

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Automatización de dos espesadores de tipo cono profundo para
incrementar la recuperación de mineral disuelto en la etapa de
lavado de relaves**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico

Elaborado por

Luis Smith Torres Archiñego

 [0009-0004-2270-2609](https://orcid.org/0009-0004-2270-2609)

Asesor

Ing. Daniel Roberto Carbonel Olazabal

 [0000-0001-7991-4267](https://orcid.org/0000-0001-7991-4267)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Torres Arquíñego [1]
Referencia/Reference	[1] L. Torres Arquíñego, “ <i>Automatización de dos espesadores de cono profundo para incrementar la recuperación de mineral disuelto en la etapa de lavado de relaves</i> ” [Trabajo de suficiencia profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Torres, 2025)
Referencia/Reference	Torres, L. (2025). <i>Automatización de dos espesadores de cono profundo para incrementar la recuperación de mineral disuelto en la etapa de lavado de relaves</i> . [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A mis queridos padres Jesús y Rocío por todo
el apoyo a lo largo de mi vida.*

*A mi querida abuela Rosa que desde el cielo
me cuida siempre.*

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a todos mis compañeros de trabajo que contribuyeron de manera significativa a la realización de este proyecto. Su apoyo y colaboración fueron fundamentales para su conclusión y buen desarrollo.

Resumen

En el presente informe se describe el problema de incrementar la producción en una planta de lixiviación de óxidos de plata mediante la implementación de un sistema de control automático para dos espesadores de cono profundo. La importancia de este proyecto surge del requerimiento para aumentar la capacidad de la línea de lavado de mineral existente, añadiendo dos nuevos espesadores de cono profundo en la etapa de lavado de relaves.

Para implementar de forma rápida y eficiente el nuevo sistema de control, se implementó una arquitectura de control basada en equipos compatibles. Utilizando instrucciones de librerías predefinidas para reducir los tiempos de desarrollo y programación. Además, se sintonizaron controladores PID para regular automáticamente la dosificación de floculante, el flujo de agua, el flujo en la descarga y mantener la altura de agua clara (mineral disuelto) entre los rangos operativos.

Con las pruebas de la respuesta del sistema de control, que se realizaron durante 17 días y se documentaron en los protocolos de comisionamiento, se demostró una mejora significativa en la producción de plata de la planta de lixiviación. Con la automatización se generó un impacto positivo, permitiendo un retorno de la inversión en aproximadamente 5.7 meses.

Palabras clave – Espesadores, automatización industrial, *PlantPAx*, controladores PID

Abstract

In the present report, the problem of increasing production at a silver oxide leaching plant by implementing an automatic control system for two deep cone thickeners is described. The importance of this project arises from the requirement to increase the capacity of the existing mineral washing line by adding two new deep cone thickeners in the tailings washing stage.

To quickly and efficiently implement the new control system, a control architecture based on compatible equipment was implemented. Predefined library instructions were used to reduce development and programming times. Additionally, PID controllers were tuned to automatically regulate flocculant dosing, water flow, discharge flow, and maintain the clear water height (dissolved mineral) within operational ranges.

With the system response tests, which were carried out over 17 days and documented in the commissioning protocols, a significant improvement in silver production at the leaching plant was demonstrated. The automation generated a positive impact, allowing a return on investment in approximately 5.7 months.

Keywords – Thickeners, industrial automation, PlantPAx, controllers PID

Índice de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Capítulo I. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Hipótesis.....	3
1.3.1. Hipótesis general.....	4
1.3.2. Hipótesis específicas	4
1.4. Alcance.....	4
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	6
2.1. Reseña sobre los espesadores industriales.....	6
2.2. Tipos de espesadores	8
2.2.1. Espesadores convencionales	9
2.2.2. Espesadores de alta capacidad (HCT)	9
2.2.3. Espesadores de alta densidad (HDT)	10
2.2.4. Espesador de cono profundo	10
2.3. Controladores lógicos programables (PLC)	11
2.4. Sistemas de supervisión y control (SCADA)	14
2.5. Sistemas de control distribuido (DCS)	16
2.6. Redes Industriales	17
2.6.1. Protocolo <i>EtherNet/IP</i>	17
2.6.2. Protocolo <i>Profinet</i>	19
2.7. Estrategias de control	19
2.7.1. Controlador <i>On/Off</i>	21

2.7.2.	Controlador PID	22
Capitulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....		26
3.1.	Diseño de la arquitectura del sistema de control.....	26
3.1.1.	Tablero principal 450-GC-001	27
3.1.2.	Tablero RIO 450-TC-001	28
3.1.3.	Tablero HMI 450-TC-002	29
3.2.	Configuración de la instrumentación industrial.....	30
3.2.1.	Configuración de los sensores digitales.....	30
3.2.2.	Configuración de los sensores analógicos	33
3.2.3.	Configuración de las válvulas	37
3.3.	Configuración del arranque de los motores	40
3.3.1.	Modos de operación de los motores	41
3.3.2.	Configuración de los arrancadores directos	42
3.3.3.	Configuración de los variadores de velocidad.....	47
3.4.	Configuración de las secuencias de arranque	53
3.4.1.	Secuencia de arranque 450-SEC-001	57
3.4.2.	Secuencia de arranque 450-SEC-002	58
3.4.3.	Secuencia de arranque 450-SEC-003	59
3.4.4.	Secuencia de arranque 450-SEC-004	60
3.4.5.	Secuencia de arranque 450-SEC-005	60
3.4.6.	Secuencia de arranque 450-SEC-006	61
3.4.7.	Secuencia de arranque 450-SEC-007	62
3.4.8.	Secuencia de arranque 450-SEC-008	63
3.5.	Configuración de los controladores.....	64
3.5.1.	Modos de operación de los controladores	65
3.5.2.	Desarrollo de las rutinas controladores.....	66
3.6.	Controladores del espesador CCD 4	68
3.6.1.	Controlador de dosificación de floculante	69

3.6.2.	Controlador de dosificación de agua para diluir floculante	71
3.6.3.	Controlador de dosificación de agua para diluir pulpa.....	73
3.6.4.	Controlador en la descarga.....	75
3.6.5.	Sintonización de los parámetros de los controladores de los espesadores.....	79
3.7.	Controladores del espesador CCD 5	81
3.7.1.	Controlador de dosificación de floculante	81
3.7.2.	Controlador de dosificación de agua para diluir floculante	84
3.7.3.	Controlador de dosificación de agua para diluir pulpa.....	86
3.7.4.	Controlador en la descarga.....	88
3.7.5.	Sintonización de los parámetros de los controladores del espesador	92
3.8.	Sistemas auxiliares.....	93
3.8.1.	Agua de sello.....	94
3.8.2.	Aire de instrumentación	95
3.8.3.	Planta de preparación de floculante:.....	96
3.8.4.	Dosificación de cal.....	97
3.8.5.	Tanque de rebose y tanque de descarga.....	98
3.9.	Alarmas	101
3.9.1.	Pantallas gráficas para monitorear las alarmas	101
3.9.2.	Alarmas en Sensores Analógicos	103
3.9.3.	Alarmas en Motores.....	104
3.9.4.	Alarmas en Válvulas	105
3.9.5.	Alarmas en Control PID	105
3.10.	Tendencias	105
3.11.	Reportes.....	107
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		109
4.1.	Pruebas de funcionamiento de instrumentos	109
4.2.	Pruebas de funcionamiento de motores.....	110
4.3.	Pruebas de funcionamiento de válvulas.....	111

4.4.	Pruebas de funcionamiento de secuencias.....	112
4.5.	Pruebas de funcionamiento de los controladores	114
4.6.	Puesta en marcha del circuito de espesadores CCD 4 – CCD 5.....	116
4.6.1.	Incorporación de nuevos sistemas de controladores	120
4.6.2.	Selector de Operación de Espesadores.....	123
4.7.	Análisis Económico del proyecto	124
4.8.	Demostración de las hipótesis	126
	Conclusiones	129
	Recomendaciones	130
	Referencias bibliográficas.....	131
	Anexos	133

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Componentes del tablero 450-GC-001	28
Tabla 2 Componentes del tablero 450-TC-001	29
Tabla 3 Componentes del tablero 450-TC-002	29
Tabla 4 Listado de motores	41
Tabla 5 Listado de secuencias	53
Tabla 6 Fases de la secuencia 450-SEC-001.....	57
Tabla 7 Fases de la secuencia 450-SEC-002.....	58
Tabla 8 Fases de la secuencia 450-SEC-003.....	59
Tabla 9 Fases de la secuencia 450-SEC-004.....	60
Tabla 10 Fases de la secuencia 450-SEC-005.....	61
Tabla 11 Fases de la secuencia 450-SEC-006.....	62
Tabla 12 Fases de la secuencia 450-SEC-007.....	63
Tabla 13 Fases de la secuencia 450-SEC-008.....	64
Tabla 14 Listado de controladores.....	65
Tabla 15 Variables consideradas para el cálculo del WTFR.....	69
Tabla 16 Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0107	70
Tabla 17 Variables consideradas para el cálculo del DMF.....	72
Tabla 18 Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0106	73
Tabla 19 Variables consideradas para el cálculo de D2.....	74
Tabla 20 Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0103	75
Tabla 21 Variables consideradas para el cálculo del USWF.....	76
Tabla 22 Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0302	77
Tabla 23 Variables que determinan las reglas para el valor del factor K.....	78
Tabla 24 Parámetros de sintonización de los controladores del espesador CCD 4	80
Tabla 25 Variables consideradas para el cálculo del WTFR.....	82
Tabla 26 Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0408	83

Tabla 27	<i>Variables consideradas para el cálculo del DMF.....</i>	85
Tabla 28	<i>Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0407</i>	86
Tabla 29	<i>Variables consideradas para el cálculo de D2</i>	87
Tabla 30	<i>Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0401</i>	88
Tabla 31	<i>Variables consideradas para el cálculo del USWF.....</i>	89
Tabla 32	<i>Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0602</i>	90
Tabla 33	<i>Variables que determinan las reglas para el valor del factor K.....</i>	91
Tabla 34	<i>Parámetros de sintonización de los controladores del espesador CCD 5</i>	93
Tabla 35	<i>Variables consideradas para el cálculo de D2</i>	100
Tabla 36	<i>Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0708</i>	101
Tabla 37	<i>Tipos de severidad de las alarmas</i>	103
Tabla 38	<i>Valores del botón selector de modo operación de los espesadores.....</i>	124
Tabla 39	<i>Costos del sistema de control.....</i>	125
Tabla 40	<i>Ingresos calculados en base a la producción de plata</i>	126

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1 Diagrama de flujo simplificado de la operación de los espesadores CCD 4 y CCD 5.....	2
Figura 2 Esquema de un espesador y sus partes	8
Figura 3 Espesador de cono profundo (DCT).....	11
Figura 4 Controladores programables de Rockwell Automation	12
Figura 5 EtherNet/IP como parte del modelo OSI del protocolo CIP	18
Figura 6 Diagrama de bloques de un controlador en lazo cerrado	20
Figura 7 Control On/Off en un sistema de calentamiento de líquido.....	21
Figura 8 Diagrama de bloques de un controlador PID.....	24
Figura 9 Arquitectura de control	27
Figura 10 Diagrama de lazo típico de un sensor digital	31
Figura 11 Bloque lógico de la instrucción P_DIn	32
Figura 12 Indicador y ventana emergente de un sensor digital	33
Figura 13 Diagrama de un lazo de un sensor analógico de 2 hilos.....	34
Figura 14 Diagrama de lazo típico de un sensor analógico de 4 hilos	34
Figura 15 Bloque lógico de la instrucción P_AIn	35
Figura 16 Indicador y ventana emergente de un sensor analógico.....	36
Figura 17 Diagrama de lazo típico para una válvula solenoide.....	38
Figura 18 Bloque lógico de la instrucción P_ValveSO.....	38
Figura 19 Indicador y ventana emergente de una válvula	40
Figura 20 Diagrama unifilar de arranque de un motor con el relevador E1 Plus	43
Figura 21 Bloque lógico de la instrucción P_Motor.....	45
Figura 22 Indicador y ventana emergente de un motor de arranque directo.....	46
Figura 23 Ventana emergente de estado del relevador E1 plus	47
Figura 24 Diagrama unifilar de arranque del Powerflex 525.....	49
Figura 25 Diagrama unifilar de arranque del PowerFlex 755.....	49

Figura 26	<i>Bloque lógico de la instrucción P_VSD</i>	<i>50</i>
Figura 27	<i>Indicador y ventana emergente de un variador de velocidad.....</i>	<i>51</i>
Figura 28	<i>Ventana emergente de estado del variador PowerFlex 525</i>	<i>52</i>
Figura 29	<i>Ventana emergente de estado del variador PowerFlex 725</i>	<i>52</i>
Figura 30	<i>Ubicación de las secuencias en el diagrama de flujo</i>	<i>54</i>
Figura 31	<i>Rutina programada en el PLC para una secuencia</i>	<i>55</i>
Figura 32	<i>Botón de acceso y ventana emergente de una secuencia.....</i>	<i>56</i>
Figura 33	<i>Indicador que los interlock están activados</i>	<i>57</i>
Figura 34	<i>Indicador que los enclavamientos (interlocks) están en bypass</i>	<i>57</i>
Figura 35	<i>Bloque lógico enhanced PID (PIDE).....</i>	<i>67</i>
Figura 36	<i>Indicador y ventana emergente de un controlador.....</i>	<i>68</i>
Figura 37	<i>Pantalla gráfica del cálculo FY-107</i>	<i>71</i>
Figura 38	<i>Pantalla gráfica del cálculo FY-0302</i>	<i>79</i>
Figura 39	<i>Ventana de configuración del sintonizador automático de lazo abierto.....</i>	<i>80</i>
Figura 40	<i>Pantalla gráfica del cálculo FY-0408</i>	<i>84</i>
Figura 41	<i>Pantalla gráfica del cálculo FY-0602</i>	<i>92</i>
Figura 42	<i>Pantalla gráfica de sistemas auxiliares.....</i>	<i>94</i>
Figura 43	<i>Pantalla gráfica monitoreo de agua de sello.....</i>	<i>95</i>
Figura 44	<i>Pantalla gráfica monitoreo de aire de instrumentación</i>	<i>95</i>
Figura 45	<i>Diagrama de conexión del equipo PLX31-EIP-SIE.....</i>	<i>96</i>
Figura 46	<i>Botón y ventana emergente de la planta de floculante</i>	<i>97</i>
Figura 47	<i>Pantalla gráfica de adición de cal, bombas 450-PU-014A/B.....</i>	<i>98</i>
Figura 48	<i>Pantalla gráfica de control de nivel del tanque 450-TK-003.....</i>	<i>99</i>
Figura 49	<i>Panel de alarmas</i>	<i>102</i>
Figura 50	<i>Pantalla gráfica de resumen de alarmas</i>	<i>102</i>
Figura 51	<i>Pantalla gráfica de tendencias</i>	<i>107</i>
Figura 52	<i>Reporte de los espesadores CCD 4 y CCD 5.....</i>	<i>108</i>
Figura 53	<i>Protocolo de pruebas de los instrumentos digitales y analógicos</i>	<i>110</i>

Figura 54	<i>Protocolo de pruebas de los motores</i>	<i>111</i>
Figura 55	<i>Protocolo de pruebas de las válvulas</i>	<i>112</i>
Figura 56	<i>Protocolo de pruebas de las secuencias</i>	<i>113</i>
Figura 57	<i>Protocolo de pruebas del lazo 450FIC0320 del espesador CCD 4.....</i>	<i>114</i>
Figura 58	<i>Comparación de la tendencia del PV (azul) y SP (rojo) del lazo FIC-0107 ...</i>	<i>115</i>
Figura 59	<i>Comparación de la tendencia del PV (azul) y SP (rojo) del lazo FIC-0408 ...</i>	<i>116</i>
Figura 60	<i>Pantalla gráfica principal del espesador CCD 4 en el sistema SCADA.....</i>	<i>117</i>
Figura 61	<i>Pantalla gráfica del sistema hidráulico del espesador CCD 4.....</i>	<i>118</i>
Figura 62	<i>Pantalla gráfica principal del espesador CCD 5</i>	<i>119</i>
Figura 63	<i>Pantalla gráfica de detalle del espesador CCD 5</i>	<i>120</i>
Figura 64	<i>Controlador de nivel para la adición de agua al tanque 450-TK-001</i>	<i>122</i>
Figura 65	<i>Controlador de nivel para la adición de agua al tanque 450-TK-002</i>	<i>122</i>
Figura 66	<i>Controlador de flujo para la dosificación de flujo hacia Detox.....</i>	<i>123</i>
Figura 67	<i>Espesadores CCD 4 y CCD 5</i>	<i>128</i>

Capítulo I. Introducción

En este capítulo se describe y contextualiza el problema, estableciendo el contexto en el cual se desarrolla el informe de suficiencia profesional. Luego, se describe el objetivo principal y los objetivos específicos que dirigen el desarrollo de este trabajo, junto con la formulación de las hipótesis que se deben demostrar. Finalmente, se limita el alcance del informe, precisando los aspectos considerados y los que se encuentran fuera del enfoque de este informe.

1.1. Descripción del problema

Una de las dificultades más importantes que afronta la minería en la actualidad es la disminución de las leyes (grado de concentración) de minerales en los yacimientos. Esta situación ha conllevado a la implementación de proyectos en las instalaciones mineras con el objetivo de mejorar y optimizar los procedimientos de producción. Uno de los enfoques más comúnmente empleados en las instalaciones mineras implica el uso de espesadores en las operaciones de producción. Los espesadores tienen la función de sedimentar las partículas de mayor tamaño y permiten que se genere una fase de agua clara con mineral disuelto en la parte superior. La fase de agua clara del espesador se envía nuevamente al circuito de planta para ser reutilizada en el proceso de producción, mientras que las partículas sedimentadas se envían a la siguiente etapa o al proceso de relaves.

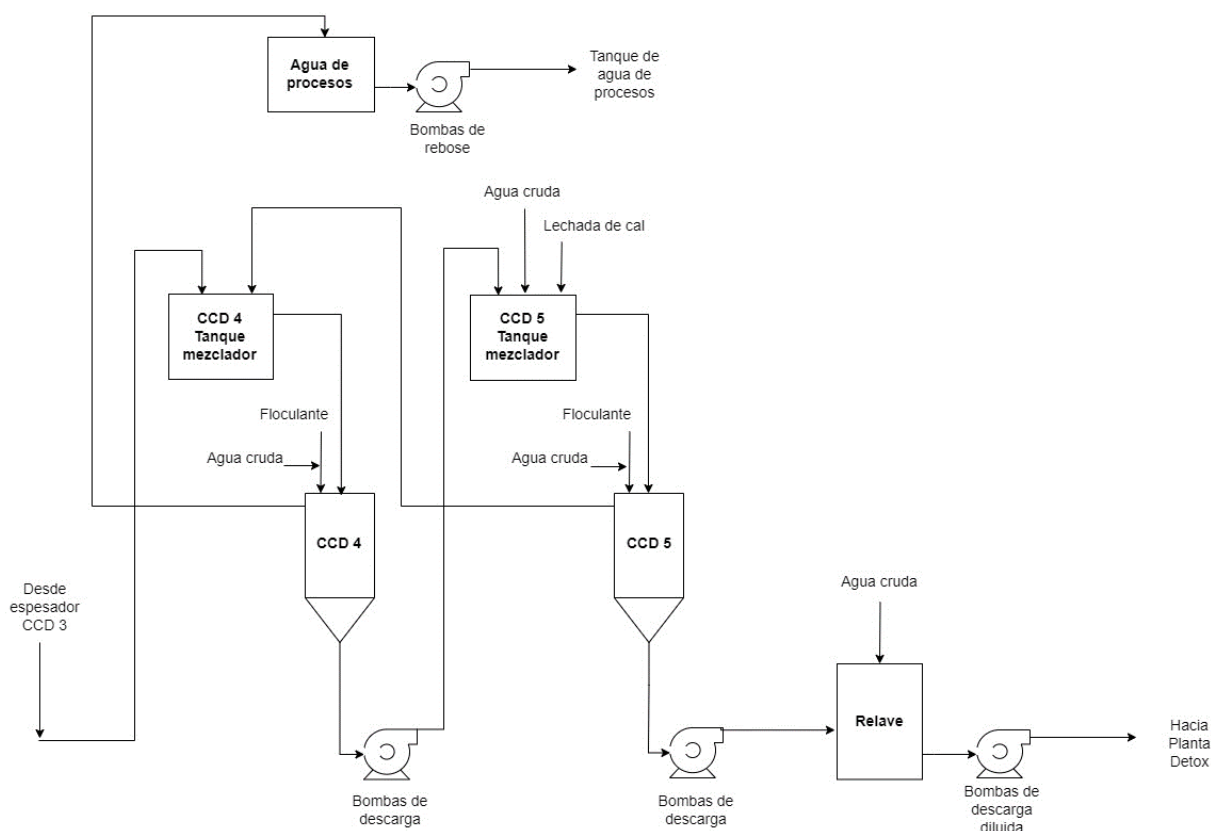
Como parte del proyecto de mejora del rendimiento de la planta de lixiviación de óxidos de plata la empresa minera ha planeado aumentar la capacidad de la línea de lavado de mineral existente agregando dos nuevos espesadores correspondientes a la etapa 4 y 5 (CCD 4 y CCD 5) para mejorar la recuperación de los minerales disueltos.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo de proceso de los espesadores CCD 4 y CCD 5. Como se aprecia en la Figura 1 el espesador CCD 4 recibe material proveniente del espesador existente CCD 3 (circuito existente de espesadores). El rebose del

espesador CCD 4 es enviado al tanque de agua de proceso, para reutilizar en la planta, la descarga del espesador CCD 4 se envía a la alimentación del espesador CCD 5. El rebose del espesador CCD 5 es enviado a la alimentación del espesador CCD 4 y la descarga se envía para procesarse en la planta de destrucción de cianuro (*Detox*).

Figura 1

Diagrama de flujo simplificado de la operación de los espesadores CCD 4 y CCD 5



Nota: Elaboración propia.

Para garantizar el funcionamiento adecuado de los espesadores, se implementa un sistema de control automático que posibilite la operación remota de los equipos, el control de la dosificación de floculante, el control de suministro de agua y control del flujo en la descarga. También se debe prevenir la acumulación excesiva de sólidos en la parte inferior de los espesadores, ya que esto podría causar obstrucciones en el agitador y causar su ruptura, lo que llevaría a una prolongada inactividad del espesador y por consecuencia la

detención de la cadena de producción. Adicionalmente el sistema de control de los espesadores debe ser compatible con el sistema control existente lo que contribuirá a reducir costos en la implementación y reducir los tiempos de desarrollo del sistema de control.

1.2. Objetivos

En el informe de suficiencia profesional se formulan los siguientes objetivos.

1.2.1. Objetivo General

Automatizar dos espesadores de tipo cono profundo para incrementar la recuperación de mineral disuelto en la etapa de lavado de relaves en una planta de lixiviación de óxidos de plata.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- Implementar una arquitectura de control compatible con la red de la planta de lixiviación, asegurando comunicación eficiente y menores costos de implementación.
- Desarrollar las rutinas de control para la dosificación precisa de floculante, el suministro adecuado de agua, la regulación de flujo en la descarga y mantener la altura de agua clara (mineral disuelto) dentro de los rangos operativos.
- Elaborar las pantallas gráficas en el sistema SCADA, utilizando las librerías *PlantPAx*, para el monitoreo de los parámetros operativos y el control remoto de los equipos del circuito de espesadores de cono profundo.

1.3. Hipótesis

En el presente informe de suficiencia profesional se establecen las siguientes hipótesis.

1.3.1. Hipótesis general

Con la automatización de dos espesadores de tipo cono profundo se incrementa la recuperación de mineral disuelto en la etapa de lavado de relaves.

1.3.2. Hipótesis específicas

- La implementación de una arquitectura de control compatible con la red de la planta de lixiviación mejorará la eficiencia de la comunicación y reducirá los costos de implementación.
- El desarrollo de rutinas de control para la dosificación precisa de floculante, el suministro adecuado de agua y la regulación de flujo en la descarga mantendrá la altura de agua clara dentro de los rangos operativos, mejorando la eficiencia y estabilidad del proceso de espesamiento.
- La elaboración de pantallas gráficas en el sistema SCADA utilizando las librerías *PlantPAx* permitirá un monitoreo eficiente de los parámetros operativos y un control remoto preciso de los equipos del circuito de espesadores de cono profundo, optimizando el rendimiento del sistema.

1.4. Alcance

El propósito del presente informe de suficiencia consiste en planificar la estructura de la arquitectura del sistema de control, garantizando la efectiva incorporación de los equipos en la red industrial existente en la planta de lixiviación. Además, incluye la programación del PLC principal (450-PLC-001) en el cual se elaboran las secuencias en lenguaje escalera (*ladder*) y en diagrama de bloques de funciones (*function blocks diagram*) para la integración de los instrumentos digitales, instrumentos analógicos, válvulas, motores, secuencias de arranque, los controladores PID e integración de sistemas auxiliares. Igualmente, comprende el desarrollo de las pantallas gráficas en el panel HMI instalado en campo para la operación local del nuevo sistema, también abarca el desarrollo

de las pantallas gráficas en el servidor HMI del sistema SCADA para la operación desde el cuarto de control de la planta.

Se involucran las pruebas de comisionamiento realizadas a los equipos y a los controladores cada espesador y finalmente se analiza el factor económico de la implementación del sistema de espesadores.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

En este capítulo se describen los conceptos teóricos y técnicos fundamentales para el desarrollo y comprensión del informe. Se describen las definiciones y características de los espesadores industriales, incluyendo los diferentes tipos existentes, para establecer una base sólida del funcionamiento y sus respectivas aplicaciones. Posteriormente, se describen los controladores lógicos programables (PLC), los sistemas de supervisión y control (SCADA), y los sistemas de control distribuido (DCS), destacando la importancia en la automatización industrial. Además, se describen las redes industriales que permiten la interconexión de los distintos dispositivos en un sistema automatizado. Finalmente, se presentan las técnicas de control utilizadas en la industria, las cuales son importantes para la automatización del sistema de espesadores de cono profundo.

2.1. Reseña sobre los espesadores industriales

Los espesadores industriales se desarrollaron en los primeros años de 1900, exactamente al año 1906 cuando Jhon Dorr patentó el espesador continuo el cual consistía en un tanque circular y un conjunto de rastras. (Serbon, Mac-Namara, & Schoenbrunn, 2016, pág. 315) El funcionamiento básico consistía en el movimiento de las rastras o raquetas que acercaban el lodo decantado hacia el centro del tanque para su evacuación en forma de lodo, en tanto que el agua desbordaba por un canal periférico.

En estos primeros espesadores industriales se esperaba que el tiempo de retención de la pulpa fuese lo suficientemente extenso, para permitir que los sólidos de la pulpa sedimentarán por gravedad, el tiempo para completar la sedimentación se extrapolaba de la sedimentación observado en el laboratorio. El proceso de sedimentación resultaba extremadamente lento, “lo que motivaba que solo pudieran estar rellenos con un 95% de líquido clarificado, y una pequeña capa de sólidos decantados en el fondo, con un bajo

contenido en sólidos en el hundido.” (Rodríguez Avello-Sanz, Butragueño Muñoz, & Grima Olmedo, 2013, pág. 31)

Para comprender el proceso de mejora de los espesadores industriales, analizamos la caída libre del sólido dentro del espesador. La caída libre del sólido se regula por la ley de Stokes. Según esta ley, la velocidad de sedimentación es proporcional a la diferencia de la densidad del sólido con la densidad del líquido que lo rodea, así como también es proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula. (Ros Moreno, 2014, pág. 22). Cualquier acción que pudiera incrementar los parámetros descritos anteriormente, aumentará la velocidad de sedimentación y eso explica el uso inicial de sustancias como goma, caliza, pegamento y otros agentes químicos, los cuales tuvieron cierto éxito. Pero la verdadera innovación se da con la invención y desarrollo de los electrolitos sintónicos. “Los ratios de sedimentación podían ser incrementados por diez, veinte o más veces, y por primera vez materiales de difícil decantación comienzan a poder sedimentados con cierta rapidez.” (Rodríguez Avello-Sanz, Butragueño Muñoz, & Grima Olmedo, 2013, pág. 31)

El uso de floculantes es actualmente una norma en la mayoría de los espesadores con excepción de los procesos que no pueden tolerar contaminación. El uso de floculantes puso de manifiesto la necesidad de diluir el floculante en la alimentación del espesador para optimizar el efecto. (Serbon, Mac-Namara, & Schoenbrunn, 2016, pág. 315)

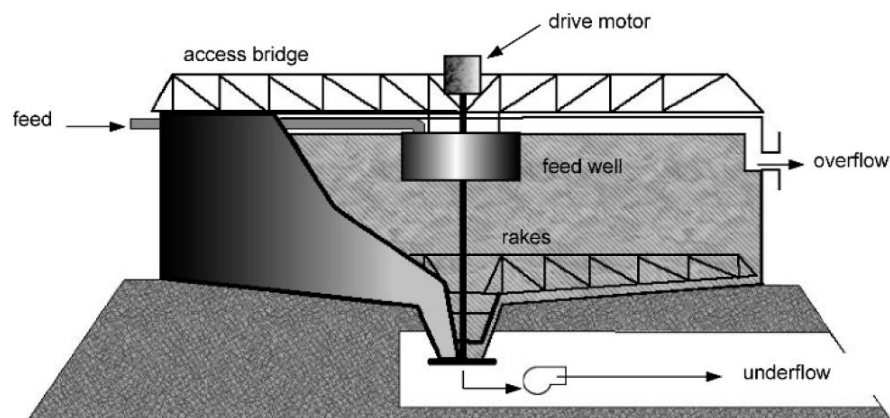
En la actualidad se puede definir un espesador industrial de la siguiente forma.

Un espesador es un aparato de separación sólido-líquido continuo, en el que las partículas sólidas contenidas en un [una] pulpa se dejan decantar, produciendo un rebose de agua clarificada (*overflow*) y un lodo concentrado en la descarga (*underflow*). El flujo que entra en un espesador se denomina *alimentación* o *influyente*, en tanto que el rebose se denomina *efluente*, *sobrenadante* u *overflow*. El producto inferior se llama *lodo* o *underflow*. (Cabrejos Salinas, 2011, pág. 84)

En la Figura 2 se indican las partes típicas de un espesador. En la cual se indica la presencia de unas rastras (*rakes*). La rotación de las rastras es fundamental para prevenir la compactación del lodo en el fondo, asegurando una descarga continua y evitando la paralización del espesador.

Figura 2

Esquema de un espesador y sus partes



Nota. El gráfico fue obtenido de *Mineral Processing Design and Operation* (Gupta & Yan, 2006, pág. 402).

2.2. Tipos de espesadores

Los espesadores cuentan con una larga historia de innovación en el diseño para habilitar la producción de densidades mayores. Debido a esto los espesadores industriales han experimentado una reducción en el tamaño y en el área de sedimentación requerida para igual caudal de alimentación de sólidos. Esta importante reducción de tamaño ha sido posible a dos grandes avances: “en primer lugar, el uso de floculantes sintéticos de alto rendimiento y en segundo lugar el desarrollo de sistemas de alimentación de alta eficiencia para la alimentación del espesador industrial.” (Rodríguez Avello-Sanz, Butragueño Muñoz, & Grima Olmedo, 2013, pág. 29)

2.2.1. Espesadores convencionales

El equipo consiste en un tanque de sedimentación en la mayoría de los casos de forma circular. Se caracteriza por presentar un fondo cónico con inclinaciones de 5° a 10° con la horizontal. Incluye un mecanismo con al menos dos raquetas que permiten arrastrar el producto sedimentado y acercarlo hasta el punto de descarga. El líquido sobrenadante u *overflow* se descarga por la parte superior del tanque. (Butragueño Muñoz, 2015, págs. 31-32)

Los espesadores convencionales presentan la desventaja que requieren grandes áreas de piso, debido a que el rendimiento se basa únicamente en el área total, mientras la profundidad del equipo es de menor importancia. (Wills & Napier-Munn, 2006, pág. 388)

2.2.2. Espesadores de alta capacidad (HCT)

Ante la creciente aceptación de la industria minera y metalúrgica de equipos de espesado de mayor volumen y su funcionamiento con floculantes específicos, se empezó a realizar investigación para la mejorar los procesos de producción. Este esfuerzo se concretó con la introducción de los espesadores de “alta capacidad” (*High Capacity Thickener* = HCT o también llamados *High Rate Thickener* = HRT).

El espesador HCT se caracteriza por la adición de floculante en al menos 3 etapas, una etapa es en la fase previa, produciendo una mezcla rápida entre el floculante y la pulpa. Otra diferencia es la forma en que los sólidos floculados son introducidos, la adición se hace por la parte superior del lecho de lodos para una máxima floculación y mejor claridad del rebose, este mecanismo de alimentación regula las variaciones y cambios bruscos en el ingreso de la pulpa floculada. (Rodríguez Avello-Sanz, Butragueño Muñoz, & Grima Olmedo, 2013, págs. 30-31)

Los espesadores de alta capacidad HCT optimizan la efectividad en el desarrollo de la operación de espesado, mientras se minimizan los costes de inversión y operativos.

2.2.3. Espesadores de alta densidad (HDT)

Los espesadores de alta densidad o compresión (HDT) constituyen una tecnología moderna aparecida y desarrollada al mismo tiempo que los espesadores de Cono Profundo (DCT), coincidiendo con el uso general de sistemas de alimentación con dilución y el empleo de floculantes a base de polímeros. De los espesadores revisados, estos espesadores pueden considerarse un equipo de transición o intermedio entre los espesadores convencionales y los espesadores de pasta, tanto por las características de operación como por su diseño geométrico. (Butragueño Muñoz, 2015, pág. 39)

Los espesadores de alta densidad (HDT), se comenzaron a desarrollar para ir sustituyendo a los espesadores convencionales y los de alta capacidad en el tratamiento de estériles (relaves) mineros, a medida que las necesidades de tratamiento crecían con los grandes yacimientos mineros que han entrado en operación en las últimas décadas. Su aplicación surge con la necesidad de recuperar una mayor cantidad de agua en las pulpas de los relaves con grandes ratios de alimentación de sólidos en el hundido capaz de tratar los grandes tonelajes de los yacimientos mineros, pero sin resultar un coste excesivo de inversión para estos. (Rodríguez Avello-Sanz, Butragueño Muñoz, & Grima Olmedo, 2013, pág. 32)

2.2.4. Espesador de cono profundo

Los espesadores de cono profundo (*Deep Cone Thickener* = DCT) son una alternativa más reciente los cuales son diseñados para la producción de lodos de alta viscosidad. Estos espesadores utilizan camas de lodos muy profundas y una base empinada para ser capaz de producir descargas de lodo cerca del límite de bombeabilidad y operar a altos ratios en términos de área de espesamiento. Actualmente estos diseños se están construyendo para unos 45 metros de diámetro, aunque, como es típico en la industria de los minerales, hay máquinas más grandes en la mesa de dibujo. (Serbon, Mac-Namara, & Schoenbrunn, 2016, pág. 315)

La geometría del espesador de cono profundo (DCT) le proporciona una alta compresión de la capa de lodo y un elevado lecho de lodos consiguiendo con ello alcanzar la máxima concentración de sólidos de hundido y llegar a un hundido dentro del rango de pasta. (Butragueño Muñoz, 2015, pág. 46)

Las aplicaciones más comunes donde se utilizan los espesadores de cono profundo (DCT) son:

- El espesado de relaves para el depósito en relaveras o para relleno de mina.
- La decantación contracorriente
- Como parte del circuito de alimentación al proceso de filtrado
- La alimentación a autoclaves.

Figura 3

Espesador de cono profundo (DCT)



Nota. La imagen fue obtenida de *Application of the FLSmidth Deep Cone technology to the Fertilizer plants in OCP* (Serbon, Mac-Namara, & Schoenbrunn, 2016, pág. 316).

2.3. Controladores lógicos programables (PLC)

Un controlador lógico programable (PLC) consiste en un computador de grado industrial programable para realizar funciones de control en tiempo real. Los controladores

programables han eliminado mucho del cableado asociado con los circuitos de control basados en relevadores. El PLC está diseñado por un arreglo de múltiples entradas y salidas, se caracteriza por un rango extendido de temperaturas, inmunidad al ruido, resistencia a la vibración y al impacto. Los programas de los PLC para el control y la operación de equipos y maquinaria de procesos de fabricación generalmente se almacenan en memoria con respaldo de batería o no volátil. Un PLC es un ejemplo de un sistema de tiempo real ya que la salida del sistema controlado por el PLC depende de las condiciones de la entrada. (Petruszella, 2017, pág. 2) En la Figura 4 se muestra las diferentes familias de PLC del fabricante *Rockwell Automation*.

Figura 4

Controladores programables de Rockwell Automation



Nota. La imagen fue obtenida de Controladores Programables de *Rockwell Automation* (Rockwell, 2024).

De acuerdo con Petruzella (Petruszella, 2017, págs. 2-4) los controladores programables ofrecen muchos beneficios sobre los controles convencionales basados en lógica cableada de relevador:

Cableado reducido. Los relevadores tenían que ser cableados para realizar una función específica, si se necesitaba realizar una función diferente se tenían que volver a cablear los relevadores. En algunos circuitos complejos resultaba más sencillo instalar un

tablero nuevo antes que modificar el cableado original. El controlador programable reduce considerablemente el número de cables a utilizar y resulta más sencillo realizar modificaciones dado que estas se hacen desde el *software* del PLC.

Mejora de la confiabilidad. El programa desarrollado puede ser fácilmente descargado hacia otro PLC. Debido a que toda la lógica de control está contenida en la memoria del PLC, no hay posibilidad que ocurra un error de cableado. El programa toma el lugar de mucho del cableado externo que normalmente debería ser requerido para el control del proceso. El cableado aun es requerido para conectar los dispositivos de campo, sin embargo, este cableado es menos extensivo. También el PLC ofrece la confiabilidad asociada con sus componentes de estado sólido.

Menor costo. Los PLC fueron diseñados originalmente para reemplazar la lógica de control de los relevadores y el ahorro de costo ha sido tan significativo que el control de relevadores se está convirtiendo en obsoleto excepto para aplicaciones de energía. Generalmente, si una aplicación tiene más de media docena relevadores de control, probablemente será menos costoso instalar un PLC.

Mayor capacidad de comunicación con otros sistemas. Un PLC puede comunicarse con otros controladores o equipos informáticos para realizar funciones tales como control de supervisión, recopilación de datos, monitorear dispositivos, monitorear parámetros de proceso, y descarga/carga de programas.

Menor tiempo de respuesta. Los PLC son diseñados para alta velocidad y aplicaciones de tiempo real. Los controladores programables operan en tiempo real, lo cual significa que si un evento toma lugar en campo resultará en la ejecución inmediata de una operación o salida. Las máquinas que procesan miles de elementos por segundo y objetos que pasan en frente de un sensor solo por una fracción de segundo requieren la capacidad de respuesta rápida del PLC.

Menor tiempo de diagnóstico de errores. Los PLC tienen diagnósticos propios y opciones de sobrescribir funciones que permiten a los usuarios rastrear y corregir fácilmente los problemas de *software* y *hardware*. Para encontrar y solucionar problemas, los usuarios pueden mostrar el programa de control en un monitor y verlo en tiempo real mientras se ejecuta.

Facilita la prueba de los dispositivos de campo. Un panel de control que contiene PLC tiene la función de verificar los dispositivos de campo en un punto común. Por ejemplo, un sistema de control que consta de cientos de dispositivos de campo de entrada y salida pueden ser contenida dentro de un área de fabricación extensa. Por lo tanto, tomaría una cantidad considerable de tiempo testear cada dispositivo en su ubicación. Al tener cada dispositivo conectado a un punto común en un módulo del PLC, se puede comprobar de forma rápida el funcionamiento de cada dispositivo.

2.4. Sistemas de supervisión y control (SCADA)

Los sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) se podrían definir como una solución integral diseñada para supervisar y controlar los equipos de campo como PLC, sensores, actuadores y otros dispositivos conectados, permitiendo una gestión centralizada y eficiente de las operaciones.

La arquitectura de un sistema SCADA es centralizada, lo que significa que prioriza la recopilación, procesamiento y análisis de datos. A través de esta estructura, los sistemas SCADA pueden monitorear continuamente las señales enviadas por los PLC, asegurando que los datos críticos estén disponibles en tiempo real. Esto no solo permite la supervisión continua, sino que también habilita la capacidad de enviar comandos remotos, como órdenes de arranque o paro de equipos, directamente a los PLC, optimizando así las operaciones sin necesidad de intervención manual en el lugar.

Una de las características más destacadas de los sistemas SCADA es su diseño modular. Esta modularidad permite que el sistema sea altamente personalizable y escalable, adaptándose a las necesidades específicas de cada aplicación. Los módulos básicos de un sistema SCADA incluyen:

- **Módulos de recolección de información:** Encargados de recopilar datos en tiempo real desde los dispositivos en campo, asegurando la disponibilidad inmediata de información para la toma de decisiones.
- **Interfaz de monitoreo y control:** A través de pantallas gráficas de visualización, los operadores pueden monitorear el estado de los equipos y procesos, así como interactuar con ellos para ajustar parámetros, activar alarmas o ejecutar comandos específicos.
- **Bases de datos:** El sistema almacena toda la información recolectada en bases de datos, permitiendo tanto la consulta histórica como el análisis de tendencias a largo plazo. Este almacenamiento es crucial para la generación de reportes y la auditoría de operaciones.
- **Sistemas de reportes:** Estos módulos generan documentos y reportes con la información recolectada, facilitando la evaluación del rendimiento, la identificación de problemas y la planificación de mejoras.
- **Gestión de alarmas:** Los sistemas SCADA incluyen capacidades avanzadas para la detección y gestión de alarmas, notificando a los operadores sobre condiciones anómalas que requieren atención inmediata.
- **Visualización de tendencias:** Permite observar y analizar tendencias en los datos históricos, ayudando a prever problemas potenciales y optimizar el rendimiento de los procesos.
- **Servicios de seguridad:** Incluyen medidas de ciberseguridad y gestión de accesos para proteger el sistema y la información manejada, así como módulos de gestión de logs, esenciales para la auditoría y el cumplimiento normativo.

2.5. Sistemas de control distribuido (DCS)

Un sistema de control distribuido (DCS), es un sistema basado en la red. El control distribuido consiste en la comunicación de dos o más PLC que se comunican entre sí para lograr completar la tarea de control. Cada PLC Controla diferentes procesos localmente y los PLC están constantemente intercambiando información a través del enlace de comunicación y reportando el estado de los procesos.

De acuerdo con Petruzella (Petruzella, 2017, pág. 307) las principales características de los sistemas distribuidos de control son:

- Los sistemas de control distribuido permiten la distribución de las tareas de procesamiento entre varios controladores.
- Cada PLC es asociado a una máquina, proceso, etapa o fase del proceso productivo.
- La alta velocidad de la comunicación entre la computadora se realiza a través de cableado CAT-5 o CAT-6, cables coaxiales simples, fibra óptica, o *ethernet*.
- El control distribuido reduce drásticamente el cableado de campo y aumenta el rendimiento porque coloca el tablero del controlador y el tablero de entradas y salidas (*input/output*) cerca del proceso que está siendo controlado.
- Dependiendo del proceso una falla del PLC no necesariamente detendría el proceso completo. Dado que algunas etapas podrían seguir trabajando debido a que estas están siendo controladas por otros PLC.
- El DCS está supervisado por una computadora o un grupo de computadoras que puede realizar funciones de operación / seguimiento / supervisión como también generación de informes y almacenamiento de datos.

2.6. Redes Industriales

Las redes industriales se percibían en el pasado como diferentes de las redes de tecnologías de la información (TI). En realidad, en los inicios las redes de automatización no fueron consideradas como redes en todo el sentido de la palabra en cambio fueron considerados como buses seriales. De este periodo inicial proviene el termino bus de campo (*fieldbus*). Naturalmente cada red fue diseñada para resolver un problema, luego se extendió para resolver otros problemas, quizás relacionados. Debido a que el modelo de negocio de cada proveedor fue dirigido a nichos ligeramente diferentes uno del otro. (Caro, 2016, pág. 9)

Actualmente la idea de que las redes de automatización industrial y las redes de TI son completamente diferentes ha dejado de ser predominante. La tendencia clara es utilizar componentes comerciales listos para usar (COTS) y adaptarlos mediante software a las aplicaciones de automatización industrial. Debido a que *Ethernet* fue el claro ganador en el mercado de TI, no es de sorprender que *Ethernet* es la base para la más reciente evolución de las redes de automatización industrial – al menos en el extremo de alto rendimiento – que deja a las redes de nivel más bajo que conectan sensores y actuadores con una solución diferente. (Caro, 2016, pág. 10)

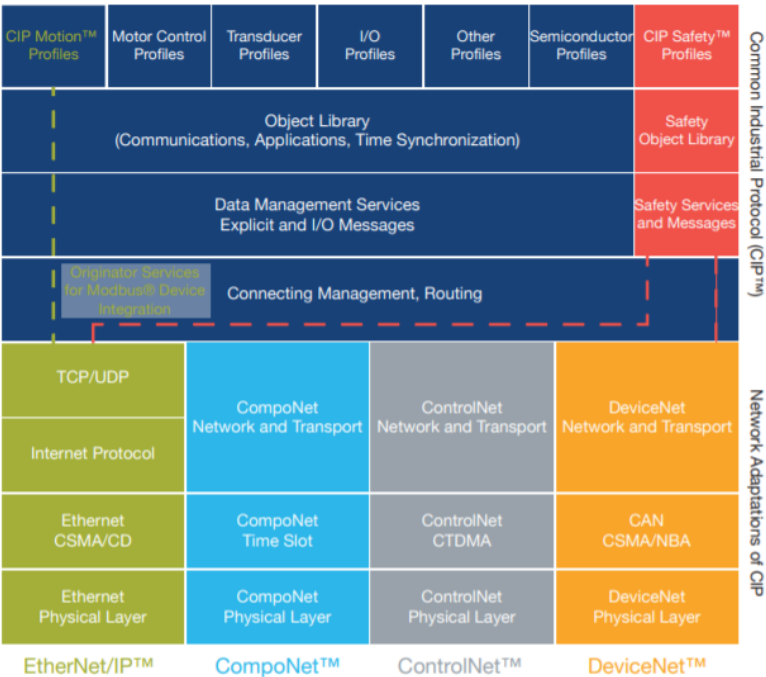
2.6.1. Protocolo *EtherNet/IP*

EtherNet/IP fue introducido en el 2001 y hoy es el *Ethernet* industrial más desarrollado, proveído y completa solución de red disponible para manufactura y procesos de automatización. *Ethernet/IP* es un miembro de una familia de redes que implementan el protocolo *Common Industrial Protocol* (CIP™) en sus capas superiores. El protocolo CIP abarca una suite integral de mensajes de servicio para variedad de aplicaciones de fabricación y automatización de procesos, incluidos control, seguridad, sincronización, movimiento, configuración e información. Como un protocolo verdaderamente independiente del medio, este es soportado por cientos de fabricantes alrededor del

mundo, el protocolo CIP provee a los usuarios una arquitectura de comunicación unificada en todo el proceso de producción. El protocolo *Ethernet/IP*, como otras redes CIP, sigue el modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI), que define un marco para la implementación de protocolos en siete capas: física, enlace de datos, red, transporte, sesión, presentación y aplicación. Las redes que siguen este modelo definen un conjunto completo de funciones de red desde la implementación física hasta la capa de aplicación o la capa de usuario. Como ocurre con todas las redes CIP, *Ethernet/IP* implementa CIP en la capa de sesión y superiores y se adapta el protocolo CIP a la tecnología específica de *Ethernet/IP* en las capas de transporte e inferiores. En la Figura 5 se muestra la arquitectura que muestra el detalle del protocolo *Ethernet/IP*. (ODVA, 2016, pág. 2)

Figura 5

EtherNet/IP como parte del modelo OSI del protocolo CIP



Nota. La imagen fue obtenida de *TECHNOLOGY OVERVIEW SERIES: ETHERNET/IP* (ODVA, 2016, pág. 2).

2.6.2. Protocolo *Profinet*

El protocolo *Profinet* constituye una variante de *Ethernet Industrial*. *Profinet* nace como una continuación del protocolo *Profibus*; adquiere la experiencia del protocolo *Profibus* y las ventajas de las redes de *Ethernet*.

El motivo de que *Ethernet Industrial* no tuviera implantación en la industria se basa en dos aspectos fundamentales: uno de ellos era la imposibilidad de disponer de unidades de E/S descentralizadas, al igual que ocurría en *Profibus*; el otro motivo reside en el propio principio de funcionamiento de *Ethernet* respecto al método de acceso al medio. Faltaba el determinismo, es decir, saber con seguridad un rango de tiempo en el que se iba a producir el envío de información. Existen muchas aplicaciones donde este detalle no resulte importante, pero hay otras donde es fundamental para su correcto funcionamiento. *Profinet* solucionó estos dos problemas. El más complicado era la falta de determinismo. Por tal motivo, *Profinet* creó una prioridad para los datos manejados por él mismo. Se debe tener presente que, en estas redes, al conectarse a *Ethernet*, se manejan datos de tipo industrial pero también tipo ofimático. Con la creación de esta “autopista” reservada los datos industriales, se puede establecer un tiempo de comunicación. (Peciña Belmonte, 2018, pág. 23)

Finalmente, el protocolo *Profinet* se define como el estándar abierto de *Ethernet Industrial* de la asociación *Profibus Internacional* (PI), según la norma IEC 61784. *Profinet* ha sido promovido y desarrollado en gran medida por Siemens, quien ha integrado este protocolo en su vasta gama de productos de automatización industrial.

2.7. Estrategias de control

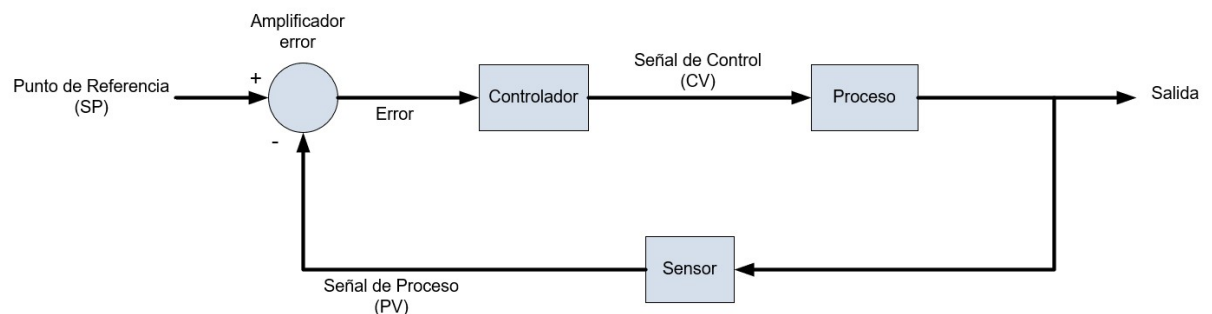
La mayoría de los sistemas de control son de lazo cerrado y estos utilizan la señal de realimentación, la cual consiste en la salida de un proceso que afecta la señal de control de entrada. Un sistema de lazo cerrado mide la salida actual del proceso y lo compara con

la salida deseada. Los ajustes son realizados continuamente por el sistema de control hasta que la diferencia entre la salida actual y la deseada este dentro de un rango de tolerancia predeterminado. (Petruzella, 2017, pág. 309)

En la Figura 6 se muestra un sistema de control de lazo cerrado. La actual salida es medida y es enviada como retroalimentación y comparada con la entrada.

Figura 6

Diagrama de bloques de un controlador en lazo cerrado



Nota: Elaboración propia.

Las señales del diagrama de bloques de la Figura 6 son:

- **Punto de referencia (SP).** Es la entrada que determina el punto de operación deseado del proceso. También es usual que se utilice el término en inglés: *set point*.
- **Señal de proceso (PV).** Se refiere a la señal de realimentación que contiene información actual del proceso.
- **Error (E).** Indica si la operación del proceso coincide con el punto de referencia. La magnitud y polaridad de la señal de error determinará como la señal de error trabajará.
- **Señal de Control (CV).** Es la señal correctiva adecuada basada en la señal de error.

2.7.1. Controlador On/Off

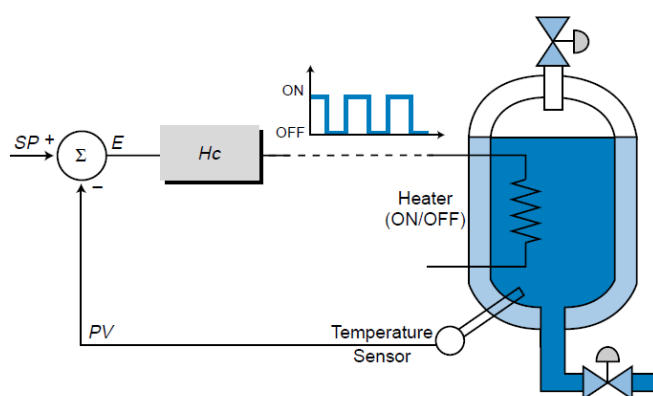
Los controladores *On/Off* se caracterizan porque el elemento final de control solo toma dos posibles estados o es activo (*On*) o inactivo (*Off*), se le asigna activo para la ocasión cuando la variable medida está por encima de la referencia y el valor inactivo para la ocasión cuando la variable está por debajo de la referencia. El controlador nunca mantendrá el elemento de control final en una posición intermedia.

En la Figura 7 se muestra un controlador *On/Off*. La operación del proceso puede ser resumida como sigue:

- Si la temperatura del líquido va debajo de la referencia el calentador se enciende y la temperatura se empieza a elevar.
- Cuando la temperatura del líquido va por encima de la referencia, el calentador se apaga y la temperatura empezará a elevarse.
- El ciclo *On/Off* continuará a lo largo que el sistema siga operando.

Figura 7

Control On/Off en un sistema de calentamiento de líquido.



Nota. La imagen fue obtenida de *PROGRAMMABLE CONTROLLERS THEORY AND IMPLEMENTATION* (Bryan & Bryan, 1997, pág. 678).

2.7.2. Controlador PID

Con su funcionalidad de tres términos que cubre el tratamiento de respuestas tanto transitorias como de estado estable, el control proporcional – integral – derivativo (PID) ofrece la solución más simple y, sin embargo, más eficiente para muchos problemas de control del mundo real. (Ang, Chong, & Li, 2005, pág. 559)

Las acciones que conforman el controlador PID son:

Control Proporcional: Los controladores proporcionales son diseñados para eliminar el ciclo que forma el control *On/Off*. Estos controladores permiten al elemento final de control asignar valores intermedios entre el encendido (*On*) y el apagado (*Off*). La acción proporcional permite el control análogo del elemento final del sistema de control para variar la cantidad de energía hacia el proceso. Dependiendo de cuanto la variable medida se ha movido del valor deseado. (Petruszella, 2017, pág. 311)

Control Integral: La acción integral, a veces denominada acción de reinicio, actúa en función de la magnitud y la duración de la señal de error. Existe una señal de error cuando hay una diferencia entre la variable de proceso y el punto de referencia (*set point*), por lo que la acción integral causa cambios en la salida y continua cambios hasta que el error ya no exista. La acción integral elimina el error de estado estacionario. La cantidad de acción integral se mide como minutos por repetición o repeticiones por minuto, que es la relación entre cambios y tiempo. (Petruszella, 2017, pág. 313)

El control proporcional más el control integral (PI) combina las características de ambos tipos de control. Un cambio de paso en el punto de referencia hace que el controlador responda proporcionalmente, seguido de la respuesta integral, que se agrega a la respuesta proporcional. Porque el modo integral determina el cambio de la salida en función del tiempo, la mayor acción integral encontrada en el control se da cuando la salida cambia más rápido. Esta acción se puede resumir como sigue:

- Para eliminar el error de compensación (*offset*), el controlador necesita ajustar la salida hasta que el error de la variable de proceso sea cero.
- Restablecer la acción de control integral cambia la salida del controlador por la cantidad necesaria para impulsar la variable de proceso de nuevo al valor del punto de referencia.
- Después del reinicio de la acción de control integral un nuevo punto de equilibrio es establecido.
- Dado que el controlador proporcional siempre debe operar en su banda proporcional, la banda proporcional debe ser movida para incluir el nuevo punto de equilibrio.
- Un controlador con reinicio de control integral hace esto automáticamente.

Control PID: El control PID es un método de control de retroalimentación que combina la acción proporcional, integral y derivativa. La acción proporcional proporciona un control suave sin llegar al punto de referencia. La acción integral corrige automáticamente la compensación. La acción derivada responde rápidamente a grandes cambios externos: Disturbios. El controlador PID es el controlador de procesos más utilizado. Cuando se combina en un controlador único el control proporcional, integral y derivativo los controles se complementan entre sí para reducir el error del sistema a cero más rápido que cualquier otro controlador. (Petruszella, 2017, pág. 313)

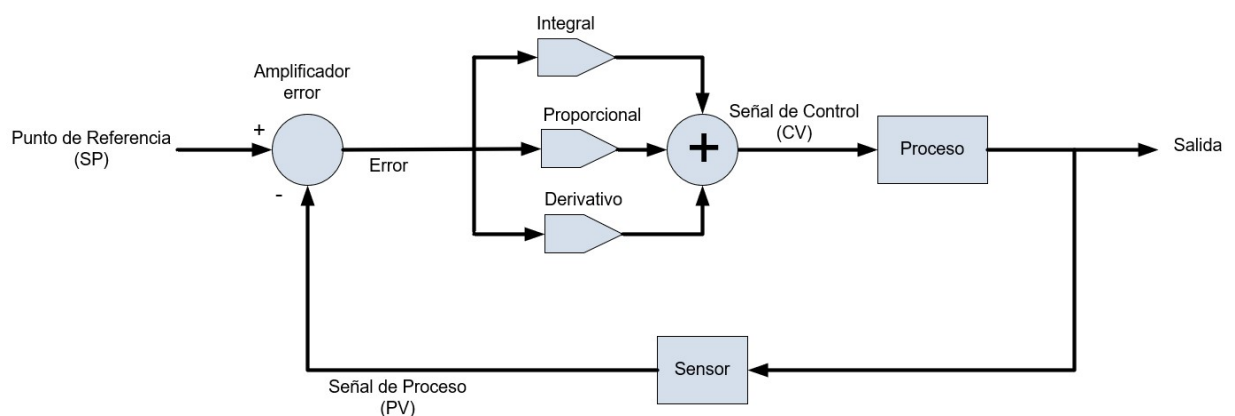
En la Figura 8 se muestra el diagrama de bloques de un controlador PID, la operación de los cuales se puede resumir de la siguiente manera:

- Todas las ganancias se pueden cambiar durante la operación para sintonizar el proceso.
- El término integral mejora la precisión y la derivada reduce el sobre impulso para alteraciones transitorias.

- La salida se puede utilizar para controlar las posiciones de las válvulas, temperatura, equipo de medición de flujo, etc.
- El control PID permite variar el nivel de potencia de salida.
- Como ejemplo, suponga que un horno está configurado a 50 °C. La potencia del calentador aumentará a medida que la temperatura cae por debajo del punto de ajuste de 50 °C. Cuanto menor sea la temperatura, mayor será la potencia.
- El control PID tiene el efecto de bajar suavemente la energía a medida que la señal se acerca al punto de referencia.

Figura 8

Diagrama de bloques de un controlador PID



Nota: Elaboración propia.

Ajuste Controlador PID:

Básicamente, el ajuste del controlador PID consiste en determinar los valores apropiados para la ganancia (proporcional banda), tasa (derivada) y tiempo de reinicio (integral) parámetros de ajuste (constantes de control) que darán el control requerido. Dependiendo de las características de la desviación de la variable de proceso del punto de ajuste, los parámetros de ajuste interactúan para alterar el controlador producción y producir cambios en el valor del proceso variable. (Petruszella, 2017, pág. 314)

En general, tres métodos de ajuste del controlador son los más usados:

Manual: En este método el operador o encargado realiza una estimación de los parámetros de ajuste requeridos para obtener la respuesta deseada en el controlador. Los términos proporcional, integral y derivativo deben ser ajustado, o sintonizado usando el método de ensayo y error.

Semiautomático o Autoajuste (*autotune*): En este método el controlador se encarga de calcular y configurar los parámetros PID. El controlador mide la salida del sensor, calcula el error, la suma del error, la tasa de cambio de error. Calcula la potencia deseada en ecuaciones PID. Finalmente actualiza la salida de control.

Totalmente automático o inteligente: Este método también se conoce en la industria como control lógico difuso. El controlador utiliza inteligencia artificial para reajustar los parámetros de ajuste PID continuamente según sea necesario. En lugar de calcular un resultado con una fórmula, el controlador de lógica difusa evalúa las reglas. El primero paso es difusificar el error. El término difusificar se refiere al proceso mediante el cual se toma el valor numérico de una variable y se convierte en variable lingüística, como por ejemplo "negativo grande" o "positivo pequeño". Posteriormente mediante un grupo de reglas condicionales de la forma "si – entonces" se evalúan para desarrollar una salida. La salida como paso final se le aplica el proceso inverso y se convierte de un valor lingüístico a un valor numérico. La señal de salida es una variable continua y se puede utilizar por ejemplo para controlar la posición de una válvula. (Petruszella, 2017, pág. 314)

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

En este capítulo, se describe detalladamente el desarrollo de la solución propuesta, comenzando con el diseño de la arquitectura que soportará todo el sistema. Se revisa en profundidad la configuración de los diferentes componentes, incluyendo tanto los sensores digitales como los sensores analógicos, asegurando su correcta integración y funcionamiento dentro del sistema. Posteriormente, se describe la configuración de los motores, los de arranque directo y los variadores de velocidad, estos últimos son fundamentales para el funcionamiento de los controladores.

En el capítulo se continua con una explicación sobre la configuración de las secuencias de arranque, las cuales permiten el arranque adecuado de las bombas. Se discutirá también la implementación de los controladores, esenciales para mantener los procesos dentro de los parámetros deseados. Además, se incluye la integración de los sistemas auxiliares que complementan la operación principal, seguido de un enfoque en la gestión de alarmas para la identificación y respuesta rápida ante cualquier anomalía. Finalmente, se abordará el desarrollo de las tendencias y la generación de reportes, herramientas importantes para el monitoreo continuo y la optimización de la operación.

3.1. Diseño de la arquitectura del sistema de control

La arquitectura de control del nuevo sistema utiliza la tecnología de *Rockwell Automation*, debido a que el sistema de control distribuido (DCS) de la Planta se basa en la tecnología del mismo fabricante. Esto garantiza una integración adecuada de los equipos con el DCS de la Planta.

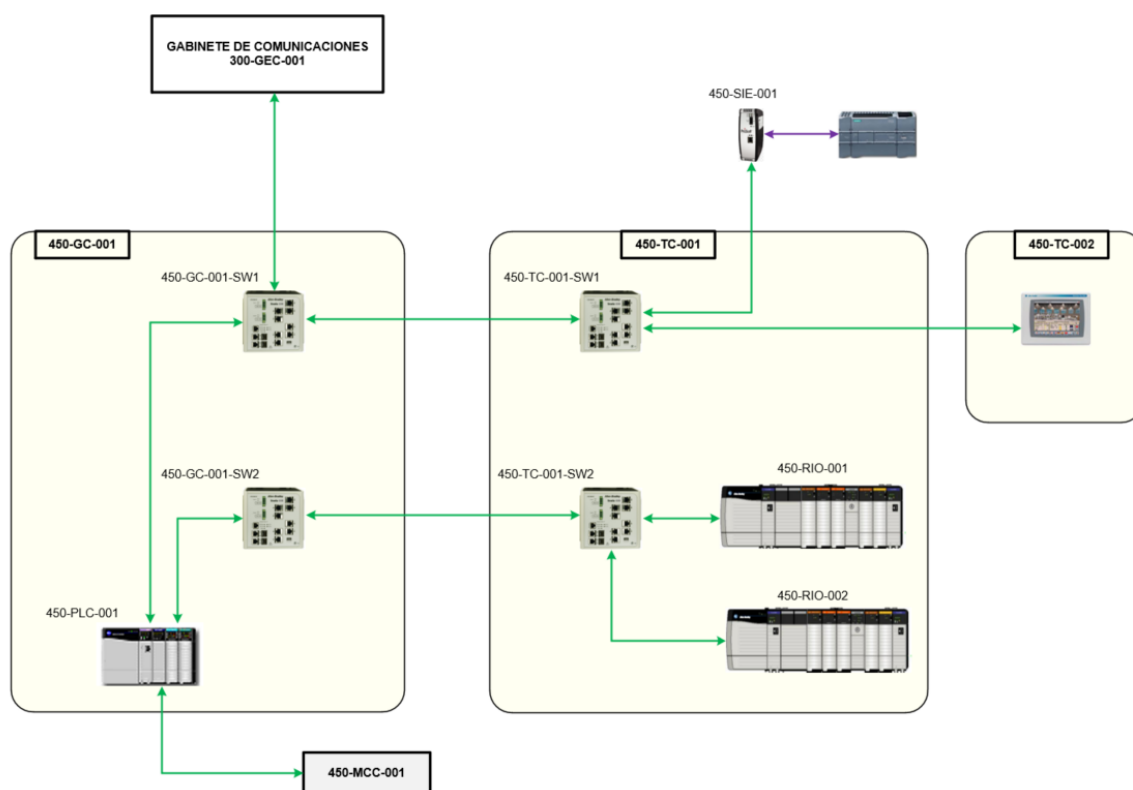
El núcleo del sistema de control es el procesador 1756-L74 de la familia *ControlLogix*, instalado en el tablero de control principal identificado como 450-GC-001. Para la conexión de los sensores, se utiliza el tablero 450-TC-001, ubicado en las proximidades de los espesadores CCD 4 y CCD 5. Además, se utiliza el tablero 450-TC-

002, que incorpora un panel HMI para permitir el control local por parte del operador.

La Figura 9 detalla las conexiones de los equipos del sistema de control de los espesadores de cono profundo. También se indica la conexión con la red industrial de planta mediante gabinete de comunicaciones 300-GEC-001.

Figura 9

Arquitectura de control



Nota: Elaboración propia.

3.1.1. Tablero principal 450-GC-001

En el panel principal se localiza la unidad central de procesamiento 1756-L74 perteneciente a la familia *ControlLogix*, junto con las tarjetas de comunicación *Ethernet/IP* en el mismo chasis. También se incluyen 2 switches para establecer la comunicación con la red del DCS y con los demás tableros.

Del tablero de principal se establece la comunicación con 3 redes, las cuales son:

- **La red de comunicación de proveedores (*vendors*):** Esta red está diseñada para que los controladores de sistemas nuevos se integren al DCS principal de planta, la conexión se da mediante el switch 450-GC-001-SW1 el cual tiene un puerto conectado al gabinete de comunicaciones 300-GEC-001.
- **La red de comunicación de entradas y salidas (RIO):** Esta red está diseñada para que el controlador principal se comuniquen con las tarjetas de entrada y salida en campo, la conexión se da mediante el switch 450-GC-001-SW2 el cual tiene un puerto conectado al switch 450-TC-001-SW2 del tablero 450-TC-001.
- **La red de comunicación de motores:** Esta red está diseñada para que el controlador principal se comuniquen con el centro de control de motores 450-MCC-001 de tecnología *Rockwell Automation* modelo *Centerline 2100*.

En la Tabla 1 se especifican los componentes instalados en el tablero principal 450-GC-001.

Tabla 1

Componentes del tablero 450-GC-001

Ítem	Descripción	Código de Producto	Cantidad
1	Procesador	1756-L74	1
2	Tarjetas de comunicación	1756-EN2T	3
3	<i>Switch stratix 8000</i>	1783-MS10T	2

3.1.2. Tablero RIO 450-TC-001

Este tablero se ubica en campo y cuenta con 2 chasis (*racks*): 450-RIO-001 y 450-RIO-002. En estos 2 *racks* se ubican las tarjetas digitales y análogas donde se conectan

los instrumentos de campo. En la Tabla 2 se especifican los componentes instalados en el tablero.

Tabla 2

Componentes del tablero 450-TC-001

Ítem	Descripción	Código de Producto	Cantidad
1	Tarjetas de comunicación	1756-EN2T	2
2	Módulo de entradas analógicas	1756-IF8H	3
3	Módulo de salidas analógicas	1756-OF8H	2
4	Módulo de entradas digitales	1756-IA16I	8
5	Módulo de salidas digitales	1756-OW16I	5
6	Switch stratix 8000	1783-MS10T	2

3.1.3. Tablero HMI 450-TC-002

Este tablero se ubica en campo y tiene una interfaz táctil de operación (HMI), desde donde el usuario puede comandar la operación de los equipos y puede monitorear las variables de proceso. En la Tabla 3 se especifican los componentes instalados en el tablero.

Tabla 3

Componentes del tablero 450-TC-002

Ítem	Descripción	Código de Producto	Cantidad
1	Panel HMI	2711P-T10C4A8	1

3.2. Configuración de la instrumentación industrial

Los sensores se colocan directamente en el área de medición del proceso y se conectan a un tablero de conexión (*junction box*), que actúa como una caja de derivación para evitar longitudes excesivas y simplificar el diagnóstico en caso de fallas. En las siguientes líneas se pretende detallar como se realizó las conexiones físicas de los sensores, así como se configuraron las rutinas de control en el PLC y como se realizó el desarrollo de los elementos para las pantallas gráficas de supervisión del sistema SCADA.

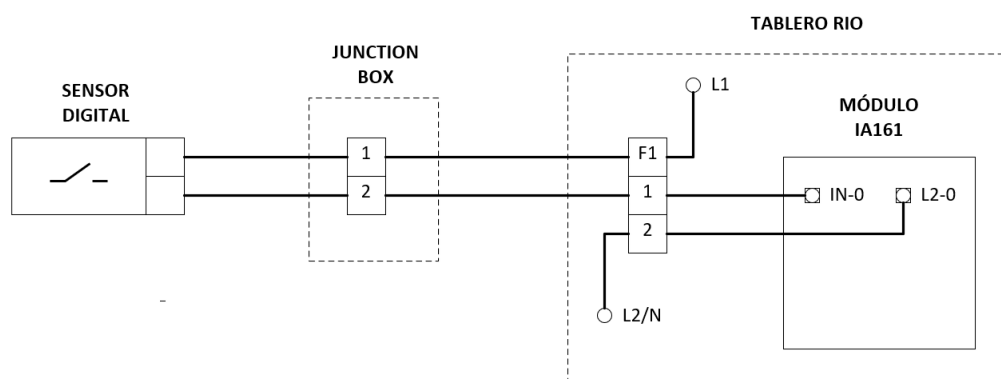
3.2.1. Configuración de los sensores digitales

Los sensores digitales son dispositivos que convierten una magnitud física en una señal eléctrica discreta, que solo puede tomar 2 valores lo cual se traduce en la lógica del PLC como un 0 o 1.

- a) Diagrama de lazo típico:** Como se muestra en la Figura 10 los sensores digitales se conectan mediante dos cables. Uno de los cables se conecta al voltaje L1 y el otro va conectado a una de las borneras de la tarjeta 1756-IA16I. Cuando el sensor se activa, cierra su contacto interno, permitiendo que el voltaje L1 se transmita a la bornera. Al mismo tiempo, la otra bornera sigue conectada al voltaje L2. Esta diferencia de potencial entre las borneras es convertida por la tarjeta 1756-IA16I en un valor lógico 1 en la memoria del PLC. En el caso contrario cuando el sensor no este activo, no se generará una diferencia de potencial entre las borneras, la tarjeta 1756-IA16I generará el valor lógico 0 en la memoria del PLC

Figura 10

Diagrama de lazo típico de un sensor digital

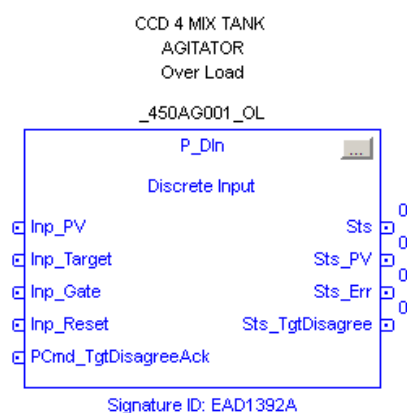


Nota: Elaboración propia.

- b) Lógica de Control:** Para programar las rutinas de los sensores digitales, se utiliza la instrucción *P_DIn* (Figura 11), que forma parte de la librería *PlantPAx* versión 2.0. Esta instrucción ofrece las siguientes funciones preconfiguradas:
- Una entrada para la lectura del sensor digital (*Inp_PV*), una entrada para el valor de referencia (*Inp_Target*) y una salida de disconformidad entre la referencia y la lectura del sensor digital (*Sts_TgtDisagree*).
 - Un parámetro de tiempo de retardo configurable para la activación del estado de disconformidad y la activación de la alarma de disconformidad.
 - Un modo mantenimiento en el cual se puede sobrescribir el valor de la lectura del sensor digital, esta función se utiliza para el uso durante las tareas de mantenimiento del sensor.
 - Una entrada simulada para usarse en pruebas, demostración o entrenamiento de los operadores.

Figura 11

Bloque lógico de la instrucción P_DIn



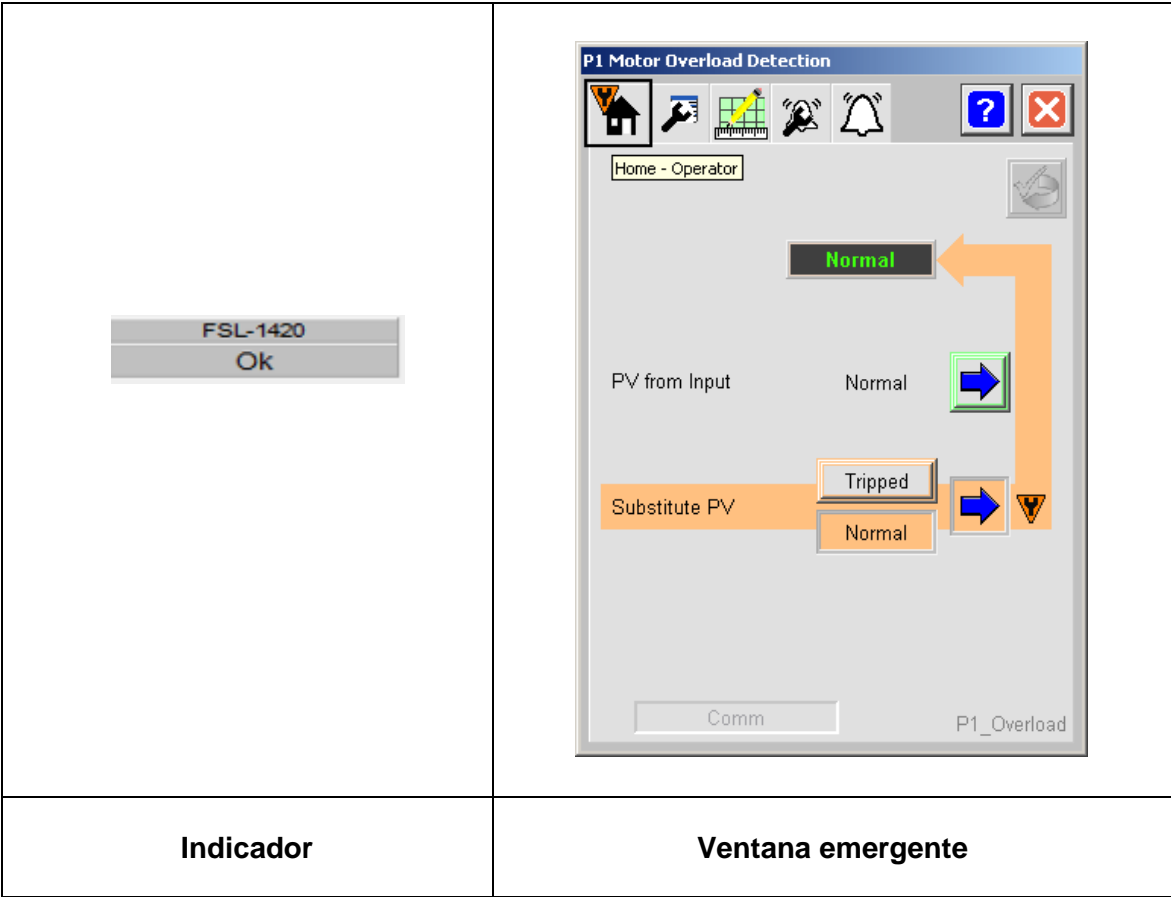
Nota: Captura de pantalla del software RSLogix 5000.

c) Interfaz gráfica: Para la creación de los elementos gráficos, se utilizan los componentes prediseñados de la instrucción *P_DIn*, disponibles en la librería *PlantPAx*. Como se observa en la Figura 12, se presenta un indicador que se incorpora en las pantallas gráficas de supervisión del sistema SCADA, y una ventana emergente (*faceplate*) que permite al usuario interactuar con los parámetros de la instrucción. Esta ventana proporciona las siguientes funcionalidades:

- Visualización del estado del sensor, además proporciona la capacidad de personalizar los nombres del estado 0 y estado 1.
- Visualización del estado de la entrada real inclusive cuando esta entrada es forzada o es simulada a nivel de la lógica del PLC.
- Acceso a la ventana de mantenimiento del sensor, parámetros de configuración del sensor y los parámetros de configuración de las alarmas.

Figura 12

Indicador y ventana emergente de un sensor digital



Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.2.2. Configuración de los sensores analógicos

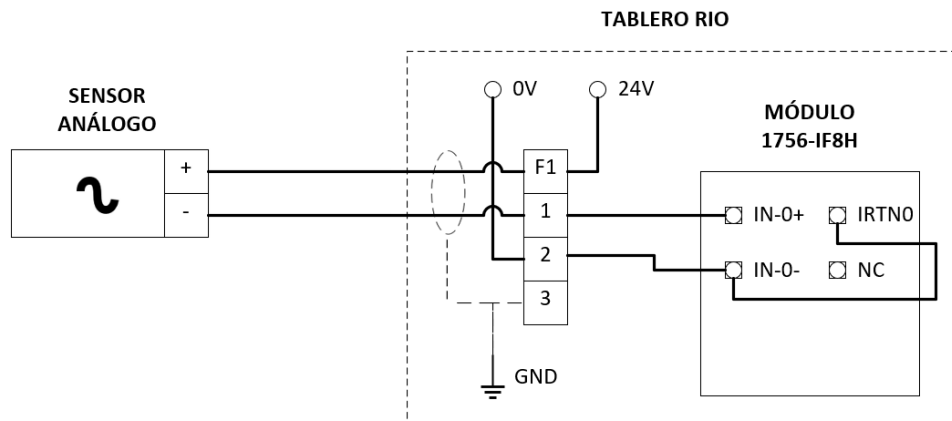
Los sensores analógicos son dispositivos que convierten una magnitud física en una señal eléctrica continua que varía en el rango de 4 a 20 mA, este rango de valores se traduce en la lógica del PLC como una señal analógica (por ejemplo, de 0 a 100%).

- a) Diagrama de lazo típico:** Los sensores analógicos se caracterizan por dos tipos de configuraciones: conexión de dos hilos y conexión de cuatro hilos. En la configuración de dos hilos, tanto la alimentación de 24 voltios como la señal se transmiten a través del mismo par de cables. En contraste, los sensores de cuatro hilos utilizan dos cables dedicados para la transmisión de la señal y otros dos para

la alimentación. En la Figura 13 y Figura 14 se muestran los diagramas de lazo típicos para las conexiones de dos hilos y cuatro hilos respectivamente.

Figura 13

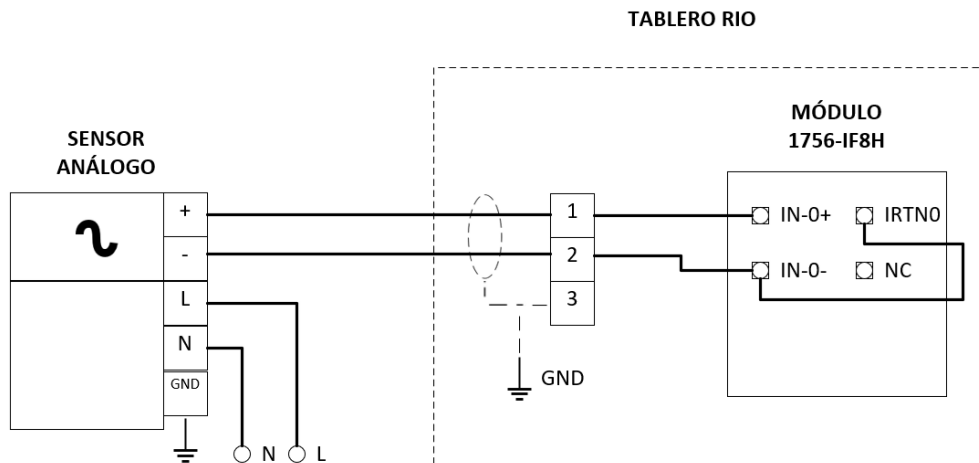
Diagrama de un lazo de un sensor analógico de 2 hilos



Nota: Elaboración propia.

Figura 14

Diagrama de lazo típico de un sensor analógico de 4 hilos



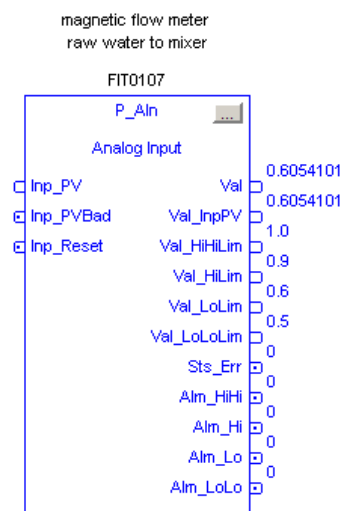
Nota: Elaboración propia.

b) Lógica de Control: Para programar las rutinas de los sensores analógicos, se utiliza la instrucción *P_Aln* (Figura 15), que forma parte de la librería *PlantPAX* versión 2.0. Esta instrucción ofrece las siguientes funciones preconfiguradas:

- Una entrada para la señal analógica sin escalar (*Inp_PV*).
- Parámetros de escalamiento para convertir la señal del sensor a unidades de ingeniería y opcionalmente proporciona parámetros para filtrar la señal de entrada.
- Alarmas alto-alto (*high-high*), alto (*high*), bajo (*low*) y bajo-bajo (*low-low*) con tiempos de retardos y bandas muertas configurables.
- Un modo mantenimiento en el cual se puede forzar el valor de la entrada, para el uso durante las tareas de mantenimiento del sensor.
- Una entrada simulada para usarse en pruebas, demostración o entrenamiento de los operadores.

Figura 15

Bloque lógico de la instrucción P_Aln



Nota: Captura de pantalla del software RSLogix 5000.


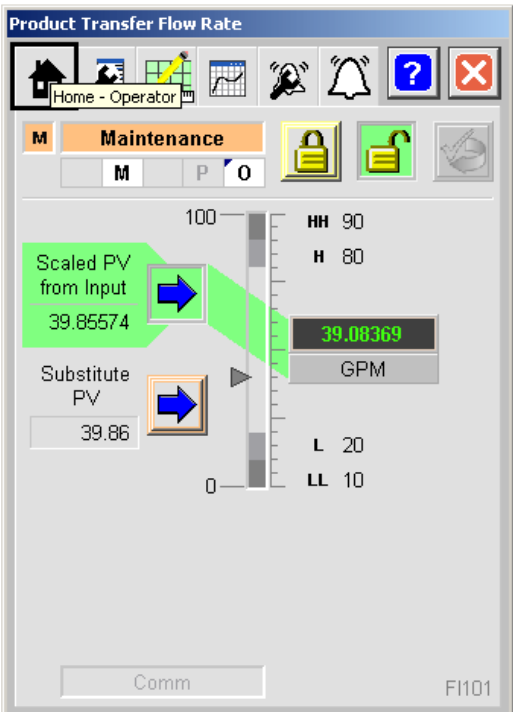
c) Interfaz gráfica: Para la creación de los elementos gráficos, se utilizan los componentes prediseñados de la instrucción *P_Aln*, disponibles en la librería *PlantPAX*. Como se observa en la Figura 16, se presenta un indicador que se

incorpora en las pantallas gráficas supervisión del sistema SCADA y una ventana emergente (*faceplate*) que permite al usuario interactuar con los parámetros de la instrucción. Esta ventana proporciona las siguientes funcionalidades:

- Visualización del valor de la señal analógica escalada a unidades de ingeniería, además proporciona la opción de configuración del nombre y de las unidades.
- Visualización del valor de la señal analógica escalada inclusive cuando esta entrada es forzada o es simulada a nivel de la lógica del PLC.
- Acceso a la ventana de mantenimiento del sensor, parámetros de configuración del sensor y los parámetros de configuración de las alarmas.

Figura 16

Indicador y ventana emergente de un sensor analógico

	
<p align="center">Indicador</p>	<p align="center">Ventana emergente</p>

Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.2.3. Configuración de las válvulas

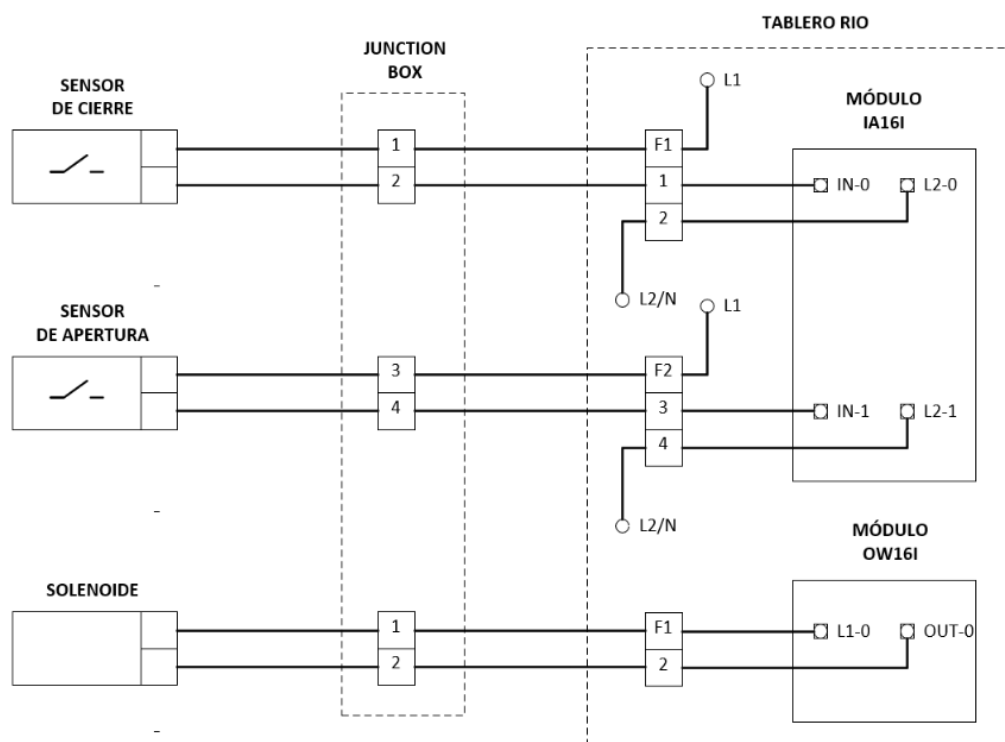
Las válvulas son dispositivos mecánicos que regulan el flujo principalmente de agua y pulpa. Son de suma importancia para el sistema de espesadores porque regulan el paso de la pulpa en las líneas donde se tiene una alta concentración de sólidos, además son importantes en las secuencias de arranque de las bombas evitando que estas trabajen en vacío durante el inicio del circuito correspondiente. El principal tipo de válvula que se trabaja en el proyecto es la válvula solenoide la cual se activa mediante una señal digital que proviene del PLC.

- a) Diagrama de lazo típico:** Las válvulas solenoide se activan a través de una señal digital de salida, y la posición de apertura y cierre se comprueba mediante dos sensores de posición (conocidos como *limit switch*), que confirman dichas posiciones. Para leer la posición de cada sensor, se emplea un canal de entrada digital independiente para cada uno. En la Figura 17 se muestra el diagrama típico de conexión de una válvula solenoide.
- b) Lógica de Control:** Para programar las rutinas de control de las válvulas, se utiliza la instrucción *P_ValveSO* (Figura 18), que forma parte de la librería *PlantPAX* versión 2.0. Esta instrucción ofrece las siguientes funciones preconfiguradas:
- Una salida para comandar la apertura y cierre de la válvula solenoide (*Out*), también proporciona dos entradas para la conexión de los sensores de confirmación de apertura y cierre.
 - Alarmas de falla al abrir (*fail open*), falla al cerrar (*fail close*), bloqueo total (*full stall*), bloqueo en tránsito (*transit stall*) y falla de los sensores de confirmación apertura/cierre (*limit switch failure*).
 - Una entrada disponible para conectar un bloque de permisivos (*P_Perm*), en el cual se agrupan las señales o condiciones que deben estar en estado normal para permitir la apertura de la válvula.

- Una entrada disponible para conectar un bloque de *Interlocks* (*P_Intlk*), en el cual se agrupan las señales o condiciones que deben estar en estado normal durante la operación de la válvula; de lo contrario, se producirá una alarma y se colocará la válvula en su estado base.
- Un modo mantenimiento que permite forzar la apertura o cierre de la válvula, utilizado específicamente durante las tareas de mantenimiento.
- La capacidad de simulación, en la cual la salida de la válvula permanece no energizada, pero el bloque lógico puede ser manipulado como si la válvula estuviera activa. Esta función es frecuentemente usada para pruebas, demostración o entrenamiento de los operadores.

Figura 17

Diagrama de lazo típico para una válvula solenoide



Nota: Elaboración propia.

Figura 18

Bloque lógico de la instrucción P_ValveSO



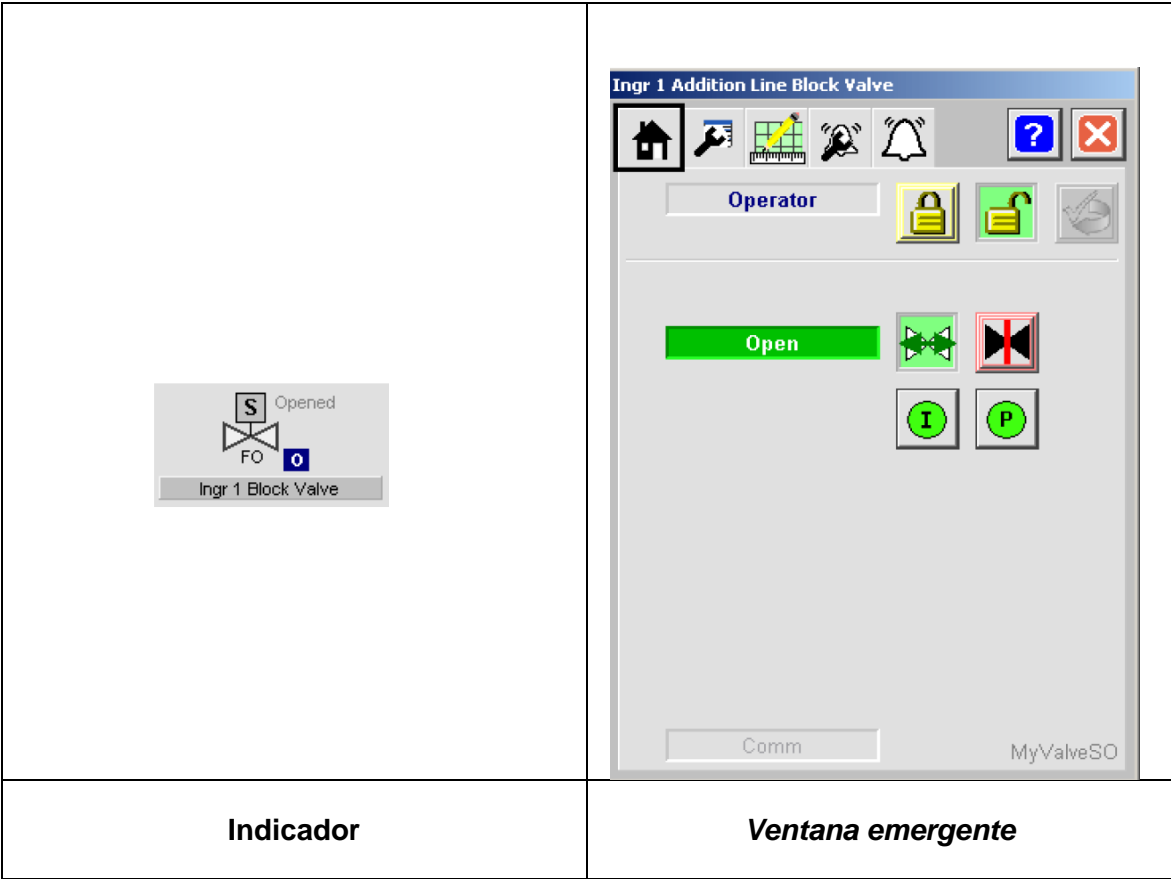
Nota: Captura de pantalla del software RSLogix 5000.

c) Interfaz gráfica: Para la creación de los elementos gráficos, se utilizan los componentes prediseñados de la instrucción *P_ValveSO*, disponibles en la librería *PlantPAx*. Como se observa en la Figura 19, se presenta un indicador que se incorpora en las pantallas gráficas de supervisión del sistema SCADA, y una ventana emergente (*faceplate*) que permite al usuario interactuar con los parámetros de la instrucción. Esta ventana proporciona las siguientes funcionalidades:

- Visualización de estado de la válvula, además proporciona la opción de configuración si es una válvula normalmente cerrada (*normally close*) o normalmente abierta (*normally open*).
- Visualización del estado de la válvula inclusive cuando esta entrada es forzada o es simulada a nivel de la lógica del PLC.
- Acceso a las ventanas donde se listan las señales de *interlocks* y permisos.
- Acceso a la ventana de mantenimiento de la válvula, parámetros de configuración de la válvula y los parámetros de configuración de las alarmas de las válvulas.

Figura 19

Indicador y ventana emergente de una válvula



Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.3. Configuración del arranque de los motores

Para el proyecto de automatización de los espesadores de cono profundo CCD 4 y CCD 5 se tiene dos tipos de sistemas de arranque para los motores: El arranque directo y el arranque mediante variador de velocidad.

Para los arranques directos se utiliza los relevadores electrónicos *E1 Plus* los cuales soportan comunicación con el protocolo *Ethernet/IP*.

Para los variadores de velocidad se utilizan los modelos *PowerFlex 525* y *PowerFlex 755*. Estos modelos de variadores tienen una tarjeta *EtherNet/IP* incorporada.

En la Tabla 4 se muestra la lista completa de motores indicando el tipo de arranque.

Tabla 4*Listado de motores*

Tag	Descripción	Tipo de Arranque
450-AG-001	CCD 4 agitador mezclador de tanque	Directo
450-AG-002	CCD 5 agitador mezclador de tanque	Directo
450-AG-004	CCD 5 agitador mezclador de tanque en la descarga	Directo
450-PU-001A	CCD 4 bomba 1 en servicio en la descarga	Variador 755
450-PU-001B	CCD 4 bomba 2 en <i>stand by</i> en la descarga	Variador 755
450-PU-002A	CCD 5 bomba 1 en servicio en la descarga	Variador 755
450-PU-002B	CCD 5 bomba 2 en <i>stand by</i> en la descarga	Variador 755
450-PU-003	CCD bomba sumidero del área	Directo
450-PU-004	CCD 4 bomba <i>P-duc</i>	Variador 525
450-PU-005	CCD 5 bomba <i>P-duc</i>	Variador 525
450-PU-006A	CCD 4 bomba A en servicio en el rebose	Variador 755
450-PU-006B	CCD 4 bomba 2 en <i>stand by</i> en el rebose	Variador 755
450-PU-007A	CCD 5 bomba 1 en servicio en la descarga diluida	Variador 755
450-PU-007B	CCD 5 bomba 2 en <i>standby</i> en la descarga diluida	Variador 755
450-PU-011	CCD 4 bomba de dosificación de floculante	Variador 525
450-PU-012	CCD 5 bomba de dosificación de floculante	Variador 525
450-PU-013	CCD 4 y CCD 5 bomba de dosificación de floculante	Variador 525
450-TM-001	CCD 4 motor de la rastra del espesador	Directo
450-TM-002	CCD 5 motor de la rastra del espesador	Directo

3.3.1. Modos de operación de los motores

Los motores tienen tres modos de operación claramente diferenciados:

- **Modo Remoto-operador:** En este modo el operador de sala de control a través de las pantallas gráficas del sistema SCADA tiene la posibilidad de ponerlo en marcha

o detenerlo según considere conveniente para el proceso. La mayoría de los equipos de la planta operarán en este modo por defecto.

- **Modo Remoto-programa:** En este modo el control total del equipo queda a cargo del sistema de control, de acuerdo con la lógica implementada en el PLC, este controlará los arranques y paradas del equipo. El operador de sala de control, a través de las pantallas gráficas del sistema SCADA, solo podrá monitorear el estado del equipo. Los motores que estén en este modo funcionarán automáticamente según las condiciones colocadas en el programa (por ejemplo, las bombas sumideros, se encienden con la activación del nivel alto del sumidero y se detienen con la activación del nivel bajo del mismo).
- **Modo Local:** En este modo el control del equipo estará a cargo de personal en campo. En campo se ha habilitado una botonera llamada *jog*, la cual mantendrá al motor encendido mientras se mantenga presionada, cuando se libere la botonera el motor se detendrá. El modo local se activa desde el sistema SCADA. Este modo solo es temporal con fines de mantenimiento y/o prueba de equipos, por ello tiene un tiempo máximo de activación (tiempo configurable). Luego de finalizado el tiempo de activación el control regresa a modo remoto de forma automática.

Para los arrancadores de las bombas hidráulicas 450-TM-001 y 450-TM-002 (correspondiente a cada espesador), el arranque se realiza solo en modo local desde el puente de cada espesador, no existe la posibilidad de un arranque remoto desde la sala de control o del panel de operador (*panelview*). Esta condición es estableció debido a que los arrancadores de los espesadores requieren un procedimiento especial que solamente se puede llevar a cabo de forma presencial desde el puente de cada espesador.

3.3.2. Configuración de los arrancadores directos

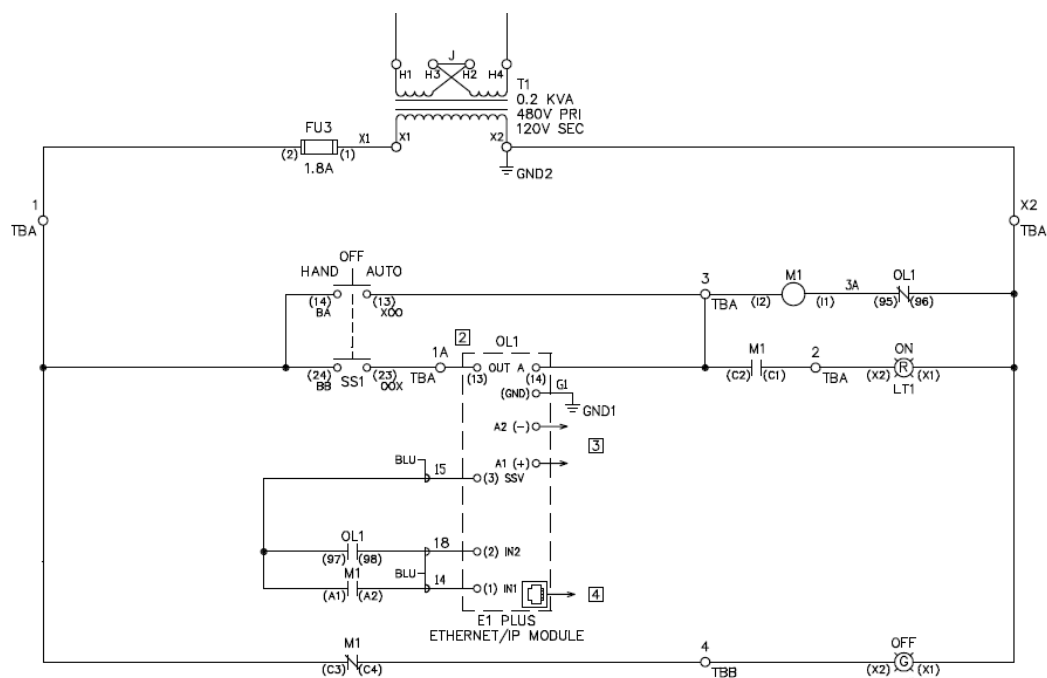
Para el caso de los arranques directos se utiliza como elemento de control el relevador electrónico *E1 Plus* de *Rockwell Automation*. Este relevador permite el control

del arranque y parada remota además de contar con sistemas de protección eléctrica para el motor.

a) **Diagrama de lazo:** El relevador *E1 Plus* está conectado mediante cableado *Ethernet* a la red de comunicación de motores. En la Figura 20 se muestra el diagrama del circuito eléctrico de control de arranque del motor. El relevador se encuentra directamente conectado a la bobina del contactor de arranque. En el momento que se envía el comando de arranque, el contactor de arranque y los contactos auxiliares M1 cambian de estado. Uno de los contactos auxiliares M1 se conecta al relevador como entrada para monitorear la confirmación de arranque. Otra señal que se monitorea es la de sobre carga de corriente (*overload*), la cual está conectada al relevador mediante el contacto auxiliar OL.

Figura 20

Diagrama unifilar de arranque de un motor con el relevador E1 Plus



Nota: Adaptado del plano eléctrico del Relevador E1 plus del proyecto.

b) Lógica de Control: Para programar las rutinas de control de los motores de arranque directo se utiliza la instrucción *P_Motor* (Figura 21), que forma parte de la librería *PlantPAx* versión 2.0. Esta instrucción ofrece las siguientes funciones preconfiguradas:

- Una salida para comandar el arranque y parada del motor y una entrada para la conexión de la señal de confirmación de arranque.
- Múltiples modos de operación: Operador, Manual, Mantenimiento, Programa, Sobreescritura (*Override*).
- Alarmas de falla al arrancar (*fail to start*), falla al parar (*fail to stop*), falla de entrada/salida (*I/O fault*) y falla por la activación de *interlock* (*interlock trip*).
- Una entrada disponible para conectar un bloque de permisivos (*P_Perm*), en el cual se agrupan las señales o condiciones que deben estar en estado normal para permitir el arranque del motor.
- Una entrada disponible para conectar un bloque de *interlocks* (*P_Intlk*), en el cual se agrupan las señales o condiciones que deben estar en estado normal durante la operación del motor; de lo contrario, se producirá una alarma y la detención del motor.
- La capacidad de simulación, en la cual la salida del bloque *P_Motor* se mantiene no energizada, pero el bloque lógico puede ser manipulado como si el motor estuviera activo. Esta función es frecuentemente usada para pruebas, demostración o entrenamiento de los operadores.

Figura 21

Bloque lógico de la instrucción P_Motor



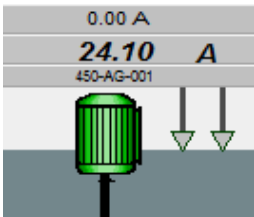
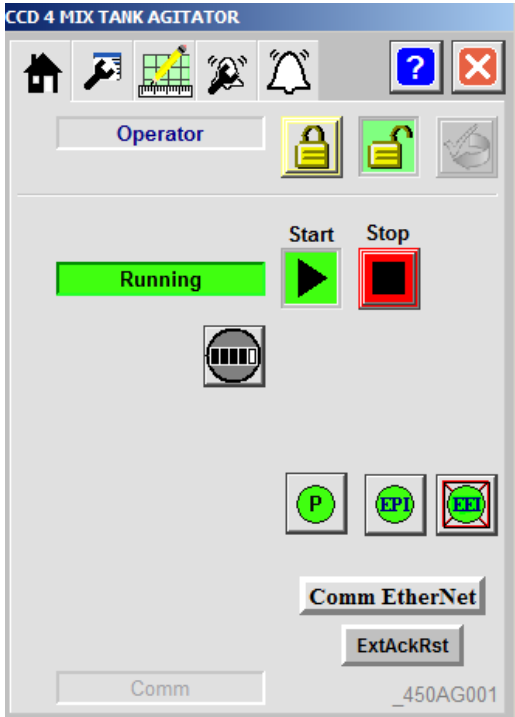
Nota: Captura de pantalla del software RSLogix 5000.

c) Interfaz gráfica: Para la creación de los elementos gráficos, se utilizan los componentes prediseñados de la instrucción *P_Motor*, disponibles en la librería *PlantPAx*. Como se observa en la Figura 22, se presenta un indicador que se incorpora en las pantallas gráficas de supervisión del sistema SCADA y una ventana emergente (*faceplate*) que permite al usuario interactuar con los parámetros de la instrucción. Esta ventana proporciona las siguientes funcionalidades:

- Visualización de estado del motor, además proporciona la opción de configuración si el motor presenta señal de confirmación de arranque.
- Acceso a las ventanas donde se listan las señales de *interlocks* internos (*EPI*), *interlocks* externos (*EEl*) y permisivos.
- Acceso a la ventana de mantenimiento del motor, parámetros de configuración del motor y los parámetros de configuración de las alarmas de los motores.

Figura 22

Indicador y ventana emergente de un motor de arranque directo

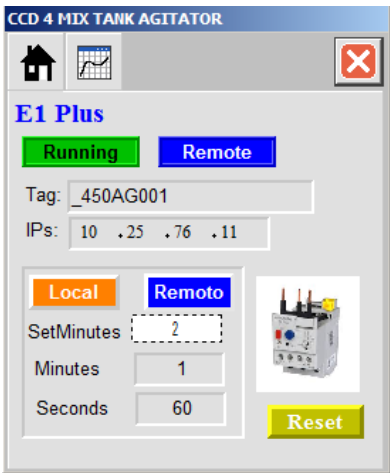
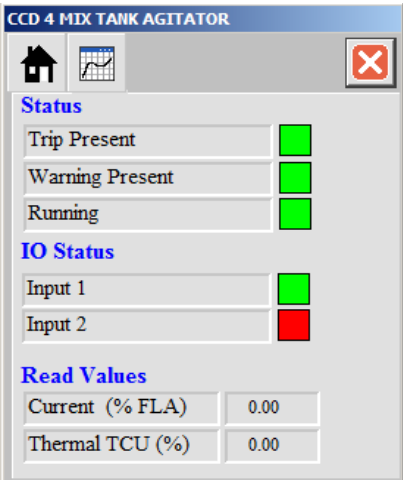
	
Indicador	Ventana emergente

Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Utilizando como referencia la librería *PlantPax* se desarrollaron ventanas emergentes adicionales que visualizan los estados de comunicación obtenidos del relevador *E1 Plus*, en la Figura 23 se muestra el detalle de las ventanas emergentes desarrolladas.

Figura 23

Ventana emergente de estado del relevador E1 plus

	
Descripción	Estado de equipo, entradas y salidas

Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.3.3. Configuración de los variadores de velocidad

En el caso de los variadores de los variadores de velocidad, se emplean dos tipos: el *PowerFlex 525* y el *PowerFlex 755*. Los variadores *PowerFlex 525* se utilizan para equipos de menor potencia, mientras que los *PowerFlex 755* se destinan a equipos de mayor potencia.

- a) **Diagrama de lazo:** Los variadores de velocidad están conectados mediante cableado *Ethernet* a la red de comunicación de motores. En la Figura 24 y en la Figura 25 se muestran las conexiones de los variadores *PowerFlex 525* y *PowerFlex 725* respectivamente. Los variadores de velocidad incluyen internamente los circuitos para el arranque y la generación de pulsos necesarios para controlar la velocidad del motor. La confirmación del arranque y las protecciones se monitorean a través de comunicación *Ethernet/IP*.

b) Lógica de Control: Para el desarrollo de la rutina de control de los variadores de velocidad *PowerFlex 525* y *Powerflex 755* se utiliza la instrucción *P_VSD*, la cual se muestra en la Figura 26, esta instrucción forma parte de la librería *PlantPAX* versión 2.0. Al utilizar esta función se obtiene los siguientes beneficios:

- Una salida para comandar el arranque y parada del variador, una salida para la referencia de velocidad, una entrada para la señal de confirmación de arranque del variador y una entrada para la velocidad real del variador.
- Alarmas de falla al arrancar (*fail to start*), falla al parar (*fail to stop*), falla del variador (*fail drive*), falla de entrada/salida (*I/O fault*) y falla por la activación de *interlock* (*interlock trip*).
- Una entrada disponible para conectar un bloque de permisivos (*P_Perm*), en el cual se agrupan las señales o condiciones que deben estar en estado normal para permitir el arranque del variador.
- Una entrada disponible para conectar un bloque de *interlocks* (*P_Intlk*), en el cual se agrupan las señales o condiciones que deben estar en estado normal durante el funcionamiento del variador; de lo contrario, se producirá una alarma que ocasionará la detención del variador.
- La capacidad de simulación, en la cual la salida del bloque *P_VSD* se mantiene no energizada, pero el bloque lógico puede ser manipulado como si el variador estuviera activo. Esta función es frecuentemente usada para pruebas, demostración o entrenamiento de los operadores.

Diagrama unifilar de arranque del Powerflex 525



Diagrama unifilar de arranque del PowerFlex 755



Figura 26

Bloque lógico de la instrucción P_VSD



Nota: Captura de pantalla del software RSLogix 5000.

c) Interfaz gráfica: Para la creación de los elementos gráficos, se utilizan los componentes prediseñados de la instrucción *P_VSD*, disponibles en la librería *PlantPAx*. Como se observa en la Figura 27, se presenta un indicador que se incorpora en las pantallas gráficas del sistema SCADA, y una ventana emergente

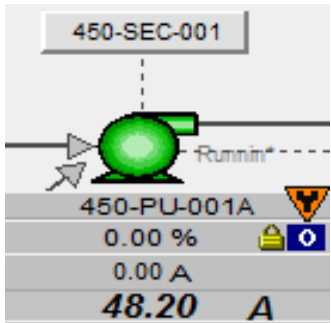
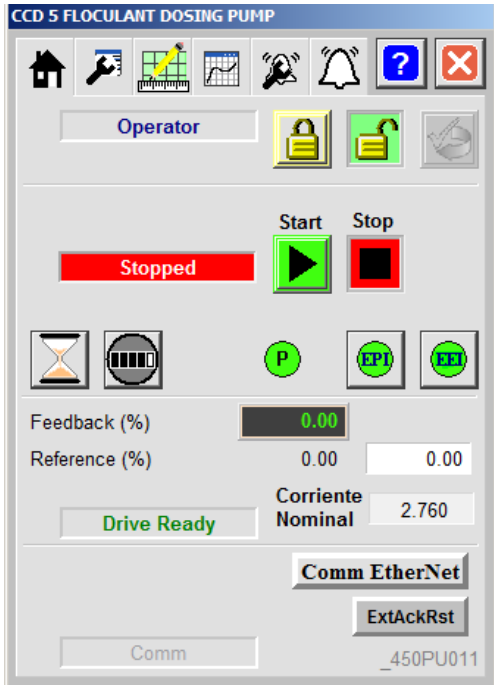
(faceplate) que permite al usuario interactuar con los parámetros de la instrucción.

Esta ventana proporciona las siguientes funcionalidades:

- Visualización de estado del variador, además proporciona la opción de configuración si el variador presenta señal de confirmación de arranque.
- Acceso a las ventanas donde se listan las señales de *interlocks* internos (*EPI*), *interlocks* externos (*EEL*) y permisivos.
- Acceso a la ventana de mantenimiento del variador, parámetros de configuración del variador y los parámetros de configuración de las alarmas de los variadores.

Figura 27

Indicador y ventana emergente de un variador de velocidad

	
<p align="center">Indicador</p>	<p align="center">Ventana emergente</p>

Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Utilizando como referencia la librería *PlantPax* se desarrollaron ventanas emergentes adicionales que visualizan los estados de comunicación obtenidos de los

variadores, en la Figura 28 y Figura 29 se muestran las ventanas emergentes desarrolladas.

Figura 28

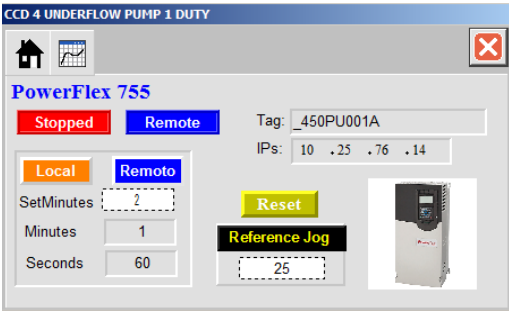
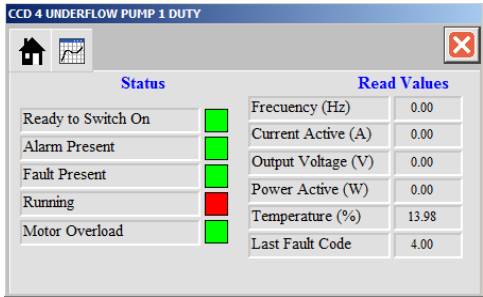
Ventana emergente de estado del variador PowerFlex 525

	
Descripción	Estado del Arrancador

Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Figura 29

Ventana emergente de estado del variador PowerFlex 725

	
Descripción	Estado de equipo

Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.4. Configuración de las secuencias de arranque

Las secuencias de arranque consisten en una serie de pasos necesarios desde una perspectiva operativa para asegurar un arranque seguro y eficiente de las bombas de descarga. Es importante realizar el arranque de estas bombas correctamente para evitar que trabajen en vacío (sin carga) o sin agua de sello. En la Tabla 5 se muestra la lista completa de las secuencias del proyecto.

Tabla 5

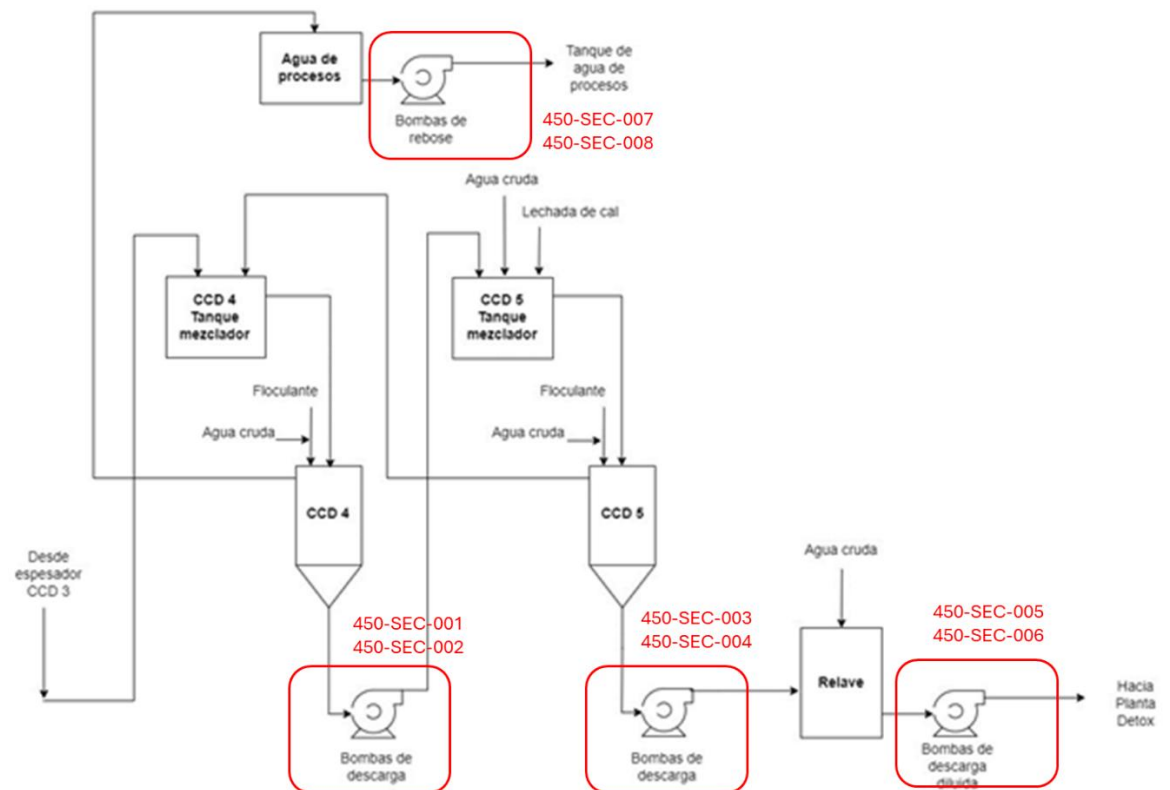
Listado de secuencias

Tag	Descripción
450-SEC-001	Secuencia de encendido bomba 450-PU-001A, descarga del espesador
450-SEC-002	Secuencia de encendido bomba 450-PU-001B, descarga del espesador
450-SEC-003	Secuencia de encendido bomba 450-PU-002A, descarga del espesador
450-SEC-004	Secuencia de encendido bomba 450-PU-002B, descarga del espesador
450-SEC-005	Secuencia de encendido bomba 450-PU-007A, descarga diluida
450-SEC-006	Secuencia de encendido bomba 450-PU-007B, descarga diluida
450-SEC-007	Secuencia de encendido bomba 450-PU-006A, rebose
450-SEC-008	Secuencia de encendido bomba 450-PU-006B, rebose

La Figura 30 ilustra en detalle de las ubicaciones de todas las secuencias del proyecto.

Figura 30

Ubicación de las secuencias en el diagrama de flujo

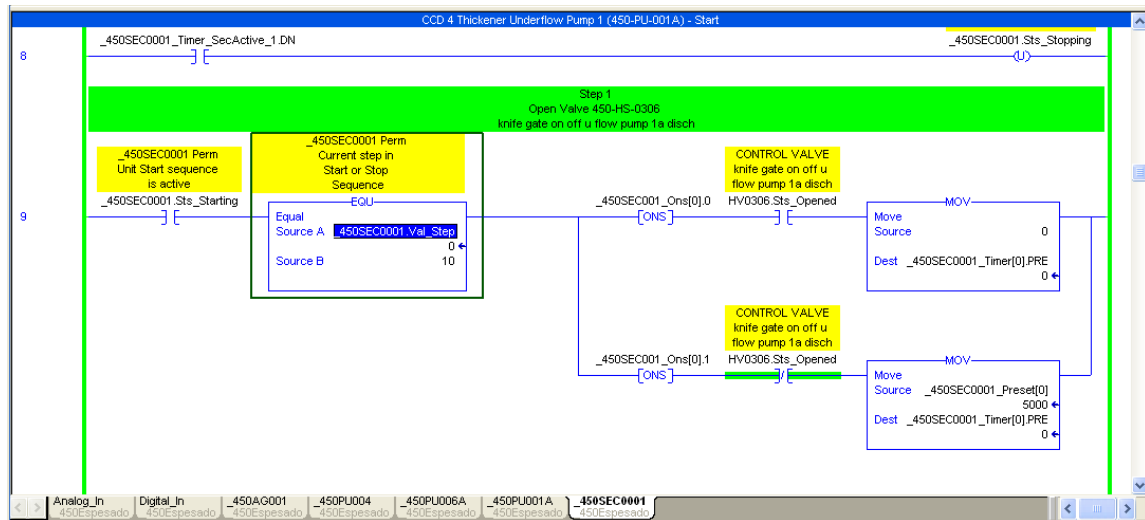


Nota: Elaboración propia.

- a) Lógica de Control:** La rutina de control de las secuencias se desarrolla utilizando un lenguaje escalera (*ladder*) con bloques temporizadores para sincronizar el orden de los pasos. La Figura 31 se muestra uno de los pasos programados en el PLC mediante el software *RSLogix 5000*.

Figura 31

Rutina programada en el PLC para una secuencia

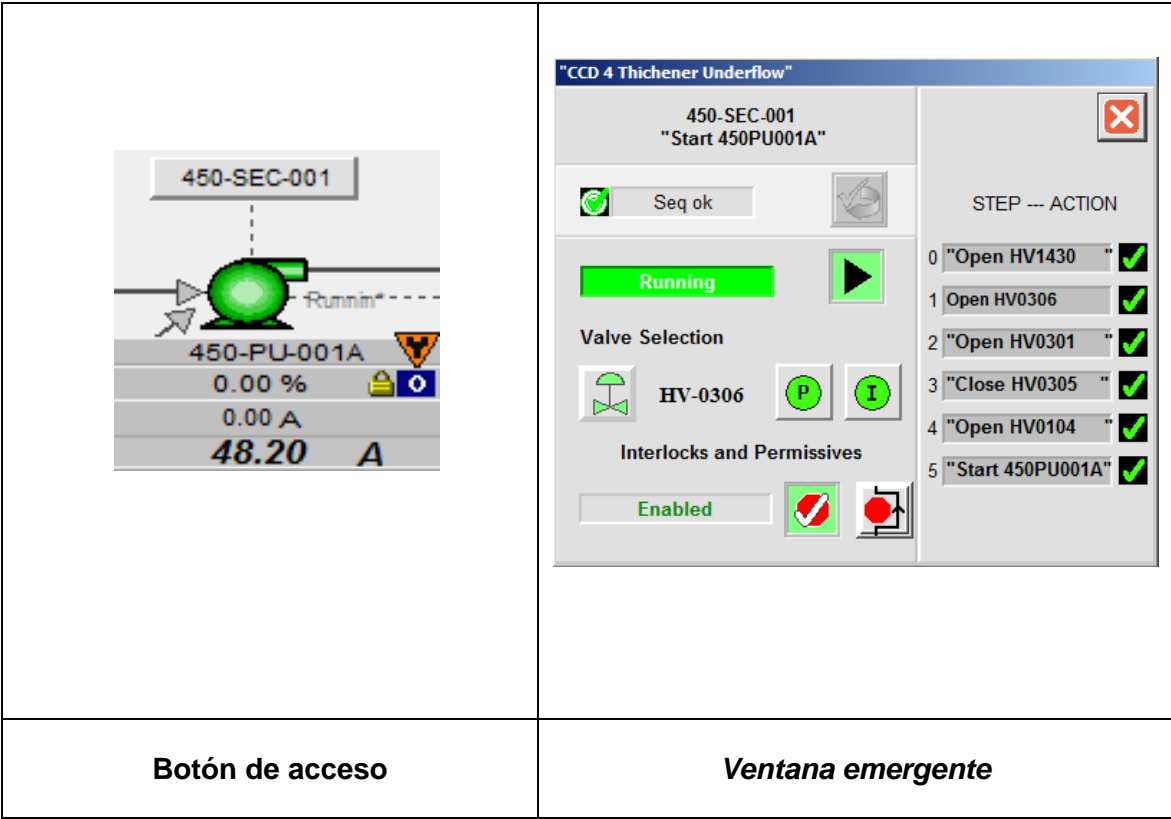


Nota: Captura de pantalla del software RSLogix 5000.

- b) Interfaz gráfica:** Se desarrollo una ventana emergente específica para las secuencias con el fin de inicia o detener la secuencia. Esta ventana permite monitorear el estado de los pasos; un carácter "X", indica que el paso no está activo, mientras que un carácter de verificación señala que el paso ya se ha ejecutado. La Figura 32 se muestra el botón de acceso, ubicado en la parte superior de la bomba correspondiente a la secuencia, que permite acceder a la ventana emergente.

Figura 32

Botón de acceso y ventana emergente de una secuencia

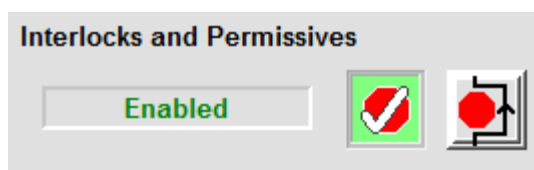


Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Para los procedimientos de mantenimiento y pruebas, puede ser necesario deshabilitar permisos e *interlocks* para iniciar la secuencia sin la necesidad de cumplir todas las condiciones preestablecidas. Para estas situaciones, se habilita la opción de *bypass* en las secuencias, esta opción se programó y se colocó un botón para habilitarlos o deshabilitarlos en la Figura 33 se muestran los permisos e *interlocks* habilitados (*enabled*) y en la Figura 34 se muestran los permisos e *interlocks* deshabilitados (*bypassed*).

Figura 33

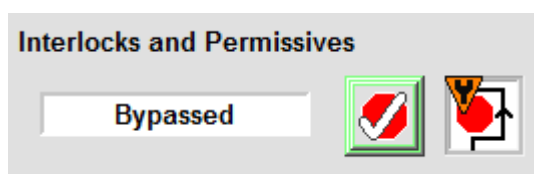
Indicador que los interlock están activados



Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Figura 34

Indicador que los enclavamientos (interlocks) están en bypass



Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.4.1. Secuencia de arranque 450-SEC-001

La secuencia 450-SEC-001 controla el encendido de la bomba 450-PU-001A en la descarga del espesador CCD 4. Esta secuencia comenzará abriendo la válvula de sello de agua, seguida de la apertura de la válvula de succión, luego la válvula de descarga y, finalmente, el encendido de la bomba. Los pasos detallados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Fases de la secuencia 450-SEC-001

Paso	Equipo	Acción
1	HV-1430 – Válvula Sello de agua	Open (Abrir)
2	HV-0306 ó HV-0307 – Válvula de distribución 450-TK-002 o 450-TK-004	Open (Abrir)
3	HV-0301 – Válvula de descarga Bomba 450-PU-001A	Open (Abrir)
4	HV-0305 - Válvula de descarga Bomba 450-PU-001B	Close (Cerrar)

5	HV-0104 – Válvula de succión Bomba 450-PU-001A	<i>Open</i> (Cerrar)
6	450-PU-001A – Bomba de descarga	<i>Start</i> (Encendido)

Para iniciar la secuencia, el operador debe abrir la ventana emergente de la secuencia 450-SEC-001, la cual se accede desde el botón ubicado en la parte superior del gráfico de la bomba 450-PU-001A y hacer clic en el botón de arranque. La apertura y cierre de las válvulas se realizará automáticamente una vez que se inicie la secuencia. Si la bomba 450-PU-001A se detiene, las válvulas HV-1430, HV-0104, HV-0301 y HV-0306 o HV-0307 se cerrarán automáticamente.

3.4.2. Secuencia de arranque 450-SEC-002

La secuencia 450-SEC-002 controla el encendido de la bomba 450-PU-001B en la descarga del espesador CCD 4. Esta secuencia comenzará abriendo la válvula de sello de agua, seguida de la apertura de la válvula de succión, luego la válvula de descarga y, finalmente, el encendido de la bomba. Los pasos detallados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7

Fases de la secuencia 450-SEC-002

Paso	Equipo	Acción
1	HV-1426 – Válvula Sello de agua	<i>Open</i> (Abrir)
2	HV-0306 ó HV-0307 – Válvula de distribución 450-TK-002 o 450-TK-004	<i>Open</i> (Abrir)
3	HV-0305 – Válvula de descarga Bomba 450-PU-001B	<i>Open</i> (Abrir)
4	HV-0301 - Válvula de descarga Bomba 450-PU-001A	<i>Close</i> (Cerrado)
5	HV-0105 – Válvula de succión Bomba 450-PU-001B	<i>Open</i> (Abrir)
6	450-PU-001B – Bomba de descarga	<i>Start</i> (Encendido)

Para iniciar la secuencia, el operador debe abrir la ventana emergente de la secuencia 450-SEC-002, la cual se accede desde el botón ubicado en la parte superior del gráfico de la bomba 450-PU-001B y hacer clic en el botón de arranque. La apertura y cierre de las válvulas se realizará automáticamente una vez que se inicie la secuencia. Si la bomba 450-PU-001B se detiene, las válvulas HV-1426, HV-0105, HV-0305 y HV-0306 o HV-0307 se cerrarán automáticamente.

3.4.3. Secuencia de arranque 450-SEC-003

La secuencia 450-SEC-003 controla el encendido de la bomba 450-PU-002A en la descarga del espesador CCD 5. Esta secuencia comenzará abriendo la válvula de sello de agua, seguida de la apertura de la válvula de succión, luego la válvula de descarga y, finalmente, el encendido de la bomba. Los pasos detallados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Fases de la secuencia 450-SEC-003

Paso	Equipo	Acción
1	HV-1422 – Válvula Sello de agua	Open (Abrir)
2	HV-0601 – Válvula de descarga Bomba 450PU002A	Open (Abrir)
3	HV-0604 - Válvula de descarga Bomba 450PU002B	Close (Cerrado)
4	HV-0405 – Válvula de succión Bomba 450PU001A	Open (Abrir)
5	450-PU-002A – Bomba de descarga	Start (Encendido)

Para iniciar la secuencia, el operador debe abrir la ventana emergente de la secuencia 450-SEC-003, la cual se accede desde el botón ubicado en la parte superior del gráfico de la bomba 450-PU-002A y hacer clic en el botón de arranque. La apertura y cierre de las válvulas se realizará automáticamente una vez que se inicie la secuencia. Si la bomba 450-PU-002A se detiene, las válvulas HV-1422, HV-0405 y HV-0601 se cerrarán automáticamente.

3.4.4. Secuencia de arranque 450-SEC-004

La secuencia 450-SEC-004 controla el encendido de la bomba 450-PU-002B en la descarga del espesador CCD 5. Esta secuencia comenzará abriendo la válvula de sello de agua, seguida de la apertura de la válvula de succión, luego válvula de descarga y, finalmente, el encendido de la bomba, los pasos a detallados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9

Fases de la secuencia 450-SEC-004

Paso	Equipo	Acción
1	HV-1418 – Válvula Sello de agua	<i>Open</i> (Abrir)
2	HV-0604 – Válvula de descarga Bomba 450PU002B	<i>Open</i> (Abrir)
3	HV-0601 - Válvula de descarga Bomba 450PU002A	<i>Close</i> (Cerrado)
4	HV-0406 – Válvula de succión Bomba 450PU001B	<i>Open</i> (Abrir)
5	450-PU00-2B – Bomba de descarga	<i>Start</i> (Encendido)

Para iniciar la secuencia, el operador debe abrir la ventana emergente de la secuencia 450-SEC-004, la cual se accede desde el botón ubicado en la parte superior del gráfico de la bomba 450-PU-002B y hacer clic en el botón de arranque. La apertura y cierre de las válvulas se realizará automáticamente una vez que se inicie la secuencia. Si la bomba 450-PU-002B se detiene, las válvulas HV-1418, HV-0406 y HV-0604 se cerrarán automáticamente.

3.4.5. Secuencia de arranque 450-SEC-005

La secuencia 450-SEC-005 controla el encendido de la bomba 450-PU-007A en la descarga del tanque 450-TK-004. Esta secuencia comenzará abriendo la válvula de sello de agua, luego verificará el nivel del tanque 450-TK-004, seguida de la apertura de la válvula de succión, luego la válvula de descarga y, finalmente, el encendido de la bomba. Los pasos detallados se presentan en la Tabla 10:

Tabla 10*Fases de la secuencia 450-SEC-005*

Paso	Equipo	Acción
1	HV-1414 – Válvula Sello de agua	<i>Open</i> (Abrir)
2	LAL-0709 – Verifica Alarma de nivel bajo Tanque 450-TK-004	Verifica
3	HV-0703 - Válvula de descarga Bomba 450-PU-007A	<i>Open</i> (Abrir)
4	HV-0706 – Válvula de descarga Bomba 450-PU-007B	<i>Close</i> (Cerrado)
5	HV-0702 - Válvula de succión Bomba 450-PU-007A	<i>Open</i> (Abrir)
6	450-PU-007A – Bomba de dilución	<i>Start</i> (Encendido)

Para iniciar la secuencia, el operador debe abrir la ventana emergente de la secuencia 450-SEC-005, la cual se accede desde el botón ubicado en la parte superior del gráfico de la bomba 450-PU-007A y hacer clic en el botón de arranque. La apertura y cierre de las válvulas se realizará automáticamente una vez que se inicie la secuencia. Si la bomba 450-PU-007A se detiene, ya sea por una falla o parada programada, se activará un mecanismo que cerrará automáticamente las válvulas HV-1414, HV-0702 y HV-0703, garantizando la seguridad del sistema, protección de los activos operativos y evitando posibles fugas o interrupciones en el proceso.

3.4.6. Secuencia de arranque 450-SEC-006

La secuencia 450-SEC-006 se encarga de controlar el encendido de la bomba 450-PU-007B, asegurando un funcionamiento ordenado y seguro en la descarga del tanque 450-TK-004. Esta secuencia comenzará abriendo la válvula de sello de agua, luego verificará el nivel del tanque 450-TK-004, seguida de la apertura de la válvula de succión, luego la válvula de descarga HV-0703 y, finalmente, el encendido de la bomba. Los pasos detallados se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11*Fases de la secuencia 450-SEC-006*

Paso	Equipo	Acción
1	HV-1410 – Válvula Sello de agua	<i>Open</i> (Abrir)
2	LAL-0709 – Verifica Alarma de nivel bajo Tanque 450-TK-004	Verifica
3	HV-0706 - Válvula de descarga Bomba 450-PU-007B	<i>Open</i> (Abrir)
4	HV-0703 – Válvula de descarga Bomba 450-PU-007A	<i>Close</i> (Cerrado)
5	HV-0701 - Válvula de succión Bomba 450-PU-007B	<i>Open</i> (Abrir)
6	450-PU-007B – Bomba de dilución	<i>Start</i> (Encendido)

Para iniciar la secuencia, el operador debe abrir la ventana emergente de la secuencia 450-SEC-006, la cual se accede desde el botón ubicado en la parte superior del gráfico de la bomba 450-PU-007B y hacer clic en el botón de arranque. La apertura y cierre de las válvulas se realizará automáticamente una vez que se inicie la secuencia. Si la bomba 450-PU-007B se detiene, ya sea por una falla o parada programada, se activará un mecanismo que cerrará automáticamente las válvulas HV1410, HV0701 y HV0701, garantizando la seguridad del sistema, protección de los activos operativos y evitando posibles fugas o interrupciones en el proceso.

3.4.7. Secuencia de arranque 450-SEC-007

La secuencia 450-SEC-007 se encarga de controlar el encendido de la bomba 450-PU-006A, asegurando un funcionamiento ordenado y seguro en la descarga del tanque 450-TK-003. Esta secuencia comenzará abriendo la válvula de sello de agua, luego verificará el nivel del tanque 450-TK-004, seguida de la apertura de la válvula de succión, luego la válvula de descarga y, finalmente, el encendido de la bomba. Los pasos detallados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12*Fases de la secuencia 450-SEC-007*

Pasos	Equipo	Acción
1	HV-1406 – Válvula Sello de agua	<i>Open</i> (Abrir)
2	LAL-0805 – Verifica Alarma de nivel bajo Tanque 450-TK-003	Verifica
3	HV-0803 - Válvula de descarga Bomba 450-PU-006A	<i>Open</i> (Abrir)
4	HV-0804 – Válvula de descarga Bomba 450-PU-006B	<i>Close</i> (Cerrar)
5	HV-0802 - Válvula de succión Bomba 450-PU-006A	<i>Open</i> (Abrir)
6	450-PU-006A – Bomba de dilución	<i>Start</i> (Encendido)

Para iniciar la secuencia, el operador debe abrir la ventana emergente de la secuencia 450-SEC-007, la cual se accede desde el botón ubicado en la parte superior del gráfico de la bomba 450-PU-006A y hacer clic en el botón de arranque. La apertura y cierre de las válvulas se realizará automáticamente una vez que se inicie la secuencia. Si la bomba 450-PU-006A se detiene, ya sea por una falla o parada programada, se activará un mecanismo que cerrará automáticamente las válvulas HV-1406, HV-0802 y HV-0803, garantizando la seguridad del sistema, protección de los activos operativos y evitando posibles fugas o interrupciones en el proceso.

3.4.8. Secuencia de arranque 450-SEC-008

La secuencia 450-SEC-008 se encarga de controlar el encendido de la bomba 450-PU-006B, asegurando un funcionamiento ordenado y seguro en la descarga del tanque 450-TK-003. Esta secuencia comenzará abriendo la válvula de sello de agua, luego verificará el nivel del tanque 450-TK-004, seguida de la apertura de la válvula de succión, luego la válvula de descarga y, finalmente, el encendido de la bomba. Los pasos detallados se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13*Fases de la secuencia 450-SEC-008*

Pasos	Equipo	Acción
1	HV-1402 – Válvula Sello de agua	<i>Open</i> (Abrir)
2	LAL-0805 – Verifica Alarma de nivel bajo Tanque 450-TK-003	Verifica
3	HV-0804 - Válvula de descarga Bomba 450-PU-006B	<i>Open</i> (Abrir)
4	HV-0803 – Válvula de descarga Bomba 450-PU-006A	<i>Close</i> (Cerrar)
5	HV-0801 - Válvula de succión Bomba 450-PU-006B	<i>Open</i> (Abrir)
6	450-PU-006B – Bomba de dilución	<i>Start</i> (Encendido)

Para iniciar la secuencia, el operador debe abrir la ventana emergente de la secuencia 450-SEC-008, la cual se accede desde el botón ubicado en la parte superior del gráfico de la bomba 450-PU-006B y hacer clic en el botón de arranque. La apertura y cierre de las válvulas se realizará automáticamente una vez que se inicie la secuencia. Si la bomba 450-PU-006B se detiene, las válvulas HV-1402, HV-0801 y HV-0804 se cerrarán automáticamente.

3.5. Configuración de los controladores

Los controladores son fundamentales para la operación segura del sistema, ajustando las variables de proceso dentro de rangos predefinidos para evitar condiciones anómalas. Su configuración está orientada a mantener parámetros críticos dentro de rangos preestablecidos, evitando condiciones anómalas que puedan comprometer la seguridad, eficiencia o integridad de los equipos y procesos asociados. Cada controlador ha sido ajustado teniendo en cuenta las características específicas del sistema y los requisitos operativos definidos para el proyecto. En la Tabla 14 se muestra la lista completa de los controladores implementados en el proyecto.

Tabla 14*Listado de controladores*

Tag	Descripción	Elemento de control
FIC-0107	CCD 4 Controlador de dosificación de floculante	HV-0107
FIC-0106	CCD 4 Controlador de dosificación de agua para diluir floculante	HV-0106
FIC-0103	CCD 4 Controlador de dosificación de agua para diluir pulpa	HV-0103
FIC-0302	CCD 4 Controlador de la pulpa en la descarga	450-PU-001A 450-PU-001B
FIC-0408	CCD 5 Controlador de dosificación de floculante	HV-0408
FIC-0407	CCD 5 Controlador de agua para diluir floculante	HV-0407
FIC-0401	CCD 5 Controlador de agua para diluir pulpa	HV-0401
FIC-0602	CCD 5 Controlador de la pulpa en la descarga	450-PU-002A 450-PU-002B
LIC-0805	Controlador de nivel del tanque 450-TK-003	450-PU-006A 450-PU-006B
LIC-0709	Controlador de nivel del tanque 450-TK-004	450-PU-007A 450-PU-007B
FIC-0708	Controlador de flujo del tanque 450-TK-004	450-PU-007A 450-PU-007B
AIC-0110	Controlador de PH del tanque 450-TK-001	AV-0110
AIC-0410	Controlador de PH del tanque 450-TK-002	AV-0410

3.5.1. Modos de operación de los controladores

Los controladores tienen dos modos de operación claramente diferenciados:

- **Modo Operador-manual:** En este modo el operador tiene control directo sobre la señal de salida CV (variable controlada), no se ejecuta ninguna lógica ni algoritmo para operar en este modo.
- **Modo Operador-automático:** En este modo el operador tiene el control del punto de referencia (*set point*) del controlador. La señal de salida CV (variable controlada) será calculada de acuerdo con el algoritmo PID en el procesador *ControlLogix*. Este es el modo en el cual deben trabajar todos los controladores PID de la planta.

3.5.2. Desarrollo de las rutinas controladores

Para la configuración de los controladores se tiene en cuenta que previamente se han configurados los sensores analógicos correspondiente al proceso y también los motores con variadores de velocidad que corresponden al controlador.

a) Lógica de Control: Para programar las rutinas de los controladores se utiliza la instrucción *Enhance PIDE* (Figura 35), que forma parte de la librería *PlantPax* versión 2.0. Esta instrucción ofrece las siguientes funciones preconfiguradas:

- Capacidad para programar los parámetros de un controlador PID. Permitiendo colocar valores para las ganancias proporcionales, integral y derivativa.
- Escalamiento de la señal de proceso (PV) y también la señal controlada (CV), por ejemplo, RPM, Hz, %.
- Capacidad de selección del modo de cálculo del error, permitiendo ajustar cuando la señal PV y CV son directamente proporcionales o inversamente proporcionales.
- Instrucción preconstruida de *open loop autotuner* que permite un cálculo rápido de los parámetros de sintonización.

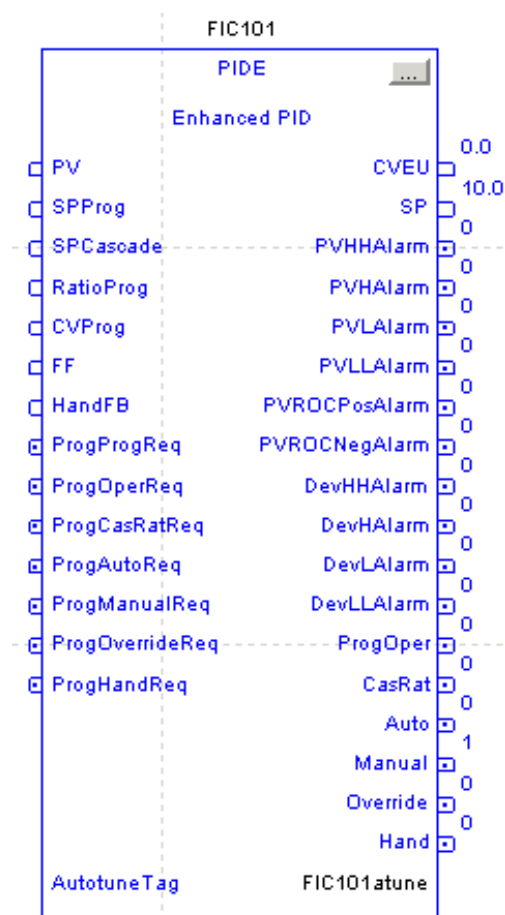
b) Interfaz gráfica: Para la creación de los elementos gráficos, se utilizan los componentes prediseñados de la instrucción *P_PIDE*, disponibles en la librería *PlantPax*. Como se observa en la Figura 36, se presenta un indicador que se incorpora en las pantallas gráficas de supervisión del sistema SCADA, y una ventana emergente (*faceplate*) que permite al usuario interactuar con los parámetros de la instrucción. Esta ventana proporciona las siguientes funcionalidades:

- Visualización el valor de la variable de proceso (PV) y la variable controlada (CV).
- Un dial para ajustar el valor de la variable controlada (CV) en el modo operador-programa.

- Acceso a la ventana de mantenimiento del controlador, parámetros de configuración del controlador y los parámetros de configuración de las alarmas de controlador.
- Acceso a la ventana de ingeniería para la configuración del modo de funcionamiento.
- Acceso a la ventana de configuración de las alarmas en la cual se establecen los límites de activación de estas.

Figura 35

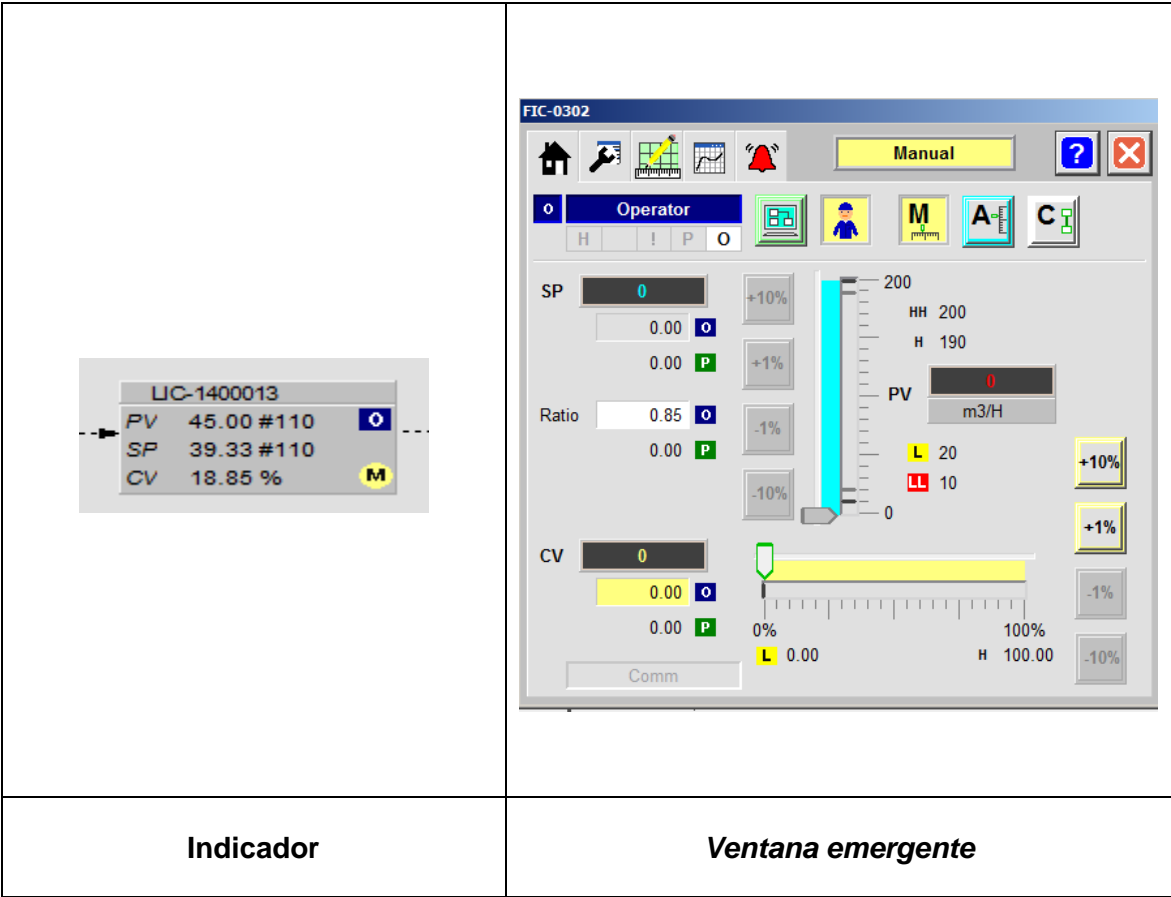
Bloque lógico enhanced PID (PIDE)



Nota: Captura de pantalla del software RSLogix 5000.

Figura 36

Indicador y ventana emergente de un controlador



Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.6. Controladores del espesador CCD 4

Los controladores del espesador CCD 4 se han desarrollado con el objetivo de maximizar la eficiencia operativa y garantizar la continuidad del proceso de espesado. Estos controladores automatizan las operaciones clave, incluyendo la dosificación precisa del floculante, lo cual contribuye a mejorar la calidad del proceso y minimizar el desperdicio de insumos. Además, han sido configurados para prevenir interrupciones en el sistema, específicamente aquellas relacionadas con la acumulación de material en la parte inferior del espesador debido a altas concentraciones de sólidos, que podrían generar bloqueos o afectar el rendimiento del equipo.

3.6.1. Controlador de dosificación de floculante

Este controlador regula la dosificación de floculante al ingreso del espesador. Para establecer el punto de referencia del flujo de floculante, que proviene de la planta de preparación de floculante, en primer lugar, se calcula la fracción de sólidos en la pulpa que ingresa en la alimentación del espesador. La fracción en masa de sólidos en la alimentación (*WTFR*) se define en la ecuación (1).

$$WTFR = \frac{m_{sólido}}{m_{pulpa}} \quad (1)$$

Otra forma que se puede representar el *WTFR* es en función de la densidad de pulpa al ingreso, la densidad del sólido y la densidad del líquido como se indica en la ecuación (2), la demostración se encuentra desarrollada en el Anexo 1.

$$WTFR = \frac{(FSSG - DL) \times DS}{(DS - DL) \times FSSG} \quad (2)$$

Los parámetros que se requieren para realizar el cálculo del *WTFR* de acuerdo con la ecuación (2) están detallados en la Tabla 15.

Tabla 15

Variables consideradas para el cálculo del WTFR

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
<i>WTFR</i>	Fracción en masa de sólidos en la alimentación del espesador	-	Cálculo
<i>FSSG</i>	Densidad de la pulpa al ingreso	SG	Lectura del sensor DIT-0400009
<i>DS</i>	Densidad del sólido	SG	Ingreso manual
<i>DL</i>	Densidad del líquido	SG	Ingreso manual

Finalmente, para obtener el punto de referencia de floculante (SP0107) se multiplica la fracción en masa de sólidos en la alimentación con el flujo, con la densidad de la pulpa de alimentación y el ratio de dosificación, ingreso manual que coloca el operador, además se divide el producto entre la concentración de solución que también es un ingreso manual. En la ecuación (3) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del punto de referencia de floculante (SP0107).

$$SP0107 = \frac{FSF \times FSSG \times WTFR \times FDR}{FC \times 1000} \quad (3)$$

Los parámetros que se requieren para realizar el cálculo del SP0107 de acuerdo con la ecuación (3) están detallados en la Tabla 16.

Tabla 16

Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0107

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
SP0107	Punto de referencia de flujo de dosificación de floculante	m3/h	Cálculo
FSF	Flujo de alimentación de pulpa	m3/h	Lectura del sensor FIT-0400009
FSSG	Densidad de la pulpa	SG	Lectura del sensor DIT-0400009
WTFR	Fracción en masa de sólidos en la alimentación del espesador	-	Cálculo, proviene de la ecuación (2)
FDR	Ratio de dosificación de floculante	g/t	Ingreso manual
FC	Concentración de solución de floculante	g/l	Ingreso manual

Para el ingreso de datos de parte del operador y para que se puedan visualizar los resultados de este cálculo, “FY- 0107”, se ha diseñado una ventana la cual se aprecia en la Figura 37.

Figura 37

Pantalla gráfica del cálculo FY-107

FY0107 Flocculant Addition					
Flocculant Dose Rate:		16.00 g/t			
Flocculant					
FIC-0107	SP	0.40	m3/h	PV	0.40 m3/h
Raw water to dilute flocculant					
FIC-0106	SP	7.58	m3/h	PV	7.58 m3/h
FC concentrate:		3.00 g/l			
FC Diluted:		0.16 g/l			
Raw water to dilute slurry					
FIC-0103	SP	14.01	m3/h	PV	14.01 m3/h
"Solids in feed Slurry"		43.01		%	
Set point Solid in feed Slurry:		40.0 %			

Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk.

3.6.2. Controlador de dosificación de agua para diluir floculante

Este controlador regula el flujo de agua necesario para diluir el floculante que proviene de la planta de preparación de acuerdo con los requerimientos operativos. En primer lugar, se calcula el flujo de toneladas secas (*DMF*) de ingreso al espesador. En la ecuación (4) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del *DMF*.

$$DMF = FSF \times FSSG \times WTFR \quad (4)$$

Los parámetros que se requieren para realizar el cálculo del *DMF* de acuerdo con la ecuación (4) están detallados en la Tabla 17.

Tabla 17*Variables consideradas para el cálculo del DMF*

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
<i>DMF</i>	Flujo de toneladas secas	t/h	Cálculo
<i>FSF</i>	Flujo de alimentación de pulpa	m3/h	Lectura del sensor FIT-0400009
<i>FSSG</i>	Densidad de la pulpa	SG	Lectura del sensor DIT-0400009
<i>WTFR</i>	Fracción en masa de sólidos en la alimentación del espesador	-	Cálculo, proviene de la ecuación (2)

Como siguiente paso se multiplica el valor de *DMF* por el ratio de dosificación de floculante y se divide entre la concentración diluida de floculante. Finalmente se resta menos el punto de referencia de la dosificación de floculante (SP0107) calculado en la ecuación anterior. En la ecuación (5) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del punto de referencia para agua de dilución de floculante (SP0106).

$$SP0106 = \frac{DMF \times FDR}{1000 \times FCd} - SP0107 \quad (5)$$

Para llevar a cabo el cálculo del SP0106, es fundamental contar con un conjunto de parámetros específicos que permiten aplicar correctamente la ecuación (5). La información detallada de estos parámetros, incluyendo su descripción y unidades, se encuentra presentada de manera organizada en la Tabla 18. Proporcionando una guía clara y práctica para su consulta e implementación.

Tabla 18

Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0106

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
SP0106	<i>Punto de referencia</i> de flujo de agua para diluir floculante	m ³ /h	Cálculo
<i>DMF</i>	Flujo de toneladas secas	t/h	Cálculo, proviene de la ecuación (4)
<i>FDR</i>	Ratio de dosificación de floculante	g/t	Ingreso manual
<i>FCd</i>	Concentración de la solución diluida de floculante	g/l	Ingreso manual
SP0107	<i>Punto de referencia</i> de dosificación de floculante	m ³ /h	Cálculo, proviene de la ecuación (3)

Para el ingreso de datos de parte del operador y para que se puedan visualizar los resultados se usa una ventana la cual puede apreciar en la Figura 37.

3.6.3. Controlador de dosificación de agua para diluir pulpa

Este controlador controla el flujo de ingreso de agua al tanque 450-TK-001 para la dilución de pulpa. Para el cálculo del punto de referencia previamente se calcula la variable *D2*, la cual se refiere a la densidad deseada, la cual relaciona la fracción de sólidos deseados (*PSW*) en la alimentación con la densidad del líquido y la densidad del sólido. En la ecuación (6) se muestra la fórmula para el cálculo numérico de *D2*, la demostración se encuentra desarrollada en el Anexo 2.

$$D2 = \frac{1}{\frac{PSW}{DS} + \frac{1-PSW}{DL}} \quad (6)$$

Los parámetros que se requieren para realizar el cálculo del $D2$ de acuerdo con la ecuación (6) están detallados en la Tabla 19.

Tabla 19

Variables consideradas para el cálculo de $D2$

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
$D2$	Variable	SG	Cálculo
PSW	Porcentaje de sólidos buscados	%	Ingreso manual
DS	Densidad del sólido	SG	Ingreso manual
DL	Densidad del líquido	SG	Ingreso manual

El punto de referencia para agua de dilución de pulpa (SP0103), m³/h, se calcula dividiendo el flujo de toneladas secas entre el porcentaje de sólidos deseados y la variable $D2$ finalmente a este resultado se le resta el flujo de la pulpa al ingreso. En la ecuación (7) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del SP0103.

$$SP0103 = \frac{DMF}{PSW \times D2} - FSF \quad (7)$$

Para llevar a cabo el cálculo del SP0103, es fundamental contar con un conjunto de parámetros específicos que permiten aplicar correctamente la ecuación (7). La información detallada de estos parámetros, incluyendo su descripción y unidades, se encuentra presentada de manera organizada en la Tabla 20. Proporcionando una guía clara y práctica para su consulta e implementación.

Tabla 20*Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0103*

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
SP0103	Punto de referencia de flujo de agua para dilución de pulpa	m3/h	Cálculo
DMF	Flujo de toneladas secas	t/h	Cálculo, proviene de la ecuación (4)
PSW	Porcentaje de sólidos buscados	%	Ingreso manual
D2	Variable	SG	Cálculo, proviene de la ecuación (6)
FSF	Flujo de alimentación de pulpa	m3/h	Lectura del sensor FIT-0400009

Para el ingreso de datos de parte del operador y para que se puedan visualizar los resultados se usa una ventana la cual puede apreciar en la Figura 37.

3.6.4. Controlador en la descarga

Este controlador regula el flujo de descarga de pulpa a la salida del espesador. Para establecer el punto de referencia en primer lugar se calcula la fracción de sólidos en la descarga del espesador (*USWF*). En la ecuación (8) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del *USWF*.

$$USWF = \frac{(D - DL) \times DS}{(DS - DL) \times D} \quad (8)$$

Los parámetros que se requieren para realizar el cálculo del *USWF* de acuerdo con la ecuación (8) están detallados en la Tabla 21.

Tabla 21

Variables consideradas para el cálculo del USWF

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
<i>USWF</i>	Fracción de sólidos en la descarga del espesador	-	Cálculo
<i>D</i>	Densidad en la descarga	SG	Cálculo, proviene del sensor sensor DIT-0304
<i>DS</i>	Densidad del sólido	SG	Ingreso manual
<i>DL</i>	Densidad del líquido	SG	Ingreso manual

El punto de referencia de la descarga del espesador (SP0302), se calcula como el flujo de toneladas secas en la alimentación dividido entre la fracción de sólidos en la descarga y la densidad en la descarga. Todo el producto finalmente se multiplica con el factor *K*. En la ecuación (9) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del SP-0302.

$$SP0302 = K \times \left(\frac{Q}{USWF \times D} \right) \quad (9)$$

Para llevar a cabo el cálculo del SP0302 es fundamental contar con un conjunto de parámetros específicos que permiten aplicar correctamente la ecuación (9). La información detallada de estos parámetros, incluyendo su descripción y unidades, se encuentra presentada de manera organizada en la Tabla 22. Proporcionando una guía clara y práctica para su consulta e implementación.

Tabla 22*Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0302*

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
SP0302	Punto de referencia de flujo de descarga	m ³ /h	Cálculo
K	Factor basado en el nivel de espejo y torque.	-	Determinado por reglas
Q	Flujo de toneladas secas ($Q=DMF$)	t/h	Cálculo, proviene de la ecuación (4)
$USWF$	Fracción de sólidos en la descarga del espesador	-	Cálculo, proviene de la ecuación (8)
D	Densidad en la descarga	SG	Proviene del sensor DIT-0304

El valor que adopta el Factor K depende del nivel de espejo de agua del espesador y del valor del torque. Siendo el torque el de mayor prioridad. Cuando el factor K es igual a 1 se entiende que el espesador CCD 4 esta trabajando en estado normal. Si el valor de K es mayor de 1 significa que el punto de referencia de flujo en la descarga aumenta trayendo consigo que el espesador empezara a descarga mayor cantidad de sólidos logrando que el nivel de espejo de agua aumente y llegue a los niveles de operación normal. En el otro caso si el valor de K es menor de 1 significa que el punto de referencia de flujo en la descarga disminuirá trayendo consigo que el espesador empezará a descargar menor cantidad de sólidos logrando que el nivel de espejo de agua disminuya y llegue a los niveles de operación normal. En la ecuación (10) se muestra la configuración del factor K .

$$\text{Si } MIRROR LEVEL \leq 3m \rightarrow K = 1.15$$

$$\text{Si } MIRROR LEVEL \geq 3.5 m \rightarrow K = 0.85$$

$$\text{Si } 3 < MIRROR LEVEL < 3.5 \rightarrow K = 1$$

(10)

$$\text{Si } TORQUE \geq 40\% \rightarrow K = 1.14$$

Los parámetros que se requieren para determinar el valor de K de acuerdo con la ecuación (10) están detallados en la Tabla 23.

Tabla 23


Variables que determinan las reglas para el valor del factor K

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
K	Factor basado en el nivel de espejo y torque.	-	Determinado por reglas
$MIRROR LEVEL$	Nivel de espejo	m	Cálculo, proviene del sensor LIT-0109
$TORQUE$	Torque de la rastra	%	Proviene del sensor OIT-0201

Para acceder a ingresar datos y visualizar los resultados de este cálculo, “FY-0302”, se ha diseñado una ventana la cual se aprecia en la Figura 38.

Figura 38

Pantalla gráfica del cálculo FY-0302

FY0302		
Underflow Flow Rate 		
WI0400009	80.03	t/hr
DIT0400009	????????	SG
Input:	<input type="text" value="2.55"/>	Solid SG
Input:	<input type="text" value="1.00"/>	Liqu SG
"Underflow Solids in Slurry"	73.12	%
FIC0302	SP 0.00	m3/hr

Nota: Captura del software FactoryTalk Site Edition

3.6.5. Sintonización de los parámetros de los controladores de los espesadores

Para la sintonización de los controladores se utilizó la instrucción *open loop autotuner* (la cual se muestra en la Figura 39) que viene con la librería *PlantPAx* y trabaja directamente con la instrucción *enhanced PID* (PIDE). Esta herramienta realiza un barrido por pasos (*step*) de la variable de salida y hace una estimación de los mejores parámetros de ganancia proporcional, integral y derivativa para obtener una respuesta lenta (*slow*), media (*medium*) y rápida (*fast*). Esta herramienta es útil porque brinda un punto inicial para las pruebas de sintonización. Posteriormente se realiza un reajuste de estos parámetros.

Figura 39

Ventana de configuración del sintonizador automático de lazo abierto

The screenshot shows a software window titled "PIDE Autotune - FlowLoop". It contains several controls and data fields:

- Buttons:** "Start", "Abort", "Set Gains in PIDE", "Close", and "Help".
- Execution State:** A label "Execution State:" followed by the text "Complete".
- Autotune Status:** A label "Autotune Status:" followed by a dropdown menu showing "OK".
- Autotune Gains Section:** A group box containing four radio buttons and three columns of numerical values.

	Proportional	Integral (1/min)	Derivative (min)
<input type="radio"/> Slow Response	0.5857508	5.9906335	0.007484594
<input type="radio"/> Medium Response	1.1715016	11.981267	0.014969188
<input type="radio"/> Fast Response	1.7572525	17.9719	0.022453781
<input checked="" type="radio"/> Current	1.7975489	18.489075	0.021970043
- Parameters:**
 - Time Constant: 5.1 sec
 - Deadtime: 2.3 sec
 - Gain: 1.0505912
 - Based on Non-integrating model

Nota: Captura de pantalla del software RSLogix 5000.

Luego de realizar la sintonización de los parámetros de las ganancias proporcionales, integral y derivativa. En la Tabla 24 se muestra los valores finales que se establecieron para el espesador CCD 4.

Tabla 24

Parámetros de sintonización de los controladores del espesador CCD 4

Tag	Descripción	Ganancia proporcional K_P	Ganancia integral K_I (1/min)	Ganancia derivativa K_D (min)
FIC-0107	Floculante al espesador	0.48	3.67	0.02
FIC-0106	Agua para diluir floculante	0.4	3.2	-
FIC-0103	Agua al espesador	0.4	3.2	-
FIC-0302	Descarga del espesador	0.272	0.0885	0.02

3.7. Controladores del espesador CCD 5

Los controladores del espesador CCD 5 se han desarrollado con el objetivo de maximizar la eficiencia operativa y garantizar la continuidad del proceso de espesado. Estos controladores automatizan las operaciones clave, incluyendo la dosificación precisa del floculante, lo cual contribuye a mejorar la calidad del proceso y minimizar el desperdicio de insumos. Además, han sido configurados para prevenir interrupciones en el sistema, específicamente aquellas relacionadas con la acumulación de material en la parte inferior del espesador debido a altas concentraciones de sólidos, que podrían generar bloqueos o afectar el rendimiento del equipo.

3.7.1. Controlador de dosificación de floculante

Este controlador regula la dosificación de floculante al ingreso del espesador. Para establecer el punto de referencia del flujo de floculante se trabaja de forma similar como se trabajó para el CCD 4 se calcula en primer lugar el *WTFR*. En la ecuación (11) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del *WTFR*, la demostración se encuentra desarrollada en el Anexo 1.

$$WTFR = \frac{(FSSG - DL) \times DS}{(DS - DL) \times FSSG} \quad (11)$$

Para llevar a cabo el cálculo del *WTFR*, es fundamental contar con un conjunto de parámetros específicos que permiten aplicar correctamente la ecuación (11). La información detallada de estos parámetros, incluyendo su descripción y unidades, se encuentra presentada de manera organizada en la Tabla 25. Proporcionando una guía clara y práctica para su consulta e implementación.

Tabla 25*Variables consideradas para el cálculo del WTFR*

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
<i>WTFR</i>	Fracción en masa de sólidos en la alimentación del espesador	-	Cálculo
<i>FSSG</i>	Densidad de ingreso de la pulpa	SG	Lectura del sensor DIT-0304
<i>DS</i>	Densidad del sólido	SG	Ingreso manual
<i>DL</i>	Densidad del líquido	SG	Ingreso manual

Finalmente, para obtener el punto de referencia de floculante (SP0408) se multiplica el porcentaje de sólidos en la alimentación con el flujo y la densidad de la pulpa de alimentación. Adicionalmente se multiplica por el ratio de dosificación, ingreso manual que coloca el operador y se divide entre la concentración de solución que también es un ingreso manual. En la ecuación (12) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del punto de referencia de floculante (SP0408).

$$SP0408 = \frac{FSF \times FSSG \times WTFR \times FDR}{FC \times 1000} \quad (12)$$

Para llevar a cabo el cálculo del SP0408, es fundamental contar con un conjunto de parámetros específicos que permiten aplicar correctamente la ecuación (12). La información detallada de estos parámetros, incluyendo su descripción y unidades, se encuentra presentada de manera organizada en la Tabla 26. Proporcionando una guía clara y práctica para su consulta e implementación.

Tabla 26*Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0408*

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
SP0408	Punto de referencia de flujo de dosificación de floculante (m3/h).	m3/h	Cálculo
<i>FSF</i>	Flujo de alimentación de pulpa	m3/h	Lectura del sensor FIT-0400009
<i>FSSG</i>	Densidad de ingreso de la pulpa	SG	Lectura del sensor DIT-0304
<i>WTFR</i>	Fracción en masa de sólidos en la alimentación del espesador	-	Cálculo, proviene de la ecuación (11)
<i>FDR</i>	Ratio de dosificación de floculante	g/t	Ingreso manual
<i>FC</i>	Concentración de solución de floculante	g/l	Ingreso manual

Con el objetivo de brindar mayor comodidad y eficiencia al operador, se ha diseñado una interfaz específica para visualizar los resultados obtenidos mediante el cálculo, “FY-0408”, se ha diseñado una ventana la cual se aprecia en la Figura 40. Esta ventana facilita el acceso a la información relevante, permitiendo al operador analizar y monitorear de forma clara y precisa los datos generados. La estructura de esta interfaz ha sido optimizada para asegurar su funcionalidad y mejorar la interacción

Figura 40

Pantalla gráfica del cálculo FY-0408

FY0408

Flocculant Addition

Flocculant Dose Rate: 15.00 g/t

Flocculant

FIC-0408	SP	0.00	m3/h	PV	0.00	m3/h
----------	----	------	------	----	------	------

Raw water to dilute flocculant

FIC-0407	SP	0.00	m3/h	PV	0.00	m3/h
----------	----	------	------	----	------	------

FC concentrate: 3.00 g/l

FC Diluted: 0.16 g/l

Raw water to dilute slurry

FIC-0401	SP	0.00	m3/h	PV	0.00	m3/h
----------	----	------	------	----	------	------

"Solids in feed Slurry" 43.01 %

Set point Solid in feed Slurry: 40.0 %

Nota: Captura de pantalla del software RSLogix 5000.

3.7.2. Controlador de dosificación de agua para diluir floculante

Este controlador regula el flujo de agua necesario para diluir el floculante que proviene de la planta de preparación de acuerdo con los requerimientos operativos. En primer lugar, se calcula el flujo de toneladas secas (*DMF*) de ingreso al espesador. En la ecuación (13) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del *DMF*.

$$DMF = FSF \times FSSG \times WTR \quad (13)$$

Los parámetros que se requieren para realizar el cálculo del *DMF* de acuerdo con la ecuación (13) están detallados en la Tabla 27.

Tabla 27*Variables consideradas para el cálculo del DMF*

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
<i>DMF</i>	Flujo de toneladas secas	t/h	Cálculo
<i>FSF</i>	Flujo de alimentación de pulpa	m ³ /h	Lectura del sensor FIT-0400009
<i>FSSG</i>	Densidad de la pulpa	SG	Lectura del sensor DIT-0400009
<i>WTFR</i>	Fracción en masa de sólidos en la alimentación del espesador	-	Cálculo, proviene de la ecuación (11)

Como siguiente fase se multiplica el valor de *DMF* por el ratio de dosificación de floculante y se divide entre la concentración diluida de floculante. Finalmente se resta menos el punto de referencia de la dosificación de floculante (SP0408) calculado en la ecuación anterior. En la ecuación (14) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del punto de referencia para agua de dilución de floculante (SP0407).

$$SP0407 = \frac{DMF \times FDR}{1000 \times FCD} - SP0408 \quad (14)$$

Los parámetros que se requieren para realizar el cálculo del SP0407 de acuerdo con la ecuación (14) están detallados en la Tabla 28.

Tabla 28*Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0407*

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
SP0407	<i>Punto de referencia</i> de flujo de agua para diluir floculante	m ³ /h	Cálculo
<i>DMF</i>	Flujo de toneladas secas	t/h	Cálculo, proviene de la ecuación (13)
<i>FDR</i>	Ratio de dosificación de floculante	g/t	Ingreso manual
<i>FCd</i>	Concentración de la solución diluida de floculante	g/l	Ingreso manual
SP0408	<i>Punto de referencia</i> de dosificación de floculante	m ³ /h	Cálculo, proviene de la ecuación (12)

Para el ingreso de datos de parte del operador y para que se puedan visualizar los resultados se usa una ventana la cual puede apreciar en la Figura 40.

3.7.3. Controlador de dosificación de agua para diluir pulpa

Este controlador controla el flujo de ingreso de agua al tanque 450-TK-002 para la dilución de pulpa. Para el cálculo del punto de referencia previamente se calcula la variable *D2*, la cual se refiere a la densidad deseada, la cual relaciona la fracción de sólidos deseados (*PSW*) en la alimentación con la densidad del líquido y la densidad del sólido. En la ecuación (15) se muestra la fórmula para el cálculo numérico de *D2*, la demostración se encuentra desarrollada en el Anexo 2.

$$D2 = \frac{1}{\frac{PSW}{DS} + \frac{1 - PSW}{DL}} \quad (15)$$

Los parámetros que se requieren para realizar el cálculo de $D2$ de acuerdo con la ecuación (15) están detallados en la Tabla 29.

Tabla 29

Variables consideradas para el cálculo de $D2$

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
$D2$	Variable (SG).	SG	Cálculo
PSW	Porcentaje de sólidos buscados	%	Ingreso manual
DS	Densidad del sólido	SG	Ingreso manual
DL	Densidad del líquido	SG	Ingreso manual

El punto de referencia para agua de dilución de pulpa (SP0401), m³/h, se calcula dividiendo el flujo de toneladas secas entre el porcentaje de sólidos deseados y la variable $D2$ finalmente a este resultado se le resta el flujo de la pulpa al ingreso. En la ecuación (16) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del SP0401.

$$SP0401 = \frac{DMF}{PSW \times D2} - FSF \quad (16)$$

Para llevar a cabo el cálculo del SP0401, es fundamental contar con un conjunto de parámetros específicos que permiten aplicar correctamente la ecuación (16). La información detallada de estos parámetros, incluyendo su descripción y unidades, se encuentra presentada de manera organizada en la Tabla 30. Proporcionando una guía clara y práctica para su consulta e implementación.

Tabla 30

Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0401

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
SP0401	Punto de referencia de flujo de agua para dilución de pulpa	m3/h	Cálculo
DMF	Flujo de toneladas secas	t/h	Cálculo, proviene de la ecuación (13)
PSW	Porcentaje de sólidos buscados	%	Ingreso manual
D2	Variable	SG	Cálculo, proviene de la ecuación (15)
FSF	Flujo de alimentación de pulpa	m3/h	Lectura del sensor FIT-0400009

Para el ingreso de datos de parte del operador y para que se puedan visualizar los resultados se usa una ventana la cual puede apreciar en la Figura 40.

3.7.4. Controlador en la descarga

Este controlador regula el flujo de descarga de pulpa a la salida del espesador. Para establecer el punto de referencia en primer lugar se calcula la fracción de sólidos en la descarga del espesador (*USWF*). En la ecuación (17) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del *USWF*.

$$USWF = \frac{(D - DL) \times DS}{(DS - DL) \times D} \quad (17)$$

Los parámetros que se requieren para realizar el cálculo del *USWF* de acuerdo con la ecuación (17) están detallados en la Tabla 31.

Tabla 31*Variables consideradas para el cálculo del USWF*

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
<i>USWF</i>	Fracción de sólidos en la descarga del espesador	-	Cálculo
<i>D</i>	Densidad en la descarga	SG	Lectura del sensor DIT-0603
<i>DS</i>	Densidad del sólido	SG	Ingreso manual
<i>DL</i>	Densidad del líquido	SG	Ingreso manual

El punto de referencia de la descarga del espesador (SP0602), m3/h, se calcula como el flujo de toneladas secas en la alimentación dividido entre el porcentaje de sólidos en la descarga y la densidad en la descarga. Todo el producto finalmente se multiplica con el factor *K*. En la ecuación (18) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del SP-0602.

$$SP0602 = K \times \left(\frac{Q}{USWF \times D} \right) \quad (18)$$

Para llevar a cabo el cálculo del SP0602, es fundamental contar con un conjunto de parámetros específicos que permiten aplicar correctamente la ecuación (18). La información detallada de estos parámetros, incluyendo su descripción y unidades, se encuentra presentada de manera organizada en la la Tabla 32. Proporcionando una guía clara y práctica para su consulta e implementación.

Tabla 32*Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0602*

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
SP0602	Punto de referencia de flujo en la descarga del espesador	m ³ /h	Cálculo
K	Factor basado en el nivel de espejo y torque.	-	Determinado por reglas
Q	Flujo de toneladas secas ($Q=DMF$)	t/h	Cálculo, proviene de la ecuación (13)
$USWF$	Fracción de sólidos en la descarga del espesador	-	Cálculo, proviene de la ecuación (17)
D	Densidad en la descarga	SG	Lectura del sensor DIT-0603

El valor que adopta el factor K depende del nivel de espejo de agua del espesador y del valor del torque. Siendo el torque el de mayor prioridad. Cuando el factor K es igual a 1 el espesador CCD 5 esta trabajando en estado normal. Si el valor de K es mayor de 1 significa que el punto de referencia de flujo en la descarga aumenta y el espesador empezara a descarga mayor cantidad de sólidos logrando que el nivel de espejo de agua aumente y llegue a los niveles de operación normal. En el otro caso si el valor de K es menor de 1 significa que el punto de referencia de flujo en la descarga disminuirá y el espesador empezará a descargar menor cantidad de sólidos logrando que el nivel de espejo de agua disminuya y llegue a los niveles de operación normal. En la ecuación (19) se muestra la configuración del factor K .

$$\text{Si } MIRROR LEVEL \leq 2.5 m \rightarrow K = 1.15$$

$$\text{Si } MIRROR LEVEL \geq 3 m \rightarrow K = 0.85$$

$$\text{Si } 2.5 < MIRROR LEVEL < 3 \rightarrow K = 1$$

(19)

$$\text{Si } TORQUE \geq 40\% \rightarrow K = 1.14$$

Los parámetros que se requieren para determinar el valor de K de acuerdo con la ecuación (19) están detallados en la Tabla 33.

Tabla 33

Variables que determinan las reglas para el valor del factor K

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
K	Factor basado en el nivel de espejo y torque.	-	Determinado por reglas
$MIRROR LEVEL$	Nivel de espejo	m	Lectura del sensor LIT-0411
$TORQUE$	Torque de la rastra	%	Lectura del sensor OIT-0501

Con el objetivo de brindar mayor comodidad y eficiencia al operador, se ha diseñado una interfaz específica para visualizar los resultados obtenidos mediante el cálculo, “FY-0602”, se ha diseñado una ventana la cual se aprecia en la Figura 41. Esta ventana facilita el acceso a la información relevante, permitiendo al operador analizar y monitorear de forma clara y precisa los datos generados. La estructura de esta interfaz ha sido optimizada para asegurar su funcionalidad y mejorar la interacción, minimizando posibles errores y simplificando la interpretación de los resultados.

Figura 41

Pantalla gráfica del cálculo FY-0602

FY0602 Underflow Flow Rate		
FEED_CCD5_TNS	118.15	t/hr
FEED_CCD5_DENSITY	1.74	t/m3
Input:	2.90	Solid t/m3
Input:	1.00	Liqu t/m3
"Underflow Solids in Slurry"	78.50	%
FIC0602	SP 62.14	m3/hr

Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.7.5. Sintonización de los parámetros de los controladores del espesador

Para la sintonización de los controladores se utilizó la instrucción *open loop autotuner* (la cual se muestra en la Figura 39) que viene con la librería *PlantPAx* y trabaja directamente con la instrucción *enhanced PID* (PIDE). Esta herramienta realiza un barrido por pasos (*step*) de la variable de salida y hace una estimación de los mejores parámetros de ganancia proporcional, integral y derivativa para obtener una respuesta lenta (*slow*), media (*medium*) y rápida (*fast*). Esta herramienta es útil porque brinda un punto inicial para las pruebas de sintonización. Posteriormente se realiza un reajuste de estos parámetros.

Luego de realizar la sintonización de los parámetros de las ganancias proporcionales, integral y derivativa. En la Tabla 34 se muestra los valores finales que se establecieron para el espesador CCD 5.

Tabla 34

Parámetros de sintonización de los controladores del espesador CCD 5

Tag	Descripción	Ganancia proporcional K_P	Ganancia integral K_I (1/min)	Ganancia derivativa K_D (min)
FIC-0408	Floculante al espesador	0.48	3.67	-
FIC-0407	Agua para diluir floculante	0.4	3.2	-
FIC-0401	Agua al espesador	1.5	3.2	-
FIC-0602	Descarga del espesador	0.76	12.49	0.02

3.8. Sistemas auxiliares

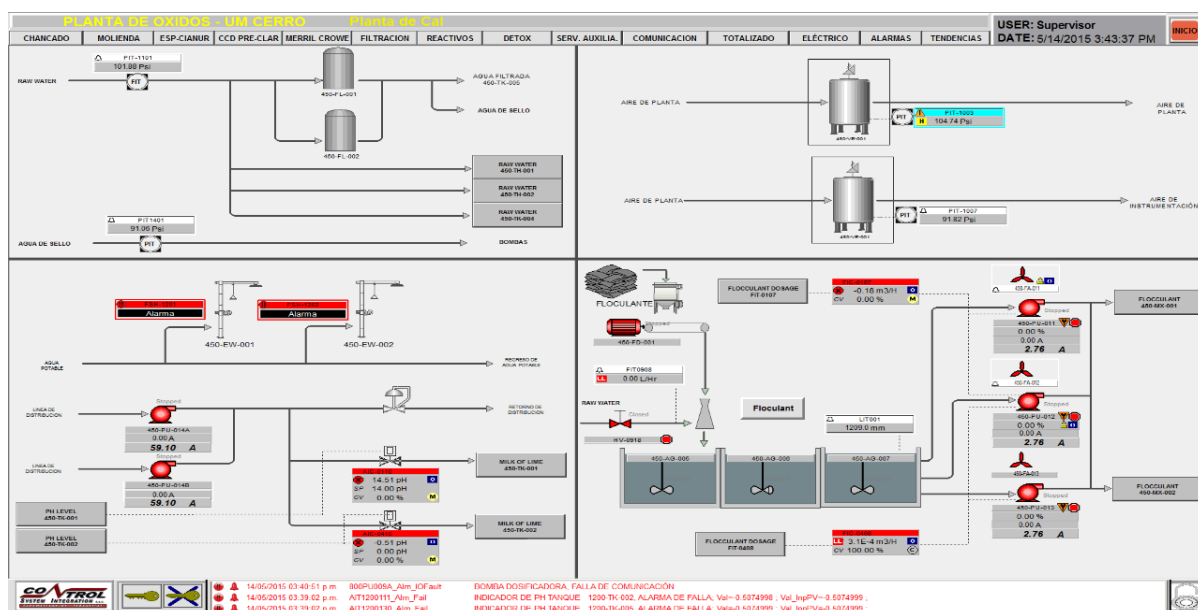
Los sistemas auxiliares son importantes para garantizar la operación continua del sistema y proteger los equipos principales. En el proyecto se incluyen cinco sistemas auxiliares, que se enumeran a continuación:

- Agua de sello.
- Aire de planta e instrumentación.
- Planta de preparación de floculante.
- Dosificación de cal.
- Tanque de rebose y tanque de descarga.

La Figura 42 muestra la pantalla gráfica diseñada para el monitoreo de los sistemas auxiliares.

Figura 42

Pantalla gráfica de sistemas auxiliares



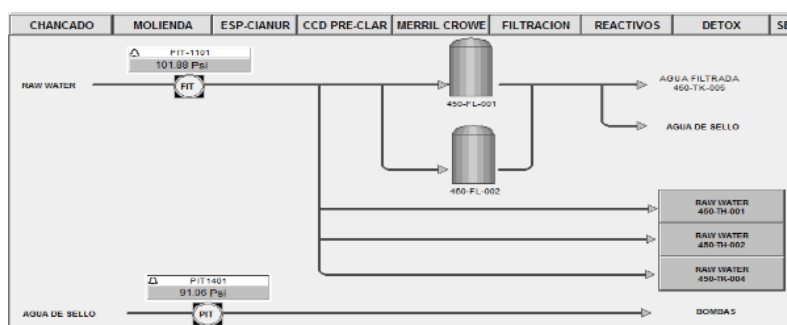
Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.8.1. Agua de sello

El suministro de agua de sello previene el contacto directo entre las superficies de los sellos mecánicos y las partículas abrasivas del fluido bombeado, lo que reduce el desgaste y prolonga la vida útil de los sellos. Para el presente proyecto se implementó líneas de agua de sello para las bombas en la descarga de los espesadores. En la Figura 43 se muestra la pantalla gráfica en el sistema SCADA para el monitoreo de la línea de agua de sello, principalmente se monitorea el sensor de presión PIT-1401.

Figura 43

Pantalla gráfica monitoreo de agua de sello



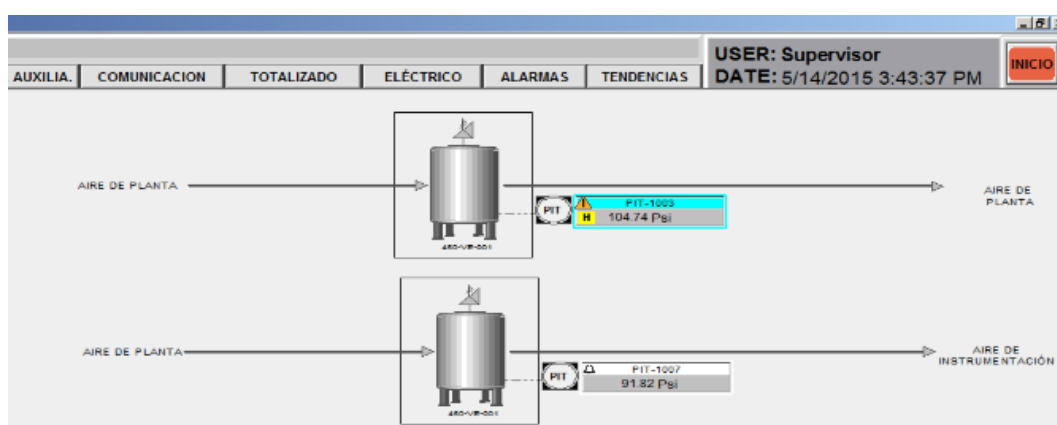
Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.8.2. Aire de instrumentación

El aire de instrumentación es aire comprimido que se utiliza para accionar los actuadores neumáticos de las válvulas solenoides. En la Figura 44 se muestra la pantalla gráfica en el sistema SCADA para el monitoreo del suministro de aire de instrumentación, se monitorea el sensor de presión PIT-1007.

Figura 44

Pantalla gráfica monitoreo de aire de instrumentación



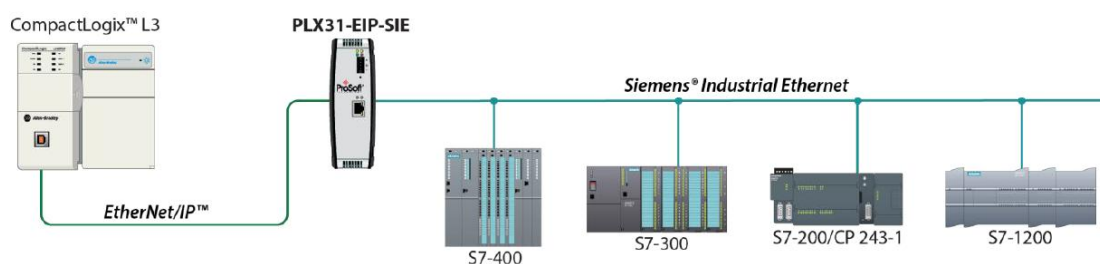
Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.8.3. Planta de preparación de floculante:

La planta de floculante es un sistema independiente del sistema de control principal de los espesadores CCD 4 y CCD 5. Este sistema está diseñado para la preparación del floculante, que consiste en mezclar floculantes en polvo con agua. Para controlar la operación de la planta, se utiliza un PLC modelo S7-1200 de *Siemens*. La interconexión del PLC S7-1200 con la red de control principal requiere un *gateway* que permita la comunicación entre los protocolos *Profinet* y *Ethernet/IP*. Para este propósito se utiliza el *gateway* PLX31-EIP-SIE de la marca *ProSoft*. La Figura 45 muestra un diagrama referencial de la conexión.

Figura 45

Diagrama de conexión del equipo PLX31-EIP-SIE



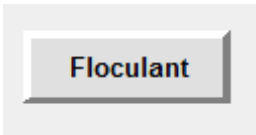
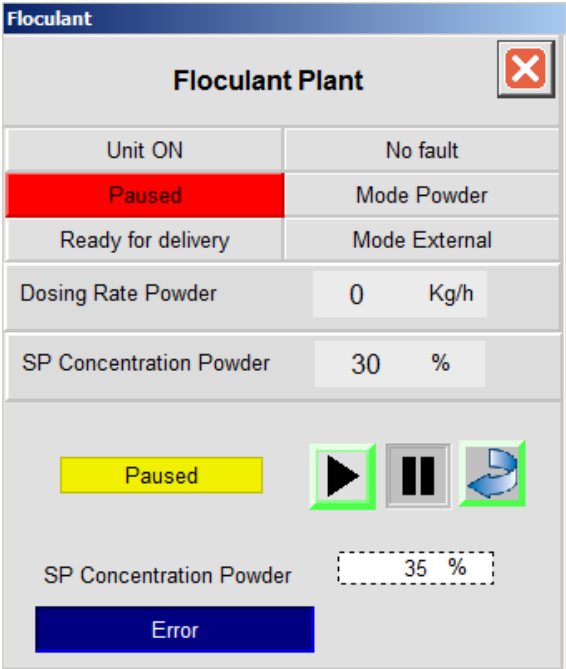
En el Anexo 3 se detalla la tabla los parámetros de lectura que van desde el PLC S7-1200 al PLC principal *ControlLogix* y en el Anexo 4 se detalla los parámetros de escritura que se originan en el PLC principal *ControlLogix* y van dirigidos al PLC *Siemens S7-1200*.

Para mejorar la visualización de los parámetros de comunicación entre la planta de floculante y el proceso principal, se ha desarrollado una interfaz gráfica personalizada. Esta interfaz permite acceder a los botones de arranque y a los parámetros de ajuste de la planta de floculante. Se ha colocado un botón en la pantalla gráfica de cada espesador para

acceder a esta ventana emergente (*faceplate*). La Figura 46 muestra el botón y la pantalla emergente.

Figura 46

Botón y ventana emergente de la planta de floculante

	
<p>Botón</p>	<p>Ventana emergente</p>

Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

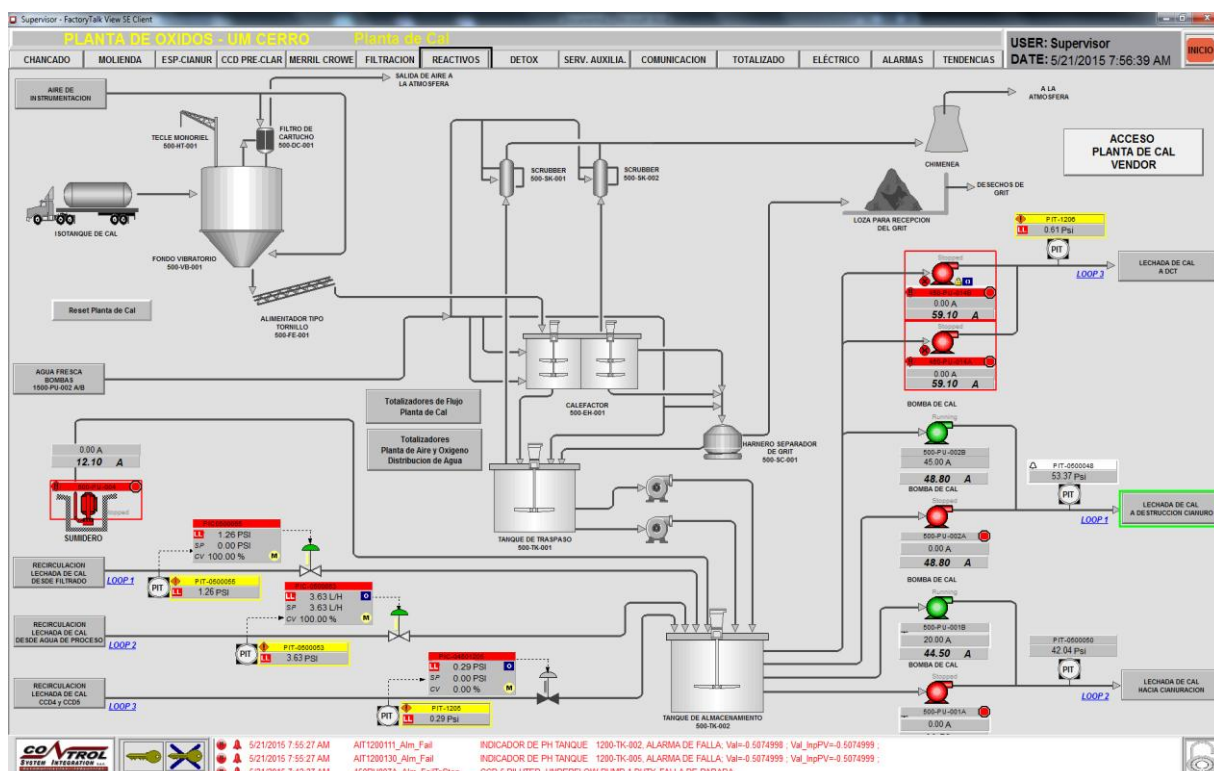
3.8.4. Dosificación de cal

La dosificación de cal es importante para mantener el PH óptimo del proceso en el sistema de espesadores. Esto mejora la eficiencia del espesamiento y la separación sólido-líquido. Para dosificar cal a los espesadores CCD 4 y CCD 5 se reutiliza la planta de preparación de cal existente de la planta de lixiviación de óxidos de plata. El suministro se realiza mediante las bombas 450-PU-014A/B, el control de las bombas se colocó en la

pantalla gráfica existente de la planta de cal en el sistema SCADA, la Figura 47 muestra la pantalla gráfica de dosificación de cal.

Figura 47

Pantalla gráfica de adición de cal, bombas 450-PU-014A/B



Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

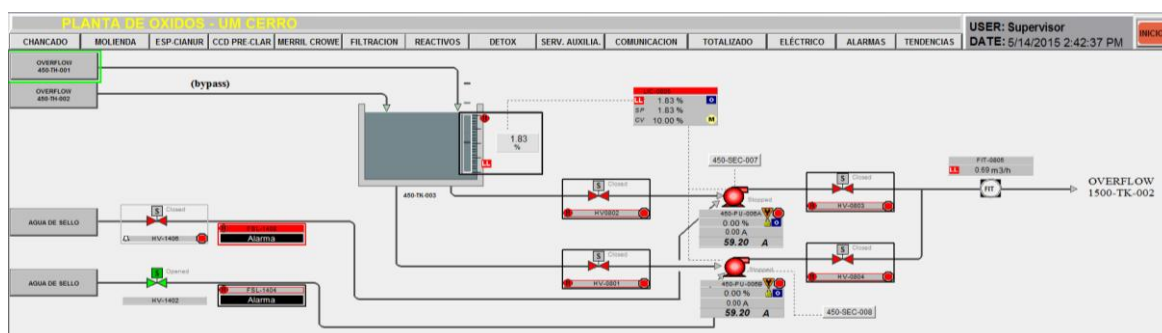
3.8.5. Tanque de rebose y tanque de descarga

El rebose del espesador CCD 4 es recolectado en el tanque 450-TK-003, diseñado específicamente para recibir y almacenar este flujo de manera eficiente. Posteriormente, el contenido del tanque es transportado al tanque de agua de proceso 1500-TK-002 mediante las bombas 450-PU007A y 450-PU007B, que operan alternadamente o en paralelo para garantizar una transferencia confiable. Para mantener la estabilidad operativa y asegurar un correcto funcionamiento del circuito, se ha implementado un control de nivel PID, el cual

regula de forma precisa las variaciones del nivel en el sistema, optimizando su desempeño.

Figura 48

Pantalla gráfica de control de nivel del tanque 450-TK-003



Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Para recolectar la descarga del espesador CCD 5 se tiene el tanque 450-TK-004. Para el cálculo del punto de referencia previamente se calcula la variable $D2$, la cual se refiere a la densidad deseada, la cual relaciona la fracción de sólidos deseados (PSW) en la alimentación con la densidad del líquido y la densidad del sólido. En la ecuación (20) se muestra la fórmula para el cálculo numérico de $D2$.

$$D2 = \frac{1}{\frac{PSW}{DS} + \frac{1 - PSW}{DL}} \quad (20)$$

Para llevar a cabo el cálculo del $D2$, es fundamental contar con un conjunto de parámetros específicos que permiten aplicar correctamente la ecuación (20). La información detallada de estos parámetros, incluyendo su descripción y unidades, se encuentra presentada de manera organizada en la Tabla 35. Proporcionando una guía clara y práctica para su consulta e implementación.

Tabla 35*Variables consideradas para el cálculo de D2*

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
<i>D2</i>	Variable (SG).	SG	Cálculo
<i>PSW</i>	Porcentaje de sólidos buscados	%	Ingreso manual
<i>DS</i>	Densidad del sólido	SG	Ingreso manual
<i>DL</i>	Densidad del líquido	SG	Ingreso manual

El punto de referencia para agua de dilución de pulpa (SP0708), expresado en metros cúbicos por hora (m³/h), se calcula dividiendo el flujo de toneladas secas entre el porcentaje de sólidos deseados y la variable *D2* finalmente a este resultado se le resta el flujo de la pulpa al ingreso. En la ecuación (21) se muestra la fórmula para el cálculo numérico del SP0708.

$$SP0708 = \frac{DMF}{PSW \times D2} - FSF \quad (21)$$

Para llevar a cabo el cálculo del SP0708, es fundamental contar con un conjunto de parámetros específicos que permiten aplicar correctamente la ecuación (21). La información detallada de estos parámetros, incluyendo su descripción y unidades, se encuentra presentada de manera organizada en la Tabla 36. Proporcionando una guía clara y práctica para su consulta e implementación.

Tabla 36

Variables consideradas para determinar el punto de referencia SP0708

Variable	Descripción	Unidad	Tipo
SP0708	Punto de referencia de flujo de agua para dilución de pulpa	m3/h	Cálculo
DMF	Flujo de toneladas secas	t/h	Cálculo, proviene de la ecuación (13)
PSW	Porcentaje de sólidos buscados	%	Ingreso manual
D2	Variable	SG	Cálculo, proviene de la ecuación (15)
FSF	Flujo de alimentación de pulpa	m3/h	Lectura del sensor FIT-0400009

3.9. Alarmas

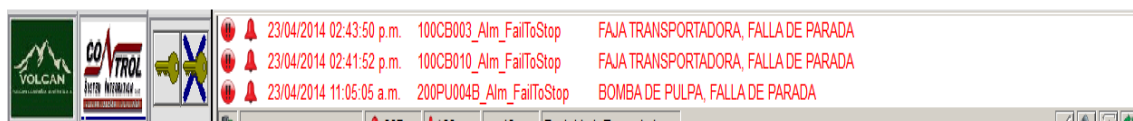
Las alarmas son notificaciones automáticas que aparecen en las pantallas gráficas del sistema SCADA para alertar a los operadores sobre eventos o condiciones inusuales que podrían indicar un problema potencial o una falla en el sistema. Estas alarmas se activan basándose en condiciones preconfiguradas que responden a los datos en tiempo real recopilados de sensores, motores, válvulas y controladores.

3.9.1. Pantallas gráficas para monitorear las alarmas

Las alarmas se pueden visualizar mediante el panel de alarmas, este panel muestra las alarmas activadas en tiempo real. En la Figura 49 se muestra el *panel* que esta colocado en la parte inferior de todas las pantallas gráficas del sistema SCADA para que el operador pueda visualizar en todo momento el estado de las alarmas más críticas.

Figura 49

Panel de alarmas

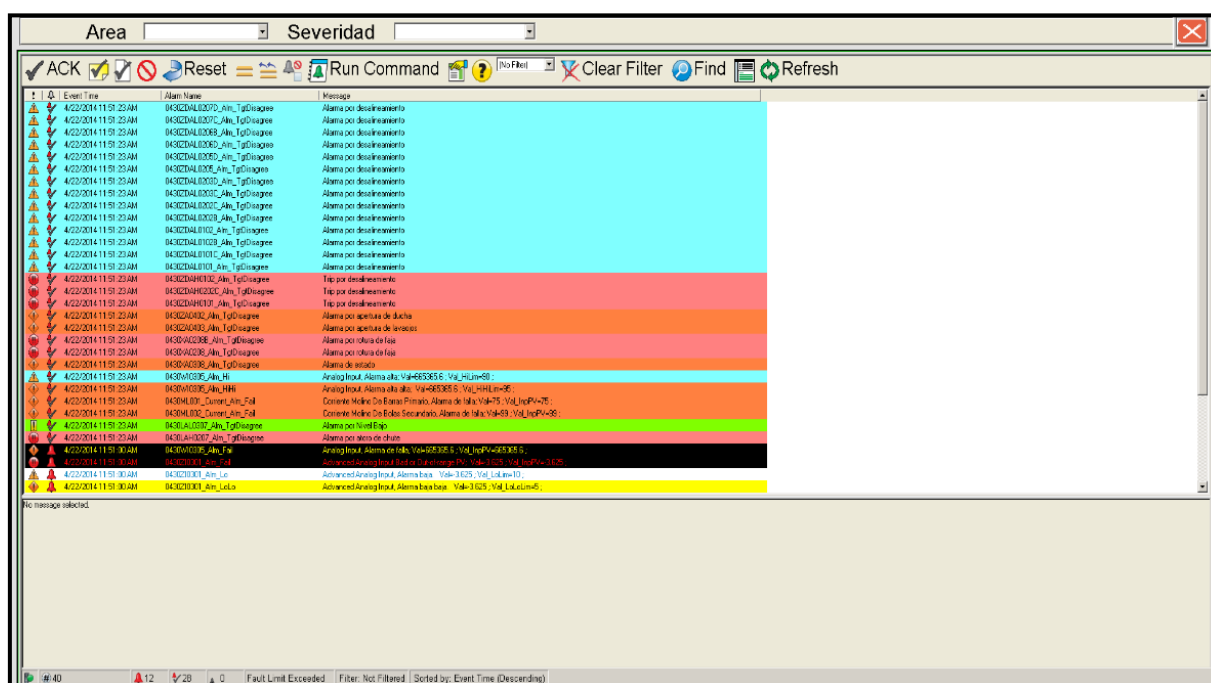


Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

También las alarmas se pueden visualizar en la pantalla gráfica resumen de alarmas, la cual se muestra en la Figura 50, donde se muestran el estado de todas las alarmas. El detalle de las alarmas consta de fecha y hora, el operador, estado, grupo, nombre y un comentario. Además, cuenta con dos menús desplegables que permiten filtrar la información por área y severidad.

Figura 50

Pantalla gráfica de resumen de alarmas



Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Las alarmas tienen 4 niveles de severidad. Esta clasificación se ha realizado para optimizar la respuesta del operador y pueda programar una respuesta gradual dependiendo del aumento de la severidad de las alarmas. En la Tabla 37 se muestra el detalle de los 4 niveles severidad de las alarmas.

Tabla 37

Tipos de severidad de las alarmas

Tipo	Severidad	Color	Comentario
Falla	751	Rojo	Alarma que implica detención de un equipo o peligro para el proceso.
Warning	501	Amarillo	Alarma que implica que se esta cerca a tener una falla y debería tomarse acciones al respecto.
Excepcion	251	Celeste	Alarmas existentes en el sistema que son comunes o siempre se activan, si se mantienen por demasiado tiempo podrían originar un problema.
Informativo	1	Verde	Alarma para indicar algun cambio o configuración solo para conocimiento del operador.

3.9.2. Alarmas en Sensores Analógicos

Para los sensores analógicos se configuraron un total de 6 alarmas por cada sensor, y a continuación se detallan los diferentes tipos.

- **Alarma Falla de Comunicación (I/O Fault Alarm):** Esta alarma se genera cuando se pierde comunicación con el dispositivo.

- **Alarma Falla de Equipo (*Device Failure Alarm*):** Esta alarma se genera cuando el sensor está en falla y/o mal configurado.
- **Alarma Alto Alto (*High High Alarm*):** Esta alarma se genera cuando el valor medido supera el nivel Máximo configurado (Por ejemplo 95%).
- **Alarma Alto (*High Alarm*):** Esta alarma se genera cuando el valor medido supera el nivel alto configurado (Por ejemplo 85%).
- **Alarma Bajo (*Low Alarm*):** Esta alarma se genera cuando el valor medido es menor al nivel Bajo configurado (Por ejemplo 30%).
- **Alarma Bajo Bajo (*Low Low Alarm*):** Esta alarma se genera cuando el valor medido es menor al nivel mínimo configurado (Por ejemplo 10%).

3.9.3. Alarmas en Motores

Para los motores se configuraron 4 tipos de alarmas típicas por cada motor, y a continuación se detallan los diferentes tipos.

- **Alarma Falla de Comunicación (*I/O Fault Alarm*):** Esta alarma se genera cuando se pierde comunicación entre el arrancador del equipo (en sala eléctrica de CCM) y el sistema de control.
- **Alarma Falla al Arrancar (*Fail To Start Alarm*):** Esta alarma se genera cuando se envía el comando de arranque y luego de un tiempo determinado no se recibe confirmación por parte del equipo.
- **Alarma Falla al Detener (*Fail to Stop Alarm*):** Esta alarma se genera cuando se envía el comando de parada y luego de un tiempo determinado no se recibe confirmación que se detuvo.
- **Motor Fault (*Falla de Motor*):** Esta alarma se genera cuando el motor presenta una falla eléctrica y requiere ser revisado y restablecido para poder continuar con la operación del motor. Esta falla eléctrica es detectada por el relevador de

protección en el caso de los motores de arranque directo y también es detectado por variadores de velocidad que manejan su respectivo motor.

3.9.4. Alarmas en Válvulas

Para los motores se configuraron 3 tipos de alarmas típicas por cada válvula, y a continuación se detallan los diferentes tipos.

- **Alarma Falla de Comunicación (*I/O Fault Alarm*):** Esta alarma se genera cuando se pierde comunicación entre la válvula y el sistema de control.
- **Alarma Bloqueo completo (*Full Stall Alarm*):** Esta alarma se genera cuando la válvula recibe un comando de apertura o cierre, pero la válvula no se mueve.
- **Alarma Bloque en Tránsito (*Transit Stall Alarm*):** Esta alarma se genera cuando la válvula recibe un comando de apertura o cierre, la válvula inicia el movimiento, pero no llega a la posición final.

3.9.5. Alarmas en Control PID

Para los motores se configuraron 2 tipos de alarmas típicas por cada controlador PID, y a continuación se detallan los diferentes tipos.

- **Alarma Falla de Comunicación (*I/O Fault Alarm*):** Esta alarma se genera cuando se pierde comunicación con la variable de proceso (PV) o con el dispositivo a controlar (variable de control).
- **Alarma de desviación (*Deviation Alarm*):** Esta alarma se genera por desviación alta entre punto de referencia (referencia) y variable de proceso PV del controlador.

3.10. Tendencias

Para garantizar una operación eficiente del sistema y simplificar las tareas de mantenimiento, resulta indispensable almacenar el histórico de las señales correspondientes al sistema de espesadores CCD 4 y CCD 5. Este almacenamiento se

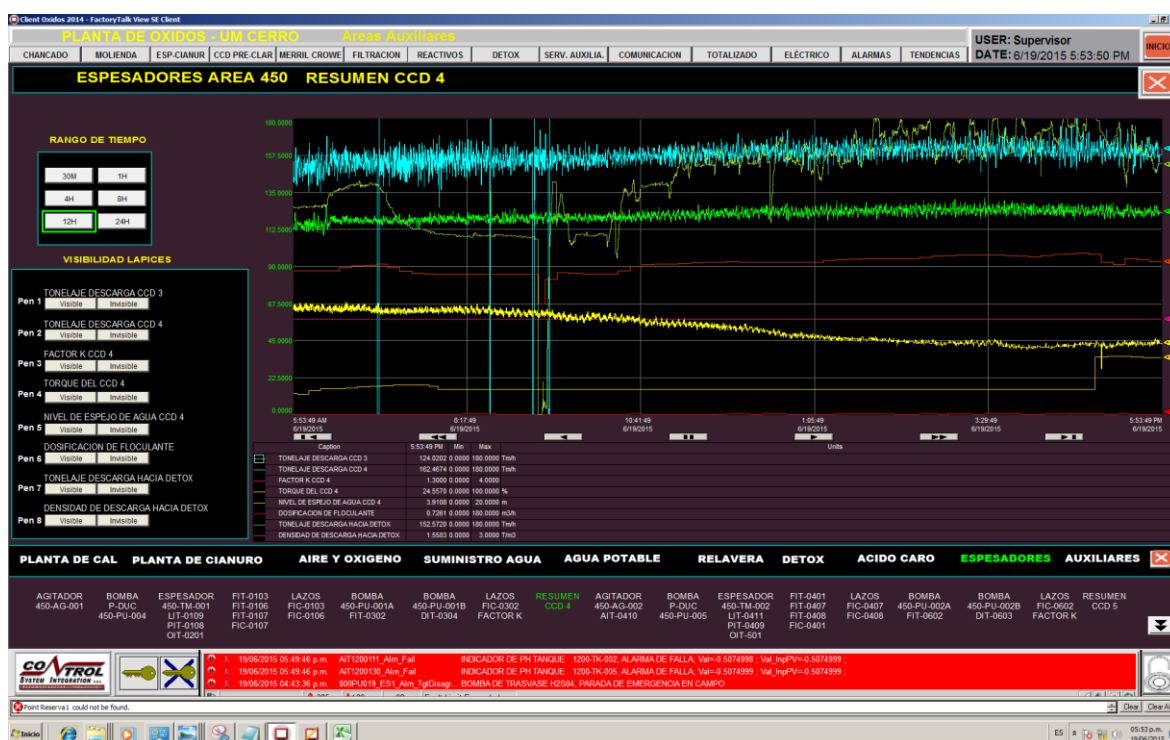
realiza a través del servidor *FactoryTalk Historian*, el cual ha sido configurado previamente para recolectar y gestionar las señales de otros procesos de la planta. Esta integración permite consolidar la información histórica en una plataforma centralizada, optimizando el acceso y análisis de los datos.

La visualización de la data histórica se realiza mediante una pantalla gráfica especialmente diseñada para facilitar la navegación y la interpretación de tendencias operativas. En la Figura 51, se presenta esta pantalla gráfica en el sistema SCADA, destacando su funcionalidad para mostrar de manera clara y ordenada los datos históricos recolectados. Esta pantalla incluye los tags asociados a los espesadores CCD 4 y CCD 5, que han sido añadidos al sistema de manera que su acceso a la base de datos *FactoryTalk Historian* mantiene la misma metodología que el sistema existente. Esto asegura que los operadores puedan consultar y analizar la información requerida de forma ágil y eficiente.

Además, el rango de tiempo de la muestra presentada en la pantalla gráfica es ajustable mediante los controles específicos indicados en el diseño, lo que permite personalizar la visualización según las necesidades de monitoreo o diagnóstico del proceso. Para determinar la ubicación de un tag en particular, se debe seleccionar inicialmente el área correspondiente, como Chancado, Molienda, Lixiviación, o espesadores en el área 450. Una vez identificada esta área, se procede a localizar el equipo principal relacionado, como motores, tanques, o fajas. Finalmente, el tag deseado se selecciona dentro de la lista de pens disponibles, facilitando una interacción intuitiva y eficaz.

Figura 51

Pantalla gráfica de tendencias



Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

3.11. Reportes

Para la gestión operativa se requiere que se puedan generar reportes automáticos del sistema de espesadores CCD 4 y CCD 5. Los reportes se generan utilizando el software *FactoryTalk VantagePoint*, el cual se configuró para que pueda generar reportes programados de forma automática y se almacenen en formato *pdf* en una ruta en la red. En la Figura 52 se aprecia un modelo de reporte que se genera por guardia sobre los espesadores.

Figura 52

Reporte de los espesadores CCD 4 y CCD 5



TOTALIZADORES- DCT -PLANTA DE OXIDOS

PLANTA DE OXIDOS

June 21, 2015

REPORTE 1/2 GUARDIA DIA					
EQUIPO	DESCRIPCION	TOTALIZADO	UN.	PROMEDIO	UN.
1/2 TONELAJES					
400-TH-005	TONELAJE DE DESCARGA CCD 3	1668.818	Tm	139.068	Tm/h
450-TH-001	TONELAJE DE DESCARGA 1/2 CCD 4	1890.752	Tm	157.563	Tm/h
450-TH-002	TONELAJE DE DESCARGA CCD 5	1008.719	Tm	84.060	Tm/h
450-TK-004	TONELAJE DE DESCARGA TANQUE 4 HACIA DETOX	1012.769	Tm	84.397	Tm/h
FLUJOS					
400-TH-005	VOLUMEN DE DESCARGA CCD 3	1472.557	m3	122.713	m3/h
450-TH-001	VOLUMEN DE DESCARGA CCD 4	1395.349	m3	116.279	m3/h
450-TH-002	VOLUMEN DE DESCARGA CCD 5	766.726	m3	63.894	m3/h
450-TK-004	VOLUMEN DE DESCARGA TANQUE 4	1706.942	m3	142.245	m3/h
450-TK-001	VOLUMEN DE AGUA PARA DISOLVER PULPA TANQUE 1	0.080	m3	0.007	m3/h
450-TK-002	VOLUMEN DE AGUA PARA DISOLVER PULPA TANQUE 2	53.641	m3	4.470	m3/h
450-TK-004	VOLUMEN DE AGUA PARA DISOLVER PULPA TANQUE 4	1240.418	m3	103.368	m3/h
450-TH-001	VOLUMEN DE FLOCULANTE HACIA CCD 4	10.858	m3	0.905	m3/h
450-TH-002	VOLUMEN DE FLOCULANTE HACIA CCD 5	12.536	m3	1.045	m3/h
450-TK-003	VOLUMEN DE AGUA DE PROCESO HACIA 1500TK002	729.406	m3	60.784	m3/h
1/2 DENSIDADES					
400-TH-005	DENSIDAD EN LA DESCARGA CCD 3	—	—	1.742	Tm/m3
450-TH-001	DENSIDAD EN LA DESCARGA CCD 4	—	—	1.889	Tm/m3
450-TH-002	DENSIDAD EN LA DESCARGA CCD 5	—	—	1.861	Tm/m3
450-TK-004	DENSIDAD EN LA DESCARGA TANQUE 4 HACIA DETOX	—	—	1.380	Tm/m3
TORQUES					
450-TH-001	TORQUE ESPESADOR CCD 4	—	—	37.348	%
450-TH-002	TORQUE ESPESADOR CCD 5	—	—	17.688	%

Nota: Capturas de pantalla del reporte los equipos.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se realiza una discusión detallada sobre las pruebas realizadas en los distintos componentes del sistema, incluyendo los sensores digitales y analógicos, motores con arranque directo y variador, también las válvulas que son importantes para el correcto funcionamiento de la instalación.

Además, se analiza el proceso de validación de las secuencias de arranque y los controladores fundamentales para garantizar una operación segura y eficiente del sistema. Posteriormente, se aborda la puesta en funcionamiento del circuito de espesadores, explicando los pasos seguidos para asegurar una integración exitosa dentro del proceso general.

Finalmente, el capítulo concluye con un análisis económico del proyecto, donde se evalúan los costos incurridos y los beneficios obtenidos, proporcionando una visión completa del impacto financiero de la implementación.

4.1. Pruebas de funcionamiento de instrumentos

Se llevan a cabo pruebas de comisionamiento para asegurar que los datos de los sensores se visualicen correctamente en las pantallas gráficas del sistema SCADA. Estas pruebas implican en registrar y validar las lecturas de los sensores en el PLC y luego estas se reflejen en las pantallas gráficas del sistema de supervisión. Las pruebas realizadas a los sensores analógicos y digitales se documentaron en el archivo PROTOCOLO_PRECOM_SENALES_E_S.pdf, y la Figura 53 muestra una parte de dicho archivo.

Figura 53

Protocolo de pruebas de los instrumentos digitales y analógicos

ORDEN DE SERVICIO N° 0002829-14 PROYECTO N° PROV-081.14.FLSMIDTH REV B						CCD 4 AND CCD 5 THICKENERS FLSMIDTH PROTOCOLO PRECOMISIONAMIENTO DE SEÑALES DE ENTRADA/SALIDA						COVOTROL SYSTEM INTEGRATION...			
Tablero Tag N° 450-GC-001															
Tag	Tag Original	Tipo de señal	Channel	Start	Control	Descripción	Estado de Motor	Mensaje Recv: Entrada = 1 logico	Mensaje Recv: Entrada = 0 logico	Atorno en el HMI	Result esperado	Observaciones	SI	NO	
HS-4501M030-2	HS-4501M030-2	DI	1	12	0	switch e-stop relay drive	0 segundos	OK	ALARMA	OK	SI				
HS-4501M030-2	HS-4501M030-2	DI	1	12	1	switch e-stop relay drive							X		
HS-450A0300-2	HS-450A0300-2	DI	1	12	2	switch stop cool mix in agitator									
HS-450A0300-3	HS-450A0300-3	DI	1	12	3	switch e-stop cool mix in agitator	0 segundos	OK	ALARMA	OK	SI				
HS-450A0300-2	HS-450A0300-2	DI	1	12	4	switch stop cool 5 mix in agitator								X	
HS-450A0300-3	HS-450A0300-3	DI	1	12	5	switch e-stop cool 5 mix in agitator							X		
HS-450A0300-2	HS-450A0300-2	DI	1	12	6	switch stop cool 5 u-flow mix in agitator							X		
HS-450A0300-3	HS-450A0300-3	DI	1	12	7	switch e-stop cool 5 u-flow mix in agitator							X		
HS-4501M001-1A	HS-4501M001-1A	DI	1	12	8	switch stop relay drive									
HS-4501M001-1B	HS-4501M001-1B	DI	1	12	9	switch start relay drive									
HS-4501M002-1A	HS-4501M002-1A	DI	1	12	10	switch stop relay drive							X		
HS-4501M002-1B	HS-4501M002-1B	DI	1	12	11	switch start relay drive							X		
HS-4501P000-2	HS-4501P000-2	DI	1	12	12	switch stop cool 5 mix in pump							X		
HS-4501P000-3	HS-4501P000-3	DI	1	12	13	switch e-stop cool 5 mix in pump							X		
HS-230C-0104	HS-230C-0104	DI	1	12	14	limit switch underflow in pump 1a		closed							
HS-230C-0104	HS-230C-0104	DI	1	12	15	limit switch underflow in pump 1a		opened							

Nota: Elaboración propia.

4.2. Pruebas de funcionamiento de motores

Se realizan pruebas de comisionamiento para garantizar que los motores puedan ser controlados tanto localmente como de forma remota, y que las señales de estado de operación, permisivos, *interlocks* y alarmas funcionen correctamente. Las pruebas realizadas a los motores (arranques directos y variadores de velocidad) se documentaron en el archivo PROTOCOLO_PRECOM_MOTORES.pdf, y la Figura 54 muestra una parte de dicho archivo.

Protocolo de pruebas de los motores

Nota: Elaboración propia.

Se realizan pruebas de comisionamiento para garantizar que las válvulas puedan ser controlados tanto localmente como de forma remota, y que las señales de estado de operación, permisivos, *interlocks* y alarmas funcionen correctamente. Las pruebas de las válvulas se documentaron en el archivo PROTOCOLO_PRECOM_VALVULAS.pdf, y la Figura 55 muestra parte de dicho archivo.

Protocolo de pruebas de las válvulas

Nota: Elaboración propia.

Para llevar a cabo el comisionamiento de las secuencias, en primer lugar, es necesario realizar el comisionamiento de las válvulas y motores. Las pruebas de estos

elementos se registraron en las secciones anteriores. A continuación, se llevan a cabo pruebas de comisionamiento para asegurar que los pasos de las secuencias se cumplan correctamente, así como también las señales de permisivos e *interlocks* funcionen adecuadamente. Las pruebas se documentaron en el protocolo PROTOCOLO_COM_SECUENCIAS.pdf, y la Figura 56 muestra parte del archivo.

Figura 56

Protocolo de pruebas de las secuencias

PRUEBA DE ARRANQUE EN SECUENCIA DE 450-PU-001A				
Proyecto:		P&ID: DT-2500128-450-D-003		
Sistema: 450-SEC-001		Diag. Esquemático:		
Tag Equipo: 450-PU-001A		Diag. Lógico:		
Descripción: CCD 4 UNDERFLOW PUMP 1 DUTY				
Item	Descripción	Resultado	Conformidad	
			SI	NO
<u>Arranque en secuencia hacia el tanque 450-TK-002</u>				
1	Se verifica el estado del motor detenido y las válvulas cerradas.	OK		
2	Se selecciona desde el HMI la válvula HV-0307	OK		
3	Se arranca la secuencia desde el HMI.	OK		
4	Se confirma apertura de la válvula de agua de sello HV-1430.	OK		
5	Se confirma apertura de la válvula HV-0307.	OK		
6	Se confirma apertura de la válvula HV-0301.	OK		
7	Se confirma cierre de la válvula HV-0305.	OK		
8	Se confirma apertura de la válvula HV-0104.	OK		
9	Se confirma arranque de la bomba 450-PU-001A.	OK		
<u>Arranque en secuencia hacia el tanque 450-TK-004</u>				
10	Se verifica el estado del motor detenido y las válvulas cerradas.	OK		
11	Se selecciona desde el HMI la válvula HV-0306	OK		
12	Se arranca la secuencia desde el HMI.	OK		
13	Se confirma apertura de la válvula de agua de sello HV-1430.	OK		
14	Se confirma apertura de la válvula HV-0306.	OK		
15	Se confirma apertura de la válvula HV-0301.	OK		
16	Se confirma cierre de la válvula HV-0305.	OK		
17	Se confirma apertura de la válvula HV-0104.	OK		
18	Se confirma arranque de la bomba 450-PU-001A.	OK		

Nota: Elaboración propia.

4.5. Pruebas de funcionamiento de los controladores

Se realizan pruebas de comisionamiento para garantizar que los controladores funcionen adecuadamente y se asegure el ajuste adecuado de los parámetros de los controlador PID. Las pruebas se documentaron en el protocolo PROTOCOLO_COM_LAZOS_PID.pdf, y la Figura 57 muestra parte del archivo.

Figura 57

Protocolo de pruebas del lazo 450FIC0320 del espesador CCD 4

PRUEBA DE SINTONIZACIÓN DEL LAZO DE CONTROL 450-FIC-0302				
Proyecto:		P&ID: DT-2500128-450-D-003		
Sistema: 450-FIC-0302		Diag. Esquemático:		
Tag Equipo: 450-PU-001A, 450-PU-001B		Diag. Lógico:		
Descripción: Thickener Underflow Density Control in the Discharge Cone				
Paso	Descripción	Resultado	Conformidad	
			SI	NO
1	Verificación de la comunicación con el sensor.	OK		
2	Verificación del control de la Bomba en Modo Manual del controlador PID.	OK		
3	Cambio el modo de Manual a Automático.	OK		
<u>Prueba</u>				
4	PV inicial:			
	Cambio de Set Point:			
	Tiempo de establecimiento (aprox):			
	Máximo valor de PV experimentado:			
<u>Prueba</u>				
5	PV inicial:			
	Cambio de Set Point:			
	Tiempo de establecimiento (aprox):			
	Máximo valor de PV experimentado:			
<u>Sintonización del lazo de control :</u>				
6	Método:			
	Ganancia Proporcional:	0.272		
	Ganancia Integral:	0.0385		
	Ganancia Derivativa:	0.02		
	Sustancia en las tuberías:	PULPA		

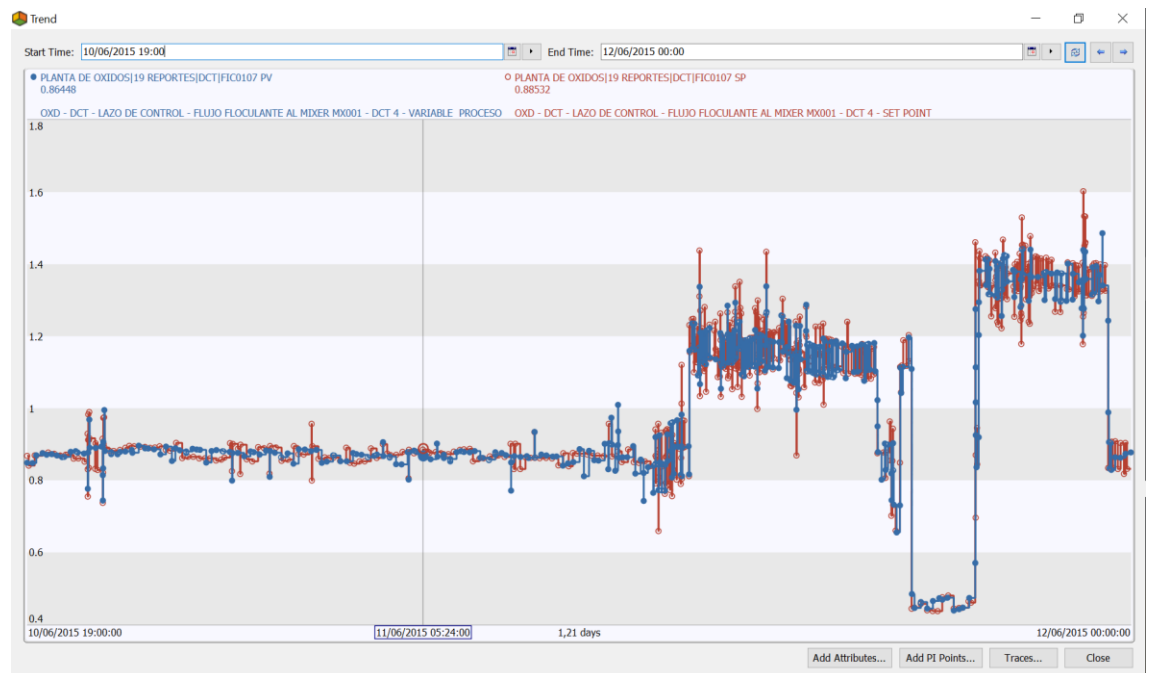
Nota: Elaboración propia.

En la Figura 58 se muestra como ejemplo la tendencia de la referencia (SP) de flujo de dosificación de floculante versus la señal de proceso (PV) proveniente del flujómetro. Se puede apreciar que la señal de PV sigue a la señal de SP en los diferentes cambios que presenta la señal. Es importante señalar que a diferencia de los controlador PID

tradicionales, el SP esta determinada por las ecuaciones de proceso lo que ocasiona que la señal sea variable en el tiempo.

Figura 58

Comparación de la tendencia del PV (azul) y SP (rojo) del lazo FIC-0107



Nota: Captura de pantalla del software PI Asset Framework.

En la Figura 59 se muestra la tendencia del SP de flujo de dosificación de floculante versus la señal PV proveniente del flujómetro. Se puede apreciar que la señal de PV sigue a la señal de SP en los diferentes cambios que tiene esta señal.

Figura 59

Comparación de la tendencia del PV (azul) y SP (rojo) del lazo FIC-0408



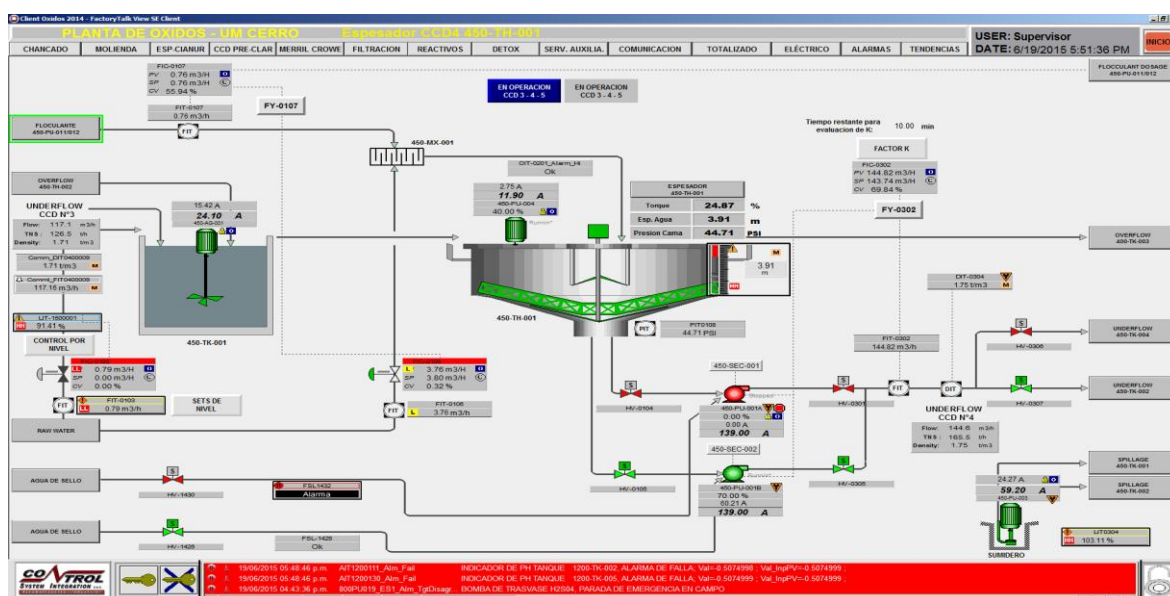
Nota: Captura de pantalla del software PI Asset Framework.

4.6. Puesta en marcha del circuito de espesadores CCD 4 – CCD 5

Una vez los equipos del sistema de control fueron probados entra en funcionamiento el sistema de espesadores CCD 4 -CCD 5. Es importante mencionar que para garantizar el correcto funcionamiento se desarrollaron pantallas gráficas en el sistema SCADA pueda tener la información a la mano para arrancar el sistema. En la Figura 60 se muestra la pantalla gráfica principal en el sistema SCADA del espesador CCD 4. Desde la pantalla gráfica principal se tiene el monitoreo de los parámetros críticos del espesador: torque, espejo de agua, presión de cama. Se tiene comando de todos los motores y la activación de los controladores y así como el establecimiento del factor K . Adicionalmente se tiene acceso a las pantallas gráficas y a los parámetros de operación del ingreso que proviene del espesador CCD 3.

Figura 60

Pantalla gráfica principal del espesador CCD 4 en el sistema SCADA



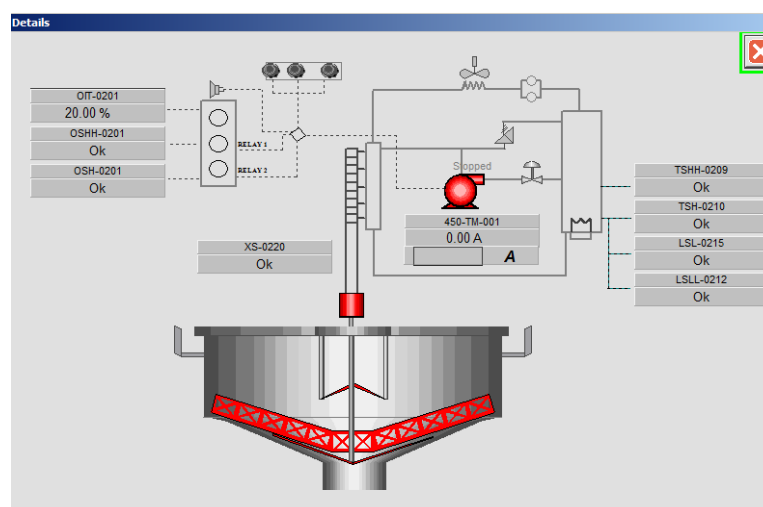
Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Para que el espesador pueda mover la rastra se tiene un sistema hidráulico que tiene un circuito que permite que la rastra del espesador gire. El encendido de la rastra del espesador (450-TM-001) se realiza únicamente desde el puente del espesador, previa habilitación de sala de control (habilitación del modo manual). El apagado se puede realizar desde el puente del espesador y también desde la sala de control.

En la Figura 61 se muestra la pantalla gráfica de detalle del sistema hidráulico, se muestran las señales principales y el valor del torque.

Figura 61

Pantalla gráfica del sistema hidráulico del espesador CCD 4

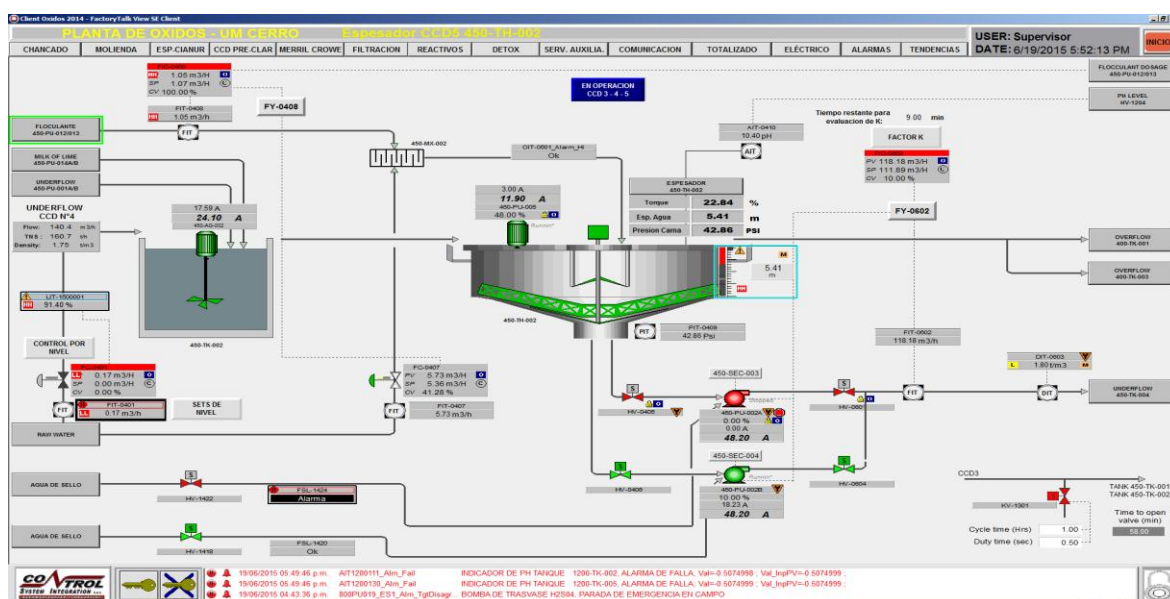


Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Para el monitoreo y control del área del espesador 450-TH-002 (CCD 5), se ha desarrollado una pantalla gráfica en el sistema SCADA donde se encuentran los equipos principales que intervienen en el funcionamiento del espesador, además se tiene acceso a los controladores PID que regulan el funcionamiento del sistema. En la Figura 62 se muestra la pantalla gráfica principal del espesador CCD 5.

Figura 62

Pantalla gráfica principal del espesador CCD 5



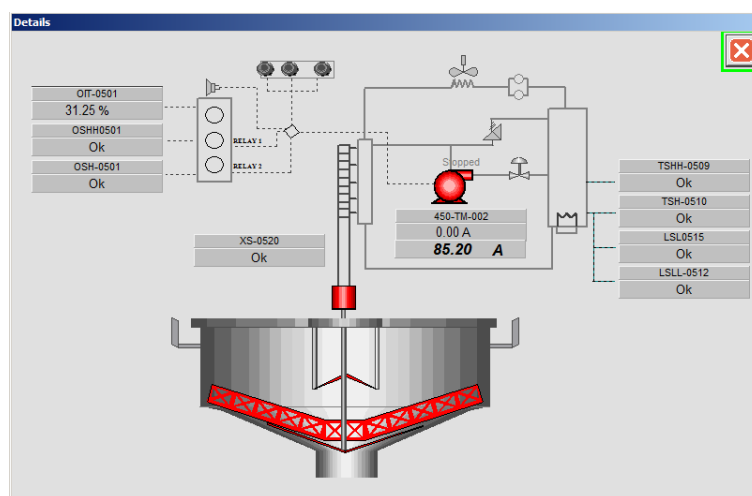
Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Para que el espesador pueda mover la rastra se tiene un sistema hidráulico que tiene un circuito que permite que la rastra del espesador gire. El encendido de la rastra del espesador (450-TM-002) se realiza únicamente desde el puente del espesador, previa habilitación de sala de control (habilitación del modo manual). El apagado se puede realizar desde el puente del espesador y también desde la sala de control.

En la Figura 63 se muestra la pantalla gráfica de detalle del sistema hidráulico, se muestran las señales principales y el valor del torque.

Figura 63

Pantalla gráfica de detalle del espesador CCD 5



Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk View Site Edition.

4.6.1. Incorporación de nuevos sistemas de controladores

Dentro del procedimiento de puesta en marcha se requirieron hacer adecuaciones a los controladores debido a condiciones operativas que se identifican en el marco de las pruebas de funcionamiento.

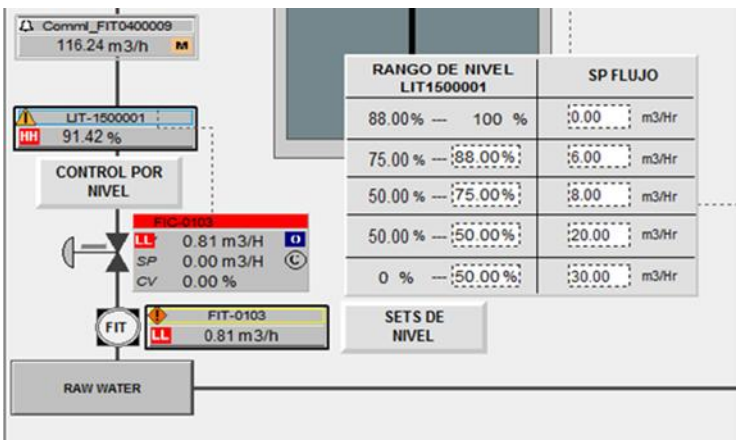
El primer caso se da en los controladores de dosificación de agua a los espesadores FIC-0103 y FIC-0401 los cuales por condiciones de proceso, que fue notorio en la puesta en marcha del sistema, que por momentos en la operación de los espesadores no se podía suministrar demasiado flujo de agua siguiendo el punto de referencia de los cálculos, debido a que podría ocasionar que el *overflow* de los espesadores se sume en el tanque de agua de proceso y rebose de su capacidad, debido a esto el flujo debía controlarse en función del nivel del tanque de agua de procesos. El nivel del tanque de agua de procesos se monitorea con el sensor LIT-1500001. Entendiendo esta limitante se desarrolló la opción para que el punto de referencia sea determinado por un control por niveles. Debido a esto se desarrolló una tabla configurable por el operador. Finalmente se habilitó un botón con la

opción de cambiar entre las opciones que el punto de referencia sea determinado por los cálculos o por el nivel. En la Figura 64 y Figura 65 se muestra las tablas de control por niveles para los controlador FIC-0103 y FIC-0401 respectivamente. También se habilitó un botón para que le operador pueda seleccionar cual será la fuente del punto de referencia que se utilizará para controlar el lazo, ya se “Control por Nivel” o “Control por ecuaciones”.

El siguiente cambio se realizó en el controlador FIC-0708 que controla el flujo de dosificación del *underflow* hacia la planta *Detox* (destrucción de cianuro). En algunas condiciones se requiere que el punto de referencia de flujo sea constante para mantener una alimentación constante continua y constante para operar de forma óptima. Por lo cual se habilitó un botón que permita seleccionar También se habilitó un botón para que le operador pueda seleccionar cual será la fuente del punto de referencia que se utilizará para controlar el lazo ya se “Control por Flujo” o “Control por porcentaje de sólidos”. En la Figura 66 se muestra el botón selector para cambiar entre control por flujo o control por “porcentaje de sólidos”.

Figura 64

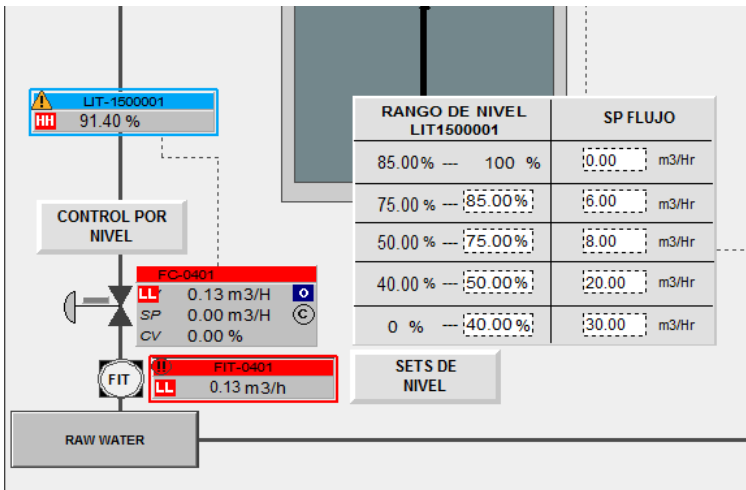
Controlador de nivel para la adición de agua al tanque 450-TK-001



Nota: Captura de pantalla del software FactoryTalk Site Edition.

Figura 65

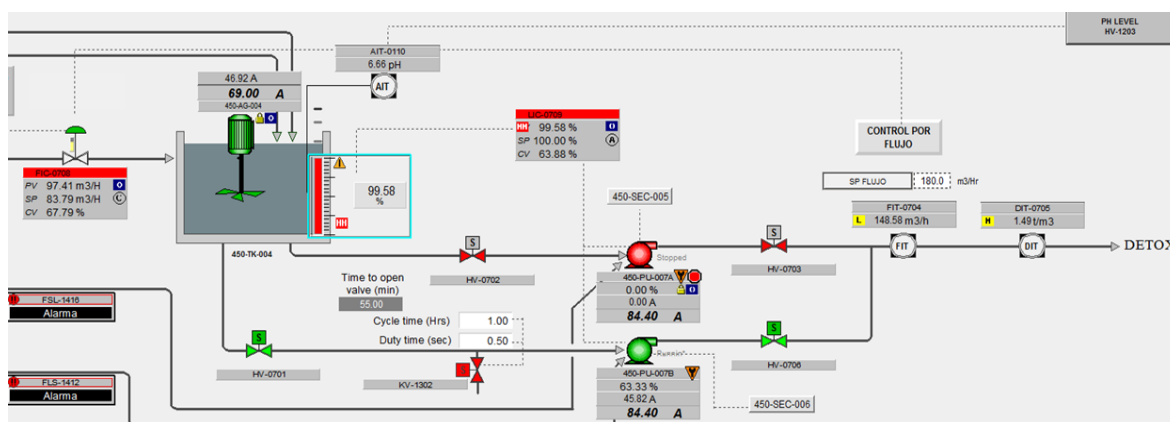
Controlador de nivel para la adición de agua al tanque 450-TK-002



Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk View Site Edition.

Figura 66

Controlador de flujo para la dosificación de flujo hacia Detox



Nota: Capturas de pantalla del software FactoryTalk View Site Edition.

4.6.2. Selector de Operación de Espesadores

Dentro de la operación del sistema de los espesadores de cono profundo CCD 4 y CCD 5 se pueden presentar situaciones en las cuales alguno de los espesadores tenga que salir de servicio ya sea por fallas del sistema o por temas de mantenimiento. Previendo estos casos se ha implementado un botón selector para indicar con que espesadores se trabajarán y los cálculos se actualicen automáticamente.

Este botón se encuentra en la pantalla gráfica del espesador CCD 4 y CCD 5. Para acceder a cambiar el modo de operación de los espesadores tenemos que estar con el usuario supervisor, estos modos de operación deciden el ingreso de flujo y densidad de pulpa al espesador CCD 5, las cuales pueden provenir del espesador CCD 3 o del espesador CCD 4.

En la Tabla 38 se muestra los valores del tag y los estados de operación, en base a estos valores las fórmulas con los cálculos de los puntos de referencia (*set point*) se actualizarán automáticamente.

Tabla 38

Valores del botón selector de modo operación de los espesadores

Estados	Valor del tag
	OPERATION_MODE=0
	OPERATION_MODE=1
	OPERATION_MODE=2

4.7. Análisis Económico del proyecto

En esta sección se enfoca en el análisis económico del proyecto de automatización de los espesadores de cono profundo CCD 4 y CCD 5. El objetivo principal de este análisis económico es evaluar la viabilidad financiera de la automatización, considerando tanto los costos incurridos como los beneficios obtenidos después de su implementación.

Es relevante destacar que la implementación de una arquitectura compatible con el sistema de control de la planta de lixiviación permitió ahorrar en la compra de licencias de software, ya que se utilizaron las licencias existentes para el sistema SCADA.

En la Tabla 39 se muestra un desglose de los costos asociados con la adquisición de los tableros de control: 450-GC-001, 450-TC-001 y 450-TC-002. En otra línea se incluye los gastos por el servicio necesario para el desarrollo de la lógica de control: incluye la programación del PLC, diseño de las pantallas gráficas para el panel HMI en campo, diseño de pantallas gráficas en el sistema de supervisión, la cual se basó en los documentos proporcionados por la etapa de ingeniería del proyecto. Por último, se detalla el gasto correspondiente a la puesta en marcha, que abarca las horas de trabajo en planta destinadas a llevar a cabo las pruebas de arranque/paradas de los motores, lectura de los

sensores (analógicos y digitales), apertura/cierre de las válvulas, inicio/fin de las secuencias, sintonización de los controladores PID del sistema y pruebas de funcionamiento de todos los sistemas conjuntos con el material final.

Tabla 39

Costos del sistema de control

Ítem	Descripción	Costos
1	Tablero de control 450-GC-001	\$31,451.74
2	Tablero de control RIO 450-TC-001	\$70,696.83
3	Tablero Panel 450-TC-002	\$5,604.55
4	Servicio de ingeniería	\$32,669.65
5	Materiales adicionales	\$1,754.94
6	Servicio de puesta en marcha	\$13,040.00
	Total	\$155,217.71

El costo total del proyecto asciende a \$12 millones. Los costos asociados a la implementación de la automatización del sistema resultan ser menores comparados con los gastos principales asociados con la parte de construcción, instalación de la infraestructura metal mecánica, adquisición de los motores, bombas y variadores. Además, esto se refleja en que los costos de la parte de automatización resultan un 1.2% del total del costo del proyecto.

Como resultado de la implementación del proyecto se obtuvo mayor producción de onzas de plata tal como se refleja en la Tabla 40, el aumento se ve reflejado a partir del tercer semestre del año 1, donde se obtuvo un aumento de 0.4 millones de onzas de plata en el trimestre siguiente del arranque del proyecto. Este aumento resulta en un aumento

del ingreso en 6.28 millones de USD. Con estas cifras podemos calcular el ROI mensual del proyecto en 17.4%. Con esto se obtiene un retorno de la inversión en 5.7 meses.

Tabla 40

Ingresos calculados en base a la producción de plata

Año	Trimestre	Producción de Onzas de plata (millones)	Costo onza (USD/Onza)	Ingreso (Millones USD)
1	1	0.6	15.7	9.42
1	2	0.6	15.7	9.42
1	3	1.0	15.7	15.7
1	4	1.0	15.7	15.7
2	1	1.0	15.7	15.7

Nota. Basado en Reporte Anual 2015 y 2016 de la empresa minera.

4.8. Demostración de las hipótesis

La hipótesis general de este informe establece que se espera que la automatización de dos espesadores de tipo cono profundo incremente la recuperación de mineral disuelto en la etapa de lavado de relaves. Para validar la hipótesis básicamente se establece la métrica producción de onzas de plata. La cual fue medida antes de la implementación proyecto y posterior al mismo. Los resultados obtenidos demuestran que, tras la automatización del sistema de espesadores de cono profundo, la producción de onzas de plata aumento en 67% (según Tabla 40). Esto confirma que el sistema automatizado ha mejorado la productividad de la planta, tal como se planteó en la hipótesis inicial.

La primera hipótesis específica plantea que la implementación de una arquitectura de control compatible con la red de la planta de lixiviación mejorará la eficiencia de la

comunicación y reducirá los costos de implementación. Para validar esta hipótesis, se comprobó que el sistema SCADA funcionó correctamente sin necesidad de adquirir servidores o licencias adicionales, ya que se pudo reutilizar los recursos existentes de la planta. Esto resultó en un ahorro estimado de USD 20,000.

La segunda hipótesis específica sugiere que el desarrollo de rutinas de control para la dosificación precisa de floculante, el suministro adecuado de agua y la regulación del flujo en la descarga mantendrá la altura de agua clara dentro de los rangos operativos, mejorando así la eficiencia y estabilidad del proceso de espesamiento. Para validar esta hipótesis, se presentan la Figura 58 y Figura 59, que muestran el funcionamiento de los controladores. Además, durante la etapa de comisionamiento del sistema, no se registraron paradas inesperadas de los espesadores.

La tercera hipótesis específica plantea que la creación de pantallas gráficas en el sistema SCADA, utilizando las librerías PlantPAx, permitirá un monitoreo eficiente de los parámetros operativos y un control remoto preciso de los equipos del circuito de espesadores de cono profundo, optimizando así el rendimiento del sistema. Para validar esta hipótesis, se hace referencia al cronograma, ya que el comisionamiento del sistema se completó en 17 días, gracias en gran parte a que los diseños se pudieron realizar en menor tiempo debido a la compatibilidad con el sistema existente

Para concluir en la Figura 67 se muestra una imagen de los espesadores construidos y actualmente en operación en la planta de lixiviación de óxidos de planta. Esta ilustración se incluye como evidencia visual del correcto funcionamiento del sistema implementado.

Figura 67

Espesadores CCD 4 y CCD 5



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Conclusiones

- El proyecto de automatización de dos espesadores de cono profundo ha demostrado ser una estrategia eficaz para incrementar la recuperación de mineral disuelto en la etapa de relaves permitiendo que la empresa minera obtenga un ROI de 5.7 meses.
- La implementación de una arquitectura de control basada en equipos compatibles se traduce en un ahorro estimado USD 20,000, al no requerir comprar servidores ni licencias adicionales para el sistema SCADA.
- La automatización solo representa el 1.2% del costo total del proyecto, pero reduce los errores humanos y asegura un retorno de inversión sostenible.
- Para acelerar el desarrollo de las pantallas gráficas, se emplearon los diseños de la plantilla de la librería *PlantPAX* para elaborar gráficos de los equipos del sistema de espesadores y permitió completar la puesta en marcha del sistema en 17 días.

Recomendaciones

- Se recomienda implementar un programa de mantenimiento regular para los equipos del sistema, con el objetivo de reducir el riesgo de desgaste prematuro y la disminución de la precisión de los controladores.
- Se recomienda automatizar el arranque del sistema hidráulico de los espesadores, podría automatizarse mediante la incorporación de una válvula electromecánica, para realizar el arranque de los espesadores de forma remota y reducir el tiempo de arranque del sistema.

Referencias bibliográficas

- Wills, B., & Napier-Munn, T. (2006). *Wills' Mineral Processing Technology*. Gran Bretaña: Elsevier Science & Technology Books.
- Ang, K., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID Control System Analysis. Design, and Technology. *IEEE Transactions on Control Systems*, 559-576.
- Bryan, L., & Bryan, E. (1997). *PROGRAMMABLE CONTROLLERS THEORY AND IMPLEMENTATION Second Edition*. Atlanta: Industrial Text Company.
- Butragueño Muñoz, J. A. (2015). *TEORIAS Y TECNOLOGIAS APLICADAS AL ESPESADO DE ESTERILES Y SU IMPACTO EN LA SOSTENIBILIDAD DE LAS OPERACIONES MINERAS*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Minas (UPM) [antigua denominación], Ingeniería Geológica y Minera, Madrid. Obtenido de <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.50795>
- Cabrejos Salinas, J. A. (2011). *ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACION DE AGUA A PARTIR DE RELAVES DE GRAN MINERIA DE COBRE MEDIANTE LA TECNOLOGIA DE RELAVES ESPESADOS (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Caro, D. (2016). *Automation Network Selection: A Reference Manual, Third Edition*. North Carolina: International Society of Automation.
- Gupta, A., & Yan, D. (2006). *Mineral Processing Design and Operation*. Países Bajos: ELSEVIER.
- ODVA. (2016). *TECHNOLOGY OVERVIEW SERIES: ETHERNET/IP*. Obtenido de <https://www.odva.org/>: <https://www.odva.org/wp-content/uploads/2020/05/PUB00138R6-Tech-Series-EtherNetIP.pdf>

Peciña Belmonte, L. (2018). *Comunicaciones industriales y WinCC*. Ulzama: Marcombo.

Petruzella, F. (2017). *Programmable Logic Controllers 5th edition*. New York: McGraw-Hill Education.

ProSoft. (19 de 04 de 2024). *ProSoft*. Obtenido de <https://mx.prosoft-technology.com/Productos/Gateways/PLX3x/PLX31/Ethernet-IP-para-Siemens-Industrial-Ethernet>

Rockwell. (10 de Mayo de 2024). *Controladores programables*. Obtenido de <https://www.rockwellautomation.com/es-pr/products/hardware/allen-bradley/programmable-controllers/all-products.html>

Rodríguez Avello-Sanz, Á., Butragueño Muñoz, J. A., & Grima Olmedo, C. (2013). Evolución de los equipos de decantación para estériles de mina: del espesador convencional al de cono profundo para la producción de pasta. *XIII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales (CIERM 2013)*, (págs. 30-38). Santander.

Ros Moreno, A. (12 de Marzo de 2014). *Separación Sólido - Líquido en Hidrometalurgia (Espesadores y filtros)*. Recuperado el 06 de Marzo de 2021, de <https://es.scribd.com/document/207509908/Separacion-Solido-Liquido-en-Hidrometalurgia>

Serbon, J. C., Mac-Namara, L., & Schoenbrunn, F. (2016). Application of the FLSmith Deep Cone technology to the Fertilizer plants in OCP. *Procedia Engineering*(138), 315.

Anexos

<i>Anexo 1: Ecuación fracción en masa de sólidos</i>	<i>1</i>
<i>Anexo 2: Ecuación densidad buscada (D2)</i>	<i>2</i>
<i>Anexo 3: Parámetros de lectura de la planta de preparación de floculante</i>	<i>4</i>
<i>Anexo 4: Parámetros de escritura de la planta de preparación de floculante.</i>	<i>5</i>

Anexo 1: Ecuación fracción en masa de sólidos

Definición:

$$\text{Fracción Sólidos} = \frac{m_{\text{sólido}}}{m_{\text{pulpa}}}$$

Reemplazando en función de la densidad y el volumen

$$\text{Fracción Sólidos} = \frac{D_{\text{sólido}} V_{\text{sólido}}}{D_{\text{pulpa}} V_{\text{pulpa}}}$$

Teniendo en cuenta que la pulpa es una mezcla de partículas sólidas dispersas en un flujo transportador tenemos que:

$$m_{\text{pulpa}} = m_{\text{sólido}} + m_{\text{líquido}}$$

$$V_{\text{pulpa}} D_{\text{pulpa}} = V_{\text{sólido}} D_{\text{sólido}} + V_{\text{líquido}} D_{\text{líquido}}$$

$$V_{\text{pulpa}} D_{\text{pulpa}} = V_{\text{sólido}} D_{\text{sólido}} + (V_{\text{pulpa}} - V_{\text{sólido}}) D_{\text{líquido}}$$

$$V_{\text{pulpa}} D_{\text{pulpa}} = V_{\text{sólido}} D_{\text{sólido}} + V_{\text{pulpa}} D_{\text{líquido}} - V_{\text{sólido}} D_{\text{líquido}}$$

$$V_{\text{pulpa}} (D_{\text{pulpa}} - D_{\text{líquido}}) = V_{\text{sólido}} (D_{\text{sólido}} - D_{\text{líquido}})$$

$$\frac{(D_{\text{pulpa}} - D_{\text{líquido}})}{(D_{\text{sólido}} - D_{\text{líquido}})} = \frac{V_{\text{sólido}}}{V_{\text{pulpa}}}$$

Reemplazando en la expresión anterior se obtiene el porcentaje de sólidos en función de la densidad de pulpa (D_{pulpa}), densidad del líquido ($D_{\text{líquido}}$) y densidad del sólido ($D_{\text{sólido}}$):

$$\text{Fracción Sólidos} = \frac{D_{\text{sólido}} (D_{\text{pulpa}} - D_{\text{líquido}})}{D_{\text{pulpa}} (D_{\text{sólido}} - D_{\text{líquido}})}$$

Anexo 2: Ecuación densidad buscada (D2)

Por definición se sabe que la densidad buscada ($D2$) se puede expresar como:

$$D2 = \frac{m_{pulpa}}{V_{pulpa}}$$

Pero sabemos que del anexo 1 que la masa de la pulpa se puede expresar en función de la masa del sólido y la fracción de sólidos deseadas (PSW):

$$m_{pulpa} = \frac{m_{sólido}}{PSW}$$

Reemplazando en la expresión anterior

$$D2 = \frac{\frac{m_{sólido}}{PSW}}{V_{pulpa}}$$

$$D2 = \frac{m_{sólido}}{PSW V_{pulpa}}$$

$$D2 = \frac{m_{sólido}}{PSW (V_{sólido} + V_{líquido})}$$

$$D2 = \frac{1}{PSW \left(\frac{V_{sólido}}{m_{sólido}} + \frac{V_{líquido}}{m_{sólido}} \right)}$$

$$D2 = \frac{1}{PSW \left(\frac{1}{DS} + \frac{V_{líquido}}{m_{sólido}} \right)}$$

En la definición de fracción de sólidos deseadas despejamos sólidos en función de masa del líquido.

$$PSW = \frac{m_{sólido}}{m_{pulpa}}$$

$$PSW = \frac{m_{solido}}{m_{solido} + m_{liquido}}$$

$$m_{solido} = \frac{PSW}{(1 - PSW)} m_{liquido}$$

Reemplazando esta última expresión obtenemos:

$$D2 = \frac{1}{PSW \left(\frac{1}{DS} + \frac{V_{liquido}}{\frac{PSW}{(1 - PSW)} m_{liquido}} \right)}$$

$$D2 = \frac{1}{PSW \left(\frac{1}{DS} + \frac{V_{liquido}(1 - PSW)}{m_{liquido} PSW} \right)}$$

$$D2 = \frac{1}{PSW \left(\frac{1}{DS} + \frac{(1 - PSW)}{DL \times PSW} \right)}$$

$$D2 = \frac{1}{\frac{PSW}{DS} + \frac{1 - PSW}{DL}}$$

Anexo 3: Parámetros de lectura de la planta de preparación de floculante

Offset	Signal	Type	Comment
0.0	Status Unit	Bool	0=Unit off, 1=Unit on
0.1	Pause	Bool	0=Pause active, 1=Pause inactive
0.2	Ready for delivery	Bool	0=no Release to discharge, 1=Release to discharge
0.3	Common Fault	Bool	0=No faults active, 1=Common Alarm active
0.4	Mode Powder/Liquid	Bool	0=Powder, 1=Liquid
0.5	Mode Intern/Extern	Bool	0=Internal mode, 1=External mode
0.6	Watchdog	Bool	Impulse signal of 0,53Hz
0.7	Reserve	Bool	Reserve
1.0	Valve Process Water	Bool	0=Valve closed, 1=Valve opened
1.1	Powder Feeder	Bool	0=Powder feeder off, 1=Powder feeder on
1.2	Sensor Powder	Bool	0=No Powder present, 1=Powder present
1.3	Powder Heater	Bool	0=Heater off, 1=Heater on
1.4		Bool	
1.5		Bool	
1.6		Bool	
1.7	Stirrer 1(+2)	Bool	0=Stirrer off, 1=Stirrer on
2.0	Stirrer 3	Bool	0=Stirrer off, 1=Stirrer on
2.1		Bool	
2.2		Bool	
2.3	Mode Emptying	Bool	0=Emptying mode off, 1=Emptying mode active
2.4		Bool	
2.5		Bool	
2.6		Bool	
2.7	Reserve	Bool	Reserve
3.0	Fault: 1F2 triggered	Bool	Fault: 1F2 triggered 0=Ok, 1=Fault
3.1	Fault: 1F6 triggered	Bool	Fault: 1F6 triggered 0=Ok, 1=Fault
3.2	Fault: Emergency-off triggered-reserve	Bool	Fault: Emergency-off triggered-reserve 0=Ok, 1=Fault
3.3	Fault: Stirrer motor protection switch triggered	Bool	Fault: Stirrer motor protection switch triggered 0=Ok, 1=Fault
3.4	Fault: Check frequency converter dry feeder	Bool	Fault: Check frequency converter dry feeder 0=Ok, 1=Fault
3.5		Bool	
3.6	Fault: Check pressure sensor	Bool	Fault: Check pressure sensor 0=Ok, 1=Fault
3.7		Bool	
4.0	Fault: Ultromat reservoir too full	Bool	Fault: Ultromat reservoir too full 0=Ok, 1=Fault
4.1	Fault: Powder feeder is empty	Bool	Fault: Powder feeder is empty 0=Ok, 1=Fault
4.2	Fault: Wetting cone too full	Bool	Fault: Wetting cone too full 0=Ok, 1=Fault
4.3		Bool	
4.4		Bool	
4.5		Bool	
4.6	Fault: Ultromat reservoir is empty	Bool	Fault: Ultromat reservoir is empty 0=Ok, 1=Fault
4.7		Bool	
5.0		Bool	
5.1		Bool	
5.2		Bool	
5.3	Fault: Water low in the redilution unit	Bool	Fault: Water low in the redilution unit 0=Ok, 1=Fault
5.4	Warning: Water supply too low	Bool	Warning: Water supply too low 0=Ok, 1=Fault
5.5	Fault: Water supply too low. Ultromat stop	Bool	Fault: Water supply too low. Ultromat stop 0=Ok, 1=Fault
5.6		Bool	
5.7		Bool	
6.0	Fault: Dry feeder is not calibrated	Bool	Fault: Dry feeder is not calibrated 0=Ok, 1=Fault
6.1		Bool	
6.2	Warning: Dry feeder-max. capacity reached	Bool	Warning: Dry feeder-max. capacity reached 0=Ok, 1=Fault
6.3		Bool	
6.4		Bool	
6.5		Bool	
6.6		Bool	
6.7		Bool	
7.0		Bool	
7.1		Bool	
7.2	Fault: Reserve	Bool	Fault: Reserve 0=Ok, 1=Fault
7.3	Fault: Reserve	Bool	Fault: Reserve 0=Ok, 1=Fault
7.4	Fault: Reserve	Bool	Fault: Reserve 0=Ok, 1=Fault
7.5	Fault: Reserve	Bool	Fault: Reserve 0=Ok, 1=Fault
7.6	Fault: Reserve	Bool	Fault: Reserve 0=Ok, 1=Fault
7.7	Fault: Reserve	Bool	Fault: Reserve 0=Ok, 1=Fault
8	Flowrate Process Water	Int	Flowrate process water, decimal place = 0, Unit = l/h
10	Level 1	Int	Level chamber 1 (chamber 3, chamber left chamber top), decimal place = 0
12		Int	
14	Dosing Rate Powder	Int	Dosing rate powder, decimal place = 1, Unit = kg/h
16		Int	
18	Set point Concentration Powder	Int	Display Set point concentration powder, decimal place = 2, Unit = %

Anexo 4: Parámetros de escritura de la planta de preparación de floculante.

Offset	Signal	Type	Comment
0.0	Remote Pause	Bool	Input Pause 0=Pause active, 1=Release unit ---> Only in mode external
0.1	Remote Reset	Bool	Input Reset 0--->1 performs an reset ---> Only in mode external
0.2	Watchdog	Bool	Impulse signal of 0,5 Hz
0.3	Reserve	Bool	Reserve
0.4	Reserve	Bool	Reserve
0.5	Reserve	Bool	Reserve
0.6	Reserve	Bool	Reserve
0.7	Reserve	Bool	Reserve
2	Set point concentration powder	Int	Input Set point concentration powder, decimal place = 2, Unit = %