

**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



TESIS

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE
DESCARGA DE UNDERFLOW PARA UN ESPESADOR DE
RELAVES”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Elaborada por:

Bach. Sánchez Medina Joel Eduardo

Bach. Benavides Mendoza Gerson Andres

Asesor:

M.Sc. Ing. Rodríguez Chirinos Frank Richard

**LAMBAYEQUE – PERÚ
2021**

JURADO



Ing. Ramírez Castro Manuel Javier
Presidente



M.Sc. Ing. Reyes Vásquez Wilson Dennis
Secretario



M.Sc. Ing. Pachamango Bautista Thauso Gad
Vocal

ASESOR



M.Sc. Ing. Rodríguez Chirinos Frank Richard

ACTA DE SUSTENTACIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DECANATO

Ciudad Universitaria - Lambayeque



ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL N°002-2022-D/FACFyM

Siendo las 12.10 pm del día Jueves 14 de Enero del 2022, se reunieron vía plataforma virtual, <https://meet.google.com/mcj-oxse-tub> los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE DESCARGA DE UNDERFLOW PARA UN ESPESADOR DE RELAVES designados por Resolución N°687-2021-VIRTUAL-D/FACFyM de fecha 23 de Setiembre 2021. Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

Ing. Manuel Javier Ramírez Castro	Presidente
M.Sc. Ing. Wilson Dennis Reyes Vásquez	Secretario
M.sc. Ing. Thauso Gad Pachamango Bautista	Vocal

La tesis fue asesorada por el M.Sc. Ing. Rodríguez Chirinos Frank Richard nombrado por Resolución N°687-2021-VIRTUAL-D/FACFyM de fecha 23 de Setiembre 2021.

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 941-2021-VIRTUAL-D/FACFyM de fecha 27 de diciembre 2021.

La Tesis fue presentada y sustentada por los Bachilleres: Sánchez Medina Joel Eduardo y Benavides Mendoza Gerson Andrés y tuvo una duración de 30 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de (16) (Dieciséis) en la escala vigesimal, mención (Bueno).

Por lo que quedan aptos para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Electrónico** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 12:30 pm se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Ing. Manuel Javier Ramírez Castro
Presidente

M.Sc. Ing. Wilson Dennis Reyes Vásquez
Secretario

M.Sc. Ing. Thauso Gad Pachamango Bautista
Vocal

Mg. Ing. Frank Richard Rodríguez Chirinos
Asesor

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Sánchez Medina Joel Eduardo, junto a mi compañero, Benavides Mendoza Gerson Andrés, investigadores principales, y el M.Sc. Ing. Rodríguez Chirinos Frank Richard, asesor de nuestro trabajo de investigación denominado “Diseño de un sistema de control automático de descarga de underflow para un espesador de relaves”, declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso se demostrara lo contrario, asumimos responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo al que hubiera lugar. Que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, 28 de setiembre del 2021.

Investigadores:



Bach. Sánchez Medina Joel Eduardo



Bach. Benavides Mendoza Gerson Andres

Asesor:



M.Sc. Ing. Rodríguez Chirinos Frank Richard

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis en primer lugar a Dios Padre por brindarme fortaleza, paciencia y sabiduría para poder afrontar todos los retos en mi camino como profesional.

A mis padres Eduardo y Clara, por su dedicación, esfuerzo y su apoyo incondicional en cada fase de mi vida.

A mi hermano Edwin, por su apoyo y constantes palabras de aliento.

Los quiero.

Bach. Sánchez Medina Joel Eduardo

En este presente proyecto de tesis quiero dedicarlo en primer lugar a ti mi Dios, por darme la sabiduría necesaria y guiarme por el buen camino.

A mis padres Delmer y Stany, por darme educación y su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mi hermano Jorge por ser uno de mis motivos de salir adelante y darle el ejemplo como hermano mayor que soy.

Bach. Benavides Mendoza Gerson Andres

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a nuestro Dios en primer lugar por darnos la sabiduría e inteligencia y sobre todo por estar siempre iluminándonos día a día. Agradecer a nuestros familiares que con su apoyo, dedicación y sabios consejos nos ayudan a seguir creciendo personal y profesionalmente para servir a Dios y la sociedad. Al M.Sc. Ing. Frank Richard Rodríguez Chirinos nuestro asesor, quien no dudó en apoyarnos, guiándonos y aconsejándonos ante cada problema e incertidumbre que se nos presentó en la realización del proyecto, estando siempre con nosotros brindándonos su apoyo. Finalmente agradecer a la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, a los docentes de la carrera de Ingeniería Electrónica que nos instruyeron durante los 5 años de carrera universitaria, gracias a su dedicación, conocimientos y experiencias compartidas hacia nosotros.

Los autores

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.1. Síntesis de la Situación Problemática	15
1.2. Formulación del Problema de Investigación	19
1.3. Hipótesis.....	19
1.4. Objetivos	19
1.4.1. Objetivo General.....	19
1.4.2. Objetivos Específicos.....	20
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes.....	21
2.1.1. Internacionales	21
2.1.2. Nacionales	22
2.1.3. Regionales	23
2.2. Bases Teóricas	24
2.2.1. Espesador de Relaves	24
2.2.2. Medición de Nivel.....	31
2.2.3. Medición de Densidad.....	35
2.2.4. Sistemas de Control Industrial.....	36
3. CAPÍTULO III: MÉTODOS Y MATERIALES	47
3.1. Tipo y Diseño de la Investigación	47
3.2. Población	47

3.3.	Muestra.....	47
3.4.	Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales.....	48
3.5.	Definición y Operacionalización de Variables.....	49
3.6.	Diseño del Sistema de Control Automático.....	49
3.6.1.	Diagnóstico General.....	49
3.6.2.	Dimensionamiento del Sistema de Bombeo.....	63
3.6.3.	Alternativas de Solución.....	69
3.6.4.	Descripción de la Estrategia de Control Seleccionada.....	70
3.6.5.	Dimensionamiento y Selección de Equipos para el Prototipo.....	71
3.6.6.	Lista de Instrumentos y Actuadores para el Prototipo.....	76
3.6.7.	Lista de Señales de Control.....	76
3.6.8.	Elaboración de Planos.....	78
3.6.9.	Configuración y Programación de Equipos.....	85
4.	CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	106
4.1.	Introducción.....	106
4.2.	Resultados de las Pruebas de Funcionamiento.....	107
5.	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	128
5.1.	Conclusiones.....	128
5.2.	Recomendaciones.....	129
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Contaminación de Efluentes por Actividad Minera	15
Figura 2: Demanda de Agua en Minería	16
Figura 3: Espesador de Relaves.....	16
Figura 4: Espesador de Relaves en SHOUXIN Perú S.A.....	17
Figura 5: Esquema de Planta de Filtrado de Relaves en Consorcio Minero Horizonte S.A.....	18
Figura 6: Espesador de Relaves Cilíndrico	25
Figura 7: Tipo de Rastras	26
Figura 8: Espesador Tipo Puente.....	28
Figura 9: Espesador Tipo Columna	29
Figura 10: Espesador con Tracción Central	29
Figura 11: Espesador Múltiple	30
Figura 12: Espesador de Alta Densidad.....	31
Figura 13: Medidores de Nivel con Medición Directa	33
Figura 14: Medición de Nivel por Presión Diferencial.....	34
Figura 15: Medida de Densidad por Radioactividad	36
Figura 16: Sistema de Control Distribuido	40
Figura 17: PLC	41
Figura 18: Campos de Aplicación de los PLC	44
Figura 19: HMI.....	45
Figura 20: SCADA	46
Figura 21: Unidad Minera Chinalco Perú S.A	50
Figura 22: Espesadores de Relaves FLSmith	51

Figura 23: Bombas de Desplazamiento Positivo.....	52
Figura 24: Control y Gestión de Bombas de Descarga.....	53
Figura 25: Diagrama de Flujo de Proceso de Flotación.....	54
Figura 26: P&ID Descarga del Espesador de Relaves (simplificado).....	55
Figura 27: Diagrama Esquemático del Espesador de Relaves (referencial)	55
Figura 28: Transmisor de Nivel.....	58
Figura 29: Transmisor de Densidad.....	59
Figura 30: Válvulas Tipo Cuchilla	62
Figura 31: Características de Cable THW	64
Figura 32: Interruptor Termomagnético	66
Figura 33: Contactor	67
Figura 34: Relé Electrónico.....	68
Figura 35: Características de Cable THW	72
Figura 36: Circuito de Potencia.....	78
Figura 37: Circuito de Control – E/S Digitales	79
Figura 38: Circuito de Control – Entradas Analógicas.....	80
Figura 39: Tablero de Control – Parte Externa	81
Figura 40: Tablero de Control – Parte Interna	82
Figura 41: Arquitectura de Red	83
Figura 42: Diseño Estructural – Vista Frontal y Aérea.....	84
Figura 43: Configuración del PLC y Módulo de Entradas Analógicas	85
Figura 44: Creación de E/S Digitales	85
Figura 45: Características del Transmisor de Nivel para el Prototipo	86

Figura 46: Secuencia para Entrar al Modo de Configuración	87
Figura 47: Configuración del Nivel Máximo en L1	88
Figura 48: Configuración del Nivel Mínimo en L2.....	89
Figura 49: Creación de Entradas Analógicas	91
Figura 50: Programación Ladder – Iniciar / Detener Proceso / Falla por Sobrecarga.....	91
Figura 51: Diagrama de Flujo – Iniciar Proceso	92
Figura 52: Diagrama de Flujo – Detener Proceso	92
Figura 53: Diagrama de Flujo – Falla por Sobrecarga.....	93
Figura 54: Programación Ladder – Procesamiento de Señales Analógicas.....	94
Figura 55: Diagrama de Flujo – Procesamiento de Señales Analógicas	95
Figura 56: Programación Ladder – Activar / Desactivar Bombas de Descarga.....	95
Figura 57: Diagrama de Flujo – Activar / Desactivar Bombas de Descarga	96
Figura 58: Programación Ladder – Activar / Desactivar Válvulas de Descarga.....	96
Figura 59: Diagrama de Flujo – Activar / Desactivar Válvulas de Descarga	97
Figura 60: Programación Ladder – Estado de Recirculación.....	97
Figura 61: Diagrama de Flujo – Estado de Recirculación	98
Figura 62: Programación Ladder – Estado de Disposición de Lodos.....	98
Figura 63: Diagrama de Flujo – Estado de Disposición de Lodos.	99
Figura 64: Programación Ladder – Falla por Sobrecarga.....	99
Figura 65: Diagrama de Flujo – Falla por Sobrecarga.....	100
Figura 66: Programación Ladder – Confirmación de Marcha	100
Figura 67: Diagrama de Flujo – Confirmación de Marcha	101
Figura 68: Pantalla Principal de HMI	102

Figura 69: Pantalla de Proceso de HMI	103
Figura 70: Pantalla Emergente de Nivel	103
Figura 71: Pantalla Emergente de Densidad	104
Figura 72: Pantalla Emergente de Estado de Bombas	104
Figura 73: Pantalla Emergente de Falla de Bombas	105
Figura 74: Relaves	106
Figura 75: Pantalla Principal en HMI	107
Figura 76: Pantalla de Proceso en HMI	108
Figura 77: Válvulas de Descarga Activada en HMI.....	109
Figura 78: Tanque Espesador de Prueba Vacío.....	110
Figura 79: Medida de Nivel en Tanque Espesador de Prueba Vacío	111
Figura 80: Medida de Nivel en Tanque Espesador Superando el Nivel Mínimo.....	112
Figura 81: Bombas de Descarga, Válvula de Descarga, Válvula de Recirculación Activadas. 113	
Figura 82: Válvula de Recirculación Activada	114
Figura 83: Medida de Nivel al 22% en Tanque Espesador en HMI.....	115
Figura 84: Medida de Nivel en Tanque Espesador Superando el Nivel Máximo	116
Figura 85: Medida de Nivel al 94% en Tanque Espesador en HMI.....	117
Figura 86: Válvula de Disposición Final de Lodos Activada	118
Figura 87: Ajuste de Corriente en la Práctica para Simular Densidad al 30%	119
Figura 88: Medida de Densidad al 30% en HMI.....	120
Figura 89: Válvula de Recirculación Activada	121
Figura 90: Ajuste de Corriente en la Práctica para Simular Densidad al 64%	122
Figura 91: Medida de Densidad al 64% en HMI.....	123

Figura 92: Válvula de Disposición Final de Lodos Activada	124
Figura 93: Confirmación de Marcha Bomba de Descarga Línea 1	125
Figura 94: Alarma Visual de Falla de Bombas en Tablero de Control.....	126
Figura 95: Alarma Visual de Falla de Bombas en HMI	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Equipos para el Desarrollo de la Investigación.....	48
Tabla 2: Definición y Operacionalización de Variables	49
Tabla 3: Características de los Espesadores de Relaves	51
Tabla 4: Características Eléctricas de las Bombas.....	52
Tabla 5: Lista de Instrumentos	56
Tabla 6: Características del Transmisor de Nivel.....	57
Tabla 7: Características del Transmisor de Densidad.....	59
Tabla 8: Características de Válvula Tipo Cuchilla - Descarga.....	60
Tabla 9: Características de Válvula Tipo Cuchilla - Recirculación y Disposición de Lodos	61
Tabla 10: Características de los ITM.....	66
Tabla 11: Características de los Contactores.....	67
Tabla 12: Características del Relé Electrónico	68
Tabla 13: Valores Mínimos y Máximos de Nivel y Densidad de Sólidos	71
Tabla 14: Lista de Equipos para el Prototipo	73
Tabla 15: Lista de Instrumentos de Medición y Actuadores.....	76
Tabla 16: Lista de Señales de Control.....	76
Tabla 17: Valores de Nivel en Porcentaje y Centímetros	90
Tabla 18: Valores de Densidad en Porcentaje y Corriente del Generador.....	90

RESUMEN

Este proyecto de investigación tiene como objetivo principal diseñar e implementar un sistema de control automático de descarga de underflow aplicado a un prototipo experimental de un espesador de relaves para evitar el derrame de lodos a la superficie y la acumulación de sólidos en el cono de descarga de la nueva línea concentradora de una reconocida unidad minera del país.

El objetivo del sistema automatizado es controlar la descarga de underflow con base en los valores mínimos y máximos de nivel de cama de lodo (10% y 90%) y la densidad de sólidos (30% y 64%) en las tuberías de descarga. El sistema de control automático es diseñado para tener la capacidad de decidir si el underflow debía ser recirculado al tanque distribuidor para realimentar el tanque espesador de relaves y seguir extrayéndole la mayor cantidad de agua o si debía ser llevado a la presa de relaves para su almacenamiento.

Al realizar las pruebas para superar el nivel mínimo se obtuvo una medida del 21,75%, mientras que el sistema de control nos indicaba que la medida de nivel era 22% de la altura total de prueba. Sin embargo, se cumplió con el objetivo de que las bombas de descarga no arranquen mientras no se supere el nivel mínimo de 10% y se mantenga el estado de recirculación. En las pruebas para superar el nivel máximo se obtuvo una medida del 95,75%, mientras que el sistema de control nos indicaba que la medida de nivel era 94% de la altura total de prueba. Sin embargo, se cumplió con el objetivo cambiar el estado de recirculación por el estado de disposición final de lodos. Con las pruebas de densidad de sólidos se cumplió con el objetivo de mantener el estado de recirculación mientras que la densidad de sólidos no superará el valor máximo de 64% y cambiar al estado de disposición final de lodos cuando el valor sea mayor o igual al valor máximo.

Palabras Clave: Sistema de Control Automático, Espesador de Relaves, Underflow.

ABSTRACT

The main objective of this research project was to design and implement an automatic underflow discharge control system applied to an experimental prototype of a tailings thickener to avoid the spillage of sludge to the surface and the accumulation of solids in the discharge cone of the new concentrator line of a renowned mining unit in the country.

The objective of the automated system was to control the underflow discharge based on the minimum and maximum values of the mud bed level (10% and 90%) and the density of solids (30% and 64%) in the discharge pipes. The automatic control system was designed to have the ability to decide if the underflow should be recirculated to the distributor tank to re-feed the tailings thickener tank and continue to extract the greatest amount of water or if it should be taken to the tailings dam for storage.

When performing the tests to exceed the minimum level, a measurement of 21.75% was obtained, while the control system indicated that the level measurement was 22% of the total test height. However, the objective that the discharge pumps do not start as long as the minimum level of 10% is not exceeded and the recirculation state is maintained. In the tests to exceed the maximum level, a measurement of 95.75% was obtained, while the control system indicated that the level measurement was 94% of the total test height. However, the objective was met to change the recirculation state to the final disposal state of sludge. The solid density tests met the objective of maintaining the recirculation state while the solid density will not exceed the maximum value of 64% and change to the state of final disposal of sludge when the value is greater than or equal to the value maximum.

Keywords: *Automatic Control System, Tailings Thickener, Underflow.*

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Síntesis de la Situación Problemática

Como se sabe, el agua es un recurso natural fundamental para el desarrollo de la industria minera desde que inicia sus operaciones. Para satisfacer su demanda las unidades mineras utilizan el agua de lagunas y ríos porque el agua desempeña un papel fundamental, lo cual se debe principalmente a que su calidad y disponibilidad son cada vez más restringidos. Sin embargo, la contaminación y el daño generado a los efluentes naturales y tierras agrícolas por acción de las actividades son un factor en contra para que esta estrategia de abastecimiento de agua sea fructífera (Palli, 2016).

Figura 1

Contaminación de Efluentes por Actividad Minera



Fuente: Tomado de <https://infomercado.pe/minem-acepta-que-no-puede-detener-contaminacion-minera-en-rios-de-la-sierra/>

La mayor demanda ocurre en los procesos metalúrgicos. La extracción de cobre por flotación es la actividad que mayor consumo de agua demanda. Los trabajadores ubicados en los campamentos de las unidades mineras ocupan el segundo puesto en lo que ha consumo de agua se refiere porque generalmente utilizan aguas subterráneas de manantial (Tovar, 2018).

Figura 2

Demanda de Agua en Minería

Tamaño Operación	Minado (%)	Concentración (%)	Población (%)	Relación Agua/Mineral
Gran Minería	3	85	12	1.00
Mediana Minería	14	59	27	3.70
Pequeña Minería	8	72	20	3.00

Fuente: Ministerio de Energía y Minas - Perú

Esto significa que se debe efectuar un uso eficiente del recurso hídrico utilizando principalmente la recirculación de aguas para maximizar su recuperación, lo que en el caso de las unidades mineras se realiza mediante el espesamiento, filtrado y disposición de relaves. En este escenario aparecen como solución los espesadores de relaves, cuya función es brindar disponibilidad de agua en los procesos de transformación de cobre a través de la recuperación de agua por sedimentación. Otro de los objetivos de los espesadores de relaves es servir de contenedor de sólidos, es decir, también impide impactos ambientales que conlleven a la contaminación química de aguas y suelos (Prado, 2016).

Figura 3

Espesador de Relaves

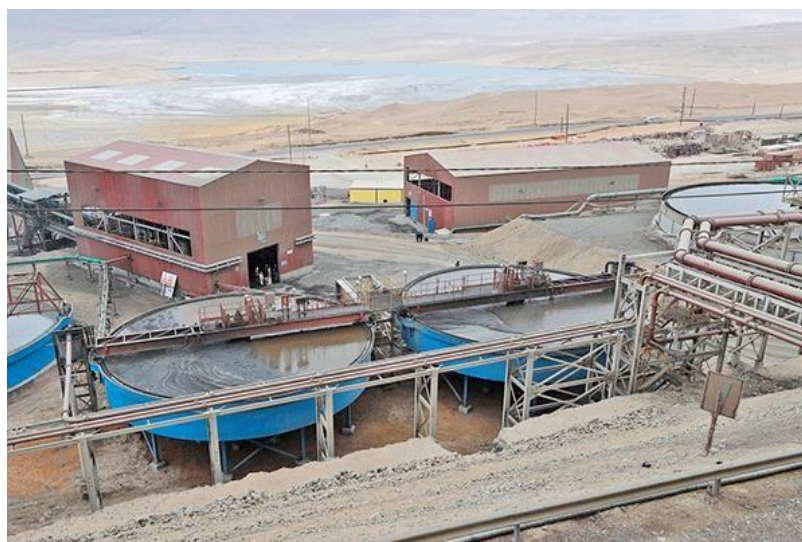


Fuente: Revista Rumbo Minero

Por ejemplo, la empresa minera SHOUXIN Perú S.A. realiza sus operaciones en el distrito de San Juan Marcona en una zona árida, donde el recurso hídrico es escaso. Por este motivo aplican técnicas de separación sólido-líquido con espesadores de relaves logrando extraer un porcentaje considerable de agua, a la vez, el tanque espesador sirve de receptor de relaves para evitar derrames (Santos G. , 2019).

Figura 4

Espesador de Relaves en SHOUXIN Perú S.A.

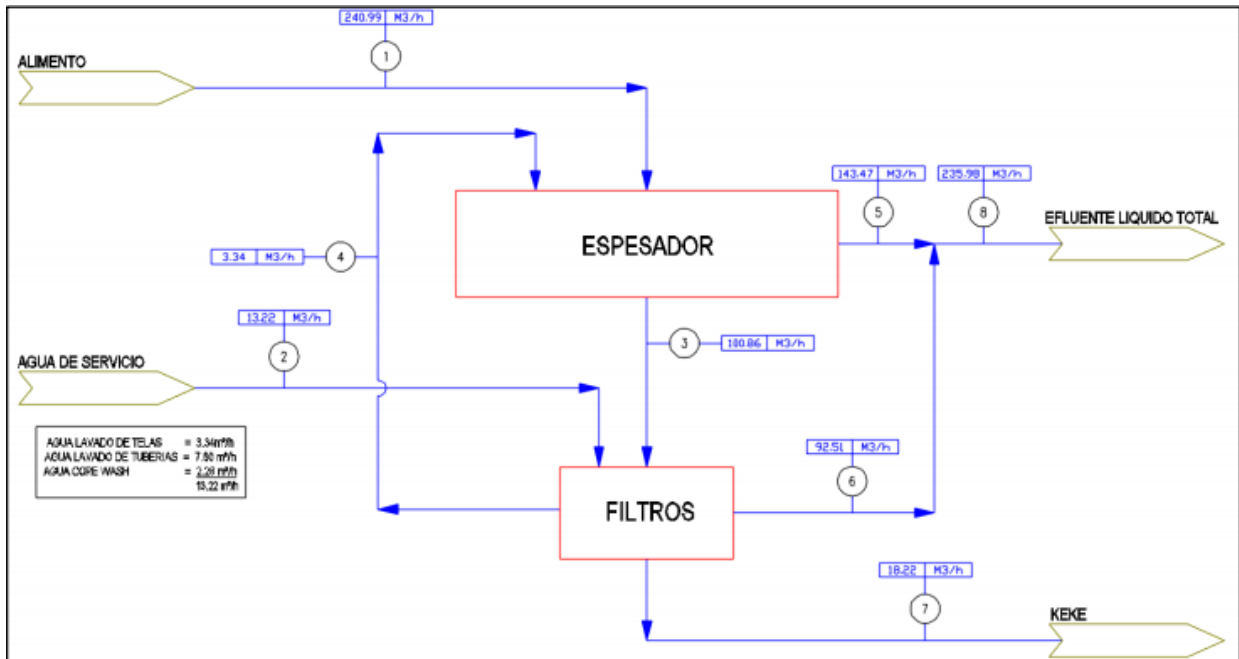


Fuente: Tomada de (Quinde, 2021)

Por otro lado, la nueva planta de filtrado de relaves de la compañía minera Consorcio Minero Horizonte S.A., que realiza sus operaciones el distrito de Parcoy, provincia de Pataz, departamento de la Libertad, para una óptima recuperación de agua utiliza espesadores de relaves que cuentan con sistemas de control automatizados e instrumentación que le brinda confiabilidad y robustez al proceso. De esta manera, obtienen un underflow con 85% de sólidos decantados aproximadamente (Bancayán, 2019).

Figura 5

Esquema de Planta de Filtrado de Relaves en Consorcio Minero Horizonte S.A.



Fuente: Tomado de (Bancayán, 2019)

Debido a las condiciones actuales para el suministro y recuperación de agua en las unidades mineras, la opción del espesamiento de relaves surge como una alternativa factible, esto gracias al desarrollo tecnológico de los tanques espesadores que permite realizar el proceso de sedimentación con una alta tasa de recuperación de agua mediante la integración de sistemas de control modernos junto con instrumentos de campo y actuadores eficientes (Dodane & Bassan, 2015).

Adicionalmente, en el proceso espesamiento existen muchos indicadores que muestran el estado de ejecución y todos deben medirse de forma precisa y segura. El porcentaje de torque en las rastras del espesador, el nivel y la masa de la cama de lodo, la claridad del flujo en la superficie, la tasa de alimentación de sólidos en la entrada y salida, la densidad y tasa de circulación del flujo de salida (descarga) son algunos de los puntos de medición críticos (Ibañez, 2016).

En este proyecto de investigación, se propone el diseño de un sistema que permita controlar la descarga del underflow en el espesador de relaves de forma automática, pero de acuerdo a las condiciones del proceso, es decir, con base en los valores de nivel (L_{min} y L_{max}) en el espesador y el porcentaje de sólidos (D_{max} y D_{min}) en el flujo de descarga, se decidirá si el underflow debe ser recirculado al cajón distribuidor para seguir extrayéndole la mayor cantidad de agua o si debe ser llevado los cajones de relaves para su almacenamiento. Esta estrategia de control es importante porque permite optimizar la recuperación de agua y evita que la acumulación de sólidos pueda generar situaciones de riesgo para el equipo y la necesidad de detener el mecanismo de las rastras, y por ende la operación.

1.2. Formulación del Problema de Investigación

¿De qué manera la implementación de un sistema de control automático puede realizar la descarga de underflow en un espesador de relaves?

1.3. Hipótesis

Con la implementación de un sistema de control automático se puede realizar la descarga de underflow en un espesador de relaves para evitar el derrame de lodos a la superficie y la acumulación de sólidos en el cono de descarga.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de control automático de descarga de underflow para un espesador de relaves.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- Obtener información sobre el espesador de relaves de la unidad minera (instrumentos de medición, unidades de control, actuadores, diámetro, altura, tonelaje, descarga, etc.) para establecer los requerimientos necesarios para el diseño.
- Dimensionar y seleccionar los equipos de los sistemas de potencia y control para la implementación del prototipo.
- Elaborar los planos eléctricos, P&ID y la arquitectura de red del prototipo.
- Configurar y programar los equipos del prototipo.
- Implementar y realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

En Gómez (2012) se investigó, analizó y evaluó la alternativa de aplicar una nueva solución tecnológica en los tanques espesadores de relaves con el objetivo de obtener una descarga de underflow con alto contenido de sólidos y evitar posibles fallas en el equipo por acumulación de lodos. La investigadora determinó que las variables a controlar en la descarga son la altura de interface de cama de lodo y la densidad de sólidos en las tuberías de descarga. Luego realizó una serie de pruebas con el objetivo de manipular el valor de estas variables y observar de qué forma afectaban a la descarga de underflow, dando por resultado una descarga de relave con alto contenido en sólidos (65%).

Asimismo, en Ojeda (2014) se desarrolló e implementó un sistema de control basado en reglas lógicas para controlar la operación de un tanque espesador de relaves de 125 m de diámetro y que recibe 13000 m³/ h de pulpa. El investigador estableció las reglas de control con base en las filosofías operativas de la unidad minera donde se establecía que la lógica de control para la descarga de underflow depende del nivel de cama de lodo y la densidad de sólidos en las tuberías de descarga. El sistema de control lo estructuró en dos etapas: en la primera se pudo tomar el control de la operación ajustando las variables en un rango de seguridad para optimizar la recuperación de agua de proceso; en la segunda se obtuvo mayores porcentajes de sólidos en la zona de descarga (>65%).

2.1.2. Nacionales

En López (2018) se diseñó un controlador difuso con la finalidad de emular el comportamiento de un sistema experto aplicado al proceso de espesamiento de relaves para optimizar su funcionamiento y maximizar la recuperación de agua de proceso sin afectar la descarga de sólidos. La lógica del controlador difuso tuvo en cuenta variables como nivel de cama de lodo, densidad de sólidos, presión en el cono de descarga y torque de las rastras. El sistema de control se implementó en un PLC y se simuló su comportamiento en Matlab para analizar su respuesta. Finalmente, el sistema de control pudo realizar la descarga de underflow y mantener un alto porcentaje de sólido en la descarga, también se estableció una estrategia de control sin necesidad de conocer el modelo matemático de la planta basado en la experiencia de los operadores de campo.

Asimismo, en Bancayán (2019) se realizó la automatización de una planta de relaves mineros. Parte de la automatización consistió en controlar la descarga de underflow del tanque espesador de relaves. El transmisor de nivel de cama de lodos fue el encargado de enviar la señal de proceso al controlador del sistema, este a su vez genera una señal de control dirigida hacia un variador de frecuencia cuya función es regular la velocidad de las bombas de descarga de underflow. La lógica de control fue la siguiente: si aumenta el nivel de cama de lodos dentro del espesador de relaves, aumenta el flujo de descarga a través de las bombas. Por el contrario, si disminuye del nivel de la cama de lodo, se produce una disminución de la velocidad de la bomba de descarga. El rango de operación de transmisor de nivel fue: mínimo: 0 %, máximo.: 100%, Alarmas: Nivel alto: 90%, Nivel cero: ubicado en el cono de descarga del espesador, la estrategia de control fue del tipo PID. Además, la descarga fue medida por un flujómetro magnético y un densímetro nuclear, el producto de ambas medidas sirvió para obtener el flujo másico de pulpa.

2.1.3. Regionales

La investigación de Neciosup & Quiñones (2017) se desarrolló en la planta de concentrado de Molibdeno de la Sociedad Minera Freeport Perú para solucionar las deficiencias del sistema de secado y concentrado en lo referente al control y gestión de fallas de motores y bombas, así como la ausencia de alarmas. Después de analizar la problemática, las investigadoras desarrollaron el sistema de automatización basado en una arquitectura de control distribuida formada por dos niveles: el primero de control y el segundo de supervisión. El primer nivel de control reguló las principales variables del proceso mediante lazos de control realimentados y basados en controladores PID, mientras que el nivel de supervisión generó base de datos, alarmas y gráficas en tiempo real.

Asimismo, la investigación de Campos & Pevete (2017) se aplicó en el sistema de transporte de relaves de la Unidad Chilca de la Compañía Minera Glencore para solucionar los inconvenientes producidos por el mal manejo de motores y bombas, el desperdicio de materia prima y posibles rupturas de la tubería de descarga de agua de relave. Después de analizar la problemática, los investigadores desarrollaron el sistema de control y supervisión, el cual permitió regular las principales variables del proceso con controladores PID, supervisar alarmas y generar gráficas de tendencias en tiempo real.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. *Espesador de Relaves*

El espesamiento es el primer proceso de separación sólido-líquido después de la etapa de concentración (flotación) y se lleva a cabo con la finalidad de tratar tanto el concentrado como los residuos (colas) que salen de las plantas en forma de pulpas. Con el espesamiento se logra obtener una pulpa con mayor concentración de sólidos (superior al 50%) en la zona de descarga y un flujo de agua en la superficie (Palli, 2016).

Dado que la cantidad de relaves es mucho mayor que la de concentrado (en la minería del cobre la proporción es de aproximadamente 25/1, es decir, la cantidad de relave es 25 veces mayor que el concentrado), el caudal de agua que sale con los relaves es mucho mayor, de modo que el espesamiento del residuo ofrece una mayor posibilidad de recircular el agua al proceso. Además, la recuperación de agua por espesamiento de los relaves permite otras ventajas, por ejemplo, la reducción de la cantidad de agua en el depósito de relaves, lo que reduce el riesgo de daño por licuefacción y la posibilidad de infiltración en el sótano, además de disminuir el área necesaria para eliminar los residuos (Álvarez, 2017).

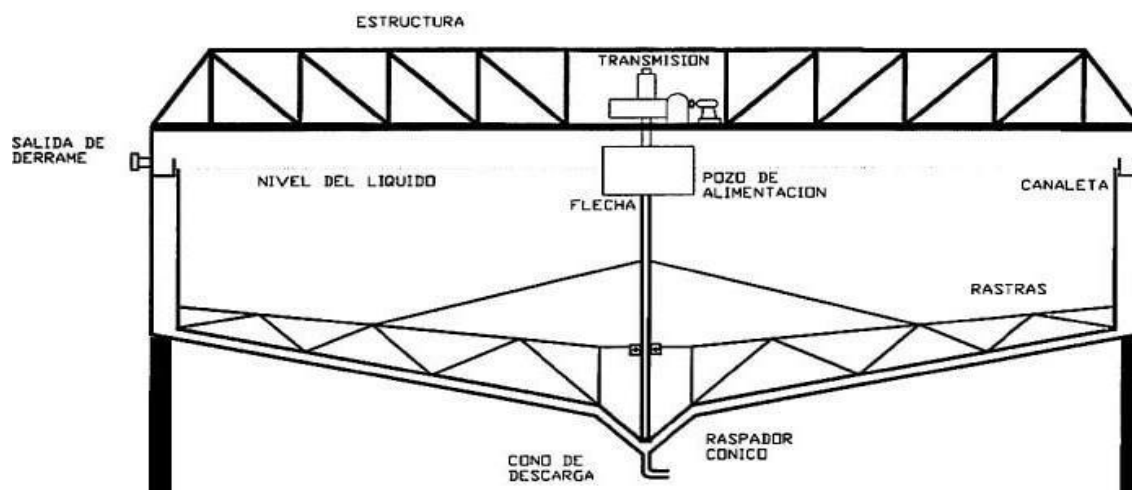
Los estanques de sedimentación (espesadores) con forma rectangular y circular, incluidos los tanques de varios niveles, se han utilizado para el tratamiento de aguas desde hace un siglo. Existen diversas formas de diseño, la placa inclinada y el tubo de sedimentación se popularizaron hace treinta años, aunque el concepto fundamental surgió a inicios de este siglo (Dodane & Bassan, 2015).

El equipo que se emplea con más frecuencia para la separación sólido-líquido es el espesador en forma de cilindro continuo que utiliza rastras mecánicas para impulsar el lodo. En él la pulpa ingresa por un pozo de suministro central, el líquido clarificado fluye a la superficie y es

enviado a un canal cercano, mientras que el barro espesado sale de la parte cónica de descarga (Rodríguez, Butragueño, & Grima, 2013).

Figura 6

Espesador de Relaves Cilíndrico



Fuente: <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/espesadores/>

Por lo general, los tanques de espesamiento cilíndricos tienen una elevación de 10 pies y un diámetro variable, están hechos de acero, madera o concreto. Para diámetros superiores a 30 m se recomienda utilizar hormigón, la inclinación común de la base es de 80-140 mm/m, pero se pueden utilizar inclinaciones más altas. El tanque representa el 40-50% del gasto global del espesador (Espinoza, 2009).

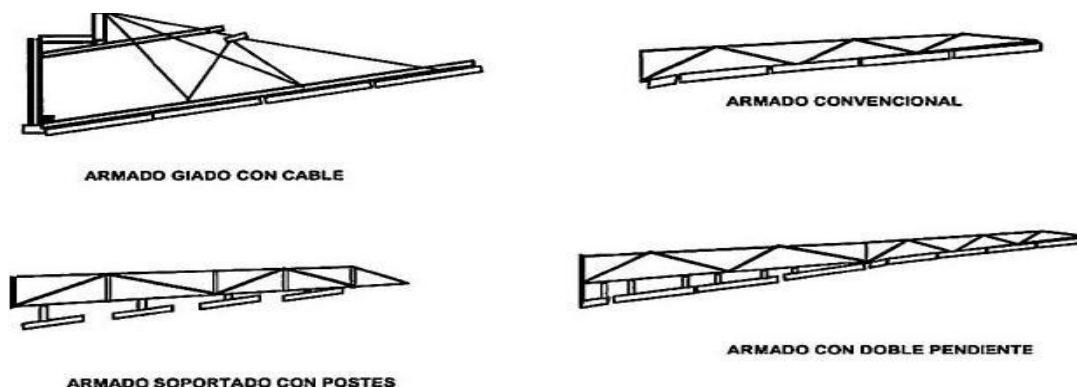
Para espesadores típicos, el diámetro del orificio de alimentación es generalmente el 10% del diámetro del tanque y 1,5 m de profundidad, a pesar que puede variar según la aplicación. Su diseño afecta en gran medida la calidad de la vertiente obtenida (sólidos en suspensión) (Gallas, 2015).

El objetivo principal de los rastrillos es depositar el lodo en la parte central del espesador, así mismo eliminan los flóculos para dejar que el agua se escape de ellos y dar a la pulpa una mayor densidad. Para ello se utilizan sistemas que tienen dos rastrillos pequeños y dos rastrillos

grandes y dos rastrillos aún más pequeños para obtener varias rastrilladas en cada revolución. La velocidad común es de 8-10 m/min, esto necesita mucho de la velocidad de sedimentación y del volumen de las partículas, ya que, si se espesan muy de prisa, necesitarán velocidades incluso de 20 m/min, por ejemplo, un espesante tradicional necesita 2 vueltas por hora. Además, un sistema de elevación de arrastre automático solo es recomendado cuando el diámetro es de 25 pies o más (McLanahan, 2019).

Figura 7

Tipos de Rastras



Fuente: <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/espesadores/>

El funcionamiento de los espesadores se basa en la sedimentación de las partículas. Una partícula sólida en un líquido de menor densidad caerá a una velocidad de sedimentación que se logra cuando se equilibran la gravedad y la resistencia del líquido. Sin embargo, la velocidad de sedimentación depende del diámetro de la partícula, la viscosidad del líquido y el peso específico entre sólido y líquido (Santos G. , 2019).

El espesamiento de la pulpa convencional se realiza en tanques cilíndricos-cónicos que cuentan con un mecanismo que hace girar unas rastras para facilitar la salida del producto espesado por el cono de descarga ubicado en el fondo. La alimentación de pulpa se realiza por un tanque circular ubicado en el centro del espesador, cuya función es minimizar la agitación y así obtener agua clara que se envía a la superficie para su evacuación (Eral Chile, 2017).

El mecanismo de la rastra normalmente consta de dos brazos radiales unidos al eje central, también es muy común encontrar diseños con tres o cuatro brazos que se desplazan con lentitud gracias a un mecanismo de accionamiento ubicado en la zona superior del eje. El movimiento de las rastras sirve para producir la colisión y adherencia de las partículas, conduciéndolas hacia el punto de descarga en la zona cónica (Gallas, 2015).

El control operativo del espesamiento está fundamentalmente enfocado a evitar sobrecargas y estancamientos, lo que permite controlar variables como presión hidráulica rotativa, intensidad de corriente del motor, par mecánico de las rastras, así como el caudal y porcentaje de sólidos en la descarga. Los lazos de control se pueden utilizar para controlar situaciones anormales levantando automáticamente las rastras o actuando directamente sobre el ingreso de pulpa hacia el espesador. Observar la claridad del agua que se desborda y su altura en el espesador también proporciona información sobre el funcionamiento del dispositivo (Ibañez, 2016).

Dado que las partículas de tamaño muy fino se sedimentan muy lentamente, se puede obtener una mayor velocidad de sedimentación induciendo la unión entre partículas, ya sea por coagulación o por floculación. La coagulación se consigue actuando sobre el medio (por ejemplo, cambiando el pH o añadiendo iones específicos) para reducir la carga superficial de las partículas, reduciendo así la repulsión entre ellas (Dodane & Bassan, 2015). Sin embargo, lo más común es inducir la unión entre partículas con la ayuda de floculantes. Los floculantes son polímeros orgánicos de alto peso molecular, de cadena larga y solubles en agua que, al unir las partículas, forman un tamaño de partícula mayor. La mayor cantidad de floculantes empleados en el sector minero son reactivos aniónicos, sin embargo, hay tipos catiónicos (son adsorbidos a las partículas por reacciones químicas), además existen catiónicos y no iónicos (la adsorción ocurre a través de

un enlace de hidrógeno). Dependiendo de la aplicación específica, la dosificación de floculantes puede ser muy variable, del orden de 10 a 250 gr / tonelada de mineral (Álvarez, 2017).

Hay distintas clasificaciones y tipo de espesadores de acuerdo al mecanismo que genera el movimiento de las rastras y del tipo de cimentación utilizado.

Espesador de Puente

Cuenta con un puente a lo largo del diámetro del tanque cuya función es brindar soporte al mecanismo de movimiento y las rastras. Su precio es bajo, se sugiere utilizarlos para diámetros de 100 pies (Dodane & Bassan, 2015).

Figura 8

Espesador Tipo Puente



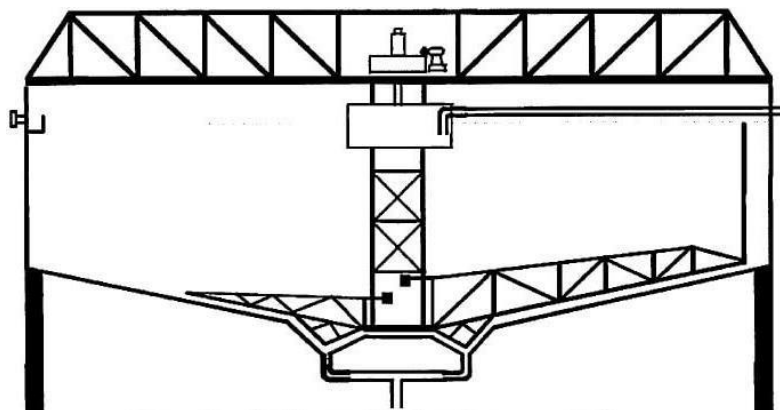
Fuente: <http://www.idm-pirineo.es/IDM/Esp/MA/espesador.php>

Espesador de Columna

En este tipo de espesador, tanto el mecanismo de movimiento como las rastras, se sostienen a través de una columna central, comúnmente fabricada de acero y recubierta con concreto. Se sugiere utilizarlos para diámetros mayores a 100 pies (Espinoza, 2009).

Figura 9

Espesador Tipo Columna



Fuente: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/tipo-de-espesadores/>

Espesador de Columna con Tracción

En este tipo de espesador, tanto el mecanismo de movimiento como las rastras, se sostienen a través de una columna central, mientras que el motor es ubicado en el contorno del tanque. Se sugiere utilizarlos para diámetros mayores a 450 pies, sin embargo, es poco usado, lo cual se debe principalmente a su alto costo en comparación con un espesador del tipo puente o uno de columna central. En este tipo de espesador se omite el mecanismo de levante de rastras (McLanahan, 2019).

Figura 10

Espesador con Tracción Central



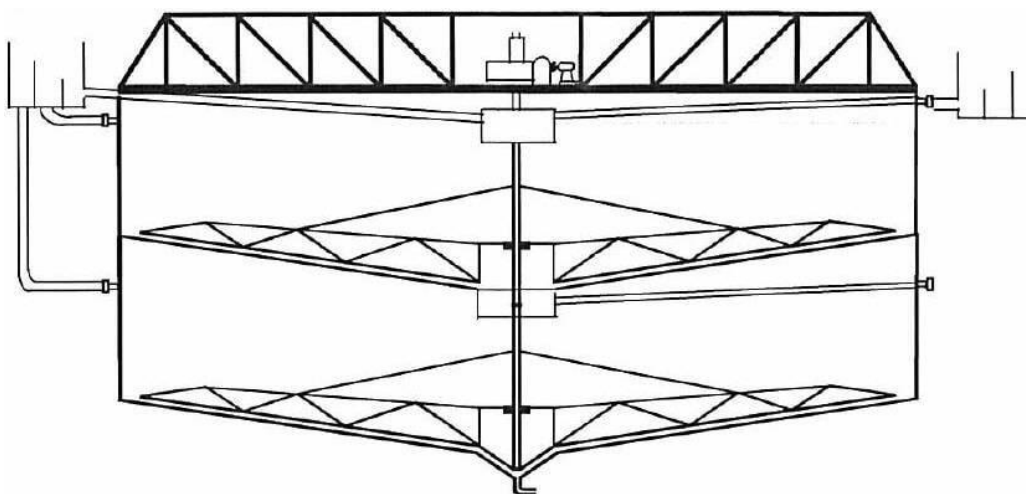
Fuente: <http://www.filtramas.com/catalogo//espesador-traccion-central/>

Espesador Múltiple

Está formado por dos o más espesadores, uno instalado encima del otro, cada tanque tiene un mecanismo de arrastre, su principal ventaja es que necesitan un pequeño espacio de instalación, pero deben trabajar con una baja concentración de sólidos. Esta disposición permite el lavado a contracorriente en espacios muy reducidos, sin embargo, necesita de mucho cuidado y suficiente protección de par, ya que, en caso de falla mecánica, todos los espesadores dejarán de funcionar (Santos G. , 2019).

Figura 11

Espesador Múltiple



Fuente: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/tipo-de-espesadores/>

Espesador de Alta Densidad

Fueron desarrollados en 1975 debido al ingreso de floclantes aniónicos mejorados, alcanzando una unidad de área de 3 a 5 pies cuadrados / ton / día. La alta densidad está definida por el tipo, dosificación y la forma en que se realiza la dosificación del floclante. En espesadores comunes, la velocidad perimétrica del rastrillo es de 10 m / min. En espesadores de alta densidad, se sugiere trabajar a una velocidad que no sea tan alta como 20 m / min para evitar un par elevado y un porcentaje de sólidos inestables. Se recomienda instalar un motor sobredimensionado (50%),

para que no haya problema si es necesario incrementar la velocidad. Este tipo de espesador tiene un sistema particular para la dosificación de floculante y un pozo de alimentación profundo. Se espesará a un porcentaje sólido del 60% al 70%, por lo que se requiere un sistema de rastrillo mejorado (Gallas, 2015).

Figura 12

Espesador de Alta Densidad



Fuente: <https://www.mclanahan.com/es/productos/espesadores-de-alta-densidad>

2.2.2. Medición de Nivel

Los medidores de nivel suelen clasificarse en dos grupos: directos e indirectos. Los medidores del tipo directo se basan en la variabilidad de nivel del líquido o sólidos en cuestión para conseguir la medida. Los medidores de tipo indirecto utilizan otra variable, tal como la presión, debido a que su valor tiende a cambiar con el nivel del material. Para cada aplicación, se utilizan instrumentos de medición de nivel mecánicos y eléctricos (Omega, 2018).

Los primeros elementos utilizados para medir e indicar nivel eran tubos de vidrio que permitían que el operador visualice el fluido de proceso. Con el avance de la tecnología, los cristales transparentes han reemplazado a los anteriores. Cuando se tiene que medir un fluido peligroso (corrosivo, tóxico, etc.), se descartan los instrumentos de vidrio y se utiliza un imán ubicado en un flotador que posibilita el traslado de un seguidor y este por acción mecánica mueve un indicador a escala graduada. El uso de flotadores para la medición de nivel es muy común, generalmente son usados como interruptores de nivel. Los desplazadores también funcionan de manera similar a los flotadores, excepto que su movimiento es más limitado. Cuando cambia el nivel de líquido, la cantidad que cubre el desplazador incrementará a medida que se sumerja. La fuerza se transmite al sistema de control neumático a través del eje y luego se envía a un indicador a escala (Procoen, 2019).

Para medir el nivel de sólidos granulares o líquidos también se emplea el método de contacto mediante una pesa o un flotador respectivamente. La medición se inicia con un botón o temporizador para colocar el peso o flotador conectado al cable sobre el material. Lo que realmente se mide es el cambio de tensión cuando el cable está en contacto con un sólido o líquido granular. La medida de nivel se indica mediante un circuito de control que activa un motor que sube y baja el cable. (Omega, 2018).

Las sondas eléctricas utilizan métodos conductivos, capacitivos y ultrasónicos para medición de nivel. Las sondas conductoras se utilizan con líquidos conductores. La sonda se inserta en el recipiente de líquido. Cuando el líquido entra en contacto con cualquier electrodo, se genera una señal de corriente que fluirá entre el electrodo y tierra. Este método es ampliamente utilizado para el control de bombas. (Velásquez, 2015).

El método capacitivo utiliza placas y basa su funcionamiento semejante al de un condensador. El material entre las placas es siempre dieléctrico. Las variaciones en el nivel causan un cambio en la salida del transmisor electrónico, la señal de salida es proporcional al cambio de capacitancia, este método es de medición continua a diferencia del conductivo que es uno discreto (Procoen, 2019).

Los medidores de nivel ultrasónicos tienen aplicaciones en medición continua y discreta, su uso extendido está dado en acciones de alarma. El transmisor genera una señal en frecuencia y la detección de la señal generada por un objeto causa una acción de control (detectores discretos). Para medición de nivel continua, el transmisor se encarga de medir el tiempo total desde la emisión y la recepción de la señal reflejada desde el objeto a detectar (Ibañez, 2016).

Figura 13

Medidores de Nivel con Medición Directa



Fuente: <https://instrumentacionycontrol.net/medidores-de-nivel-un-interesante-resumen-y-muy-completo/>

La medición de nivel indirecta se basa en el uso de sensores de presión hidrostática. El ejemplo más simple es la instalación de un manómetro (analógico o digital) en la parte inferior de un tanque de líquido. Los aumentos de nivel provocan un aumento de la presión hidrostática, la señal se gradúa en unidades de nivel con el manómetro (Velásquez, 2015).

Para aplicar el método de burbujeo se debe contar con un tubo conectado verticalmente en el recipiente. Un extremo de la tubería se debe conectar en el nivel cero del recipiente y el otro a un suministro de aire. Al momento de realizar la medición, el suministro de aire debe ser regulado para lograr que la presión sea ligeramente superior a la presión hidrostática. Esto se determina cuando se observan burbujas que salen desde el lado inferior del tubo. La señal se lee en el manómetro con la indicación de nivel (pies, pulgadas, galones, etc.) (Álvarez, 2017).

Para el método por presión hidrostática se utiliza un transmisor de presión diferencial; el transmisor envía una señal de salida proporcional a la diferencia de dos presiones, una se genera debido al fluido cuyo nivel se pretende medir (toma de alta) y la otra se debe a la presión atmosférica (toma de baja), siempre que se trate de un sistema abierto (tanque abierto a la atmósfera). Para tanques cerrados, la entrada «baja» se conecta en contacto con el fluido encerrado en el extremo superior del depósito o utilizando un fluido de sello. La calibración permitirá obtener una señal de salida proporcional al nivel (Aldakin, 2018).

Figura 14

Medida de Nivel por Presión Diferencial



Fuente: <https://instrumentacionycontrol.net/medidores-de-nivel-un-interesante-resumen-y-muy-completo/>

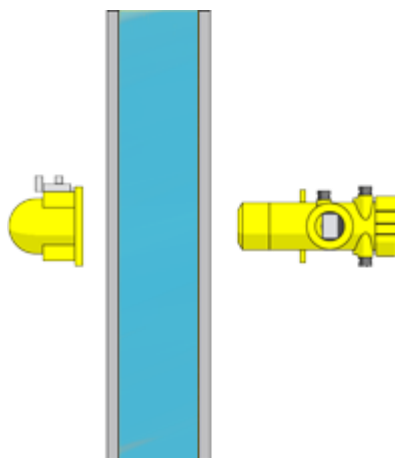
2.2.3. *Medición de Densidad*

La densidad de un material es igual a su peso por unidad de volumen. La forma más sencilla de calcular la densidad de un líquido es mediante el hidrómetro flotante que desplaza una cantidad de volumen de líquido igual a su peso. El hidrómetro se fabrica con vidrio y se le coloca un peso en un extremo para lograr que flote en forma vertical. La posición del hidrómetro en el líquido depende de la densidad de éste. La medida se puede transmitir de forma remota a través de una varilla utilizada como peso, la cual se comporta como brazo variable de un puente de inductancia. También se puede medir la densidad de fluidos de volumen fijo de líquido mediante una balanza mecánica o una celda de carga. Otra forma de medir la densidad es mediante un dispositivo tipo desplazador. En este método, el elemento que se desplaza es atrapado en una cámara de un volumen fijo. Cuando la densidad varía, la fuerza que actúa sobre el desplazador también lo hace, este a su vez mueve una barra de balance, que es el mecanismo actuador de un sistema de medición tipo neumático o eléctrico (Velásquez, 2015).

Cuando se quiere medir densidad con transmisores de presión diferencial en tanques abiertos o cerrados, se obtiene una señal de presión hidrostática de un volumen fijo que depende de la densidad del mismo. El método de burbujeo también es utilizado para la medición de densidad. Cuando un líquido puede ser sensado debido a la corrosión, abrasión u otra limitación, los sistemas de medición radiactivos son los que más destacan; para realizar la medida se coloca una fuente radiactiva en un extremo del reservorio o tubería y un detector radiactivo en el extremo opuesto. La cantidad de radiación absorbida depende de la densidad de material (Eral Chile, 2017).

Figura 15

Medida de Densidad por Radioactividad



Fuente: <https://www.vega.com/es/productos/catálogo-de-productos/densidad/radiometría>

2.2.4. Sistemas de Control Industrial

En general, el problema de control se puede dividir en tres áreas: control regulatorio, secuencial y lógico. El control regulatorio ha sido el dominio de los sistemas de control distribuido (DCS) y la lógica de los controladores lógicos programables o PLC, los cuales proporcionan capacidad de control secuencial de diferentes formas (López, 2011).

Actualmente, los PLC brindan funcionalidades de control secuencial y regulatorio, incluso si la aplicación no siempre es sencilla de ejecutar. Del mismo modo, los DCS integran capacidades lógicas, pero generalmente muy limitadas en su tiempo de escaneo (0.1 s, 0.5 s e incluso 1 s en comparación con los comunes 10 ms de un PLC). Esta preferencia es consecuencia de la presión del usuario para tener un sistema único que cumpla con las necesidades de los dominios. Esto se debe a que el nexo de dispositivos de diferentes proveedores requiere medios complementarios de ingeniería, lo que dificulta el aumento de aplicaciones en esta plataforma mixta. Debido a estas limitaciones, los dispositivos brindados por los proveedores no logran satisfacer la demanda y generalmente conlleva la necesidad de emplear DCS, PLC, secuenciadores de eventos y entre

otros, con una difícil labor de conectividad y configuración para lograr su integración, con resultados que no siempre cumplen con las expectativas del usuario (Industria 4.0, 2016).

Hay sistemas que integran las tres áreas de control. La presencia de diferentes procesadores de control que abarcan uno o más de los dominios de control integrados en la red en tiempo real facilita el desarrollo de aplicaciones. Por ejemplo, puede tener un procesador multifunción en la misma red que realiza el control, secuencias y lógica de bucle cerrado, y otro que se especializa en control lógico (por ejemplo, un PLC), los cuales intercambian información entre sí con una integración mínima. Además, estos procesadores pueden provenir de diferentes proveedores, lo que le da al usuario un mayor grado de flexibilidad a la hora de elegir el equipo que mejor se adapte a sus necesidades (Lorenzo, 2012).

Las redes de comunicación industrial permiten comprender todo lo relacionado con un proceso industrial a través de las variables básicas medidas por instrumentos in situ para que la dirección pueda conocer el desempeño de su empresa. Otro aspecto fundamental es que el sistema se puede controlar a grandes distancias. Para controlar e integrar cada uno de los instrumentos de campo, se requiere un estándar para que se comuniquen (Logicbus, 2019).

Sistemas de Control Distribuido (DCS)

Los sistemas de control distribuido (DCS) se desarrollaron a mediados de la década de 1970 y representaban los conceptos informáticos que existían en ese momento: sistemas propietarios en los que la integración de software, hardware y servicios de un solo proveedor proporcionaban una solución completa (Automática e Instrumentación, 2019).

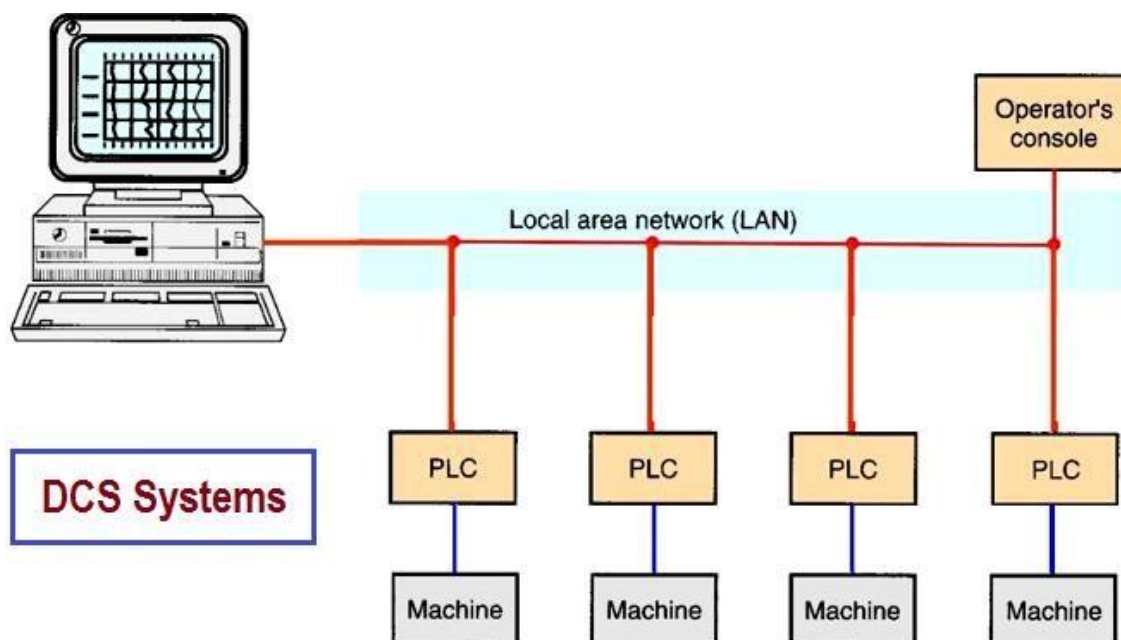
Un DCS tiene diferentes redes propietarias en distintos niveles que permiten la integración de tecnologías modernas y antiguas del mismo fabricante, aunque con ciertas dificultades. Por ejemplo, una gran cantidad de estos sistemas han integrado estaciones de trabajo UNIX, pero no es posible migrar aplicaciones heredadas a esta plataforma. Si hablamos de la integración de equipos de diferentes fabricantes, esto solo se logra mediante el uso de Gateway, que permite establecer una comunicación con limitaciones entre diferentes protocolos. Así, redes DCS, redes de PLC, redes de controladores, entre otras, conviven en una misma instalación (Riaño, 2010).

Un DCS generalmente implica la presencia de varias redes: redes de controladores de tecnologías anteriores, redes más modernas, redes de PLC dispersas o integradas a través de pasarelas y, en algunos casos, conectadas con la red informática a través de otra pasarela. Si en una planta hay sistemas de control de diferentes fabricantes, cada uno de ellos tiene acceso independiente a estas redes. La integración no es común e implica el uso de pasarelas de alto costo y rendimiento limitado (Editorial Control, 2017).

La red en tiempo real se comunica entre sí con procesadores de aplicaciones, estaciones de operador, CPU, PLC más grandes, etc. La propiedad fundamental de esta red es que proporciona procesamiento de datos en tiempo real en un bus redundante. Algunos procesadores se comunican a la vez con la red en tiempo real y la administrativa. La información de toda la empresa se transfiere libremente entre el sistema de gestión y el sistema de control, de modo que los empleados de la empresa puedan acceder de forma sencilla a la información que necesitan. Se accede a la información de la misma forma en ambos entornos. La diferencia principal entre la red de gestión y la red en tiempo real es su naturaleza transaccional y no redundante, por lo que no se puede garantizar el procesamiento de datos con alta disponibilidad y en tiempo real. (Schneider Electric, 2019).

Las limitaciones impuestas por la velocidad de la red administrativa para la transmisión de información en tiempo real de manera veloz y garantizando su seguridad se acabarán a medida que se disponga de nuevas tecnologías que ofrezcan mayor ancho de banda. Las redes disponibles actualmente ofrecen un ancho de banda de unos pocos mega baudios (Ethernet 10 Mbps). Las nuevas tecnologías, por ejemplo, ATM (modo de transferencia asincrónica), aumentarán el ancho de banda a valores que rondan los giga baudios. Con este ancho de banda, se puede afirmar que las redes transaccionales y en tiempo real se unirán en una sola red, a la que llamaremos red informática. Todas estas redes se basan en estándares existentes: en redes administrativas, TCP / IP, DecNet y Novell sobre Ethernet, entre otros. (Automática e Instrumentación, 2019).

La escalabilidad y flexibilidad de los DCS actuales, ofrecen a los usuarios finales vinculados con el sector industrial la capacidad de acceder en cualquier momento y en tiempo real al control y gestión del proceso para movilizar personal e integrar los recursos de toda la operación de la empresa. De esta manera es posible contar con todos los beneficios que ofrece el control distribuido: acelerar el comisionamiento y la puesta en marcha de máquinas; aumentar la producción; mejorar la operación sin papel; minimizar la configuración de control continuo y batch; mejora el desarrollo y la depuración de aplicaciones; reduce las paradas de producción; disminuye los gastos de mantenimiento y acelera el retorno de la inversión (López, 2011).

Figura 16*Sistema de Control Distribuido*

Fuente: <https://instrumentationforum.com/t/advantages-and-disadvantages-of-dcs-system/8199>

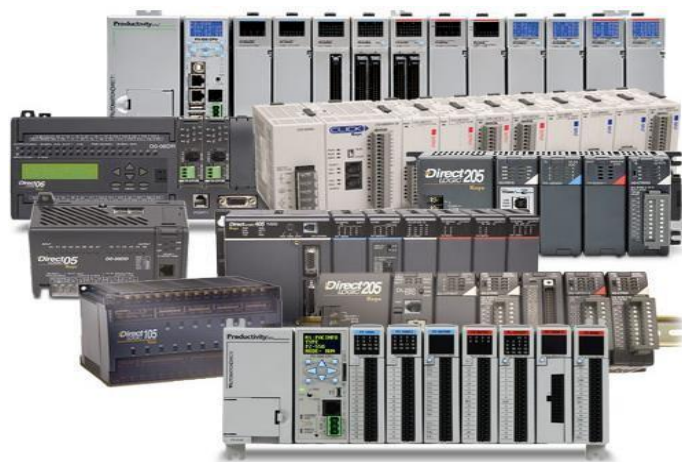
Controlador Lógico Programable (PLC)

La tecnología que se ofrece con el uso de controladores lógicos programables (PLC) es muy útil en sitios donde es necesario automatizar un proceso. Esta tecnología se adapta fácilmente a otro entorno operativo y sin mayores complicaciones, por otro lado, es una tecnología que forma parte de los denominados sistemas de automatización flexible, por lo que cuenta con una amplia gama de beneficios adicionales (Velásquez, 2015).

Desde un período razonablemente corto hasta la fecha, se ha vuelto una tendencia, un enfoque fundamentalmente diferente en el diseño de sistemas de control automático. En esta nueva perspectiva, la decisión del sistema se logra mediante una serie de algoritmos que se almacenan en una posición de memoria y son ejecutadas por un microprocesador o microcontrolador (Lorenzo, 2012).

Figura 17

PLC



Fuente: <https://control.sdindustrial.com.mx/Plc-Driver-compatibles-de-C-more.php>

La principal cualidad de un PLC es que, si es necesario realizar una modificación de la lógica de control, es suficiente cambiar las instrucciones del programa, sin tener que realizar ninguna modificación en los circuitos del sistema de control. Estas variaciones se llevan a cabo de forma muy sencilla y, a menudo, sin necesidad de detener el proceso de producción, ya que el PLC tiene la capacidad de realizar varias actividades al mismo tiempo y, en muchos casos, para realizar cambios solo se necesita un computador, cable de comunicación y el software de programación (Aguilera, 2002).

A continuación, se recomiendan algunas de las consideraciones más importantes que se deben tener en cuenta para seleccionar uno de los tantos PLC que existen en el mercado (Blog Autómatas, 2014):

- El precio debe estar acorde a la función que realizará (económico - costoso, inestable - estable, desprotegido - protegido, limitado - completo).
- Cantidad de E/S, tanto analógicas como digitales, rangos de trabajo en corriente (0-20 mA, 4-20 mA) y voltaje (0-10 VCC, etc.).

- Cantidad de programas que logra ejecutar.
- Cantidad de programas que logra ejecutar a la vez (multitarea).
- Cantidad de contadores, temporizadores, registros y banderas.
- Lenguajes de programación (Ladder, lista de instrucciones, FBD, graficet, etc.).
- Software para cada gama de PLC.
- Software para descargar aplicaciones desde la PC y necesidad de tarjeta de interfaz.
- Capacidad de conexión con varios PLC para formar una red.
- Soporte del fabricante del PLC a nivel local.
- Servicio y refacciones.
- Capacitación constante profesional sobre el uso y aplicaciones del PLC.
- Literatura en español e inglés: manuales, fichas técnicas, guías, etc.

Cabe destacar que, aunque cualquier proceso se puede automatizar con un autómatas, no debemos caer en la tentación de convertirlo en el remedio para solucionar todos los problemas que puedan surgir, por ejemplo, si se pretende controlar el llenado y descarga de un tanque de agua de una casa, el uso de un PLC para llevar a cabo esto, sería un gran desperdicio tecnológico, además de representar un altísimo costo para ejecutar una tarea fácil. El uso de un PLC debe estar justificado cuando se desee optimizar recursos económicos, factor de vital importancia y muy escaso en la actualidad (Velásquez, 2015).

Los PLC se pueden encontrar en una gran cantidad de lugares que realizan las funciones de control de procesos industriales, estos procesos se vuelven tan diferentes incluso dentro del mismo complejo industrial, donde el PLC realiza desde procedimientos simples como mantener en rangos aceptables el valor de temperatura de una habitación cerrada, hasta llegar a lo más

complejo, por ejemplo, toda la secuencia de etapas del refinado de crudo en una planta de aceite (Aldakin, 2018).

Los criterios de selección de un PLC que formará parte de un sistema de control dependen de las necesidades del proceso productivo que será automatizado, por ejemplo, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos (Industria 4.0, 2016):

- **Espacio reducido:** Cuando el sitio donde se instalará el sistema de control en fábrica es reducido, el PLC representa una opción viable, ya que incluso con todos los accesorios necesarios, ocupan un mínimo de espacio sin comprometer la producción y la integridad de los operarios y las instalaciones.
- **Procesos de producción periódicamente cambiantes:** Industrias como el sector automotriz tienen la necesidad de modificar el modelo de vehículo que sale de sus fábricas anualmente, lo que implica cambiar la secuencia de montaje como el reajuste de los valores de tolerancia de las piezas que ensamblan el vehículo. El arma principal de estos cambios son aquellos cambios que están sujetos a las instrucciones del programa que controla la lógica funcional del PLC.
- **Procesos secuenciales:** Es bien sabido que cuando una actividad que se repite un gran número de veces durante un determinado intervalo de tiempo, se convierte en una actividad monótona para el ser humano, produciendo fatiga emocional, provocando distracciones que conllevan a cometer errores no intencionales que pueden ser fatales, tanto para la integridad humana como para las instalaciones de la planta. Con un PLC lo anterior se puede evitar simplemente implementando secuencias de control que, si bien se repiten varias veces a lo largo del día, no pierden la precisión con la que deben realizarse.

- Actuadores distintos en un mismo proceso industrial: Con un solo PLC es posible manipular actuadores de diferente tipo entre sí (eléctricos, neumáticos, hidráulicos, etc.), y más aún, con un mismo PLC es posible controlar varias líneas de producción, en las que cada una tiene sus propios actuadores, esto último en función del número de salidas y en general del tamaño en lo que se refiere a la capacidad de albergar el programa de usuario.
- Verificación de las distintas partes del proceso de forma centralizada: Hay una gran cantidad de industrias en las que la planta de producción está alejada de la sala de control, o también, por ejemplo, como en las fábricas de petróleo, es necesario verificar el funcionamiento remoto de todas las refinerías. Con un PLC diseñamos de forma natural redes de comunicación, de manera que la información se canalice a una central desde la cual podamos observar de forma remota el funcionamiento del sistema de control automático, y la información se pueda visualizar a través de monitores en representación gráfica de sensores y actuadores.

Figura 18

Campos de Aplicación de los PLC



Fuente: <https://www.lymcapacitacion.com/blog/18660/appplc>

Interfaz Hombre - Máquina (HMI) y SCADA

Los paneles HMI muestran información en tiempo real sobre el funcionamiento de las máquinas y líneas de producción mediante gráfico, animaciones, registros, etc. Estos datos se muestran a los operarios para que tomen alguna acción correctiva sobre el proceso en el menor tiempo posible (Sothis, 2018).

Figura 19

HMI



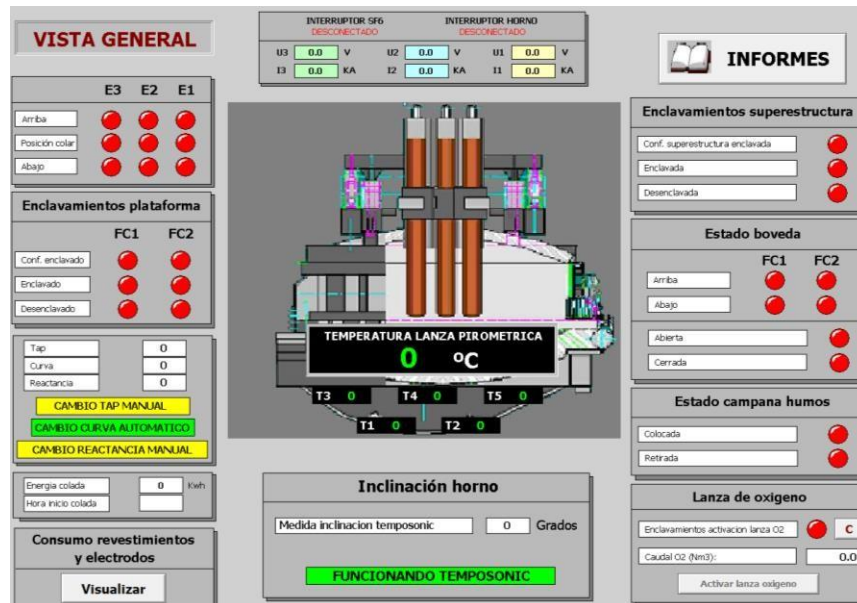
Fuente: <https://www.autycom.com/producto/pantalla-hmi-simatic-6av2123-2gb03-0ax0-siemens/>

Los sistemas SCADA se encargan de la supervisión, el control y la adquisición de datos para detectar posibles errores, administrar la producción y mejorar los procesos de producción. Su arquitectura incluye varias computadoras interconectadas, dispositivos remotos que obtienen información sobre el proceso mediante el uso de sensores y una red de comunicación industrial que permite el intercambio de datos entre las computadoras y los dispositivos de campo (Opertek, 2019).

En la era de la digitalización, los sistemas SCADA han evolucionado hasta operar con gran estabilidad logrando una gran conectividad entre las máquinas y equipos que participan del proceso de producción. De esa forma, el sistema SCADA permite alcanzar los objetivos que la empresa desea para lograr una gran eficiencia en el control y la gestión de la producción (Copa Data, 2019).

Figura 20

SCADA



Fuente: <https://www.wonderware.es/directorio-integradores/gecsa/attachment/metalogenia-horno/>

CAPÍTULO III

MÉTODOS Y MATERIALES

3.1. Tipo y Diseño de la Investigación

El tipo de investigación es aplicada tecnológica porque utiliza conocimiento científico y tecnológico, propio y ajeno, con el objetivo de mejorar un proceso para cumplir un fin valioso para la sociedad.

El diseño de la investigación es experimental, la cual busca conseguir una relación entre la causa y el efecto de una situación y se observa el resultado originado por la variable independiente sobre la variable dependiente. Para nuestro caso, las variaciones de nivel de cama de lodo y la densidad de sólidos influyen directamente sobre la descarga de underflow.

3.2. Población

En la unidad minera se ha contemplado la implementación de dos áreas de espesadores adicionales: un espesador de concentrado bulk y dos espesadores de relaves.

- Espesador de Concentrado Bulk (2212-TK-008): La pulpa floculada decanta al fondo del espesador con un porcentaje de sólidos de 55% en el cono de descarga. La descarga del underflow es bombeada al tanque acondicionador de concentrado bulk.
- Espesadores de Relaves (2561-TK-006/007): Su objetivo principal es la recuperación de agua. Los espesadores reciben las colas de las celdas de flotación bulk rougher, bulk cleaner y cleaner scavenger con aproximadamente 30% de sólidos y descargan el underflow a 64% de sólidos aproximadamente.

3.3. Muestra

- Espesador de relaves 2561-TK-006

3.4. Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales

La técnica de gabinete que se utilizó en el desarrollo de esta investigación es de análisis documental y de recopilación de datos de fuentes primarias de información con personal de la unidad minera (características de espesador de relaves, sistema de bombeo, instrumentación de campo, actuadores, filosofía de control, valores mínimos y máximos de nivel y densidad, etc.).

Como material bibliográfico se utilizaron tesis, artículos, revistas, libros, etc. cuyo contenido trataba sobre el funcionamiento de espesadores de relaves y las estrategias de control aplicadas para realizar la descarga de underflow y sobre el diseño e implementación de sistemas de control automático basados en controladores lógicos programables (PLC) y paneles de operador (HMI).

En la Tabla 1 se muestran los principales equipos utilizados para el desarrollo de esta investigación.

Tabla 1

Equipos para el Desarrollo de la Investigación

Equipo	Descripción
TM221CE16R	Controlador Lógico Programable, 9 DI, 7 DO, puerto ethernet/serial
TM3TI4	Módulo de entradas analógicas, 4 AI, 16 bits de resolución, 4 a 20 mA
HMISTU85/S5T	Panel de operador, 5.7", puerto ethernet/serial/USB
XX930A2A2M12	Transmisor de nivel, rango 0-2 m, tipo ultrasónico, 4 a 20 mA
HDHXBOXAO	Generador de señales analógicas (0-10 V, 2-10 V, 0-20 mA, 4-20 mA)
TUW-25	Válvulas ON/OFF, 1", bronce, actuador solenoide 220 V AC
Pkm 60	Bomba periférica, 220 VAC, 3P, 0.5 HP, 2.6 A
Complementarios	Tuberías y accesorios, válvulas check, cable 18 y 14 AWG, Interruptores, guardamotores, contactores, fuente de poder, pilotos luminosos, pulsadores

Fuente: Elaboración propia

3.5. Definición y Operacionalización de Variables

Tabla 2

Definición y Operacionalización de Variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Independiente Sistema de control automático	Su función es regular la dinámica de un proceso con la finalidad de eliminar las posibilidades de error y obtener un producto de calidad.	Su función es monitorear las variaciones de nivel de cama de lodo en el tanque espesador de relaves y la densidad de sólidos para controlar la descarga de underflow y evitar derrames de lodo y la acumulación de sólidos en el cono de descarga.	Nivel	Nivel mínimo Nivel máximo
			Densidad	Densidad mínima Densidad máxima
Dependiente Descarga de underflow	Este procedimiento consiste en el retiro del lodo depositado en el cono de descarga del tanque espesador de relaves.	La descarga de lodo será enviada al tanque distribuidor para luego realimentar al tanque espesador de relaves y seguir extrayéndole agua o será enviada a la presa de almacenamiento de relaves.	Recirculación	Nivel mínimo Densidad mínima
			Disposición final de lodos	Nivel máximo Densidad máxima

Fuente: Elaboración propia

3.6. Diseño del Sistema de Control Automático

3.6.1. Diagnóstico General

PROYECTO TOROMOCHO

El Proyecto Toromocho es en una mina a tajo abierto que cuenta con reservas de cobre, plata y molibdeno. Está ubicada en el distrito de Morococha, provincia de Yauli, departamento de Junín. En el área donde se ubica el proyecto se han desarrollado una gran cantidad de operaciones mineras, ha sido explorada desde la década del 60 por Cerro de Pasco Corporation, luego por Centromin, y actualmente por Minera Perú Copper S.A. (ahora Minera Chinalco Perú S.A.), quien recibió la concesión de Centromin a través de un acuerdo de transferencia el 5 de mayo de 2008 (Knight Piésold Consulting, 2009).

Las exploraciones geológicas y el planeamiento de mina han determinado que el depósito Toromocho contiene una reserva de 1526 millones de toneladas de mineral con una buena ley promedio, lo cual representa una medida que describe el grado de concentración de recursos naturales valiosos presentes en una mena (mineral o roca). La ley promedio de cobre es de 0,48%, ley promedio de molibdeno de 0,019% y ley promedio de plata de 6,88 gramos por tonelada, basado en una ley de corte de aproximadamente 0,37% de cobre (Minera Chinalco Perú , 2009).

El Proyecto de Expansión Toromocho contempla la instalación de una nueva línea concentradora de 53,000 t/d de capacidad, la cual operará en conjunto con el actual concentrador, totalizando un tratamiento de 170,000 t/d de mineral. La nueva línea concentradora incluye un nuevo túnel bajo el actual acopio de mineral grueso, manejo de materiales, chancado de pebbles, molino SAG, hidrociclones, molino de bolas, un circuito de flotación bulk, espesamiento de relaves, espesamiento de concentrados y filtrado de concentrados. Además, incluye servicios auxiliares, tales como: agua, aire, lechada de cal y reactivos.

Figura 21

Unidad Minera Chinalco Perú S.A.



Fuente: <https://www.chinalco.com.pe/es/operaciones>

ÁREA DE ESPESADORES DE RELAVES

Esta nueva área de espesamiento se compone básicamente de dos espesadores de relaves 2561-TK-006 y 2561-TK-007 con sus respectivos sistemas de bombeo de overflow y underflow, los cajones de relaves, un muestreador y un tanque distribuidor. En la Tabla 3 se muestran las principales características de los espesadores de relaves.

Tabla 3

Características de los Espesadores de Relaves

Característica	Descripción
Marca	FLSmidth
Tipo de Espesador	Alta densidad
Diámetro	43 m
Rastras	Vallas fijadas a los brazos del rastrillo
Altura pared	6,5 m
Aplicación	Relaves
Tonelaje	2110 tph
Descarga	64% de sólidos

Fuente: Elaboración propia

Figura 22

Espesador de Relaves FLSmidth



Fuente: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/high-density-thickener>

SISTEMA DE BOMBEO

Las bombas de descarga de underflow de la unidad minera son de desplazamiento positivo, especiales para lodos húmedos, manejan presiones de descargas altas. El diámetro de las tuberías de descarga es de 34”.

En la Tabla 4 se muestran sus principales características eléctricas de las bombas de descarga de underflow.

Tabla 4

Características Eléctricas de las Bombas

Parámetro	Descripción
Fases	3
Tensión	400 V
Potencia	15 kW
Frecuencia	60 Hz
Eficiencia	80%
Factor de potencia	0,85

Fuente: Unidad Minera.

Figura 23

Bombas de Desplazamiento Positivo

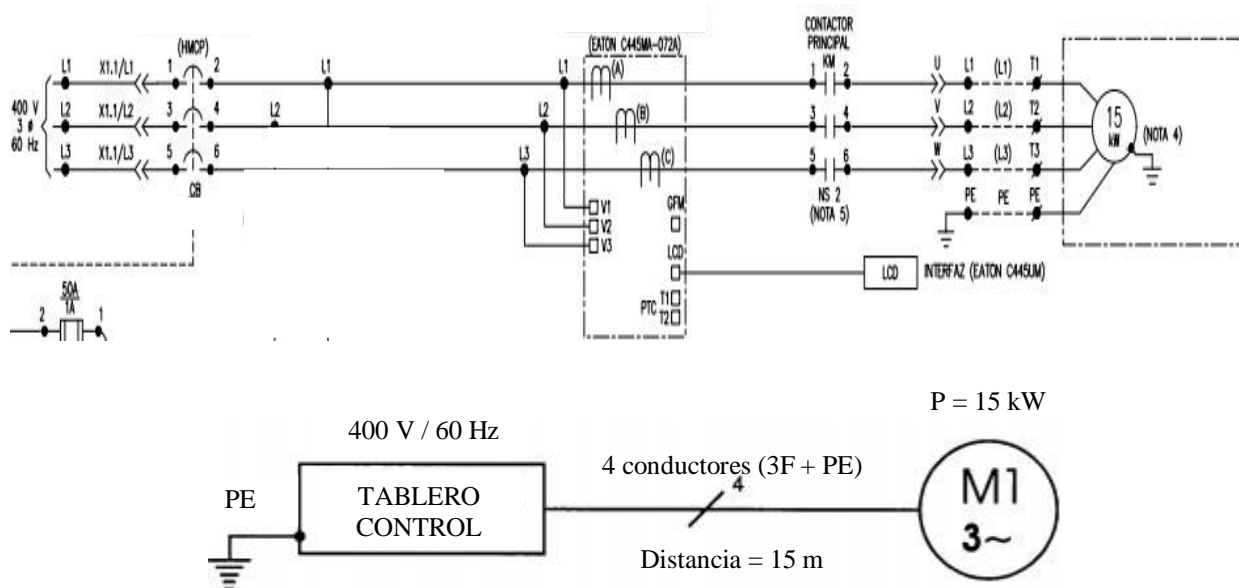


Fuente: <https://www.rumbominero.com/noticias/actualidad-empresarial/intech-provee-al-mercado-bombas-de-alta-confiabilidad-y-tecnologia/>

El control y gestión fallas de las bombas se realiza a través de arranque directo con relé electrónico con interfaz LCD marca EATON.

Figura 24

Control y Gestión de Bombas de Descarga



Fuente: Unidad Minera.

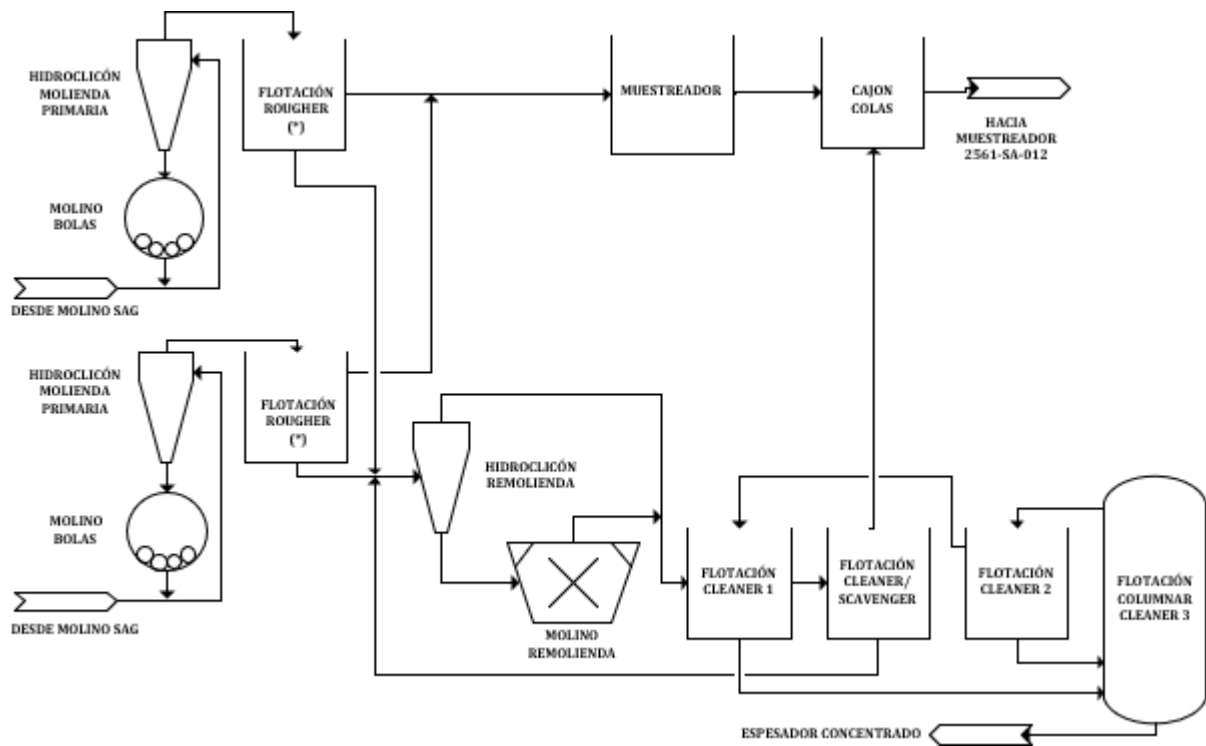
INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Los espesadores de relaves reciben los flujos o colas de las siguientes celdas de flotación: bulk rougher, bulk cleaner y cleaner scavenger.

La flotación bulk rougher comienza con la descarga del overflow de los hidrociclones de molienda con un flujo nominal de $3179 \text{ m}^3/\text{h}$ en cada línea y continúa a través de la alimentación a las celdas de flotación bulk rougher. El flujo concluye con la descarga de las colas de cada línea de la flotación bulk rougher al cajón de colas, desde donde es llevado al muestreador del área de espesadores de relaves.

Figura 25

Diagrama de Flujo de Proceso de Flotación

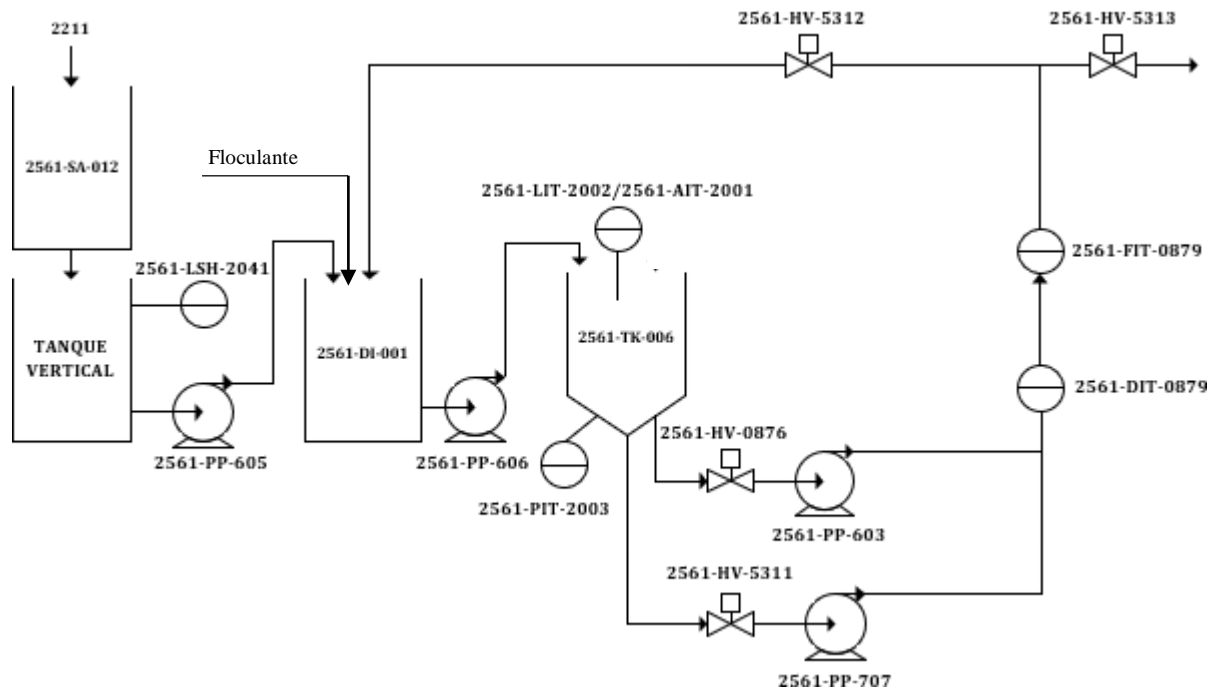


Nota: () Dos bancos de siete celdas de flotación rougher.*

Fuente: Elaboración propia

Figura 26

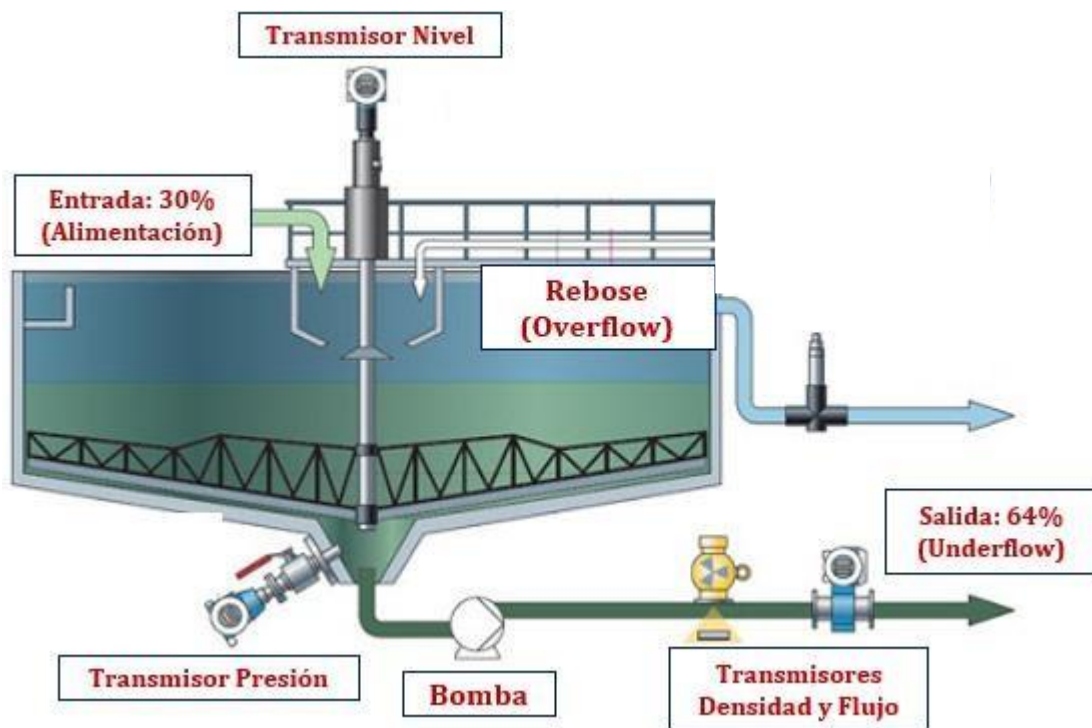
P&ID Descarga del Espesador de Relaves (simplificado)



Fuente: Elaboración propia

Figura 27

Diagrama Esquemático del Espesador de Relaves (referencial)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5*Lista de Instrumentos*

Código de instrumento	Señal		Servicio / Equipo / Línea
	Código	Descripción	
2561-LSH-2041	2561-LSH-2041	Sensor de nivel alto	Tanque vertical
2561-LIT-2002	2561-LIT-2002	Transmisor indicador de nivel	Tanque de relave / 2561-TK-006
2561-AIT-2001	2561-AIT-2001	Transmisor indicador de turbidez	Tanque de relave / 2561-TK-006
2561-PIT-2003	2561-PIT-2003	Transmisor indicador de presión	Tanque de relave / 2560-TK-006
2561-HV-0876	2561-HV-0876	Válvula descarga	Bombeo de relave / 2561-PP-603 / 707
2561-HV-5311	2561-HV-5311	Válvula descarga	Bombeo de relave / 2561-PP-603 / 707
2561-HV-5312	2561-HV-5312	Válvula recirculación	Tanque distribuidor / 2561-DI-001
2561-HV-5313	2561-HV-5313	Válvula disposición final de lodos	Tanque de relaves
2561-DIT-0879	2561-DI-0879	Indicador de densidad	Bombeo de relave / 2561-PP-603 / 707
2561-FIT-0879	2561-FI-0879	Indicador de flujo	Bombeo de relave / 2561-PP-603 / 707

Fuente: Elaboración propia

Condiciones de Funcionamiento y Diseño:

Los instrumentos de campo instalados en la unidad minera trabajan bajo las siguientes condiciones ambientales de funcionamiento:

- Altura: 5000 m.s.n.m.
- Temperatura: -10°C a 20°C
- Humedad relativa: 68.5%
- Calidad del aire: El aire filtrado puede contener el polvo generado por la mina y concentrar el polvo de los compuestos químicos del proceso.

Especificaciones Técnicas:

Transmisor Indicador de Nivel:

- El sensor es un transductor combinado de transmisión y recepción diseñado para emitir un haz de sonido ultrasónico dirigido a la superficie de los sólidos.
- El sensor tiene un diseño sin contacto.

- La carcasa del sensor / transductor y la cara acústica deben estar construidas con materiales adecuados para el servicio previsto.
- Son autolimpiables y libres de mantenimiento.
- El sensor está diseñado para operar continuamente a temperaturas de -10°C a 20°C.
- El transmisor debe tener protección NEMA (hermético al agua y al polvo).
- Salida de señal aislada de 4-20 mA, carga máxima de 600 ohmios con compensaciones programables de escala completa y cero, y protocolo de comunicación HART.

Tabla 6*Características del Transmisor de Nivel*

GENERAL	
Código de instrumento	2561-LIT-2002
Servicio	Tanque de relave / 2561-TK-006
DATOS OPERATIVOS	
Fluido	Concentrado
Temperatura	Normal: 10°C – Máxima: 20°C
Densidad	64%
Rango temperatura	-4°C a 20°C
Altura	5000 m.s.n.m.
Rango de operación	6.5 m
SENSOR	
Tipo	Ultrasónico
Material de carcasa	PBT / POLIPROPILENO
Proceso de conexión	2" NPT
Compensación de temperatura	Incluido
Ángulo del haz	11°
Distancia de bloqueo	< 0.4 m
TRANSMISOR - INDICADOR	
Tipo	Electrónico
Fuente de alimentación	24 VCC
Rango	0 - 8 m
Señal de salida	4 - 20 mA / HART
Display	LCD
Unidades	% o seleccionable (m)
Conexión conduit	½" NPT

Fuente: Unidad Minera

Figura 28*Transmisor de Nivel*

Fuente: Emerson

Transmisor Indicador de Densidad:

- El instrumento nuclear consiste en una fuente radiactiva, un soporte de fuente, un sensor y una electrónica necesaria para su funcionamiento.
- La fuente radiactiva tiene la intensidad suficiente para proporcionar una señal y una respuesta precisa para cumplir con el proceso.
- Incluye disposiciones para bloquear en la posición cerrada por medio de una llave y un mecanismo de bloqueo con llave o candado.

Tabla 7*Características del Transmisor de Densidad*

GENERAL	
Código de instrumento	2561-DIT-0879
Servicio	Tanque de relave / 2561-TK-006
Línea	34" TA-2560-2301-R2 / 2561-PP-603/707
DATOS OPERATIVOS	
Fluido	Concentrado
Flujo	Normal: 1071 m ³ /h – Máximo: 1400 m ³ /h
Temperatura	Normal: 10°C – Máxima: 20°C
Sólidos	64%
Línea / Material	34" / Acero al carbono
Rango temperatura	-4°C a 20°C
Altura	5000 m.s.n.m.
FUENTE	
Fuente de radiación	Rayos Gamma
Material de radiación	CS-137
TRANSMISOR - INDICADOR	
Tipo	Electrónico
Fuente de alimentación	120 VCA, 60 Hz
Señal de salida	4 - 20 mA + HART
Display	LCD con 4 líneas y backlight
Unidades	%

Fuente: Unidad Minera

Figura 29*Transmisor de Densidad*

Fuente: Endress Hauser

Válvulas Tipo Cuchilla:

Tabla 8

Características de Válvula Tipo Cuchilla - Descarga

GENERAL	
Código de instrumento	2561-HV-0876 / 2561-HV-5311
Servicio	Bombeo de relaves / 2561-PP-603/707
Línea	34" TA-2560-2301-R2 / 2561-PP-603/707
DATOS OPERATIVOS	
Fluido	Concentrado
Temperatura	Normal: 10°C – Máxima: 20°C
Sólidos	65%
Presión	190 kPa
Línea / Material	34" / Acero al carbono
Rango temperatura	-4°C a 20°C
Altura	5000 m.s.n.m.
VÁLVULA	
Tipo	Solenoide
Voltaje	120 VCA, 60 Hz
Conexión eléctrica	½" NPT
CUERPO	
Material del cuerpo	Hierro dúctil
Material de la cuchilla	304 SS
Material del vástago/eje	340 SS
Material de recorte	Caucho natural antiabrasivo
Material de la junta	Caucho natural antiabrasivo
Material del sello	EPDM
ACTUADOR	
Tipo	Actuador neumático doble efecto
Falla	Última posición

Fuente: Unidad Minera

Tabla 9*Características de Válvula Tipo Cuchilla - Recirculación y Disposición de Lodos*

GENERAL	
Código de instrumento	2561-HV-5312 / 2561-HV-5313
Servicio	Bombeo de relaves / 2561-PP-603/707
Línea	16" TA-2560-2301-R2 / 2561-PP-603/707
DATOS OPERATIVOS	
Fluido	Concentrado
Temperatura	Normal: 10°C – Máxima: 20°C
Sólidos	65%
Presión	180 kPa
Línea / Material	16" / Acero al carbono
Rango temperatura	-4°C a 20°C
Altura	5000 m.s.n.m.
VÁLVULA	
Tipo	Solenoide
Voltaje	120 VCA, 60 Hz
Conexión eléctrica	½" NPT
CUERPO	
Material del cuerpo	Hierro dúctil
Material de la cuchilla	304 SS
Material del vástago/eje	340 SS
Material de recorte	Caucho natural antiabrasivo
Material de la junta	Caucho natural antiabrasivo
Material del sello	EPDM
ACTUADOR	
Tipo	Actuador neumático doble efecto
Falla	Última posición

Fuente: Unidad Minera

Figura 30*Válvulas Tipo Cuchilla*

Fuente: Unidad Minera

FUNCIONAMIENTO DE LOS ESPESADORES DE RELAVES

La función principal del espesador de relaves es concentrar lodos en la parte inferior del tanque a fin de obtener agua con menos cantidad de sólidos en suspensión en el overflow. Para tal efecto, el underflow del espesador se recircula constantemente permitiendo formar una cama de lodos precipitados en la parte inferior por efecto de los floculantes. Bajo estas condiciones existen dos líneas de bombeo de underflow del espesador. En cada una de estas líneas hay una válvula ON/OF tipo cuchilla, según lo siguiente: Línea 1 con la bomba 2561-PP-603 y con la válvula 2561-HV-0876, Línea 2 con la bomba 2561-PP-707 y con la válvula 2561-HV-5311. Ambas líneas de bombeo se juntan en una línea de descarga donde se ubica un transmisor de flujo 2561-FIT-0879 y un transmisor de densidad 2561-DIT-0879. Esta línea de descarga se divide en una línea que recircula el underflow al tanque distribuidor 2561-DI-001, en la cual se ubica la válvula de control

ON/OF 2561-HV-5312 y otra línea que conduce a la línea de distribución de relaves, en la cual se ubica la válvula 2561-HV-5313.

El nivel de cama en el espesador de relaves 2561-TK-006 es medido por un transmisor de interface entre lodo y agua 2561-LIT-2002. Este instrumento también tiene incorporado un sensor de turbidez 2561-AIT-2001, el mismo que dará información sobre el grado de turbidez del agua en el tanque del espesador. En el cono de descarga del espesador está instalado un transmisor de presión 2561-PIT-2003.

En condiciones normales, tanto la densidad en la línea de descarga como el nivel de la cama de lodos en el tanque espesador irán incrementándose progresivamente por acción de los floculantes y el paso del tiempo. El rebose del espesador de colas debe ser recolectado en el tanque de agua de procesos 800-TK-114.

3.6.2. Dimensionamiento del Sistema de Bombeo

A continuación, se muestran los cálculos que se realizaron en la unidad minera para el dimensionamiento y selección de los dispositivos de protección y maniobra de las bombas de descarga.

Cálculo de la Corriente Nominal:

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} * V * n * \text{Cos}\varphi}$$

Donde:

- I_n = Corriente nominal (A)
- P = Potencia (W)
- V = Tensión (V)
- n = eficiencia
- $\text{Cos}\varphi$ = Factor de potencia

Reemplazando valores:

$$In = \frac{15000 W}{\sqrt{3} * 400 V * 0,8 * 0,85}$$

$$In = \frac{15000 W}{471.117 V}$$

$$In = 31.83 A$$

Los conductores de conexión que alimentan a las bombas están dimensionados para una intensidad del 125 % de la intensidad a plena carga. Por tanto, la intensidad nominal con corrección (Inc) es:

$$Inc = 1.25 * 31.83 A$$

$$Inc = 39.79 A$$

Esta es la intensidad de cálculo es utilizada para seleccionar los conductores de fase.

Selección del Conductor:

La Fig. 22 de conductores THW-90 indica que la capacidad del conductor 8 AWG (6 mm²) es de 55 A para instalación en tubo.

Figura 31

Características de Cable THW

Nivel de temperatura:	60°C	75°C	90°C
Tipo de aislante:	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2
Medida / calibre del cable	Amperaje soportado		
14 AWG	15 A	15 A	15 A
12 AWG	20 A	20 A	20 A
10 AWG	30 A	30 A	30 A
8 AWG	40 A	50 A	55 A

Fuente: INDECO

La caída de tensión de la línea no debe ser superior al 3 % de la tensión nominal. La fórmula a emplear es:

$$S = \frac{0.0309 * \sum I * L * \text{Cos}\varphi}{\% \Delta V * V}$$

Donde:

- S = Sección del conductor (mm^2)
- $\sum I$ = Sumatoria de corrientes (A)
- L = Longitud de la instalación (m)
- $\text{Cos}\phi$ = Factor de potencia
- $\% \Delta V$ = Caída de tensión máxima
- V = Tensión de línea (V)

Reemplazando valores:

Tomando como referencia el conductor: 8 AWG, tipo THW-90, sección de 6 mm^2 , la caída de tensión será:

$$\% \Delta V = \frac{0.0309 * 39.79 \text{ A} * 15 \text{ m} * 0.85}{6 \text{ mm}^2 * 400 \text{ V}} * 100$$

$$\% \Delta V = \frac{15.676}{2400} * 100$$

$$\% \Delta V = 0.653\% < 3\% \text{ OK}$$

Por lo tanto, el conductor seleccionado para la bomba es el adecuado.

Interruptor Termomagnético:

La corriente de ITM (I_q) debe ser mayor o igual a la corriente nominal de la bomba.

$$I_t \geq 39.79 \text{ A}$$

Por lo tanto:

$$I_t = 40 \text{ A}$$

Para la protección de las bombas se utilizan ITM con las siguientes características:

Tabla 10*Características de los ITM*

Parámetro	Descripción
Marca	ABB
Modelo	S2X 80
Tipo	Caja moldeada
Protección	Sobrecarga, cortocircuito
Corriente	80A
N° polos	3
Tensión	690 V, 50/60 Hz
Poder de corte	10/100 kA

*Fuente: Unidad Minera***Figura 32***Interruptor Termomagnético**Fuente: ABB***Contactador:**

La corriente del contactor (I_c) debe ser mayor o igual a la corriente nominal de la bomba.

$$I_c \geq 39.79 A$$

Por lo tanto:

$$I_c = 50 A$$

Para la conmutación de las bombas se utilizan contactores con las siguientes características:

Tabla 11*Características de los Contactores*

Parámetro	Descripción
Marca	ABB
Modelo	A50-30-11
Categoría	AC-3
Corriente	50A
N° polos	3
Tensión	690 V, 50/60 Hz
Bobina	200/230 V

Fuente: Unidad Minera

Figura 33

Contactador



Fuente: ABB

Relé Electrónico:

Para la supervisión y protección de todo el sistema de potencia se utiliza el relé de gestión del motor Power Xpert C445.

Tabla 12

Características del Relé Electrónico

Parámetro	Descripción
Marca	EATON
Modelo	Power Xpert C445
Rango corriente	0,3-800A
Rango tensión	690-4160 VCA, 50/60 Hz
Opciones energía	120/240 VCA o 24 VCC
E/S en tablero	4E digitales, 3S a relé
Comunicación	Ethernet IP, Modbus TCP/RTU, Profibus, USB

Fuente: Unidad Minera

Figura 34

Relé Electrónico



Fuente: EATON

3.6.3. Alternativas de Solución

Control Clásico:

En el proyecto de (Bancayán, 2019) desarrollado en el Consorcio Minero Horizonte S.A. se logró controlar la descarga de underflow de un tanque espesador de relaves con un transmisor de nivel de cama de lodo que envía la señal de proceso al controlador del sistema, este a su vez genera una señal de control para un variador de frecuencia cuya función es regular la velocidad de las bombas de descarga de underflow. La lógica de control fue la siguiente: si aumenta el nivel de cama de lodos dentro del espesador de relaves, aumenta el flujo de descarga a través de las bombas. Por el contrario, si disminuye del nivel de la cama de lodo, se produce una disminución de la velocidad de la bomba de descarga. El rango de operación de transmisor de nivel fue: LRV: 0%, URV: 100% para la medición continua del nivel de cama de lodo. También se generaron alarmas: Nivel Alto: 90%, Nivel 0%: ubicado en el cono de descarga del espesador (señales discretas), el rango de operación de transmisor de densidad fue: LRV: 0%, URV: 64%.

Control con Lógica Fuzzy:

En el proyecto de Ojeda (2014) se desarrolló e implementó un sistema de control basado en reglas lógicas o lógica fuzzy para controlar la operación de un tanque espesador de relaves. Las reglas de control se establecieron con base en las filosofías operativas. La lógica de control para la descarga de underflow se basó en la medición del nivel de cama de lodo y la densidad de sólidos en las tuberías de descarga. Los rangos de medición se establecieron en campo de la siguiente, el rango de operación de transmisor de nivel fue: LRV: 0%, URV: 100%, el rango de operación de transmisor de densidad fue: LRV: 0%, URV: 65%. Así mismo, en el proyecto de López (2018) se diseñó un controlador difuso con la finalidad de emular el comportamiento de un sistema experto aplicado al proceso de espesamiento de relaves para optimizar su funcionamiento y maximizar la

recuperación de agua de proceso sin afectar la descarga de sólidos. La lógica del controlador difuso tuvo en cuenta variables como nivel de cama de lodo, densidad de sólidos, presión en el cono de descarga y torque de las rastras. Los rangos de medición se establecieron en campo de la siguiente, el rango de operación de transmisor de nivel fue: LRV: 0%, URV: 100%, el rango de operación de transmisor de densidad fue: LRV: 0%, URV: 65%.

3.6.4. Descripción de la Estrategia de Control Seleccionada

Se optó por utilizar una estrategia de control clásico para la medición continua del nivel de cama y la densidad del lodo (señales analógicas), los valores medidos servirán para activar/desactivar las bombas de descarga de underflow y las válvulas de control según corresponda (señales discretas).

La estrategia de control a aplicar es la siguiente: Cuando la densidad de los lodos recirculantes alcance un nivel significativamente elevado ($D_{max} = 64\%$) o el nivel de cama de lodo en el espesador de relaves alcance su nivel máximo ($L_{max} = 90\%$), el estado de recirculación cambiará por el de disposición final de lodos, cerrando la válvula 2561-HV-5312 y abriendo la válvula 2561-HV-5313. En esta condición, los lodos de underflow del espesador serán enviados a la presa de relaves. La condición de disposición final de lodos se mantiene hasta que el porcentaje de densidad de sólidos sea menor a una concentración de sólidos de 64% pero mayor o igual a $D_{min} = 30\%$ o el nivel de cama lodo en el espesador de relaves sea menor a un nivel de 90% pero mayor o igual a $L_{min} = 10\%$. De presentarse cualquiera de estas condiciones, el sistema retorna a la condición de recirculación de lodos, el sistema de control ordenará abrir la válvula 2561-HV-5312 y cerrará la válvula 2561-HV-5313.

Tabla 13

Valores Mínicos y Máximos de Nivel y Densidad de Sólidos

Valor	Nivel (%)	Densidad (%)
Mínimo	10	30
Máximo	90	64

Fuente: Elaboración propia. Nota: La unidad minera utiliza como unidad de ingeniería el (%) para estas variables

3.6.5. Dimensionamiento y Selección de Equipos para el Prototipo

Para la implementación del prototipo se utilizarán dos bombas de 3 fases, 220 V, 0.37 kW, 60 Hz, $n = 0.8$, $\text{Cos}\phi = 0.85$. Conociendo esta información se dimensionarán los dispositivos de protección y maniobra.

Cálculo de la Corriente Nominal:

$$In = \frac{P}{\sqrt{3} * V * n * \text{Cos}\phi}$$

Donde:

- In = Corriente Nominal (A)
- P = Potencia (W)
- V = Tensión (V)
- n = Eficiencia
- $\text{Cos}\phi$ = Factor de Potencia

Reemplazando valores:

$$In = \frac{370 \text{ W}}{\sqrt{3} * 220 \text{ V} * 0.8 * 0.85}$$

$$In = \frac{370 \text{ W}}{259.11 \text{ V}}$$

$$In = 1.43 \text{ A}$$

Selección del Guardamotor:

El rango de corriente de regulación del guardamotor (I_{rg}) debe ser mayor o igual a la corriente nominal de la bomba.

$$I_{rg} \geq 1.43 A$$

Se ha seleccionado un guardamotor marca CHINT con un rango de corriente de regulación apropiado:

$$I_{rg} = 1 - 1.6 A$$

Selección del Contactor:

La corriente del contactor (I_c) debe ser mayor o igual a la corriente nominal de la bomba.

$$I_c \geq 1.43 A$$

Se ha seleccionado un contactor marca CHINT con el valor de corriente comercial más bajo:

$$I_c = 9 A$$

Selección del Conductor:

El conductor se seleccionará con base en la Fig. 32. Como se puede observar, el calibre adecuado es el 14 AWG.

Figura 35

Características de Cable THW

TABLA DE DATOS TECNICOS THW - 90 (AWG/MCM)									
Calibre Conductor	Seccion Nominal	N° De Hilos	Diametro Hilo	Diametro Conductor	Espesor Aislamiento	Diametro Exterior	Peso	Amperaje Aire	Amperaje Ducto
AWG	mm ²		mm	mm	mm	mm	Kg/Km	A	A
14	2.1	7	0.60	1.75	0.8	3.4	28	35	25
12	3.3	7	0.76	2.20	0.8	3.8	40	40	30
10	5.3	7	0.96	2.78	0.8	4.4	59	56	40

Fuente: INDECO

En la Tabla 13 se muestra la lista de equipos para implementar el prototipo.

Tabla 14

Lista de Equipos para el Prototipo

Equipo	Descripción	Foto
ITM trifásico	Marca CHINT, 25 A, 10 kA, curva de disparo tipo C	
Variador de frecuencia	Marca DELTA, 1 HP, 230 V	
ITM monofásico	Marca CHINT, 10 A, 10 kA, curva de disparo tipo C	
Fuente de poder	Marca Schneider Electric, 24 V CC, 1.2 A	
ITM unipolar	Marca Schneider Electric, modelo IC60N, 10 A	
Contactor	Marca CHINT, 220 V CA, 9A, AC-3, 1 NO	
Guardamotor	Marca CHINT, 1-1.6 A, 1 NO, 1 NC	

Cable de potencia	Marca INDECO, 14 AWG, THW-90	
PLC	Marca Schneider Electric, serie TM221CE16R	
HMI	Marca Schneider Electric, serie HMISTU85	
Módulo entrada analógica	Marca Schneider Electric, serie TM3TI4	
Generador de señales	Marca oneBus, serie HXHDBOXAO	
Transmisor de nivel	Marca Telemecanique, serie XX930A2A2M12	
Pilotos luminosos	Rojos, verdes, 220 V CA, 10 mA, 22 mm	
Pulsadores	1 NO (verde), 1 NC (rojo), 10 mA, 22 mm	

Parada emergencia	1 NC, 10 mA, 22 mm	
Válvula ON/OFF	Marca STNC, serie TUW-25, 1", 220 V CA	
Válvula check	Marca VALMAX, antiretorno, 1"	
Electrobomba	Marca Pedrollo, 0.5 HP, 220 V CA	
Cable de control	INDECO, 18 AWG, THW-90	
Enchufe	L/N/PE, 220 V CA, 15 A	

Fuente: Elaboración propia

3.6.6. Lista de Instrumentos y Actuadores para el Prototipo

En la Tabla 15 se muestra la cantidad de instrumentos de medición y actuadores.

Tabla 15

Lista de Instrumentos de Medición y Actuadores

Espesador	Instrumento/Actuador	Tag
2561-TK-006	Transmisor indicador de nivel	2561-LIT-2002
	Transmisor indicador de densidad	2561-DIT-0879
	Válvula descarga - Línea 1	2561-HV-0876
	Válvula descarga - Línea 2	2561-HV-5311
	Bomba descarga - Línea 1	2561-PP-603
	Bomba descarga - Línea 2	2561-PP-707
	Válvula recirculación	2561-HV-5312
	Válvula disposición final de lodos	2561-HV-5313

Fuente: Elaboración propia

3.6.7. Lista de Señales de Control

En la Tabla 16 se muestra la cantidad de señales de E/S (digitales y analógicas).

Tabla 16

Lista de Señales de Control

Instrumento/Actuador	Tag	E/S	Descripción	Valor
Transmisor indicador de nivel	2561-LIT-2002	E	Señal analógica (Lmin y Lmax)	4 a 20 mA
Transmisor indicador de densidad	2561-DIT-0879	E	Señal analógica (Dmin y Dmax)	4 a 20 mA
Válvula descarga - Línea 1	2561-HV-0876	S	Señal digital (ON/OFF)	220 V CA
Válvula descarga - Línea 2	2561-HV-5311	S	Señal digital (ON/OFF)	220 V CA
Bomba descarga - Línea 1	2561-PP-603	E	Señal digital (Marcha)	24 V CC
		E	Señal digital (Paro)	24 V CC
		E	Señal digital (sobrecarga)	24 V CC
		E	Señal digital (confirmación arranque)	24 V CC
		S	Señal digital (bobina)	220 V CA
Bomba descarga - Línea 2	2561-PP-707	E	Señal digital (Marcha)	24 V CC
		E	Señal digital (Paro)	24 V CC
		E	Señal digital (sobrecarga)	24 V CC
		E	Señal digital (confirmación arranque)	24 V CC
Válvula recirculación	2561-HV-5312	S	Señal digital (bobina)	220 V CA
Válvula disposición final de lodos	2561-HV-5313	S	Señal digital (ON/OFF)	220 V CA
Falla de bombas	FAIL_BOMBAS	S	Señal digital (ON/OFF)	220 V CA

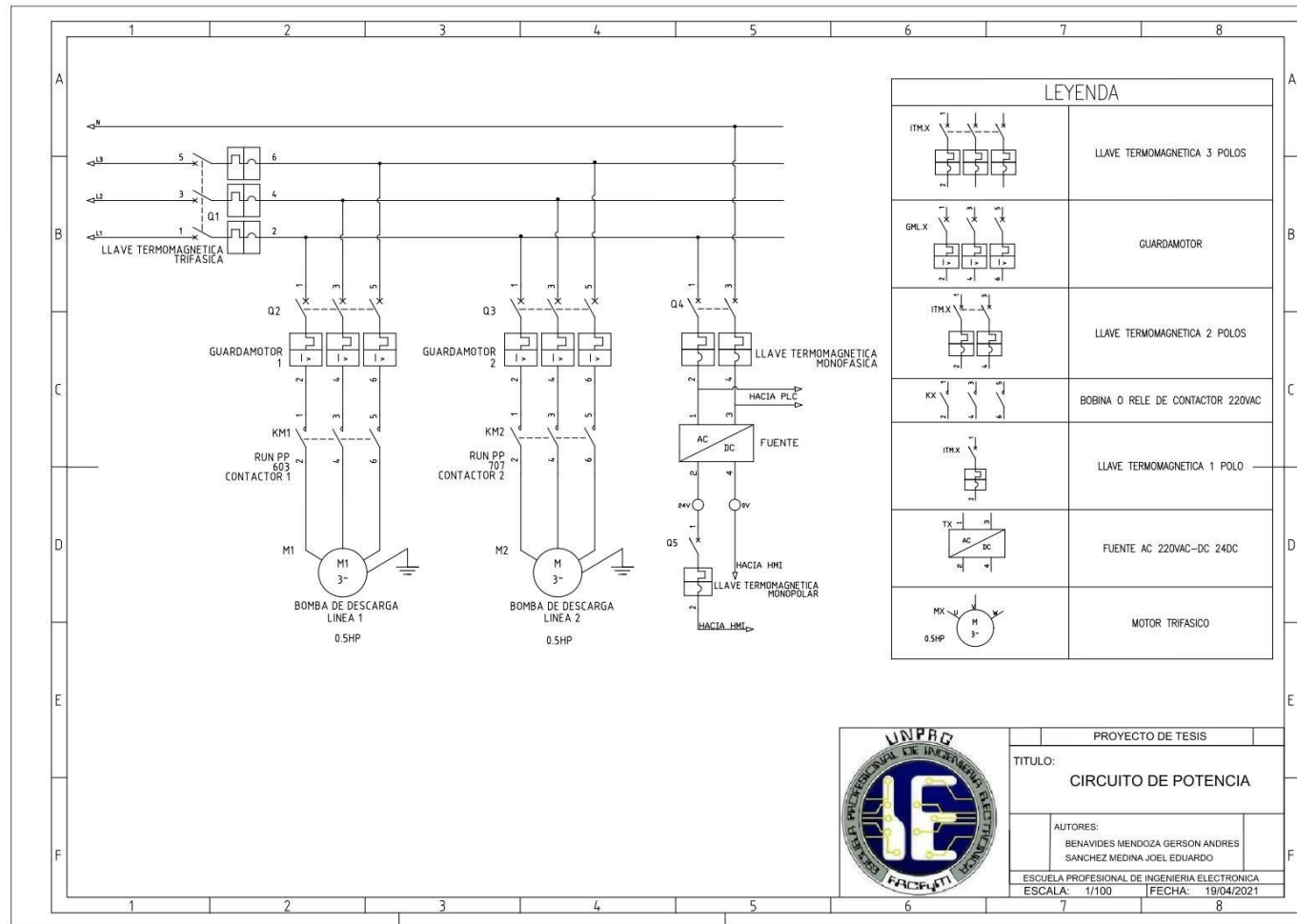
Fuente: Elaboración propia

De la lista de señales de control se concluye que para controlar la descarga de underflow en el espesador de relaves 2561-TK-006 se necesitan: ocho entradas digitales (24 V CC), siete salidas digitales (220 V CA) y dos entradas analógicas (4 a 20 mA). Sin embargo, las bombas de descarga funcionan simultáneamente, por lo tanto, las señales de marcha y paro serán compartidas, de esta manera, se reduce el número de entradas digitales a seis.

3.6.8. Elaboración de Planos

Figura 36

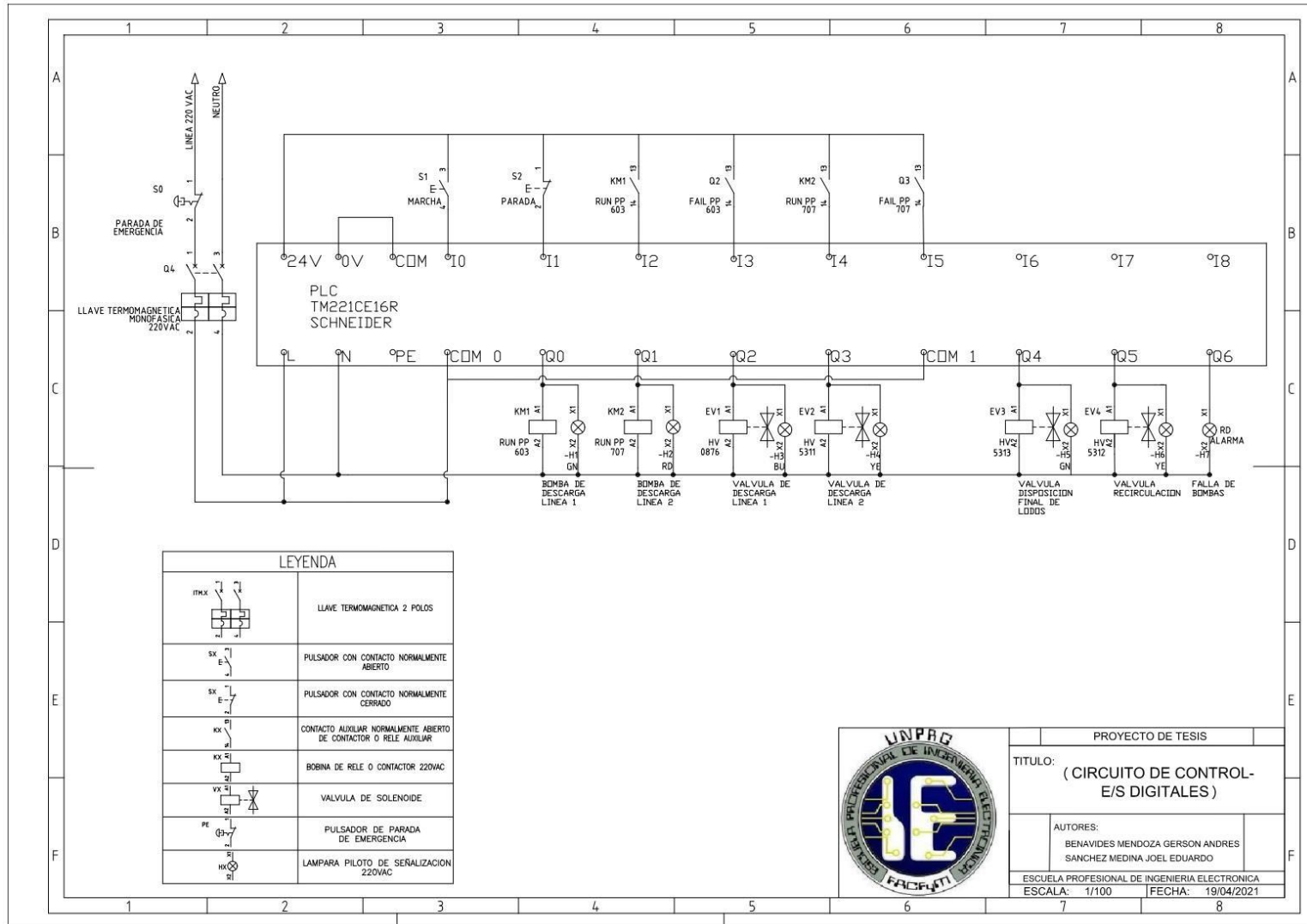
Circuito de Potencia



Fuente: Elaboración propia

Figura 37

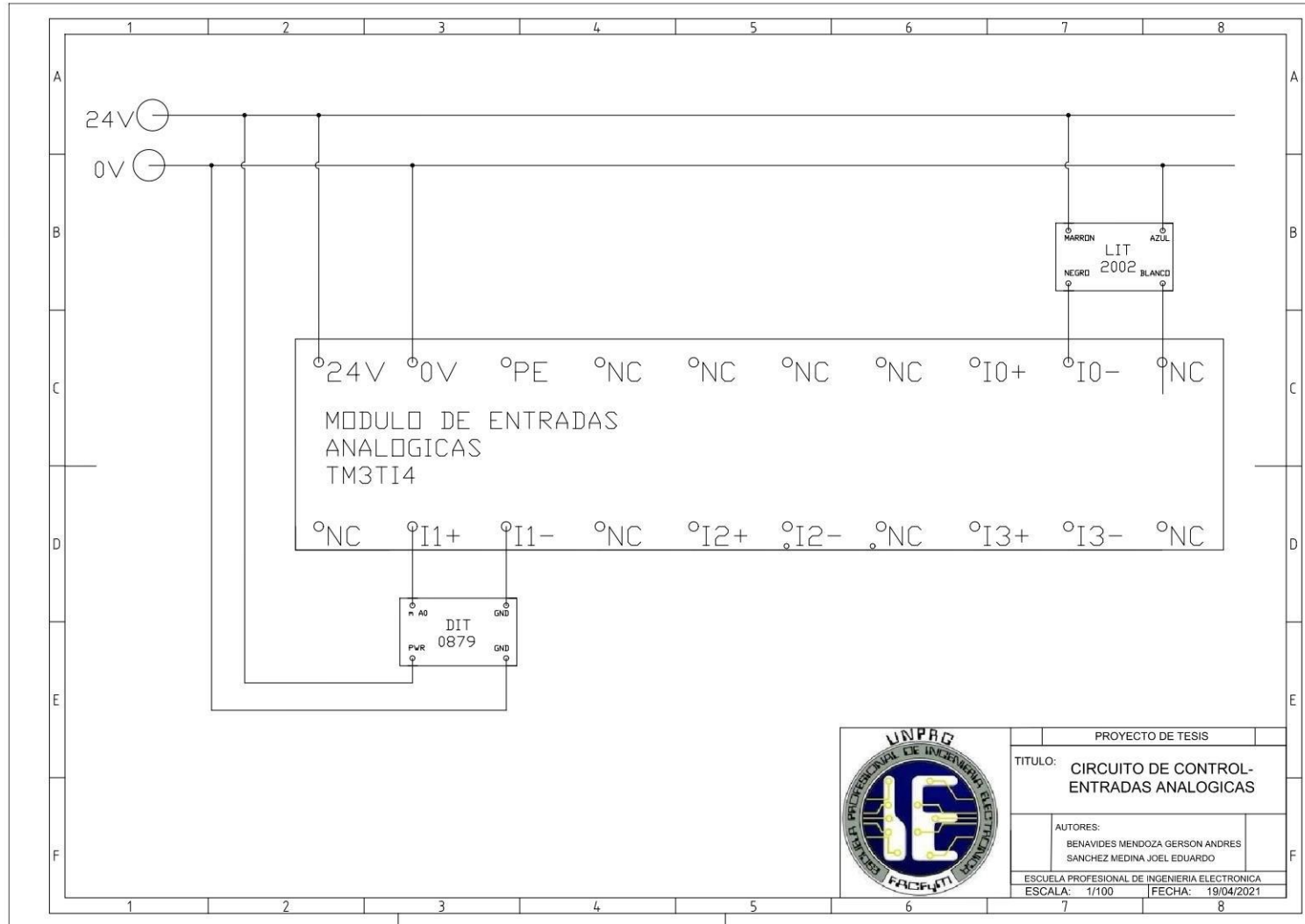
Circuito de Control - E/S Digitales



Fuente: Elaboración propia

Figura 38

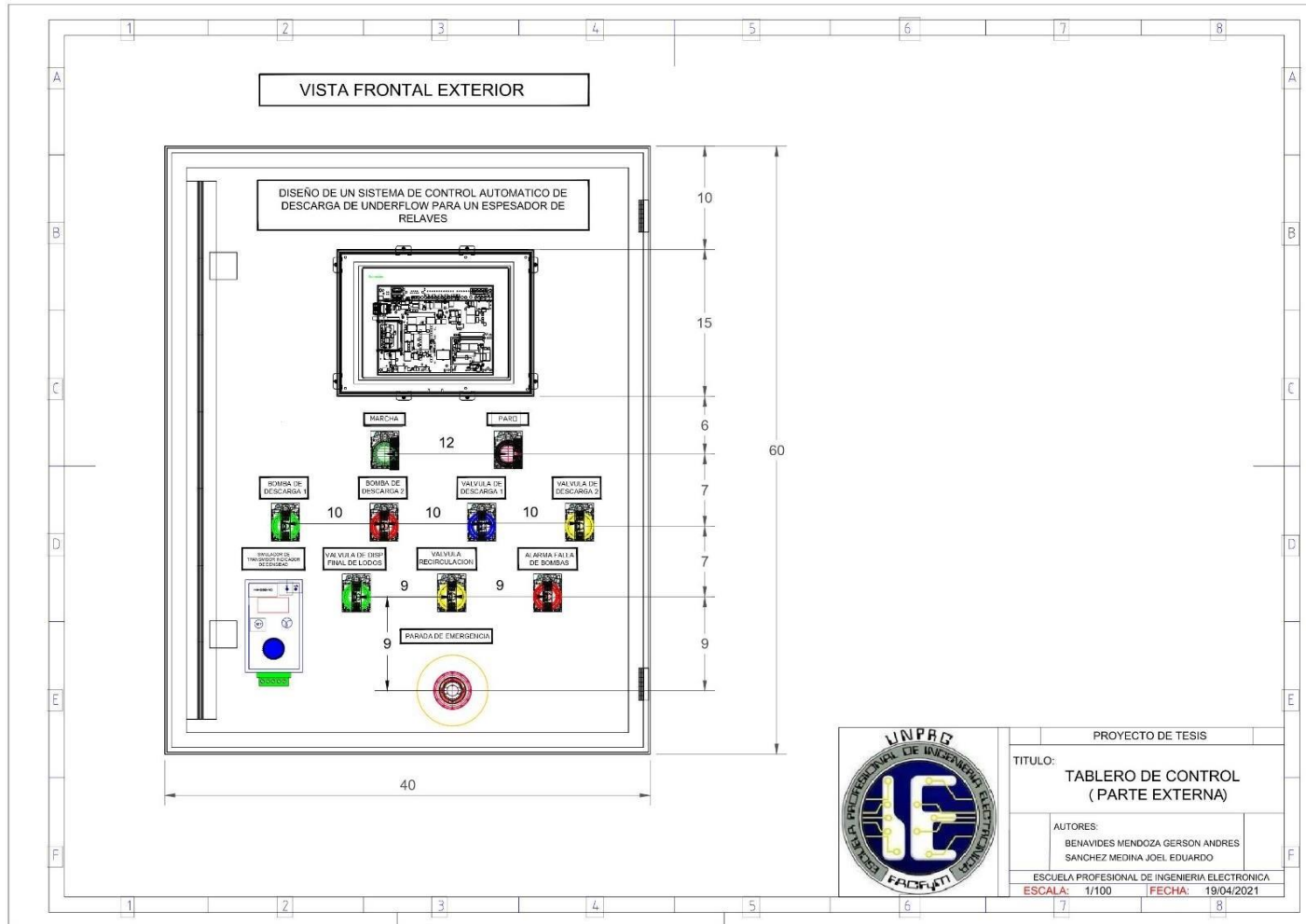
Circuito de Control - Entradas Analógicas



Fuente: Elaboración propia

Figura 39

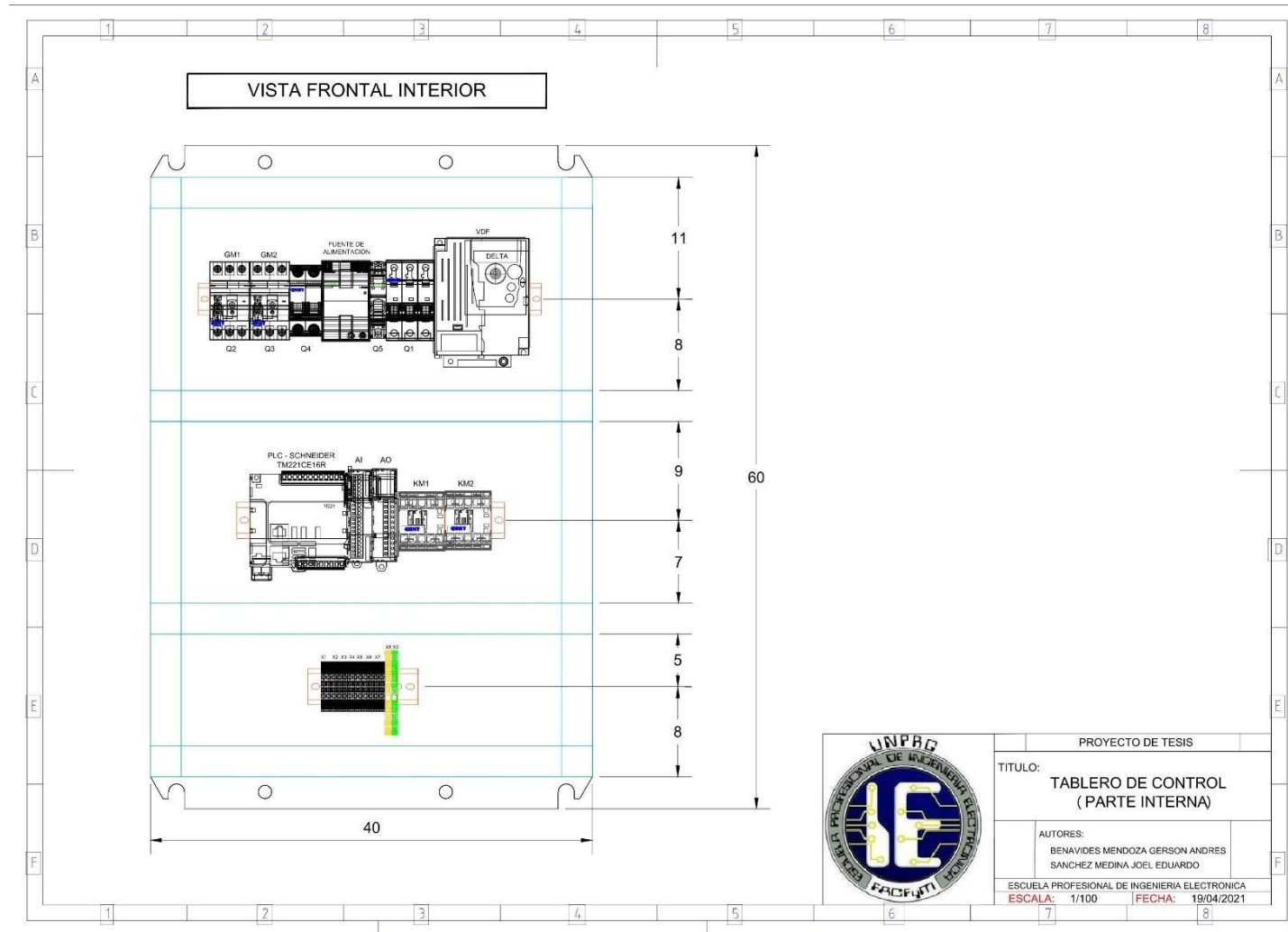
Tablero de Control - Parte Externa



Fuente: Elaboración propia

Figura 40

Tablero de Control - Parte Interna



Fuente: Elaboración propia

Figura 41

Arquitectura de Red

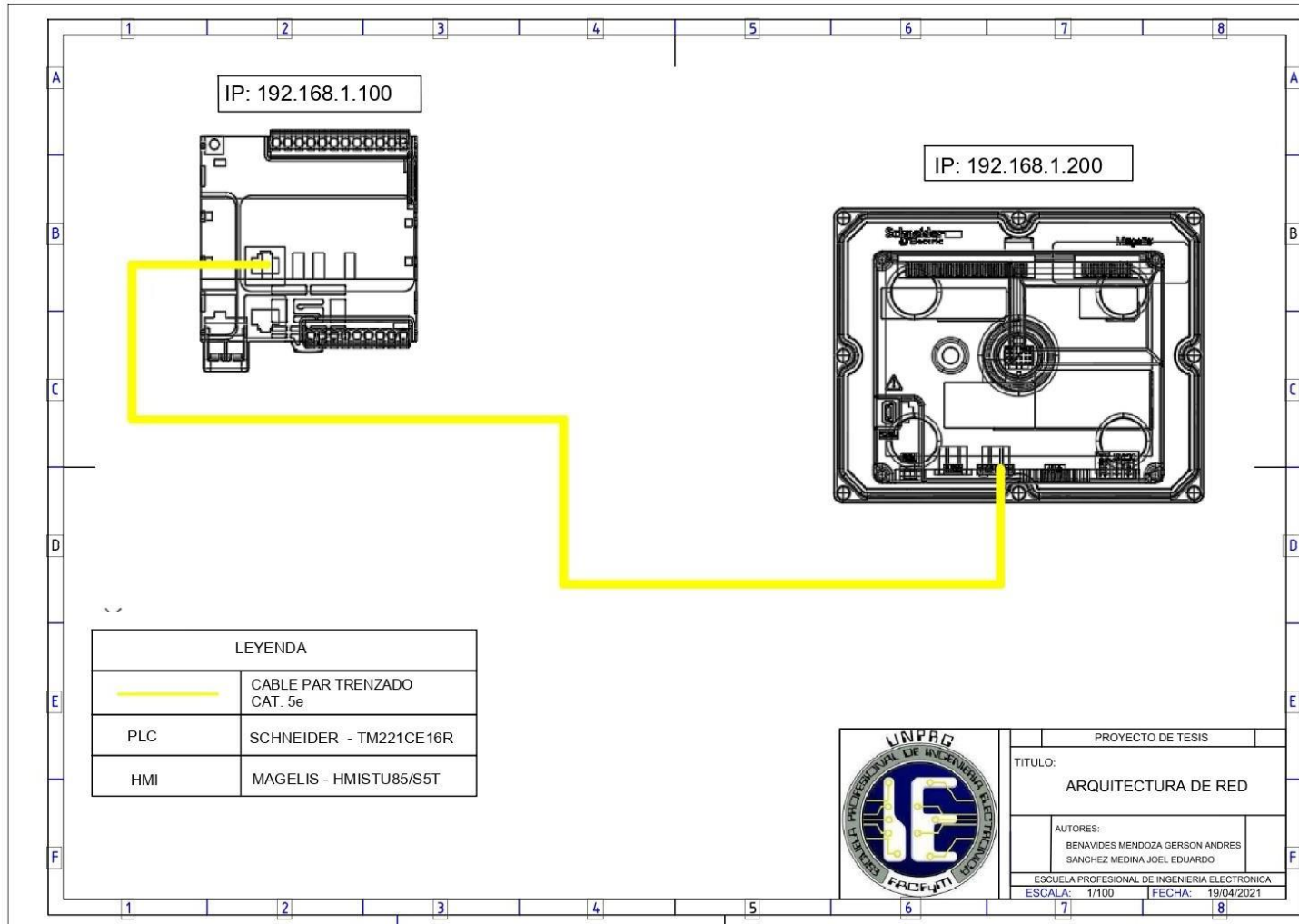
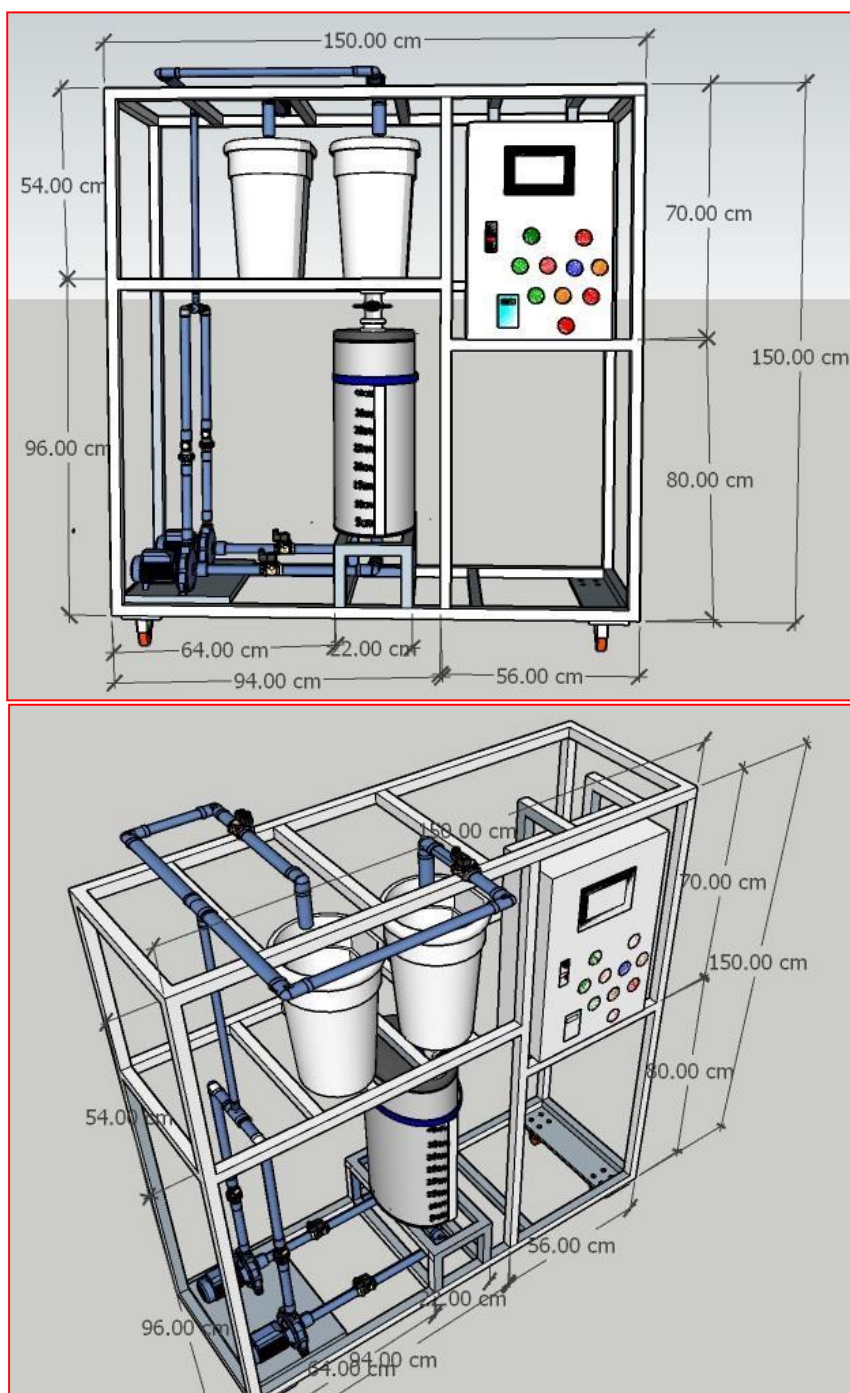


Figura 42*Diseño Estructural - Vista Frontal y Aérea*

Fuente: Elaboración propia

3.6.9. Configuración y Programación de Equipos

La lógica de control para el PLC fue desarrollada en el software EcoStruxure Machine Expert Basic v1.1 de Schneider Electric.

Figura 43

Configuración del PLC y Módulo de Entradas Analógicas



Fuente: Elaboración propia

Figura 44

Creación de E/S Digitales

Utiliz...	Dirección	Símbolo	Evento	Comentario
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.0	MARCHA		Pulsador NO Marcha
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.1	PARO		Pulsador NC Parada
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.2	RUN_PP_603		Confirmación Arranque Bomba Descarga Línea 1
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.3	OVERLOAD_PP_603		Contacto NO Guardamotor Bomba 1
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.4	RUN_PP_707		Confirmación Arranque Bomba Descarga Línea 2
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.5	OVERLOAD_PP_707		Contacto NO Guardamotor Bomba 2

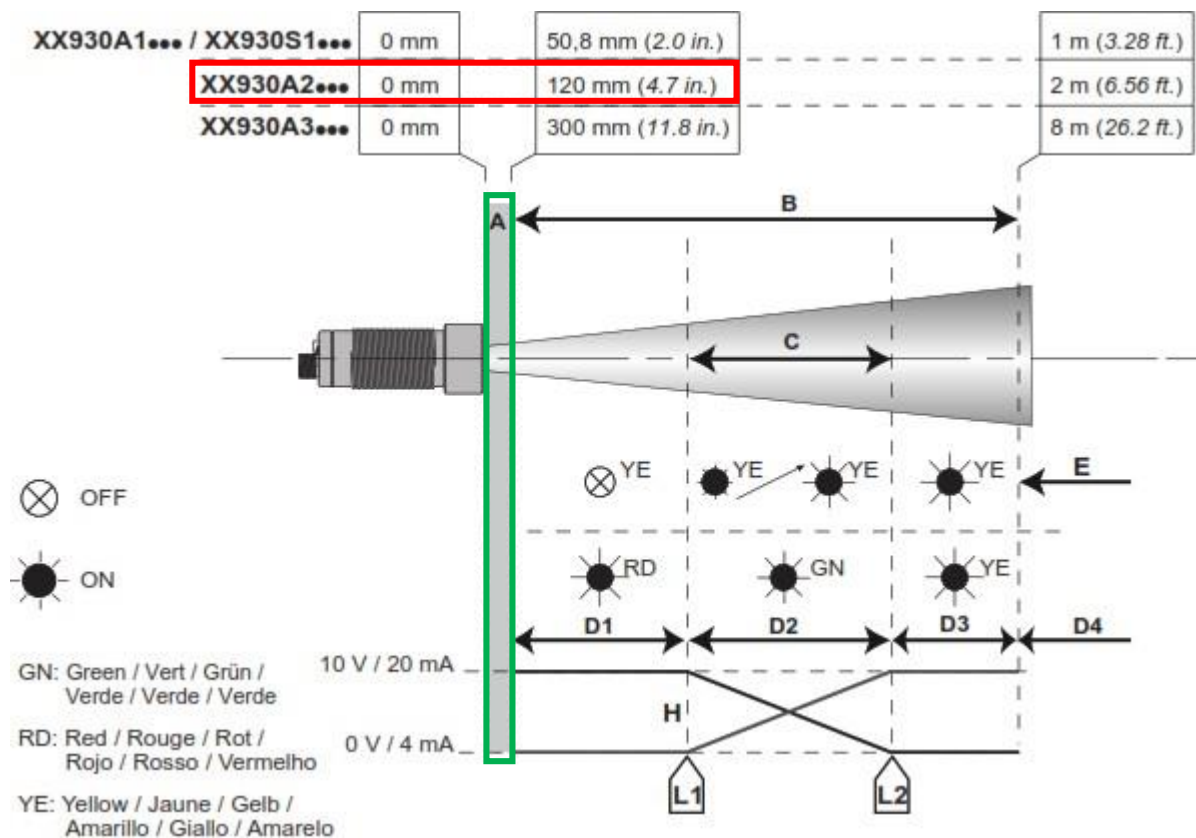
Utiliz...	Dirección	Símbolo	Comentario
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.0	PP_603	Bomba Descarga Línea 1
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.1	PP_707	Bomba Descarga Línea 2
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.2	HV_0876	Válvula Descarga Línea 1
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.3	HV_5311	Válvula Descarga Línea 2
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.4	HV_5313	Válvula Disposición Final Lodos
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.5	HV_5312	Válvula Recirculación
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.6	FAIL_BOMBAS	

Fuente: Elaboración propia

Para calibrar el transmisor de nivel (recuadro rojo) se tuvo en cuenta la zona muerta de 12 cm que indica el fabricante (recuadro verde). En esta zona el transmisor de nivel entrega valores aleatorios.

Figura 45

Características del Transmisor de Nivel para el Prototipo



Fuente: Telemecanique

El transmisor de nivel que se ubicará en la parte superior del tanque que utilizaremos para simular el tanque espesador de relaves tiene una altura de 52 cm, a este valor debemos restarle los 12 cm de la zona muerta, resultando una altura de trabajo de 40 cm. Luego de esto debemos definir el valor mínimo y máximo con ayuda del manual de instrucciones del fabricante.

Figura 46*Secuencia para Entrar al Modo de Configuración*

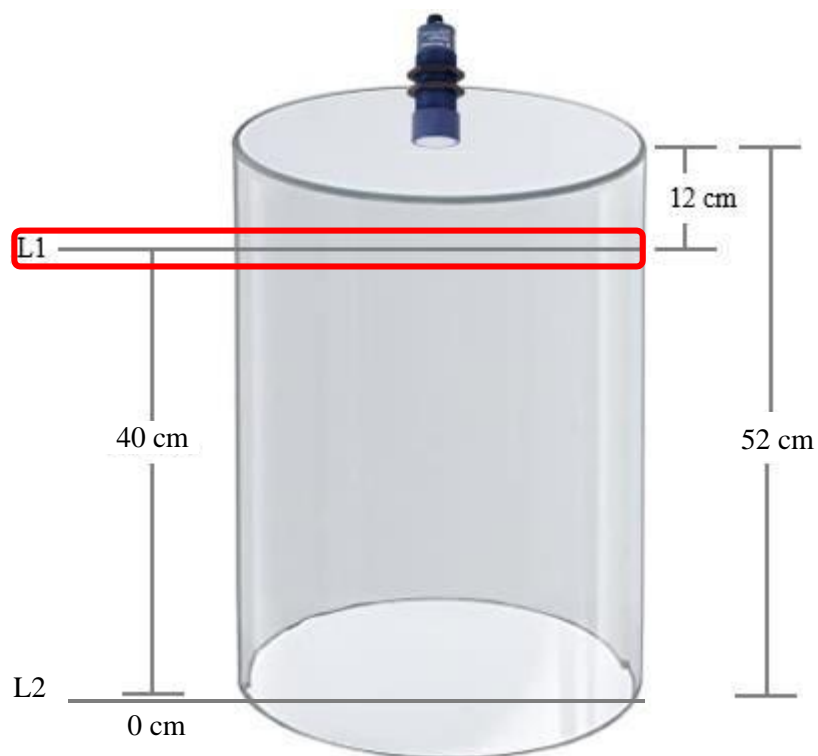
1. Oprima y mantenga oprimido el botón de aprendizaje. El LED multicolor destella rápidamente en amarillo. Continúe oprimiendo el botón de aprendizaje durante 3 segundos hasta que el LED multicolor destelle lentamente en verde.
2. Suelte el botón de aprendizaje. El LED multicolor continúa destellando lentamente en verde: el sensor está solicitando el primer límite.
3. Siga el procedimiento «Máximo: analógica en el límite lejano L2» o «Máximo: analógica en el límite cercano L1»

Fuente: Telemecanique

En nuestra investigación hemos utilizado el método de calibración denominado “Máximo: analógica en el límite cercano L1”. Esto quiere decir que el transmisor de nivel entregará una señal de salida máxima (20 mA) cuando el objeto a detectar se encuentre cerca de él, es decir, en la posición L1, tal como se aprecia en la Fig. 47.

Figura 47

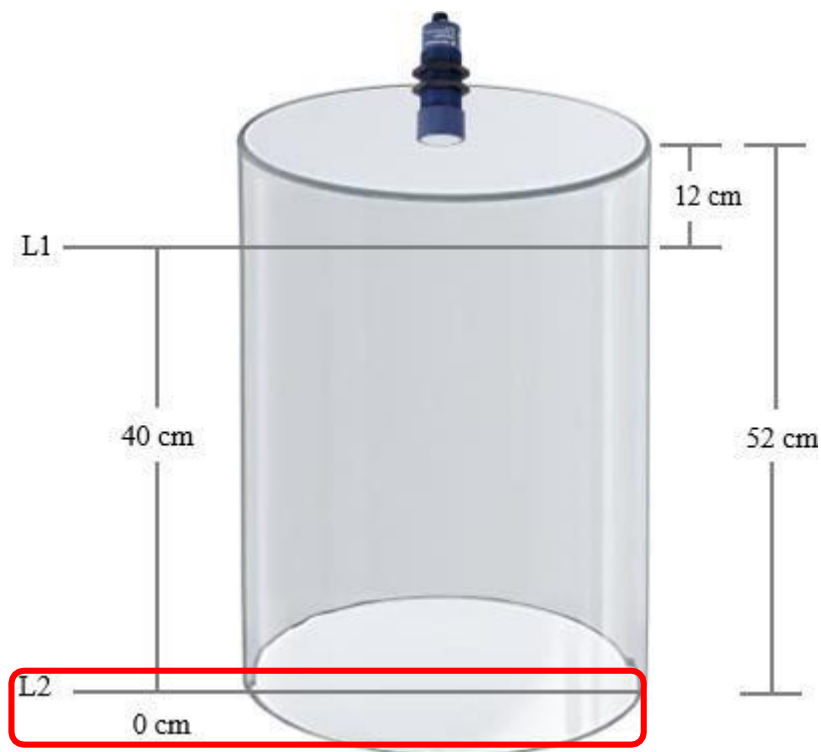
Configuración del Nivel Máximo en L1



Fuente: Elaboración propia

Asimismo, el transmisor de nivel entregará una señal de salida mínima (4 mA) cuando el objeto a detectar se encuentre lejos de él, es decir, en la posición L2, tal como se muestra en la Fig.

48.

Figura 48*Configuración del Nivel Mínimo en L2**Fuente: Elaboración propia*

Con estas consideraciones en la calibración del transmisor obtendremos una señal de 4 mA para una medida de 0 cm y 20 mA para una medida de 40 cm. En términos de porcentaje 0 cm representa el 0% y 40 cm al 100% de la altura total de trabajo. La relación que se ha obtenido a través de la ecuación de la recta es la siguiente:

$$NIVEL_{PORCENTAJE} = 2,5 * NIVEL_{CENTIMETROS}$$

Tabla 17*Valores de Nivel en Porcentaje y Centímetros*

Nivel (%)	Nivel (cm)
10	4
20	8
30	12
40	16
50	20
60	24
70	28
80	32
90	36
100	40

Fuente: Elaboración propia

Para simular la señal de densidad de sólidos se ha utilizado un generador de señales de 4 a 20 mA que nos permitirá representar el rango de 0 a 100% de densidad. La relación que se ha obtenido a través de la ecuación de la recta es la siguiente:

$$DENSIDAD_{PORCENTAJE} = 6,25 * Corriente_{mA} - 25$$

Tabla 18*Valores de Densidad en Porcentaje y Corriente del Generador*

Densidad (%)	Corriente (mA)
10	5.6
20	7.2
30	8.8
40	10.4
50	12
60	13.6
70	15.2
80	16.8
90	18.4
100	20

Fuente: Elaboración propia

Con estas consideraciones en las señales de nivel de cama de lodo (LIT-2002) y densidad de sólidos (DIT-0879), se procedió a crear y configurar las entradas analógicas en el PLC.

Figura 49

Creación de Entradas Analógicas

Utiliz...	Dirección	Símbolo	Tipo	Ámbito	Míni...	Máximo
<input checked="" type="checkbox"/>	%IW1.0	LIT_2002	4 - 20 mA	Normal	0	4200
<input checked="" type="checkbox"/>	%IW1.1	DIT_0879	4 - 20 mA	Normal	0	10000

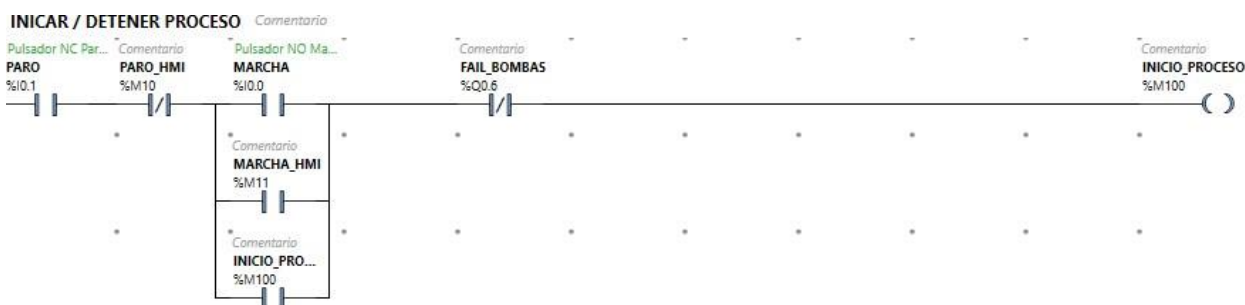
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe brevemente la lógica de control.

Para iniciar el proceso debemos accionar el pulsador de marcha del tablero de control o el pulsador de marcha virtual del HMI. El proceso se puede detener en cualquier momento accionando el pulsador de parada del tablero eléctrico o el pulsador de parada virtual del HMI o cuando se produzca una falla por sobrecarga en las bombas de descarga.

Figura 50

Programación Ladder - Iniciar / Detener Proceso / Falla por Sobrecarga



Fuente: Elaboración propia

Figura 51

Diagrama de Flujo - Iniciar Proceso



Fuente: Elaboración propia

Figura 52

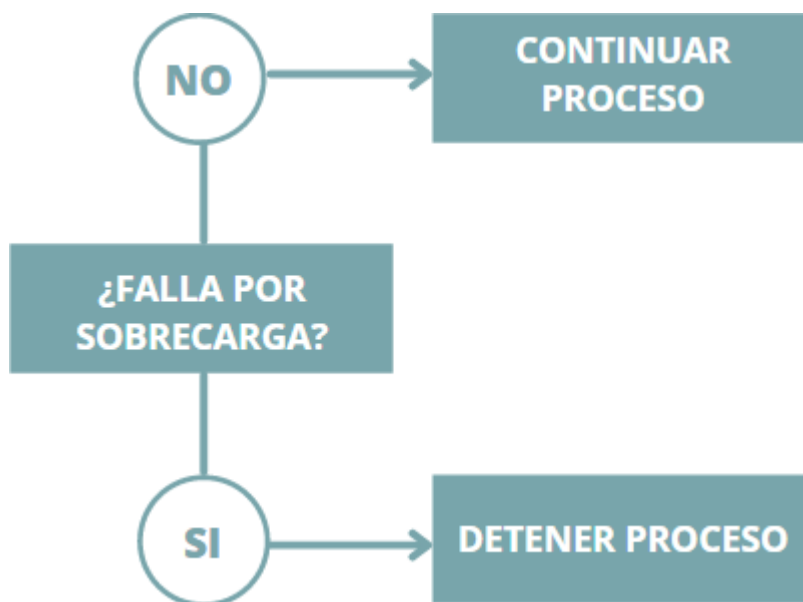
Diagrama de Flujo - Detener Proceso



Fuente: Elaboración propia

Figura 53

Diagrama de Flujo - Falla por Sobrecarga



Fuente: Elaboración propia

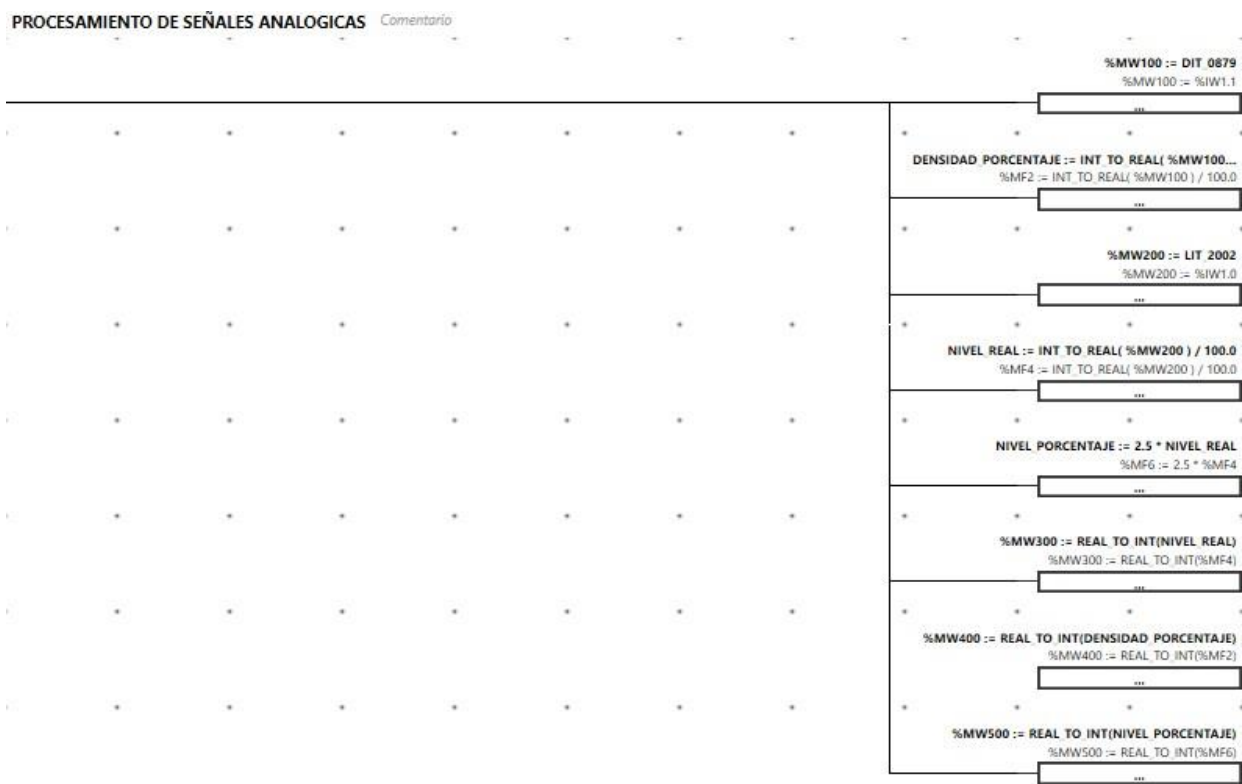
Si se ha iniciado el proceso, el PLC podrá recibir las señales de nivel de cama de lodos y densidad de sólidos. En la Fig. 51 se observa que ambas medidas obtenidas por el PLC se almacenan en palabras de memoria (%MW), luego se convierten de INT a REAL (%MF) y se han dividido entre 100 para obtener el valor real de ambas señales. La señal de nivel se procesa para expresar su valor en porcentaje, de acuerdo a la siguiente relación:

$$NIVEL_{PORCENTAJE} = 2,5 * NIVEL_{CENTIMETROS}$$

Finalmente, ambas medidas expresadas en porcentaje se convierten de INT a REAL para su visualización en el panel HMI.

Figura 54

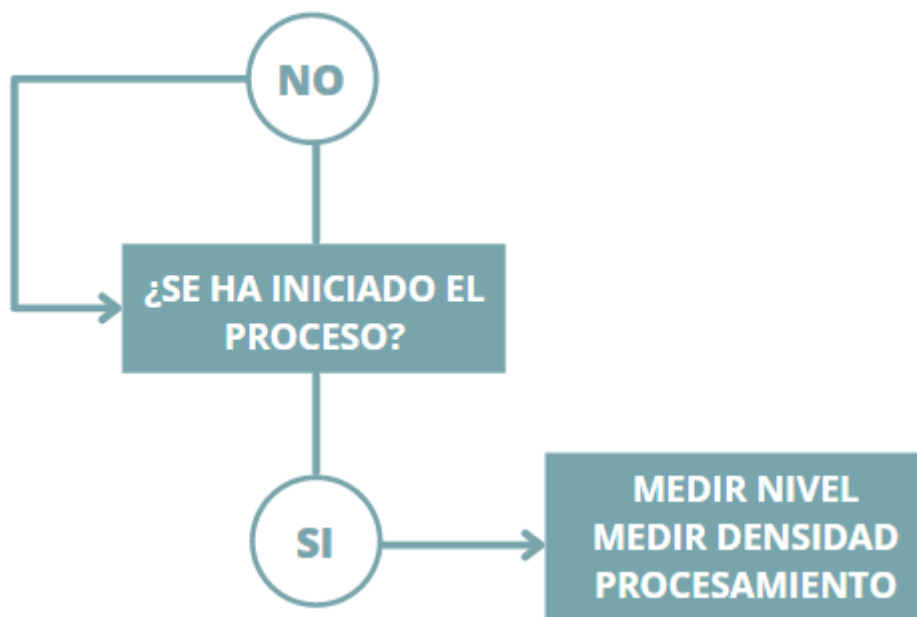
Programación Ladder - Procesamiento de Señales Analógicas



Fuente: Elaboración propia

Figura 55

Diagrama de Flujo - Procesamiento de Señales Analógicas

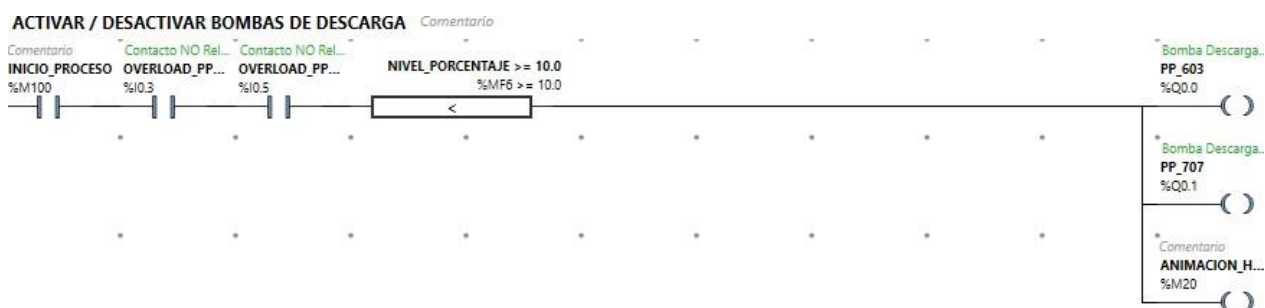


Fuente: Elaboración propia

Las bombas arrancarán si se cumplen las siguientes condiciones: se ha iniciado el proceso, no existe sobrecarga y el nivel mínimo de la cama de lodos es mayor o igual a 10%. Si existe sobrecarga el sistema irá a falla, y si el nivel es menor al mínimo las bombas no arrancarán.

Figura 56

Programación Ladder - Activar / Desactivar Bombas de Descarga



Fuente: Elaboración propia

Figura 57

Diagrama de Flujo - Activar / Desactivar Bombas de Descarga



Fuente: Elaboración propia

Las válvulas de descarga se abrirán cuando el proceso se ha iniciado para llenar las tuberías hasta la toma de succión de las bombas de descarga. Asimismo, deberán cerrarse cuando se produzca una falla en el sistema.

Figura 58

Programación Ladder - Activar / Desactivar Válvulas de Descarga



Fuente: Elaboración propia

Figura 59

Diagrama de Flujo - Activar / Desactivar Válvulas de Descarga

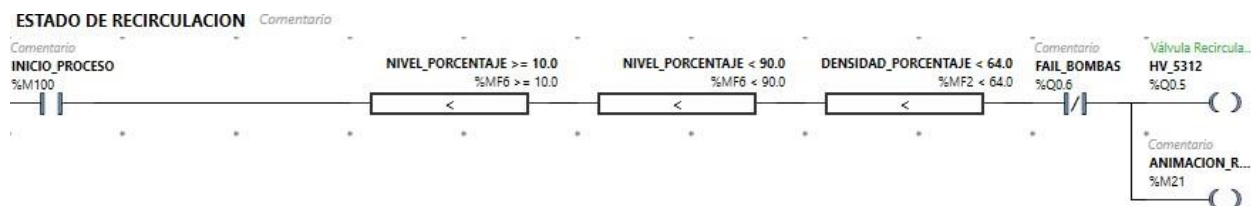


Fuente: Elaboración propia

El underflow estará recirculando mientras se cumplan las siguientes condiciones: el nivel de la cama de lodos debe ser mayor o igual al 10% y menor al 90%, mientras que la densidad de sólidos debe ser menor a 64%. De lo contrario, pasará al estado de disposición final de lodos. Cuando exista falla por sobrecarga la válvula deberá cerrarse.

Figura 60

Programación Ladder - Estado de Recirculación



Fuente: Elaboración propia

Figura 61

Diagrama de Flujo - Estado de Recirculación

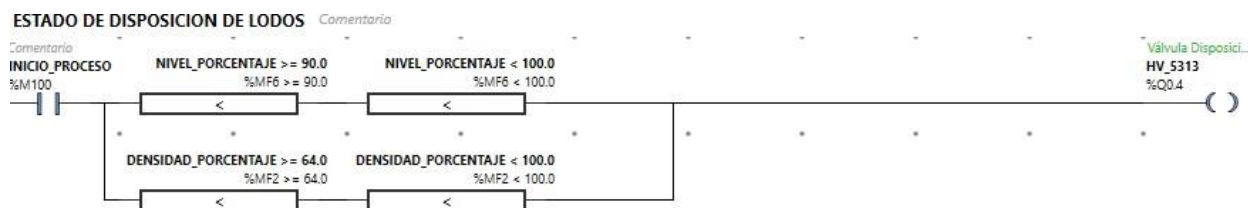


Fuente: Elaboración propia

El underflow será almacenado cuando se cumplan las siguientes condiciones: el nivel de la cama de lodos debe ser mayor o igual al 90% o la densidad de sólidos debe ser mayor o igual a 64%. De lo contrario, retornará al estado de recirculación.

Figura 62

Programación Ladder - Estado de Disposición de Lodos



Fuente: Elaboración propia

Figura 63

Diagrama de Flujo - Estado de Disposición de Lodos

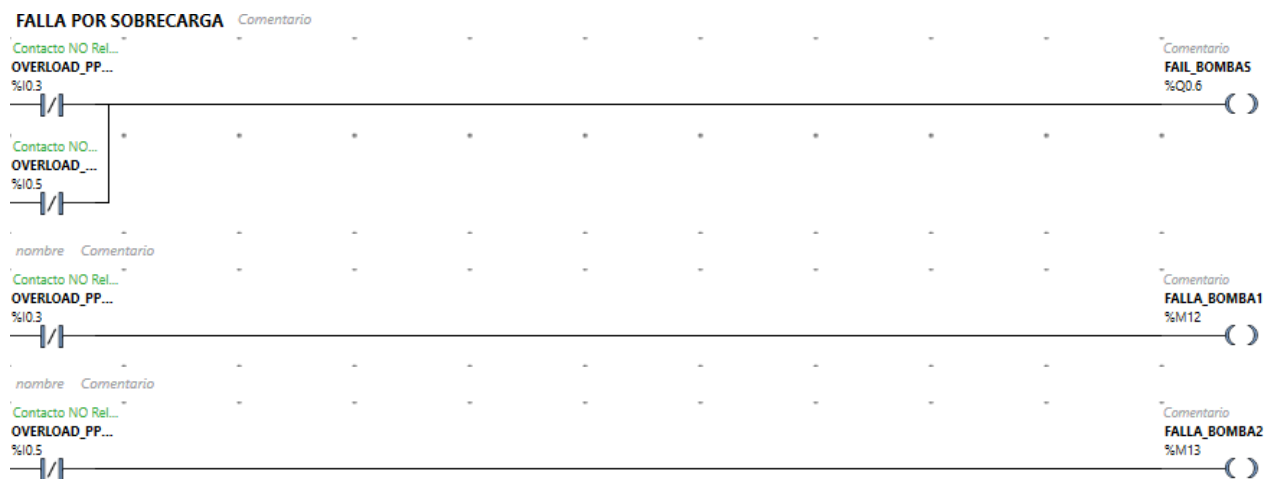


Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó antes, cuando exista sobrecarga en las bombas se activará una alarma luminosa en el tablero eléctrico y en el HMI se podrá verificar cuál de las bombas está en falla.

Figura 64

Programación Ladder - Falla por Sobrecarga



Fuente: Elaboración propia

Figura 65

Diagrama de Flujo - Falla por Sobrecarga



Fuente: Elaboración propia

Para estar seguros de que las bombas han arrancado correctamente, los contactos auxiliares normalmente abiertos de los contactores se han conectado como entradas digitales al PLC. De esta manera, cuando los contactos conmuten y se reciba señal en el PLC podremos confirmar que las bombas están funcionando.

Figura 66

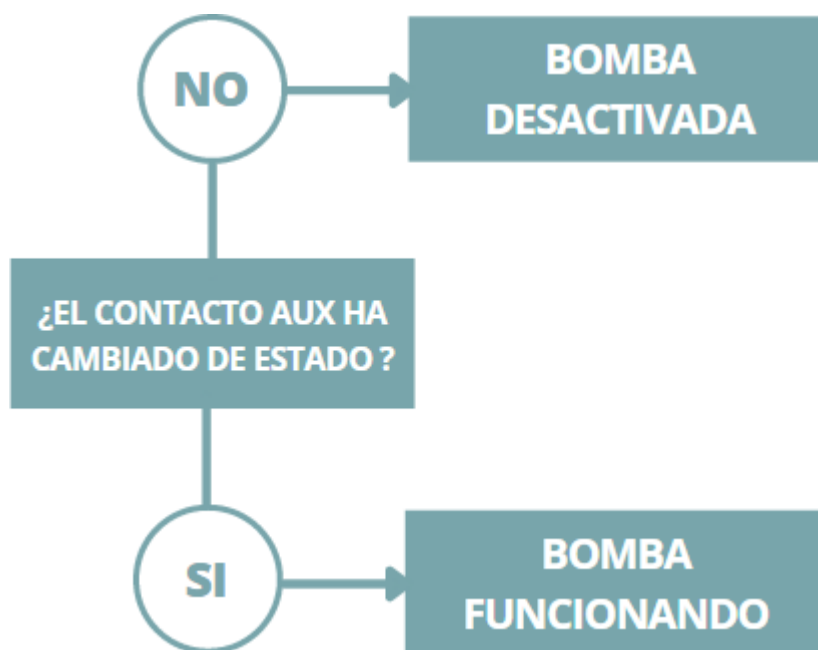
Programación Ladder - Confirmación de Marcha



Fuente: Elaboración propia

Figura 67

Diagrama de Flujo - Confirmación de Marcha



Fuente: Elaboración propia

Para el diseño de la interfaz gráfica se utilizó el software Vijeo Designer v6.2 de Schneider Electric. La interfaz gráfica cuenta con dos pantallas principales y cinco pantallas emergentes.

La pantalla principal muestra el título del proyecto y de los investigadores, cuenta con un botón virtual (recuadro rojo) que nos llevará hacia la pantalla de proceso.

Figura 68

Pantalla Principal de HMI

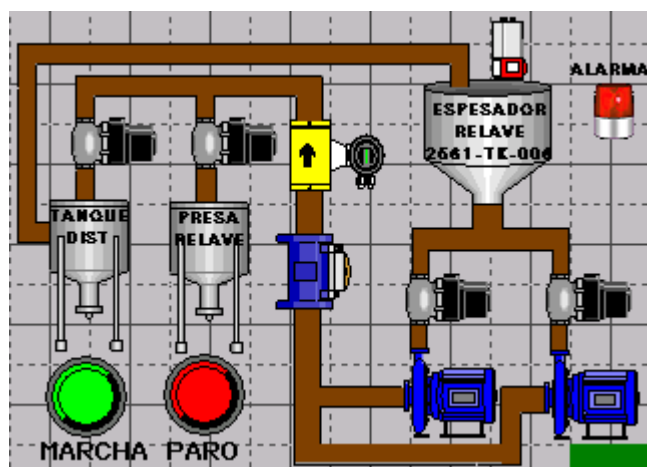


Fuente: Elaboración propia

En la pantalla de proceso podemos observar el tanque espesador de relaves (ESPESADOR RELAVES 2561-TK-006), el tanque distribuidor DI-001, la presa de relaves, la instrumentación de campo compuesta por los transmisores de nivel y densidad, cuatro válvulas de control (dos de descarga, una de recirculación y una de disposición final de lodos), las dos bombas de descarga, un piloto luminoso virtual para el aviso de fallas y tres botones virtuales: marcha, parada y uno que permite retornar a la pantalla principal.

Figura 69

Pantalla Proceso de HMI



Fuente: Elaboración propia

Al presionar el transmisor de nivel (recuadro rojo), aparecerá un panel emergente mostrando la medida de nivel de cama de lodos en dos unidades: centímetros (cm) y porcentaje (%).

Figura 70

Pantalla Emergente de Nivel



Fuente: Elaboración propia

Al presionar el transmisor de densidad (recuadro rojo), aparecerá un panel emergente mostrando la medida de densidad de sólidos en porcentaje (%).

Figura 71

Pantalla Emergente de Densidad

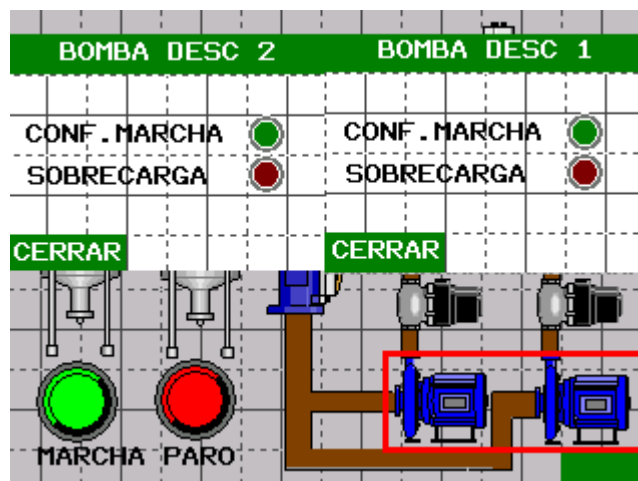


Fuente: Elaboración propia

Al presionar cualquiera de las bombas de descarga (recuadro rojo), aparecerá un panel emergente mostrando si la bomba a arrancado correctamente o si existen sobrecarga.

Figura 72

Pantalla Emergente de Estado de Bombas



Fuente: Elaboración propia

Si existe sobrecarga, el piloto luminoso virtual (recuadro rojo) se encenderá, si presionamos sobre él nos mostrará un panel emergente indicando cuál de las dos bombas presenta sobrecarga.

Figura 73

Pantalla Emergente de Falla de Bombas



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Introducción

Una limitación para las pruebas del prototipo es que se han realizado con agua. Cuando el agua ingresaba con fuerza al tanque de prueba generaba lecturas con muchas oscilaciones. En el proceso real el relave es una mezcla de desecho de concentrado de cobre procedente del área de flotación, floculantes y agua de proceso, esto incrementa su masa total y por ende lo hace más denso y propenso de decantar con facilidad por efecto de la gravedad y los reactivos logrando que la medida de nivel de cama de lodo no presente muchas variaciones.

Figura 74

Relaves



Fuente: <https://www.horizonteminero.com/gestion-presas-relaves/>

Respecto a las bombas de descarga, el proceso real utiliza bombas de desplazamiento positivo especiales para sólidos húmedos y con alta presión de descarga. En nuestra investigación hemos utilizado bombas periféricas por tratarse de agua.

Para la generación de energía trifásica se ha utilizado un variador de frecuencia con entrada monofásica a 220 VAC y salida trifásica a 220 VAC porque no se contaba con red de energía trifásica para controlar las dos bombas de descarga. Esta solución nos permitió regular la velocidad de las bombas para evitar los problemas que pueden surgir en las tuberías por una elevada presión del agua.

4.2. Resultados de las Pruebas de Funcionamiento

Iniciamos el sistema de control automático con la pantalla de presentación. Luego se presiona sobre el botón virtual (recuadro rojo) para ingresar a la pantalla de proceso.

Figura 75

Pantalla Principal en HMI



Fuente: Elaboración propia

En la pantalla de proceso podemos iniciar el sistema a través del botón virtual de marcha (recuadro rojo).

Figura 76

Pantalla de Proceso en HMI



Fuente: Elaboración propia

Al presionar el botón virtual de marcha se activarán las válvulas de descarga. En el proceso real esta acción permite que el lodo fluya hasta las tomas de succión de cada bomba de descarga. En la Fig. 77 los pilotos luminosos del tablero de control indican que las válvulas de descarga se han activado (recuadro rojo).

Figura 77

Válvulas de Descarga Activadas en HMI

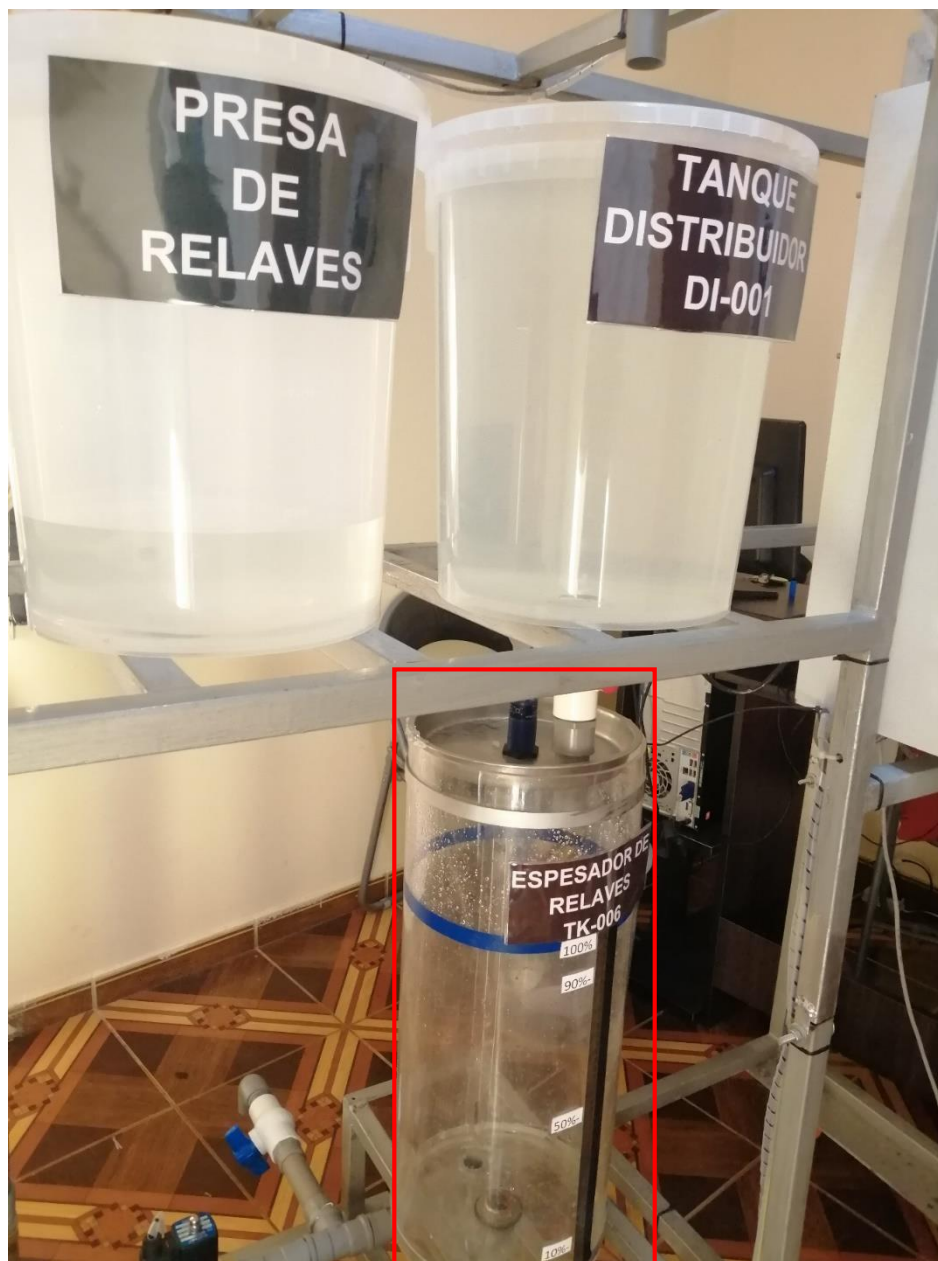


Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 78 podemos observar que el tanque espesador de prueba está completamente vacío. En el proceso real el tanque distribuidor recibe la pulpa o cola del área de flotación, floculante para acelerar la decantación y agua de proceso. Luego lo traslada al tanque espesador.

Figura 78

Tanque Espesador de Prueba Vacío



Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 79 podemos observar que el nivel leído por el sistema de control es presentado en unidades porcentaje y centímetros. El valor indicado para el tanque vacío es 0 cm o 0 % (recuadro rojo).

Figura 79

Medida de Nivel en Tanque Espesador de Prueba Vacío



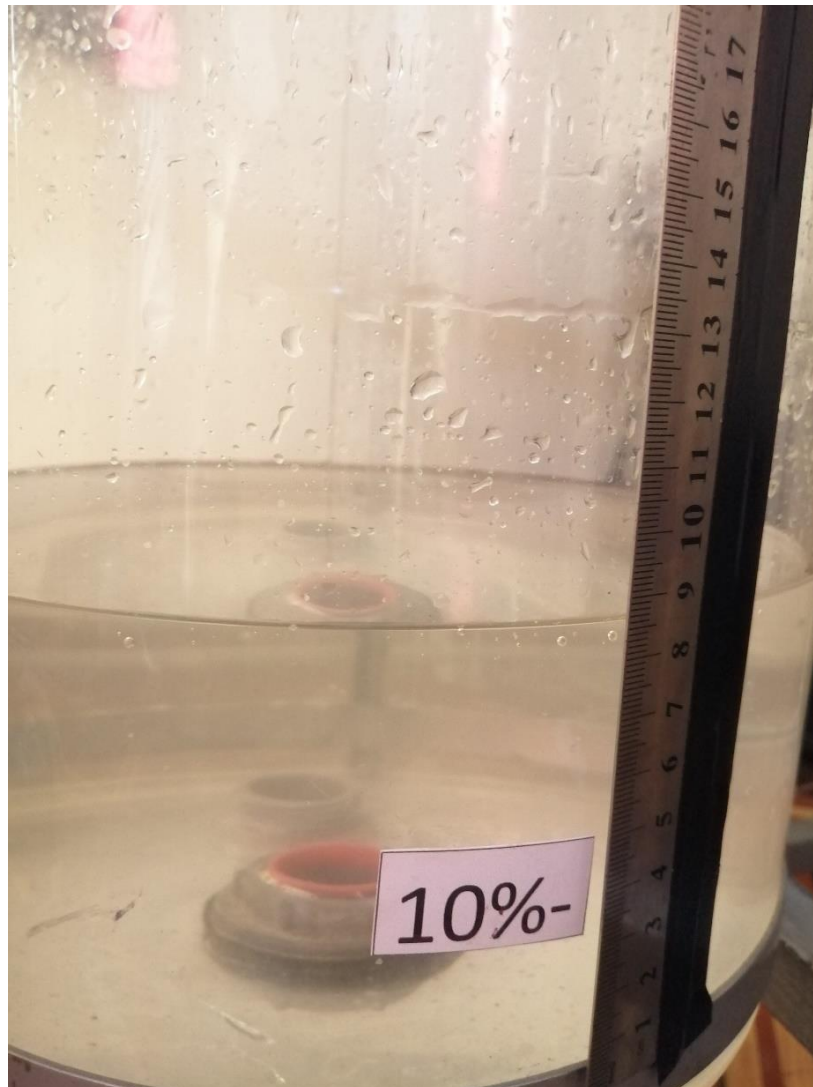
Fuente: Elaboración propia

Las bombas de descarga no entrarán en funcionamiento mientras no se supere el nivel mínimo de 10% o 4 cm. Para lograrlo se abre al 100% la válvula del tanque distribuidor para simular la alimentación al tanque espesador de prueba.

En la Fig. 80 podemos observar que se ha superado el nivel mínimo. La regleta de medida indica un nivel 8,7 cm lo cual representa el 21,75% de la altura total de prueba.

Figura 80

Medida de Nivel en Tanque Espesador Superando el Nivel Mínimo



Fuente: Elaboración propia

Bajo estas condiciones, las bombas de descarga se activan y la válvula de recirculación de lodos también. Este estado se mantendrá mientras que el nivel no sea mayor o igual a 90% de la altura de prueba.

Figura 81

Bombas de Descarga, Válvula de Descarga y Válvula de Recirculación Activadas



Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 82 observamos que la válvula de recirculación regresa el líquido al tanque espesador de prueba simulando el regreso de lodos del proceso real para la extracción de agua.

Figura 82

Válvula de Recirculación Activada



Fuente: Elaboración propia

Para estas condiciones, el sistema de control nos indica que la medida de nivel es de 9 cm o 22% de la altura total de prueba.

Figura 83

Medida de Nivel al 22% de Tanque Espesador en HMI

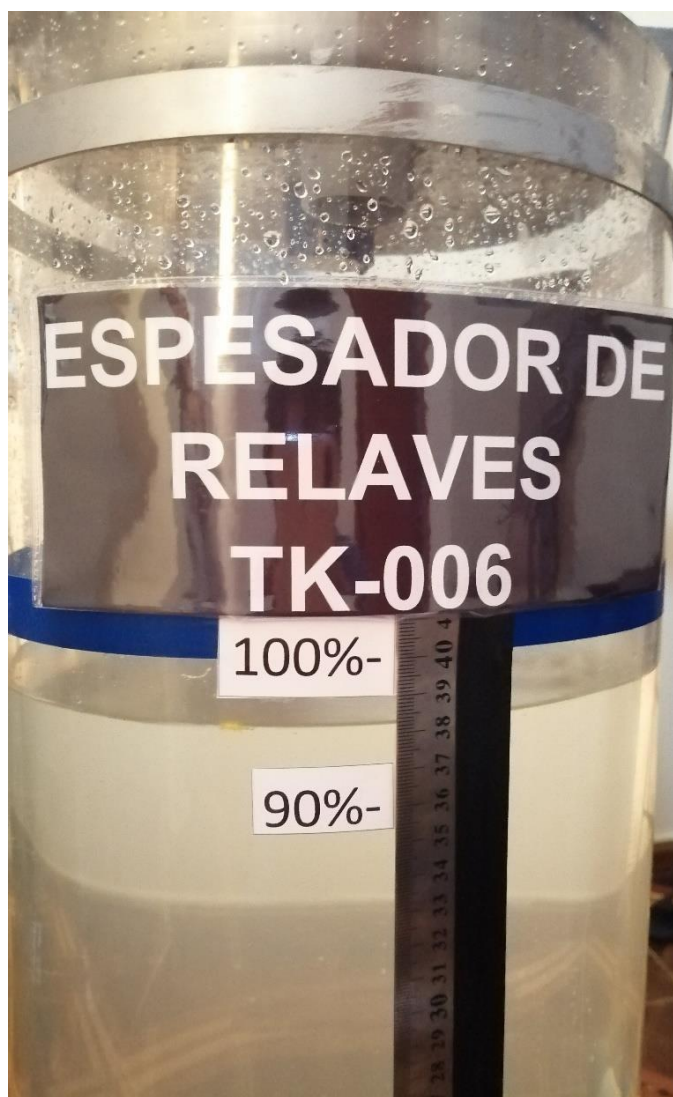


Fuente: Elaboración propia

Luego se realizó una prueba para superar el nivel máximo. En la Fig. 84 la regleta de medida indica que el nivel es de 38,3 cm o 95,75% de la altura total de prueba.

Figura 84

Medida de Nivel en Tanque Espesador Superando el Nivel Máximo



Fuente: Elaboración propia

En esta situación, la válvula de recirculación de lodos se desactiva mientras que la válvula de disposición final de lodos se activa. En el proceso real este estado se mantiene hasta que el nivel de la cama de lodo disminuya paulatinamente por acción de los floculantes y la gravedad. Para volver al estado de recirculación la medida de nivel debe ser menor a 90% de la altura total de prueba.

Para estas condiciones, el sistema de control nos indica que la medida de nivel es de 38 cm o 94% de la altura total de prueba.

Figura 85

Medida de Nivel al 94% de Tanque Espesador en HMI

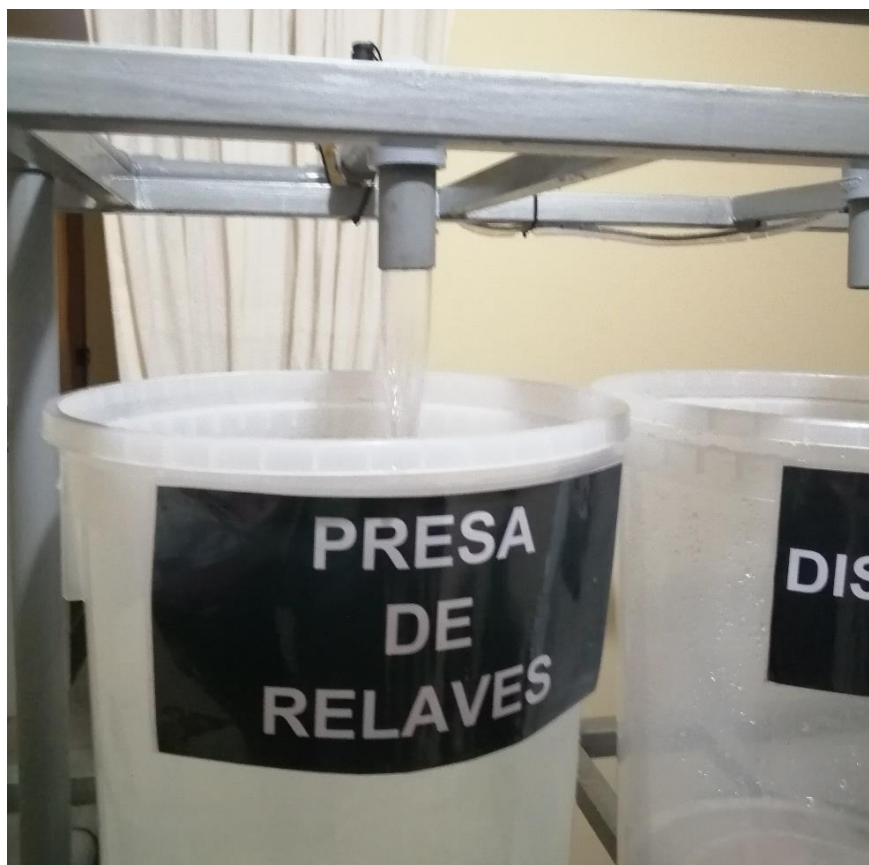


Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 86 observamos que la válvula de disposición final de lodos dirige el líquido al tanque denominado presa de relaves simulando el almacenamiento de lodos del proceso real.

Figura 86

Válvula de Disposición Final de Lodos Activada



Fuente: Elaboración propia

Para las pruebas de descarga con base en la medida de densidad de sólidos, se llenó el tanque espesador de prueba hasta el 50% de altura total aproximadamente. De acuerdo al cálculo teórico el generador de señales debía ajustarse 8,8 mA aprox. para obtener un valor simulado de 30% de densidad sólidos utilizando la siguiente relación:

$$DENSIDAD_{PORCENTAJE} = 6,25 * Corriente_{mA} - 25$$

$$Corriente_{mA} = \frac{30 + 25}{6,25} = 8,8$$

Figura 87

Ajuste de Corriente en la Práctica para Simular Densidad al 30%



Fuente: Elaboración propia

Figura 88

Medida de Densidad al 30% en HMI

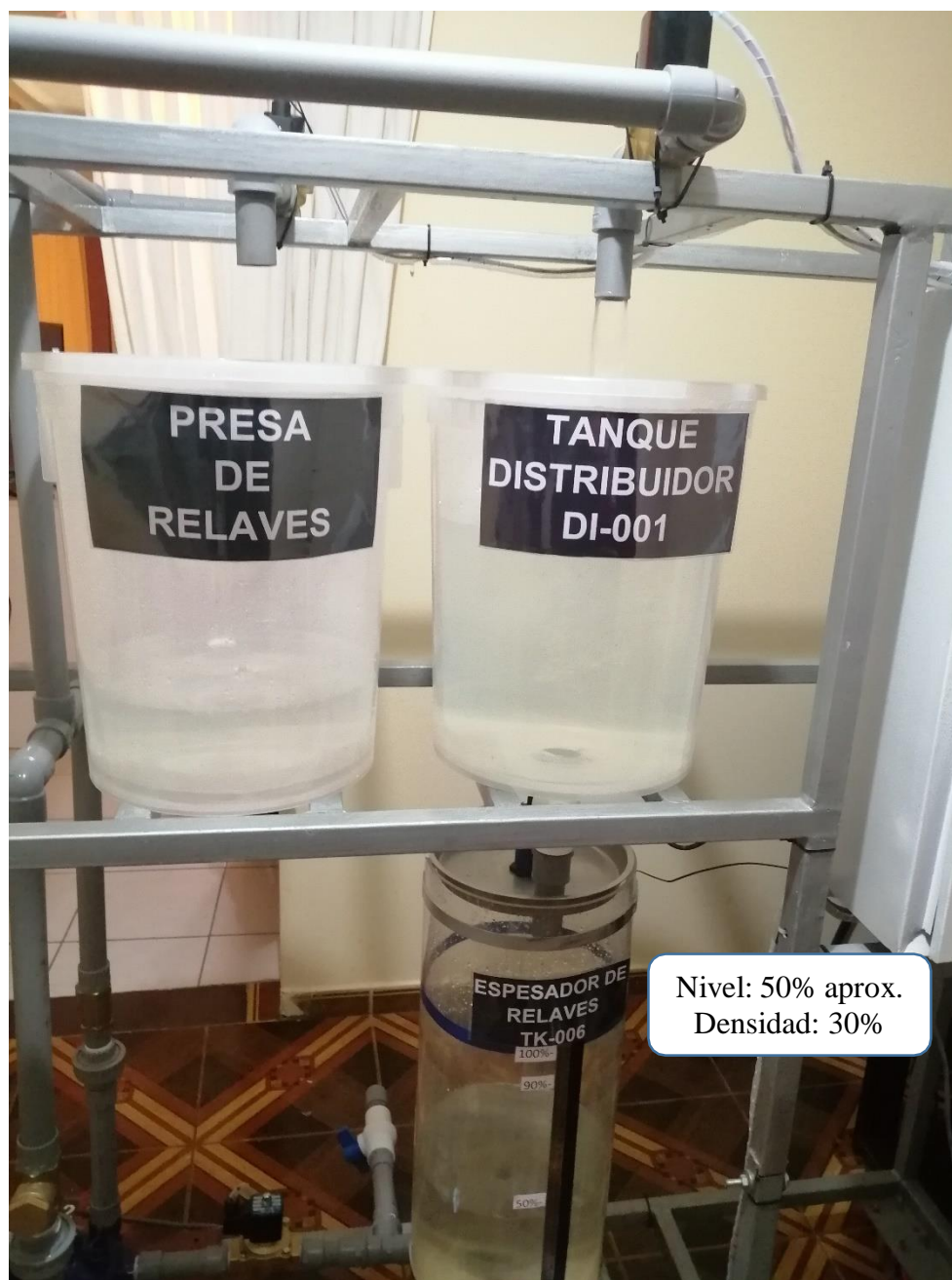


Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 89 observamos que bajo estas condiciones la válvula de recirculación regresa el líquido al tanque espesador de prueba simulando el regreso de lodos del proceso real para la extracción de agua.

Figura 89

Válvula de Recirculación Activada



Fuente: Elaboración propia

Para simular el cambio del estado de recirculación por el de disposición final de lodos, el cálculo teórico señala que el generador de señales debía ajustarse a 14,24 mA aprox. para obtener un valor simulado de 64% de densidad de sólidos utilizando la siguiente relación:

$$DENSIDAD_{PORCENTAJE} = 6,25 * Corriente_{mA} - 25$$

$$Corriente_{mA} = \frac{64 + 25}{6,25} = 14,24$$

Figura 90

Ajuste de Corriente en la Práctica para Simular Densidad al 64%



Fuente: Elaboración propia

Figura 91

Medida de Densidad al 64% en HMI



Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 92 observamos que la válvula de disposición final de lodos dirige el líquido al tanque denominado presa de relaves simulando el almacenamiento de lodos del proceso real.

Figura 92*Válvula de Disposición Final de Lodos Activada*

Fuente: Elaboración propia

Para el control y gestión de fallas de las bombas se tuvieron en cuenta las señales de confirmación de marcha y de sobrecarga obtenidas del contacto auxiliar NA del contactor y del contacto auxiliar NA del guardamotor respectivamente.

En la Fig. 93 podemos observar que el piloto luminoso virtual de color verde está activado indicando que la bomba de descarga de la línea 1 está funcionando. Para la bomba de descarga de la línea 2 el funcionamiento es el mismo.

Figura 93

Confirmación de Marcha Bomba de Descarga Línea1



Fuente: Elaboración propia

Para simular una sobrecarga se forzó el guardamotor. De esta manera se detienen las bombas de descarga y se desactiva la señal de confirmación de marcha, además se activa un piloto luminoso de color rojo en el tablero de control y en el HMI se activa una alarma virtual.

Figura 94

Alarma Visual de Falla de Bombas en Tablero de Control



Fuente: Elaboración propia

Para identificar en que bomba de descarga se ha producido la sobrecarga, presionamos sobre la alarma virtual del HMI para desplegar un panel emergente donde se identifica la bomba con falla, para esta prueba se simuló la sobrecarga en la bomba de descarga de la línea 1.

Figura 95

Alarma Visual de Falla de Bombas en HMI



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se logró diseñar e implementar un sistema de control automático aplicado a un prototipo donde se simularon las variaciones del nivel de cama de lodo y la densidad de sólidos con el objetivo de controlar la descarga de underflow de un espesador de relaves para evitar el derrame de lodos a la superficie y la acumulación de sólidos en el cono de descarga.

Cuando se abrió al 100% la llave de ingreso de líquido hacia el tanque espesador de prueba simulando la alimentación de relaves desde el tanque distribuidor, se superó el nivel mínimo obteniendo una medida del 21,75%, la regleta indicaba que la medida real de nivel era de 8,7 cm, mientras que el sistema de control nos indicaba que la medida de nivel era de 9 cm o 22% de la altura total de prueba. Esto nos genera un error porcentual entre la medida real y el sistema de control de: $21,75\% - 22\% = -0,25\%$. Sin embargo, se cumplió con el objetivo de que las bombas de descarga no arranquen mientras no se supere el nivel mínimo de 10% o 4 cm y se mantenga el estado de recirculación.

En el proceso real es importante evitar el derrame de lodos a la superficie por un tema ambiental, para evitar esta situación es que se establece un nivel máximo que no debe superarse, para este caso es el 90%. Cuando se simuló esta situación se superó el nivel máximo obteniendo una medida del 95,75%, la regleta indicaba que la medida real de nivel era de 38,3 cm, mientras que el sistema de control nos indicaba que la medida de nivel era de 38 cm o 94% de la altura total de prueba. Esto nos genera un error porcentual entre la medida real y el sistema de control de: $95,75\% - 94\% = 1,75\%$. Sin embargo, se cumplió con el objetivo de cambiar el estado de recirculación por el estado de disposición final de lodos.

En el proceso real la medida de densidad de sólidos de los relaves que ingresan al tanque espesador es de 30%. El cálculo teórico nos indicaba que para obtener una medida simulada de densidad de sólidos al 30% se debía ajustar el generador de señales a 8,8 mA. En la práctica se ajustó a 8,81 mA aproximadamente obteniendo una diferencia de 0,01 mA. Esto nos genera un error porcentual entre el valor práctico y el valor teórico de: $30,0625\% - 30\% = 0,0625\%$. Sin embargo, se cumplió con el objetivo de mantener el estado de recirculación mientras que la densidad de sólidos no supere el valor máximo de 64%.

Para obtener una medida simulada de densidad de sólidos al 64% se debía ajustar el generador de señales a 14,24 mA, de acuerdo al cálculo teórico. En la práctica se ajustó a 14,22 mA aproximadamente obteniendo una diferencia de -0,02 mA. Esto nos genera un error porcentual entre el valor práctico y el valor teórico de: $63,875\% - 64\% = -0,125\%$. Sin embargo, se cumplió con el objetivo de cambiar el estado de recirculación por el estado de disposición final de lodos.

5.2. Recomendaciones

Las pruebas de descarga con base en las variaciones del nivel de cama de lodos se iniciaron con el tanque espesador de prueba vacío y se le ingresó agua desde el tanque distribuidor ubicado en la parte superior. Sin embargo, se producían oscilaciones por encima y por debajo del nivel mínimo establecido (10%) generando que las bombas de descarga se encienden y apagan hasta que se lograba la estabilización. Para trabajos futuros se recomienda utilizar un arrancador que disminuya o elimine los picos de corriente que se producen por la conmutación de las bombas de descarga.

Si se opta por trabajar con material más denso como el lodo húmedo, se recomienda dimensionar y seleccionar las bombas, válvulas y tuberías adecuadas para este material. Además, se debe tener en cuenta la instalación de un sistema de limpieza de las tuberías que puede ser por inyección de agua a presión.

Se recomienda integrar un transmisor de flujo al prototipo en la unión de las líneas de descarga para obtener el flujo total de underflow.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, P. (2002). *Programación de PLC'S*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México.
- Aldakin. (2018). *Aplicaciones de los PLC en la Industria Moderna*. Obtenido de <http://www.aldakin.com/aplicaciones-plc-industria-moderna/>
- Álvarez, M. (2017). *Sostenibilidad de Tratamiento de Residuos Mineros Asociada al Riesgo*. Universidad de Oviedo, Oviedo, Asturias, España.
- Automática e Instrumentación. (19 de Diciembre de 2019). *Presente y tendencias de futuro de los Sistemas de Control Distribuido (DCS)*. Obtenido de <http://www.automaticaeinstrumentacion.com/es/notices/2019/12/informe-sobre-los-sistemas-de-control-distribuido-dcs-46027.php#.X2P5QrHPy00>
- Bancayán, P. (2019). *AUTOMATIZACIÓN DE UNA PLANTA DE FILTRADO DE RELAVES MINEROS*. Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú.
- Blog Autómatas. (10 de Febrero de 2014). *10 aspectos para elegir un autómata PLC*. Obtenido de <https://www.infopl.net/blogs-automatizacion/item/101501-10-aspectos-para-elegir-automata-plc>
- Copa Data. (2019). *¿Qué es SCADA?* Obtenido de <https://www.copadata.com/es/productos/zenon-software-platform/visualizacion-control/que-es-scada/>
- Dodane, P.-H., & Bassan, M. (2015). *Tanques de Sedimentación y Espesamiento*. Obtenido de https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/FS_M_Libro_low_res/manejo_fsm_cap6_120ppi.pdf

- Editorial Control. (2017). *Tecnología DCS: Ahora convertida en una solución de automatización escalable*. Obtenido de <http://www.edcontrol.com/index.php/instrumentacion/instrumentacion-190/item/143-tecnologia-dcs-ahora-convertida-en-una-solucion-de-automatizacion-escalable>
- Eral Chile. (2017). *CLARIFICADORES / ESPESADORES*. Obtenido de <http://eralchile.com/equipos/clarificadores-espesadores.php>
- Espinoza, E. (2009). *DISEÑO DE UN ESPESADOR PARA CONCENTRADO DE COBRE DE 1,78 Tn/h*. Universidad del Centro del Perú, Huancayo, Junín, Perú.
- Gallas, E. (7 de Febrero de 2015). *Fundamentos teóricos de sedimentación*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/Gallas190987/4-fundamentos-teoricos-de-sedimentacin>
- Ibañez, S. (2016). *Diseño de un Sistema de Control y Supervisión para la Operación Automática para la Nueva Planta de Relleno en Pasta de Compañía Mibera Cuzclatán*. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- Industria 4.0. (2016). *PLC o DCS, ¿qué necesito?* Obtenido de <http://industria-4.blogspot.com/2015/06/plc-o-dcls-que-necesito.html>
- Knight Piésold Consulting. (Noviembre de 2009). *Minera Chinalco Perú S.A. Proyecto Toromocho Estudio de Impacto Ambiental*. Obtenido de <https://www.chinalco.com.pe/sites/default/files/Resumen%20ejecutivo%20del%20estudio%20de%20impacto.pdf>
- Logicbus. (17 de Junio de 2019). *Protocolos de comunicación industriales*. Obtenido de <https://www.logicbus.com.mx/blog/protocolos-de-comunicacion-industriales/>
- López, O. (2011). *Diseño de un Sistema de Control Distribuido*. Universidad Rovira i Virgili, Tarragona, Cataluña, España.

- Lorenzo, G. (2012). *Automatización de una planta industrial*. Universidad de Alicante, San Vicente del Raspeig, Alicante, España.
- McLanahan. (2019). *Espesadores*. Obtenido de <https://www.mclanahan.com/es/productos/espesadores>
- Minera Chinalco Perú . (2009). *Producción y Beneficios*. Obtenido de <https://www.chinalco.com.pe/es/producción-y-beneficios>
- Omega. (2018). *Sensor de nivel ¿Qué es un sensor de nivel?* Obtenido de <https://es.omega.com/prodinfo/sondas-de-nivel-medicion.html>
- Opertek. (2019). *¿Qué es un SCADA y cómo funciona?* Obtenido de <https://www.opertek.com/blog/que-es-scada-y-como-funciona/>
- Palli, R. (2016). *DIMENSIONAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE UN SEDIMENTADOR CONVENCIONAL DE RELAVES DE COBRE EN UNA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE 850 TMD*. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Prado, S. (2016). *Optimizando la recuperación de agua desde relaves*. Revista Minería Chilena, Chile.
- Procoen. (2019). *Medidor de nivel, principio de funcionamiento y aplicaciones*. Obtenido de <https://procoen.com/medidor-de-nivel/>
- Quinde, B. (2021). *Shouxin desiste de que Senace evalúe su primer ITS en proyecto de relaves*. Tiempo Minero, Ica, Perú.
- Riaño, D. (2010). *ESTUDIO SOBRE INTEGRACIÓN DE REDES DE INSTRUMENTACIÓN DIGITALES EN SISTEMAS DE CONTROL PARA EL MEJORAMIENTO DE PROCESOS INDUSTRIALES*. Universidad EAN, Bogotá, Colombia.

- Rodríguez, Á., Butragueño, J., & Grima, C. (2013). *Evolución de los equipos de decantación para estériles de mina: Del espesador convencional al de cono profundo para la producción de pasta*. Obtenido de http://oa.upm.es/29987/1/INVE_MEM_2013_165763.pdf
- Santos, D. (2019). *OPTIMIZACION PARA LA RECUPERACION DE AGUA A PARTIR DE LOS RELAVES DE HIERRO Y COBRE MEDIANTE EL USO DE ESPESADORES EN LA EMPRESA MINERA SHOUXIN - 2018*. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.
- Santos, G. (2019). *OPTIMIZACION PARA LA RECUPERACION DE AGUA APARTIR DE LOS RELAVES DE HIERRO Y COBRE MEDIANTE EL USO DE ESPESADORES EN LA EMPRESA MINERA SHOUXIN*. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Lima.
- Schneider Electric. (2019). *Las redes industriales amplían las funciones de los PLC*. Obtenido de <https://www.se.com/es/es/about-us/press/press-release/2019/industrial-networking-expands-plc-functionality.jsp>
- Sothis. (2018). *SCADA. ¿Qué es y qué permite hacer?* Obtenido de <https://www.sothis.tech/scada-que-es-y-que-permite-hacer/>
- Tovar, J. (2018). *EL AGUA SUBTERRANEA EN EL MEDIO AMBIENTE MINERO Y SU IMPORTANCIA EN LOS PLANES DE CIERRE*. Ministerio de Energía y Minas, Lima, Perú.
- Velásquez, J. (2015). *Tecnologías para la Automatización Industrial*. Universidad Ricardo Palma, Santiago de Surco, Lima, Perú.

ANEXOS





PRESUPUESTO PARA EL PROTOTIPO

Equipo	Cantidad	Unidad	Precio unitario (S/.)	Precio total (S/.)
HMI	1	und	2,000.00	2,000.00
PLC	1	und	871.00	871.00
Módulo AI	1	und	800.00	800.00
VFD	1	und	500.00	500.00
Contactores	2	und	40.00	80.00
Guardamotor	2	und	40.00	80.00
ITM trifásico	1	und	40.00	40.00
ITM monofásico	1	und	35.00	35.00
ITM unipolar	1	und	40.00	40.00
Fuente	1	und	600.00	600.00
Borneras	1	und	30.00	30.00
Canaletas	2	und	15.00	30.00
Cable	70	m	1.20	84.00
Tablero	1	und	100.00	100.00
Pulsadores	2	und	5.00	10.00
Pilotos	7	und	5.00	35.00
Parada de emergencia	1	und	15.00	15.00
Generador de señales	1	und	170.00	170.00
Patch Cord	1	und	10.00	10.00
Manguera Espiral	2	und	30.00	60.00
Baldes	2	und	37.00	74.00
Tanque Acrílico	1	und	300.00	300.00
Regla métrica	1	und	5.00	5.00
Válvulas ON/OFF	4	und	220.00	880.00
Válvulas Check	2	und	30.00	60.00
Tuberías y Accesorios	1	und	50.00	50.00
Válvulas Manuales	2	und	10.00	20.00
Bombas periféricas	2	und	300.00	600.00
Estructura	1	und	500.00	500.00
Enchufe monofásico	1	und	15.00	15.00
Cintillos	2	bolsas	8.00	16.00
Conectores	2	bolsas	7.00	14.00
Transmisor de Nivel	1	und	2,200.00	2,200.00
TOTAL				10,324.00

Ficha técnica del producto

Características

TM221CE16R

Controlador M221 c/ Ethernet 16 ES de tipo relé -
9 entradas digitales - 7 salidas relé



Principal

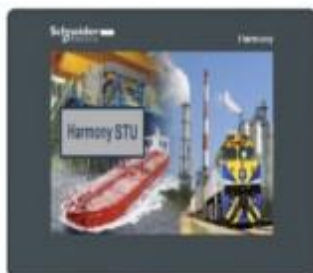
Gama de producto	Modicon M221
Tipo de producto o componente	Autómata programable
[Us] tensión de alimentación asignada	100...240 V AC
De pie conducto	9, entrada discreta acorde a IEC 61131-2 tipo 1
Número de entrada analógica	2 en 0...10 V
Tipo de salida digital	Relé normalmente abierto
Número de salidas discretas	7 relé
Tensión de salida	5...125 V CC 5...250 V CA
Montado en la pared del conducto	2 A

Ficha técnica del producto

Características

HMISTU855

Magelis STO - 5.7" QVGA - 320 x 240 - color - Ethernet



Principal

Gama de producto	Harmony STO & STU
Tipo de producto o componente	Pantalla táctil
Designación de software	Vjeo Designer
Sistema operativo	Harmony
Nombre del procesador	CPU ARM9

Ficha técnica del producto **TM3TI4**

Características

Módulo entradas analógicas 4 x V/I temperatura -
16 bits - tornillo



Principal

Gama de producto	Modicon TM3
Tipo de producto o componente	Módulo entrada analógica
Compatibilidad de gama	Modicon M221 Modicon M241 Modicon M251 Modicon M262
Número de entrada analógica	4
Tipo de entrada analógica	corriente 4...20 mA corriente 0...20 mA tensión 0...10 V tensión -10...10 V thermocouple - 200...1000 °C with thermocouple J thermocouple - 200...1300 °C with thermocouple K thermocouple 0...1760 °C with thermocouple R thermocouple 0...1760 °C with thermocouple S thermocouple 0...1820 °C with thermocouple B thermocouple - 200...400 °C with thermocouple T thermocouple - 200...1300 °C with thermocouple N thermocouple - 200...800 °C with thermocouple E thermocouple 0...2315 °C with thermocouple C Ni 100/Ni 1000 sonda temperatura - 60...180 °C Pt 100 sonda temperatura - 200...850 °C Pt 1000 sonda temperatura - 200...600 °C

Product data sheet
Characteristics

XX930A2A2M12

Ultrasonic sensors XX, ultrasonic sensor cylindrical M30, Sn 2 m, 4...20 mA, M12 connector



Main

Range of product	Telemecanique Ultrasonic sensors XX
Sensor type	Ultrasonic sensor
Series name	General purpose
Sensor name	XX9
Sensor design	Cylindrical M30
Detection system	Diffuse
[Sn] nominal sensing distance	2 m adjustable with teach push-button
Material	Plastic
Type of output signal	Analogue
Wiring technique	4-wire
Analogue output function	4...20 mA
[Us] rated supply voltage	15...24 V DC with reverse polarity protection
Electrical connection	Male connector M12 4 pins
[Sd] sensing range	0.12...2 m
Beam angle	10 °
IP degree of protection	IP67 conforming to IEC 60529

一、 Main characteristics:

1. Standard version rated power supply voltage range: DC 15~27V;
2. Upgraded rated power supply voltage: DC 15~27V power supply (terminal power supply), or power supply via MICRO USB interface (power supply voltage range: DC 4~6V, so you can use mobile phone charger, computer USB, charging power supply).
3. 1 way analog output, you can choose to use voltage type (output range: 0/2-10V) or current type (output range: 0/4-20mA);
4. Voltage type output load impedance requirement $\geq 2K\Omega$, current type output load impedance requirement $\leq 500\Omega$;
5. Voltage type, current type output and display one-button switching;
6. Shell size: 85 × 50 × 22mm.

二、 Indicator light, signal description

1. Indicator light

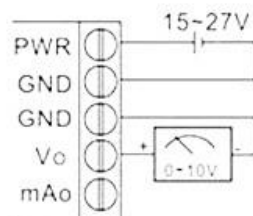
V (red) is bright, output is 0-10V voltage signal; flashing, output is 2-10v voltage signal

mA (green) is bright, output is 0-20mA current signal; flashing, output is 4-20mA current signal

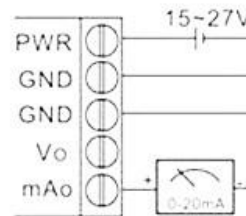
2. Port signal description

Signal	Description
MICRO USB port	(Specified for the upgrade) Another upgrade port for the upgrade. Power supply voltage range: DC 4~6V, so you can use mobile phone charger, computer USB, charging treasure power supply.
PWR	Connect DC 15~27V power supply +
GND	power and signal ground
GND	power and signal ground
Vo	Voltage type analog output interface
mAo	Current analog output interface

3. Wiring diagram:



0-10V/2-10V output



0-20mA/4-20mA output

Mirco 5V Power

0-10V
2-10V
0-20ma
4-20ma





Drive, AC, 1HP, 240V, 1PH/3PH, 4.2A, CT

Specifications

Item Number: VFD007L21A
 Manufacturer: Delta Products
 Item Category: Drives
 Subcategory: AC
 Series: VFD-L
 Nominal Input VAC: 240 Volts AC
 HP (CT): 1 Horsepower
 Amps (CT): 4.2 Amps
 Input Phase: 1 or 3
 Operator Controls: Built In
 Max. Frequency: 400 Hertz
 Braking Type: DC Injection
 Motor Control-Max Level: V/Hz (Scalar)
 Closed Loop: No
 AC Line Regenerative?: No
 Dynamic Braking Trans?: Not Available
 Frame Size: B1
 Mounting: Panel
 Height: 5.2 Inches
 Width: 2.68 Inches
 Depth: 5.04 Inches
 H x W x D (in.): 5.2 x 2.68 x 5.04



STNC[®]
TUW-25 AC220V

Especificaciones	Descripción
Tipo de operación	Acción directa (NC)
Tensión de bobina	110VAC o 220VAC ±10% (según referencia)
Apertura	16mm - 20mm - 25mm (según referencia)
Rango aplicable de presión	De 0 a 116 Psi (0 a 8,16 kg/cm ²)
Temperatura de operación	-10 a 60°C
Tipos de fluido	Aire, agua o aceite (Inferiores a 50CST)
Puerto conexión	3/8" - 1/2" - 3/4" - 1" NPT (según referencia)
Material	Material cuerpo (de fundición)
Protección	IP65



Garantía	1 Año	Profundidad Del Producto	14 cm
Altura Del Producto	16 cm	Modelo	PKM 60
Tipo de Producto	Electrobomba	Ancho Del Producto	21 cm
Sub Tipo de Producto	Periférica	Material	Metal
Color	Azul	Número de piezas	1
Máximo poder de descarga	60 l/min	Presión máxima de trabajo	50 PSI
Diámetro de distribución	1 "	Altura recomendable de distribución	5 m
Caudal máximo	40 l/min	Diámetro de succión	1 "
Máximo de succión	7 m	Potencia HP	0.5 HP
Voltaje	220 V		