de tiempo que comprometan la concentración final del producto.

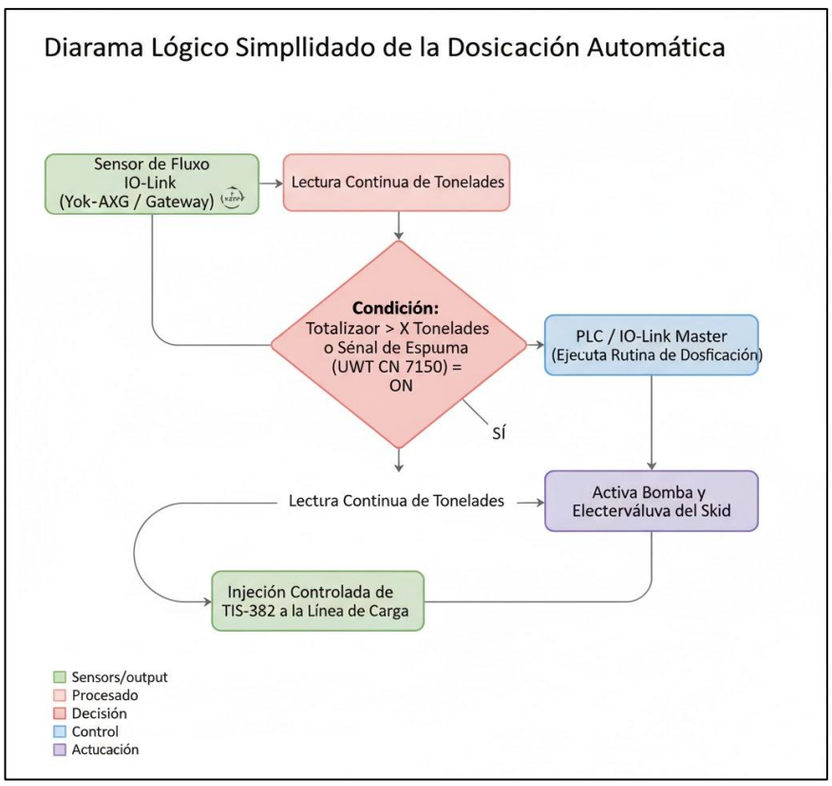


Figura 3.5-1: Diagrama conceptual de lógica de control.

Ahora es importante mencionar porque La decisión de usar un control más sofisticado que el simple ON/OFF (como un control Proporcional, o idealmente un PID que actúe sobre el VDF) es crucial para lograr la precisión y la estabilidad que requiere el control de anti-espumante.

Característica	Control ON/OFF (Simple)	Control Proporcional / PID (Avanzado)
Variable Controlada	El VDF solo recibe una señal de encendido (ON) y funciona a una velocidad fija preestablecida.	El VDF recibe una Señal Analógica 4-20mA que ajusta dinámicamente sus RPM (velocidad) y, por ende, el caudal de TIS-382
Precisión de la Dosis	Baja. La dosis se basa en un simple temporizador. Si el caudal de aceite varía, la dosis de TIS-382 será incorrecta, resultando en sobredosificado o subdosificado.	Alta. La dosis se basa en el caudal de aceite medido por el AXG (control *Feed-Forward*). La bomba inyecta proporcionalmente la concentración exacta (0.1% a 0.5%) requerida en ese instante.
Estabilidad del Proceso	Inestable**.** Introduce grandes perturbaciones al sistema (el producto pasa de cero dosificaciones a una dosis máxima), creando oscilaciones en la concentración.	Estable. La dosificación es suave y continua, manteniendo la concentración constante, lo cual es ideal para evitar alteraciones del producto final.
Respuesta a Fallos	Lenta y reactiva.	El control PID permite una corrección inmediata de la velocidad si se detecta que el caudal real de TIS-382 se desvía del *SetPoint* (si utilizas la retroalimentación de un caudalímetro de TIS-382).

Tabla 3.5.1.1: Diferencia de control on/off y PID

B. Sistemas de Verificación y Trazabilidad (Entradas de Diagnóstico Avanzado)

La fiabilidad operativa y el diagnóstico remoto se logran mediante la digitalización de la información del skid, utilizando la capacidad de IO-Link para la trazabilidad metrológica.

1. Retroalimentación de Estado Operacional de la Bomba:
    - Requerimiento de Entradas (DI): Se necesitan Entradas Digitales (DI) provenientes de contactos auxiliares en el VDF o relés de protección térmica para obtener señales de Bomba Habilitada y Falla de Motor.
    - Función de Seguridad: Si el PLC detecta una Falla de Motor durante el llenado, la lógica de seguridad debe automáticamente cerrar la válvula de llenado de aceite. Esta acción preventiva es vital para mitigar el riesgo de rebalse, ya que el sistema de control de espuma ha quedado inoperativo.
2. Medición de Caudal del TIS-382 (Trazabilidad y Calibración):
    - Caudalímetro de Precisión: Se recomienda la inclusión de un micro-caudalímetro (adecuado para micro-caudales) en la línea de inyección.
    - Ventaja de IO-Link: La selección de un equipo con salida IO-Link nativa es la solución más robusta. Permite la transferencia del Totalizador de Consumo de TIS-382 y datos de Diagnóstico al Master IO-Link. Esto facilita la comparación de la dosis teórica vs. la dosis real para auditorías y la gestión de inventario del aditivo.

3.5.2 Integración y Requerimientos de Entradas y Salidas (I/O) en el PLC.

Para la integración del *skid* y los sensores dentro del sistema de control, se necesita un conjunto específico de Entradas y Salidas (I/O), que se gestionarán a través de la plataforma Allen-Bradley POINT I/O (como los módulos 1734-IB8 para DI/DO y módulos analógicos).

Entradas (Inputs) Requeridas para el Control del Skid.

Señal de Entrada	**Dispositivo de Campo**	**Tipo de Señal / Módulo**	**Propósito Específico**
Caudal de Aceite	Yokogawa AXG	4-20 mA Analógica (Vía Gateway IO-Link/HART).	**Cálculo Base de Dosis:** Proporciona la variable de caudal para que el PLC calcule y ajuste el *SetPoint* de la dosificación proporcional.
Detección de Espuma	UWT CN 7150	Digital / IO-Link	**Cierre de Seguridad:** Si se detecta espuma en el nivel crítico preestablecido, el sistema cierra inmediatamente la Válvula de Corte Principal (VLV.Carga_Abierta).
Alineación de Camión	SICK Lector62x	Digital / IO-Link.	**Habilitación:** Condición de seguridad que activa el permiso para que el PLC inicie la secuencia de llenado y dosificación.
Estado de Falla (Motor)	VDF / Motor Bomba *Skid*	Contacto Seco Digital (DI).	**Cierre Crítico:** Si la bomba dosificadora falla, se detiene el llenado de aceite para mitigar el riesgo de rebalse debido a la inoperatividad del sistema antiespumante.

Tabla 3.5.2.1: Entradas requeridas para el control Skid.

Salidas (Outputs) Requeridas para la Actuación del Skid.

Señal de Salida	**Dispositivo de Campo**	**Tipo de Señal / Módulo**	**Propósito Específico**
Control de VDF	VDF del Skid	4-20 mA Analógica (AO)	Señal que ajusta la velocidad de inyección del TIS-382 para mantener el porcentaje de concentración constante.
Electroválvula	Electroválvula de aislamiento (Skid)	Digital (DO)	Permite el paso del aditivo. Su activación y corte deben ser sincrónicos al VDF para una dosificación precisa.

Tabla 3.5.2.2: Salidas requeridas para actuación del Skid.

Señal de Salida	Dispositivo de Campo	Tipo de Señal / Módulo	Propósito Específico
Válvula Principal	Válvula de Corte Principal de Aceite	Digital (DO)	Abre o cierra el flujo de aceite. Se controla con la lógica principal, incluyendo la señal de emergencia del sensor de espuma (CN 7150).

3.5.3 Lógica de Seguridad y Mantenimiento Predictivo.

La implementación de la tecnología IO-Link y la arquitectura EtherNet/IP no solo automatiza la dosificación, sino que también introduce una capa de diagnóstico avanzado y seguridad funcional, que se pierde en un sistema de control puramente analógico.

Seguridad Operacional (Integración con POINT Guard I/O)

La seguridad es prioritaria, ya que un rebalse causa pérdidas y contaminación.

- Enclavamiento de Flujo: El PLC utiliza una rutina de enclavamiento estricto (Interlock):
- Es decir, la carga de aceite solo se inicia si el camión está confirmado, la bomba dosificadora no tiene fallas y el sensor de espuma no ha detectado un nivel crítico.
- Corte Inmediato por Espuma (Alta Prioridad): Si el sensor UWT CN 7150 detecta espuma en el nivel de emergencia, la lógica del PLC debe generar una salida digital de cierre inmediato de la Válvula de Corte Principal. La velocidad de la red EtherNet/IP permite un tiempo de respuesta rápido (idealmente < 100mS).

Diagnóstico y Mantenimiento Predictivo (Ventajas de IO-Link)

IO-Link transforma los sensores de dispositivos de conmutación a fuentes de datos inteligentes:

1. Diagnóstico del Caudalímetro (Vía HART): El Gateway HART/IO-Link extrae datos de diagnóstico del Yokogawa AXG (como *noise* excesivo, fallo de bobina o problemas de puesta a tierra)[23]. Esto permite al personal de mantenimiento realizar una intervención antes de una falla total.
2. Configuración Remota del Sensor de Espuma: El UWT CN 7150 con electrónica IO-Link permite ajustar el punto de conmutación de espuma (sensibilidad) y los modos de falla (*Fail Safe*) a distancia desde el SCADA o la HMI. Esto reduce la necesidad de subir al camión para ajustes manuales (potenciómetros), aumentando la seguridad y reduciendo los tiempos de parada.
3. Trazabilidad del TIS-382: Se recomienda la adición de un micro-caudalímetro con salida IO-Link nativa en la línea del TIS-382. Este sensor mide el volumen real inyectado y envía el Totalizador de Consumo al PLC, permitiendo al SCADA comparar la dosis teórica (calculada por el AXG) con la dosis real inyectada, asegurando la calidad y el inventario del aditivo.

3.5.4 Impacto Operacional y de Sustentabilidad del Sistema Integrado

La implementación del sistema de llenado autónomo con detección de espuma y dosificación proporcional no solo resuelve el problema inmediato del rebalse, sino que genera un cambio profundo en la eficiencia, seguridad y gestión de costos de la operación de carga de camiones en Terramar SBH. Este sistema traslada la operación de un modelo dependiente de la supervisión manual a un entorno digital de la Industria 4.0.

1. Aumento en la Eficiencia Operativa y Reducción de Tiempos Muertos

El sistema automatizado elimina las ineficiencias asociadas a la supervisión y corrección manuales, logrando ciclos de carga más rápidos y predecibles.

- Minimización de Tiempos Muertos (Downtime): La detección instantánea de espuma mediante el sensor UWT CN 7150 y el cierre automático de la válvula de carga eliminan la necesidad de detener el proceso por un rebalse. Esto se traduce en una reducción significativa de los tiempos muertos, lo que permite cargar más camiones por turno.
- Velocidad de Respuesta Determinística: La comunicación industrial mediante EtherNet/IP y IO-Link garantiza que las señales críticas (como la detección de espuma) se transmitan al PLC en un tiempo mínimo (idealmente < 100 ms), asegurando que el corte de flujo sea casi instantáneo y previendo la pérdida de producto.
- Operación sin Dependencia Humana: Al automatizar la detección de espuma y la dosificación, se elimina la dependencia de un operador constante en el punto de carga, liberando a ese personal para tareas de mayor valor añadido.

2. Optimización de Costos y Recursos

El control preciso de la dosificación del aditivo y la eliminación de rebalses impactan directamente en la rentabilidad de la operación.

- Ahorro por Pérdida de Producto: El rebalse provoca pérdidas directas de producto líquido o semilíquido. El sistema actúa antes de que esto suceda, salvaguardando la materia prima valiosa y mitigando los costos de limpieza.
- Uso Eficiente del Antiespumante: El control proporcional (*Feed-Forward*) utiliza el dato exacto de caudal del Yokogawa AXG para inyectar el TIS-382. Esto garantiza que la dosificación se mantenga siempre dentro del rango efectivo (0.1% a 0.5% Lts), evitando el sobre dosificado. Una menor inyección se traduce directamente en un menor costo de insumos químicos.
- Mantenimiento Predictivo: El diagnóstico avanzado que ofrece IO-Link en el sensor de espuma y el Gateway HART/IO-Link en el caudalímetro permite detectar fallas incipientes (suciedad, fallas de cable, desgaste) antes de que se conviertan en paradas no planificadas, reduciendo los costos de mantenimiento correctivo.

3. Mejora de la Calidad del Producto Final y Seguridad

La precisión en la dosificación y la verificación previa a la carga aseguran que el producto entregado cumpla con los estándares de calidad y que el proceso sea inherentemente seguro.

- Integridad del Producto: La dosificación controlada del TIS-382 previene las alteraciones en la calidad del producto final (cambios de viscosidad, turbidez o sedimentos) que pueden ser causadas por un exceso de aditivo. Esto es crucial para un producto agropecuario sensible.
- Trazabilidad Completa: La integración de todos los sensores (flujo, espuma, posición) en la red EtherNet/IP permite al sistema SCADA registrar con precisión: el volumen cargado, la dosis de TIS-382 inyectada y el tiempo de carga, lo que mejora la trazabilidad metrológica para auditorías y certificaciones de calidad.
- Validación de Posición: El SICK Lector62x previene el inicio de la carga si el camión no está perfectamente alineado o si la escotilla no está abierta. Esto es una barrera de seguridad fundamental para evitar derrames y accidentes operacionales.

4. Impacto Ambiental y Sustentabilidad

El control del rebalse tiene un impacto ambiental directo al reducir la contaminación y optimizar el uso de recursos.

- Menor Contaminación: Al prevenir el rebalse de producto y la consecuente formación de espuma en el suelo de la planta, se reduce la necesidad de costosos procesos de limpieza y la potencial contaminación de la escorrentía o el sistema de alcantarillado.
- Uso Racional de Químicos: El sistema de dosificación proporcional inyecta el anti-espumante solo en la cantidad estrictamente necesaria y en función del caudal real. Esto se alinea con las mejores prácticas de sustentabilidad industrial y la gestión responsable de aditivos químicos.

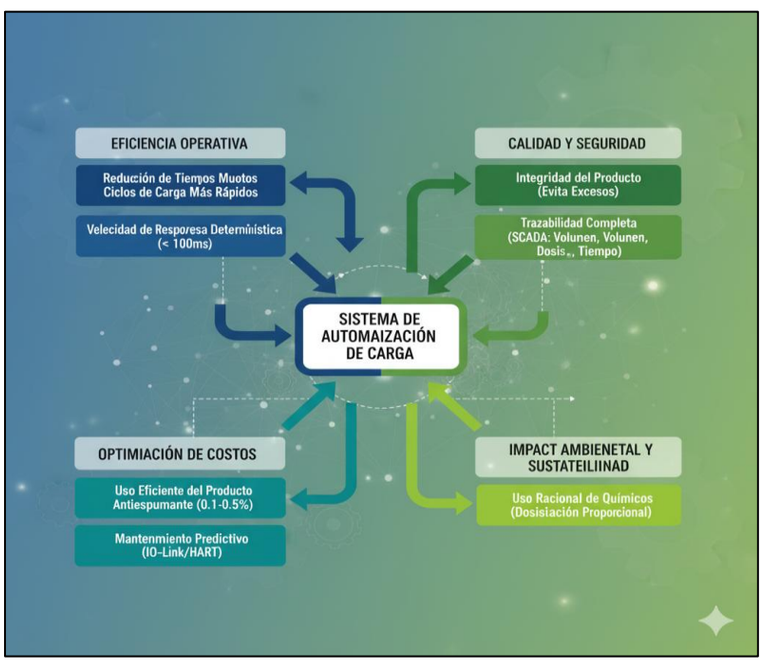


Figura 3.5-2: Mapa conceptual de la Sustentabilidad

CAPITULO N°4: CONCLUSIONES Y ANEXOS.

4.1 Conclusiones Generales del Proyecto.

El desarrollo del presente trabajo de título ha permitido abordar y resolver una problemática crítica en la industria agropecuaria moderna: la generación incontrolada de espuma durante la carga de camiones cisterna, específicamente en la planta de Terramar SBH. Tras el análisis teórico, la evaluación de tecnologías y el diseño del sistema de llenado inteligente, se establecen las siguientes conclusiones generales:

1. Validación de la Automatización como Solución a la Ineficiencia Operativa

El estudio confirma que la dependencia actual de la supervisión humana para monitorear el nivel de espuma es insostenible desde el punto de vista de la eficiencia y la seguridad. La implementación de un sistema automatizado no es simplemente una mejora tecnológica, sino una necesidad operativa. Se ha demostrado que la integración de sensores capaces de diferenciar fases (líquido vs. espuma) elimina la subjetividad del operador y los tiempos de reacción tardíos que derivan en rebalses. El diseño propuesto transforma un proceso manual y reactivo en uno proactivo y controlado, alineándose con los objetivos de reducción de pérdidas y optimización de tiempos muertos planteados al inicio de la investigación.

2. Eficacia del Control Dual: Detección Física y Mitigación Química

Una de las conclusiones más relevantes de esta investigación es que la solución óptima no reside en una sola tecnología, sino en la sinergia entre la instrumentación y la química.

- Por un lado, la selección del sensor capacitivo UWT CN 7150 ha demostrado ser la decisión técnica correcta para el entorno agresivo y variable de los tanques cisterna. Su principio de funcionamiento basado en la constante dieléctrica permite una discriminación precisa que otros sensores (como los ultrasónicos u ópticos) no pueden garantizar en presencia de espuma densa o vapores.

- Por otro lado, se concluye que la detección por sí sola evita el rebalse, pero no el problema raíz. La incorporación del agente antiespumante TIS-382, dosificado de manera automática, ataca la formación de la espuma desde su origen químico. Esta estrategia integral asegura no solo que el camión no se rebalse, sino que la carga sea más rápida y el producto mantenga su calidad, validando la hipótesis de que la automatización debe ir acompañada de un tratamiento del producto.

3. Salto Tecnológico hacia la Industria 4.0 mediante IO-Link

El diseño de la arquitectura de control marca un hito en la modernización de los procesos de la planta. Se concluye que la adopción del protocolo IO-Link es fundamental para la viabilidad a largo plazo del sistema. A diferencia de las conexiones analógicas tradicionales, IO-Link permite que los dispositivos de campo (sensor de nivel, caudalímetro y cámara) entreguen diagnósticos en tiempo real, no solo datos de proceso. Esto significa que el sistema diseñado no solo "avisa" cuando hay espuma, sino que también informa sobre el estado de salud de los propios sensores (suciedad en el lente, rotura de cable, pérdida de señal). Esto valida el objetivo específico de diseñar un sistema que minimice la intervención humana y facilite el mantenimiento predictivo.

4. Garantía de Seguridad y Trazabilidad desde el Inicio del Proceso

El análisis del posicionamiento de los camiones reveló que los riesgos operativos comienzan antes de la carga. La integración del sensor de visión SICK Lector62x permite concluir que la seguridad del proceso puede ser garantizada mediante verificación digital. Al condicionar el inicio de la carga a la lectura positiva de un código QR y la validación de la forma de la escotilla, se elimina el error humano de "falsos inicios" o cargas en camiones mal alineados. Esto cierra el ciclo de control de seguridad, protegiendo tanto al personal como al producto desde el momento en que el vehículo ingresa a la zona de carga.

5. Viabilidad Económica y Operativa de la Dosificación Precisa

Finalmente, se concluye que el sistema de dosificación proporcional diseñado es técnica y económicamente viable. Al utilizar la señal del caudalímetro Yokogawa AXG (integrado vía Gateway IO-Link) para controlar la inyección de TIS-382, se asegura que solo se utilice la cantidad estricta de aditivo necesaria (entre 0,1% y 0,5%). Esto contrasta con la dosificación manual o por tiempos fijos, que suele llevar al desperdicio de insumos o a la alteración del producto final por exceso de químicos. El sistema garantiza que cada litro de aceite cargado reciba su micro-dosis exacta de antiespumante, estandarizando la calidad del producto final independientemente del operario de turno.

6. Evaluación Económica, CAPEX, OPEX y Retorno de Inversión (Payback)

La implementación del Sistema Inteligente de Llenado en la planta Terramar SBH representa una inversión de capital altamente eficiente, sustentada en la reutilización de activos de instrumentación preexistentes (como el caudalímetro Yokogawa AXG y los variadores del Skid de dosificación). El presupuesto de inversión inicial **(CAPEX)** asciende a $18.266.600 CLP (19.855 USD), el cual agrupa la adquisición de dispositivos bajo el

estándar de Industria 4.0 (sensor capacitivo UWT CN 7150, visor de visión SICK Lector62x, Gateway de integración y arquitectura de control Allen-Bradley con seguridad funcional).

En el ámbito operacional **(OPEX)**, el suministro del agente antiespumante organosiliconado TIS-382 —cotizado directamente con el fabricante Jiangxi Tiansheng en formato de contenedor IBC de $1.000 kg a un valor FOB Shanghai de $4,96 USD/kg ($4.563 CLP)— garantiza un costo competitivo. Considerando que los camiones cisterna operan en un rango de carga contractual de 25 a 30 toneladas (con un promedio operativo de 28 toneladas), el sistema de control proporcional (Feed-Forward) evita los excesos de dosificación manual. Esto optimiza el consumo del aditivo químico a un rango de $128.000 a $151.000 CLP por lote procesado.

Con respecto al retorno de inversión y tiempo de recuperación **(Payback),** la valorización de las materias primas (lecitina, oleína y ácidos grasos) establece que cada tonelada de producto derramado por espuma incontrolada representa una pérdida de entre $1,34M y $1,78M de pesos, más $250.000 CLP en gastos de contención. Ante un escenario de derrames moderados recurrentes (2,5 toneladas promedio por incidente), el proyecto amortiza su inversión total al evitar entre 4 y 5 eventos, logrando un Payback de 6 a 8 meses. Asimismo, frente a contingencias catastróficas del nivel histórico registrado en planta (derrames de 14 toneladas equivalentes a medio camión), la prevención de un solo evento crítico cubre el 100% del CAPEX de manera inmediata, validando de forma categórica la rentabilidad técnica, económica y de seguridad del sistema automatizado.



Figura 4.1.6: Valorización de perdidas por derrame.

4.2 Guion Operativo: El Ciclo de Carga Inteligente

Tras definir la arquitectura de control y seleccionar las tecnologías de instrumentación bajo el estándar de Industria 4.0, es necesario establecer la secuencia lógica y cronológica que regirá el proceso de carga en la planta Terramar SBH. El siguiente guion operativo describe la interacción dinámica entre el PLC Allen-Bradley, el protocolo IO-Link y los actuadores finales.

Este procedimiento ha sido diseñado para transformar una operación tradicionalmente manual y reactiva en un sistema autónomo capaz de garantizar la seguridad funcional y la eficiencia en la dosificación del agente antiespumante TIS-382. A continuación, se detalla el ciclo de vida de una operación de carga, desde la validación del vehículo hasta el cierre de seguridad por detección de espuma.

Desarrollo del Ciclo Operativo

1. Llegada y Verificación (El Portero Digital)

- Escena: Un camión cisterna ingresa y se posiciona en la zona de carga.
- Intervención Tecnológica: El visor SICK Lector62x escanea el código QR en la escotilla para identificar patente y conductor.
- Validación: El sistema analiza la geometría de la escotilla mediante visión artificial para confirmar la alineación exacta con la tubería de descarga.
- Decisión: Solo si la alineación es correcta, el PLC habilita el sistema; de lo contrario, bloquea el flujo para prevenir derrames.

2. Inicio de Carga y Seguridad (El CheckList Automático)

- Acción: El operador conecta los acoples y el PLC realiza un escaneo de seguridad previo al flujo.
- Actuar de la Automatización: El sistema verifica que el Skid de Dosificación esté operativo y que el sensor UWT CN 7150 no reporte alarmas.
- Apertura: Cumplidas las condiciones, se activa la Válvula de Corte Principal.

3. Llenado y Dosificación Inteligente (El Corazón del Proceso)

- Dinámica: El aceite comienza su transferencia mientras se previene la formación de espuma mediante control químico activo.
- Control Proporcional: El caudalímetro Yokogawa AXG mide el flujo instantáneo, enviando los datos vía Gateway HART/IO-Link al PLC.

- Cálculo: El PLC aplica la fórmula de dosificación (0.1% a 0.5% Lts) y comanda al VDF del Skid para inyectar la micro-dosis exacta de TIS-382.

4. Vigilancia Activa (El Guardia de Seguridad)

- Monitoreo: Mientras el tanque se llena, el sensor capacitivo UWT CN 7150 actúa como la última barrera de defensa.
- Diferenciación de Fases: Gracias a su tecnología basada en constante dieléctrica, el sensor ignora salpicaduras y distingue entre el producto líquido y el crecimiento de espuma densa.

5. El Desenlace (Control de Rebalse o Fin Exitoso)

- Escenario A (Ideal): Al alcanzar el total de toneladas programado (aprox. 28 TON), el PLC cierra la válvula y registra la trazabilidad completa en el SCADA.
- Escenario B (Emergencia): Si la espuma toca la sonda del sensor UWT, se envía una señal de alta prioridad que cierra la válvula de carga en menos de 100 ms

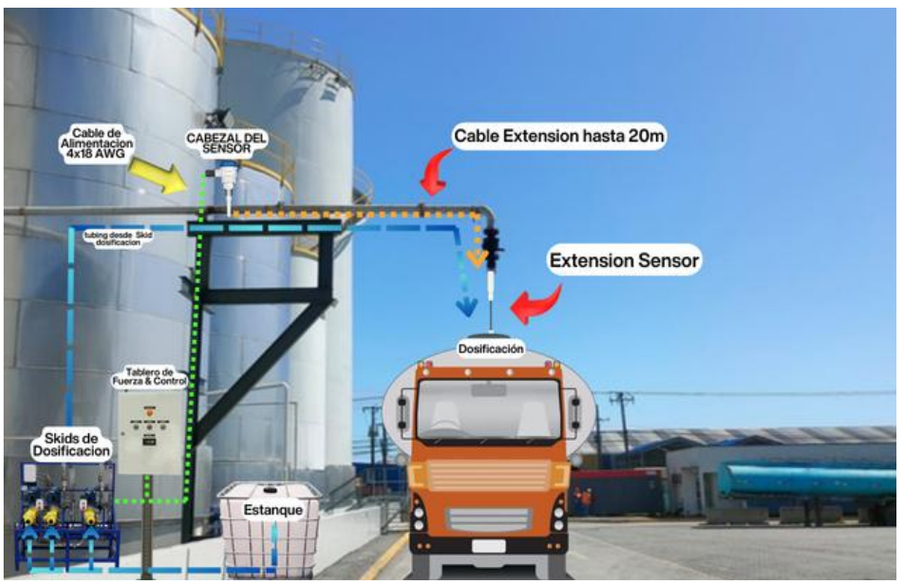


Figura 4.2-1: Imagen representativa del Proyecto.

4.3 Validación Digital del Sistema mediante Simulación 3D

Con el propósito de demostrar y validar la lógica de diseño, los interbloqueos de seguridad y el comportamiento dinámico de la estación de carga antes de invertir en la implementación física pesada, se desarrolló un entorno de simulación interactiva. Este sistema actúa como un gemelo digital simplificado que permite someter la lógica de control a escenarios operativos y de contingencia.

Arquitectura del Entorno de Simulación

La herramienta opera bajo un esquema estructurado mediante las siguientes tecnologías web y protocolos industriales:

- **Interfaz de Usuario y Estructura Base (HTML y JavaScript):** El archivo principal (Simulacion.html) articula la estructura visual del sistema, actuando como la base de la simulación. Los scripts en JavaScript integrados manejan el comportamiento interactivo, calculando variables como el balance de masa, el aumento de volumen y la generación de espuma en tiempo real.
- **Motor Gráfico Tridimensional (Three.js):** Para la representación visual se utilizó la librería Three.js. Este motor gráfico permite renderizar directamente en el navegador web una maqueta 3D interactiva del camión cisterna y la bahía de carga. Esto ilustra dinámicamente cómo interactúan los fluidos y la interfaz líquido/espuma sin requerir software de modelado pesado.
- **Entorno de Ejecución Local (Node.js):** Como capa de enlace se implementó Node.js, un motor de ejecución de JavaScript que opera directamente en el computador local. Este entorno gestiona el procesamiento de fondo, asegurando que la simulación corra de manera fluida y autónoma sin depender de un servidor externo.
- **Comunicación Industrial (Modbus TCP):** Para dotar a la simulación de validez industrial, se integró un módulo de comunicación basado en el protocolo Modbus TCP. A través de un ejecutable local, la aplicación web intercambia reglas de seguridad y protocolos en tiempo real con el "cerebro industrial" (PLC). Esto permite simular el comportamiento de los sensores propuestos (como el UWT CN 7150 y el SICK Lector62x) y la actuación de las válvulas, verificando las respuestas ante contingencias como cortes de red o detección crítica de espuma.

Modos de Operación y Puesta en Marcha

Para la ejecución del entorno virtual, el sistema requiere como requisito base la instalación de **Node.js** en el equipo local, el cual actúa como el motor que procesa las comunicaciones en segundo plano. Una vez instalado este entorno, el usuario accede a la interfaz gráfica abriendo directamente el archivo principal Simulacion.html.

Al iniciar la plataforma, el sistema despliega un menú de configuración ("Preparar Simulación") que permite al usuario seleccionar entre dos modalidades de ejecución, dependiendo del nivel de profundidad técnica requerido para las pruebas:

1. Modo APP WEB (Simulación Autónoma): En este modo, el sistema utiliza la lógica de control interna programada directamente en la aplicación web, sin necesidad de conectarse a un PLC externo. Esta configuración permite ejecutar demostraciones de manera autónoma 100% en el navegador web. Es la opción ideal para validaciones rápidas de las reglas de negocio, proyecciones ejecutivas en salas de reuniones y la visualización del proceso de llenado sin requerir configuraciones de red o archivos externos.

2. Modo PLC - MODBUS TCP (Simulación Integrada): Este modo es el núcleo de la validación técnica, ya que permite conectar la maqueta 3D interactiva con un "cerebro industrial". Para utilizar esta modalidad, es necesario contar con el archivo de programación lógica desarrollado en el software **EcoStruxure de Schneider Electric**, el cual emula el comportamiento de un PLC físico de la serie Modicon.

La aplicación web se enlaza con este controlador ingresando su dirección IP en la interfaz (por ejemplo, 127.0.0.1 si el PLC simulado se ejecuta en la misma máquina local). Una vez establecida la conexión, la simulación comienza a intercambiar datos en tiempo real mediante el protocolo Modbus TCP. La maqueta web actúa como la planta física, enviando señales de campo al PLC, mientras que este último procesa la lógica y devuelve los permisos de apertura, comandos de actuación de bombas y válvulas, y las alarmas correspondientes. Este modo permite validar la robustez de la programación y el correcto funcionamiento de los enclavamientos de seguridad antes de cargar el código en el hardware real.



Figura 4.3-1: Interfaz de configuración y selección del modo de simulación.

4.4 Conclusiones Técnicas del Proyecto.

El diseño detallado y la selección de tecnologías para el sistema inteligente de llenado han generado un conjunto de conclusiones técnicas fundamentales que validan la robustez, la precisión y la modernidad de la solución propuesta. Estas conclusiones se derivan de la exhaustiva investigación y justificación expuesta en los capítulos precedentes:

1. Fiabilidad y Precisión de la Detección de Fases con Tecnología Capacitiva:

Se concluye que el sensor capacitivo UWT CN 7150 con sonda de varilla es la elección técnica superior para la detección del nivel y la espuma en un proceso de llenado de aceite vegetal. La clave reside en su principio de medición por la constante dieléctrica, que permite una discriminación inequívoca entre la baja constante dieléctrica de la espuma y la mayor constante dieléctrica del producto líquido (aceite). Esta capacidad de diferenciar fases es crucial, ya que los sensores de nivel convencionales (como los de presión o flotador) o tecnologías como ultrasonido o radar (afectadas por la atenuación en la espuma) no podrían garantizar la fiabilidad necesaria para detener la carga con la precisión requerida justo al detectar la espuma, no el líquido. Además, su diseño robusto y resistencia a incrustaciones lo hacen idóneo para el entorno industrial.

2. Optimización de la Dosificación del Antiespumante a través de la Digitalización del Caudalímetro:

La integración del caudalímetro magnético existente Yokogawa AXG Serie ADMAG TI al sistema IO-Link, mediante el uso de un Gateway HART/4-20 mA a IO-Link (como el IFM DP1213), representa una conclusión técnica fundamental. Esta estrategia permite aprovechar una inversión ya realizada y, al mismo tiempo, modernizar su conectividad. Al convertir la señal analógica a datos digitales vía IO-Link, el PLC/SCADA recibe no solo la medición de flujo, sino también el valor totalizador acumulado del volumen cargado. Esta información es vital para el control de lazo cerrado de la dosificación del antiespumante TIS-382, asegurando que las micro-dosis (0,1% a 0,5% Lts del volumen cargado) se inyecten de forma proporcional y precisa, evitando el sub-dosificación (ineficaz) o la sobredosificación (costosa y potencialmente alteradora del producto).

3. Verificación de Seguridad con Visión Artificial para Prevenir Errores de Carga:

La incorporación del sensor de visión inteligente SICK Lector62x es técnicamente crucial para establecer una capa de seguridad preventiva. Se concluye que el uso de la visión artificial para:

Lectura de códigos QR: Asegura la identificación correcta del camión y la verificación de que está autorizado para la carga.

En cuanto al análisis de la forma de la escotilla: Valida la correcta alineación del camión debajo de la boca de carga. Este componente elimina la posibilidad de errores humanos en la verificación inicial del proceso, los cuales son una causa común de derrames y - accidentes. La conectividad EtherNet/IP de este dispositivo permite una comunicación directa y robusta con el PLC, habilitando un bloqueo del inicio de carga si las condiciones de seguridad no se cumplen, añadiendo una capa de fiabilidad crítica al sistema global.

4. Robustez y Flexibilidad de la Arquitectura de Control con IO-Link y Ethernet/IP

Se concluye que la combinación de IO-Link como enlace punto a punto a nivel de campo y EtherNet/IP como red troncal de control es una arquitectura técnica óptima para un sistema de llenado inteligente de Industria 4.0.

- IO-Link: Proporciona un canal de comunicación bidireccional digital que permite la configuración remota de parámetros del sensor (por ejemplo, ajustar la sensibilidad del UWT CN 7150) y la lectura de datos de diagnóstico avanzados (como la temperatura interna del sensor, el tiempo de funcionamiento o los ciclos de conmutación). Esta riqueza de datos es inalcanzable con la señal 4-20 mA y es esencial para el mantenimiento predictivo y la resolución de problemas.
- EtherNet/IP: Ofrece la velocidad, capacidad y estandarización necesarias para integrar el PLC, los módulos de E/S (Allen-Bradley POINT Guard I/O), el Gateway IO-Link y el sensor de visión. Esta red facilita la comunicación de grandes volúmenes de datos y la integración sencilla en sistemas SCADA existentes, asegurando la escalabilidad y la interoperabilidad de la solución.

5. Mejora Sustancial en Seguridad Funcional con Módulos POINT Guard I/O

La selección de los módulos de E/S Allen-Bradley POINT Guard I/O (808) para la gestión de las señales de seguridad críticas es una conclusión técnica que refuerza la integridad del sistema. Estos módulos no solo transmiten señales de entrada/salida, sino que también ofrecen diagnósticos detallados sobre el estado del cableado y los cortocircuitos directamente al PLC sobre EtherNet/IP. Esto minimiza el riesgo de fallas no detectadas en los lazos de seguridad y facilita una respuesta rápida ante cualquier anomalía, crucial para las funciones de parada de emergencia o interbloqueo del proceso de llenado.

6. Simulación mediante el Gemelo Digital

Se concluye que la incorporación de una simulación interactiva (Gemelo Digital) como herramienta complementaria aporta un valor estratégico fundamental en la etapa de diseño de proyectos industriales. Al emular la estación de carga y establecer una comunicación bidireccional mediante el protocolo Modbus TCP, fue posible someter el sistema a pruebas de estrés y escenarios de emergencia de forma totalmente virtual. Esta validación del tipo "Software in the Loop" demostró empíricamente que la lógica de programación del PLC, los interbloqueos de seguridad y las respuestas de los actuadores funcionan de manera sincronizada y correcta. De este modo, se garantiza que el diseño propuesto es robusto y funcional, permitiendo que la futura transición hacia el montaje y comisionamiento físico sea segura, predecible y con un margen de error considerablemente minimizado.

4.5 Recomendaciones a considerar.

Tras el desarrollo de la ingeniería conceptual y la selección tecnológica para el sistema de llenado inteligente en la planta de Terramar SBH, y considerando la naturaleza agroindustrial del proceso, se presentan las siguientes recomendaciones técnicas y operativas orientadas a garantizar la sostenibilidad, eficiencia y mejora continua del sistema propuesto:

1. Optimización Empírica de la Dosificación del Agente Antiespumante

Si bien se ha seleccionado el agente TIS-382 con un rango de dosificación teórico del 0,1% al 0,5% Lts, se recomienda implementar una fase de "Marcha Blanca" o *Commissioning* avanzado. Durante esta etapa, se deben correlacionar las variables de temperatura ambiente y viscosidad del aceite con la generación de espuma. El objetivo es encontrar la curva de dosificación mínima efectiva. Esto no solo reducirá los costos operativos al ahorrar producto químico, sino que también minimizará cualquier posible alteración en la composición final del producto entregado al cliente. Asimismo, dado que el TIS-382 puede presentar estratificación en reposo, se recomienda instalar un agitador automático de bajas revoluciones en el tanque del *skid* de dosificación para asegurar la homogeneidad de la mezcla antes de la inyección.

2. Mantenimiento Preventivo Enfocado en la Óptica del Sensor de Visión

La implementación del sensor SICK Lector62x es clave para el posicionamiento y seguridad. Sin embargo, en un entorno de carga de aceites y grasas, existe un alto riesgo de que vapores de aceite o salpicaduras ensucien la lente del equipo, afectando su capacidad de lectura de códigos QR y detección de formas. Se recomienda encarecidamente:

- Programar limpiezas periódicas de la lente como parte del protocolo de mantenimiento.
- Evaluar la instalación de un accesorio de "barrido de aire" (*air knife*) en el lente de la cámara, utilizando aire comprimido instrumental para mantener la óptica libre de partículas y condensación de aceite de forma automática.
- Utilizar la funcionalidad de IO-Link para monitorear el parámetro de "calidad de lectura" o suciedad del sensor en tiempo real, generando una alerta en el SCADA antes de que el sistema falle por falta de visibilidad.

3. Validación de la Latencia en la Medición de Flujo

Dado que el caudalímetro Yokogawa AXG se integrará mediante un *Gateway* conversor de 4-20mA/HART a IO-Link, se introduce un paso intermedio en la comunicación. Aunque para procesos de llenado estándar esto es aceptable, se recomienda realizar pruebas de estrés en la red para verificar que la latencia (retardo) introducida por el *Gateway* no afecte la precisión del corte de válvula al final de la carga. Si en el futuro se requiere una precisión milimétrica, se sugiere evaluar la migración a un módulo de comunicación nativo (EtherNet/IP o Modbus TCP) para el caudalímetro, eliminando la conversión intermedia.

4. Aprovechamiento de la Diagnóstica Predictiva (Industria 4.0)

El sistema diseñado utiliza fuertemente la tecnología IO-Link. Se recomienda no utilizar esta tecnología únicamente para obtener el valor de la variable (nivel o flujo), sino explotar los **datos acíclicos** para mantenimiento predictivo. Específicamente:

- Monitorear la "frecuencia de conmutación" del sensor capacitivo UWT CN 7150 para detectar falsos positivos causados por adherencia excesiva de material en la sonda (efecto *build-up*), a pesar de que el sensor está diseñado para ignorarlo.
- Configurar alarmas en el sistema SCADA que avisen al operador no solo cuando el tanque está lleno, sino cuando los sensores pierden calidad de señal o presentan temperaturas de operación fuera de rango.

5. Redundancia de Seguridad ante Fallos de Control

Aunque el sistema propuesto es altamente confiable mediante el uso de un PLC Allen-Bradley, se recomienda mantener o instalar un interruptor de nivel de "Alto-Alto" (High-High) puramente electromecánico o de tecnología diversa (ej. horquilla vibratoria) cableado directamente a la parada de emergencia o al corte de la bomba, sin pasar por el software del PLC. Esto actuará como una última barrera de seguridad física (capa de protección LOPA) en el caso hipotético de un fallo lógico en el controlador o congelamiento de la red de comunicación, garantizando que el rebalse sea físicamente imposible.

4.6 Bibliografía del Proyecto.

Manuales Técnicos y Hojas de Datos

- Jiangxi Tiansheng New Materials Co., Ltd. (2024). *Ficha Técnica TIS-382: Agente Antiespumante de Organosilicona*. Recuperado de documentación del fabricante: https://tis-adjuvant.en.made-in-china.com/product/qdixspNCkLhl/China-Anti-Foam-Agent-Inhibits-The-Formation-of-Foam-on-The-Surface-of-Liquid-Tis-382.html

- UWT Level Control. (2022). *Manual de Instrucciones y Especificaciones Técnicas: Sensor Capacitivo Serie CN 7000 / CN 7150 (Nivelpvc)*. Betzigau, Alemania. Recuperado de https://www.uwtgroup.com/es/capanivo-cn-7000.html

- SICK Sensor Intelligence. (2023). *Guía de Operación: Lector de códigos basado en imágenes Lector62x*. Waldkirch, Alemania. Recuperado de https://www.sick.com/mx/es/productos/procesamiento-industrial-de-imagenes-e-identificacion/lectores-de-codigos-basados-en-camara/lector62x/c/g158951

- Yokogawa Electric Corporation. (2023). *Manual de Instalación y Usuario: Medidor de Flujo Magnético AXG Serie ADMAG TI (IM 01E22A01-01ES)*. 1ª Edición. Tokio, Japón. Recuperado de https://web-material3.yokogawa.com/IM01E22A01-01EN.pdf *(Nota: Enlace a versión internacional EN/ES)*.

- IFM Electronic. (2024). *Hoja de Datos: Convertidor IO-Link a analógico 4...20 mA - Modelo DP1213*. Essen, Alemania. Recuperado de https://www.ifm.com/mx/es/product/DP1213

- Rockwell Automation / Allen-Bradley. (2022). *Manual de Usuario: Módulos de E/S POINT I/O Boletín 1734 y Adaptadores de Red*. Milwaukee, WI, EE. UU. Recuperado de https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1734-um001_-es-p.pdf

Normativas y Estándares

- International Electrotechnical Commission (IEC):
(2013). *IEC 61131-9: Programmable controllers - Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI)*. (Estándar IO-Link). Recuperado de https://webstore.iec.ch/publication/68534

- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2014):
Directiva 2014/34/UE (ATEX) sobre aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas. Recuperado de https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32014L0034

- Modbus Organization. (2006). *Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b*. Hopkinton, MA, EE. UU. Recuperado de https://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf

- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*. Springer. Referencia teórica sobre la aplicación de Gemelos Digitales.

Software y Herramientas de Ingeniería

- SICK AG:
SOPAS Engineering Tool (Software de configuración para sensores SICK). Versión 2024. Recuperado de https://www.sick.com/mx/es/catalog/productos/servicios-digitales-y-software/engineering-tools/sopas-et/sopas-engineering-tool-64-bit/p/p684930

- Schneider Electric. (2024). *EcoStruxure™ Machine Expert - Entorno de programación para controladores Modicon*. Rueil-Malmaison, Francia. Recuperado de https://www.se.com/
- OpenJS Foundation. (2026). *Node.js: Entorno de ejecución para JavaScript basado en el motor V8*. Recuperado de https://nodejs.org/
- Three.js Authors. (2026). *Three.js: JavaScript 3D Library (WebGL)*. Recuperado de https://threejs.org/

Recursos Corporativos y Antecedentes

- Terramar SBH. (2019):
Información corporativa y descripción de procesos de carga de aceites. Coronel, Región del Biobío, Chile. (Documento interno).

- IO-Link Consortium.
IO-Link: The usage of IO-Link in the Industry 4.0 context.
Recuperado de: https://io-link.com/en/

4.7 ANEXOS.

ANEXO A: Ficha Técnica del Agente Antiespumante TIS-382

Descripción del Producto: El TIS-382 es un agente antiespumante de organosilicona diseñado específicamente para aplicaciones agroindustriales. Su función principal es reducir la tensión superficial para provocar la ruptura de burbujas de espuma generadas por turbulencia mecánica.

Especificaciones Técnicas:

- Apariencia: Emulsión de color blanco lechoso a amarillo claro.
- Contenido Sólido: 27% (±1%).
- Viscosidad: 1400 - 1900 mPa.s.
- pH: 6.0 – 8.5.
- Dosificación recomendada: 0.1% a 0.5% del volumen total.
- Componentes activos: Polisiloxano, surfactantes de silicona y agentes dispersantes.

ANEXO B: Especificaciones y Configuración del Sensor de Nivel (Espuma)

Equipo: UWT Capanivo® CN 7150 (Sonda de varilla con extensión de cable).

Datos Técnicos Relevantes:

- Principio de medición: Capacitivo (detección por cambio de constante dieléctrica).
- Longitud de extensión: Configurable de 500 mm a 20.000 mm.
- Temperatura de proceso: -40°C a +125°C.
- Presión de proceso: -1 a +10 bar.
- Material de la sonda: PPS (Grado alimentario/FDA) y Revestimiento FEP.
- Certificaciones: ATEX II 1G (Zona 0) / IECEx para atmósferas explosivas.

Esquema de Conexión Seleccionado (Electrónica IO-Link):

- Pin 1 (L+): 10...30 V DC.
- Pin 3 (L-): GND.
- Pin 4 (C/Q): Comunicación IO-Link / Salida de conmutación 1.
- Lógica de conmutación: Configurado para detectar "Espuma Presente" = Salida Activa (PNP).

ANEXO C: Sistema de Visión y Verificación de Posición

Equipo: SICK Lector62x (Lector de códigos basado en imágenes).

Parámetros de Instalación:

- Distancia de lectura recomendada: 150 mm a 600 mm para códigos QR en escotillas.
- Interfaz de comunicación: IO-Link (para transmisión de datos al maestro y PLC).
- Software de configuración: SOPAS Engineering Tool.

Funciones Programadas:

1. Match Code: Verificación de coincidencia de código QR (Datos del camión/Chofer).
2. Object Locator: Verificación de forma geométrica (alineación de escotilla vs tubería).

ANEXO D: Medición de Flujo e Integración 4-20mA a IO-Link

Equipo de Medición: Yokogawa ADMAG TI - Serie AXG (DN100).

Equipo de Integración: Convertidor IFM DP1213 (IO-Link a 4-20 mA).

Detalle de Integración: El caudalímetro AXG no posee IO-Link nativo. La señal de la variable primaria (Caudal másico) se transmite vía 4-20 mA hacia el convertidor DP1213.

Esquema de conexionado:

- Yokogawa AXG (Terminales Iout+ / Iout-): Salida de corriente 4-20 mA activa.
- IFM DP1213 (Puerto Entrada): Recibe lazo de corriente (Pin 2 y 3 según configuración).
- IFM DP1213 (Puerto Salida): Conector M12 hacia Maestro IO-Link (Pin 4 Data).
- ANEXO E: Lógica de Control (Ejemplo de Programación Ladder)

Fragmento de código

```
// Rung 0: Detección de Nivel Crítico de Espuma
// Entrada_Espuma.Data.0 es la señal digital del sensor UWT
// Se usa un Timer ON Delay (TON) para filtrar falsos positivos por salpicaduras (

   Entrada_Espuma.Data.0         T4:0 (Timer Espuma)
|-------] [-----------------------(TON)--------------|
                                 | Preset: 1000 ms  |
                                 | Accum:    0      |

// Rung 1: Acción de Control - Cierre de Válvula y Alerta
// Si el timer termina (DN), se activa la memoria de "Espuma Detectada"
// Esto cierra la válvula de carga y activa la baliza roja.

      T4:0.DN                    Memoria_Fallo_Espuma
|-------] [-----------------------(L)----------------|

// Rung 2: Salida Física a Válvula (Lógica Inversa por seguridad)
// Si hay fallo de espuma, se corta la energía a la solenoide (Cierre por resorte)

   Memoria_Fallo_Espuma          Salida_Valvula_Carga
|-------]/[-----------------------( )----------------|
```

Figura 4.7-1 Ejemplo de un fragmento del código.

Descripción: Lógica simplificada para la activación de la válvula de seguridad ante la detección de espuma por el sensor UWT conectado al módulo POINT I/O.

Rutina de Seguridad de Espuma, (Allen-Bradley Studio 5000):

Explicación de Variables:

- Entrada_Espuma.Data.0: Señal digital proveniente del módulo 1734-IB8 (Sensor UWT).
- Salida_Valvula_Carga: Salida digital hacia la electroválvula neumática.

ANEXO F: Diagrama de Arquitectura de Red.

Descripción de Topología:

1. Nivel de Control: PLC Allen-Bradley CompactLogix / Sistema SCADA.
2. Red Troncal: EtherNet/IP.
3. Nivel de Campo (Distribuido):
    - Módulo IO-Link Master.
    - Módulo de Seguridad Allen-Bradley POINT Guard I/O (1734-AENTR).
4. Nivel de Dispositivos (IO-Link / Digital):
    - Sensor UWT CN 7150 (Vía IO-Link o Digital PNP).
    - Cámara SICK Lector62x (Vía IO-Link).
    - Caudalímetro Yokogawa AXG (Vía Convertidor IFM DP1213).
    - Skid de Dosificación (Controlado por salidas digitales del PLC).

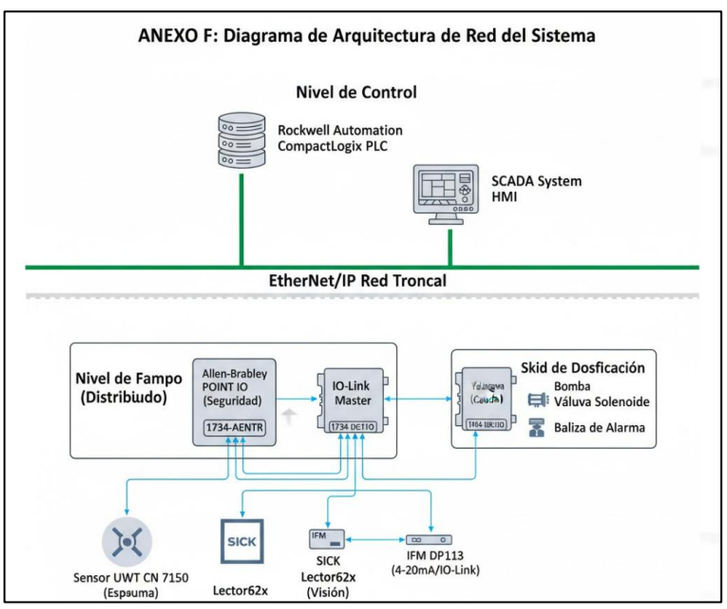


Figura 4.7-2: Arquitectura del Sistema.

4.8 AGRADECIMIENTOS.

La culminación de este trabajo de titulación simboliza la convergencia de años de esfuerzo y el invaluable apoyo de personas e instituciones que han marcado mi formación.
Agradezco a la Universidad Técnica Federico Santa María, por brindarme un entorno de excelencia que ha forjado mi carácter profesional.

Dedico estas líneas especialmente a mi Profesor Guía, Nelson Vásquez Concha. Su mentoría fue fundamental desde la génesis de la idea hasta la revisión final. Agradezco su paciencia y disposición para guiarme en los objetivos y transformar mis dudas en certezas técnicas, otorgando rigor a este proyecto.

Asimismo, extiendo mi gratitud a los profesores Ricardo Vera y Helmut Contreras. Sus consejos prácticos y perspectivas técnicas fueron claves para perfeccionar la solución propuesta y elevar la calidad de esta investigación.

Un reconocimiento destacado merece la empresa Terramar SBH. Mi experiencia profesional en su equipo fue la inspiración de este trabajo de título. Enfrentar los desafíos operativos reales me permitió identificar la problemática de la espuma y diseñar el "Sistema de Llenado Inteligente". Valoro profundamente el aprendizaje práctico adquirido en sus instalaciones.
Finalmente, a mi familia, mi pilar fundamental. Gracias por su amor incondicional, su comprensión ante mis ausencias y su aliento constante. Este logro es fruto de su apoyo y confianza en mí.

A todos quienes contribuyeron a este proyecto, muchas gracias.

FIN.