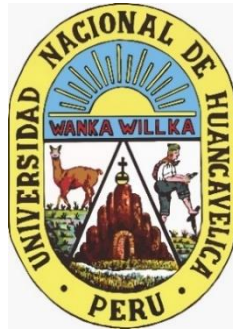


UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA

(Creada por Ley N° 25265)

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA – SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



TESIS

Sistema de control automático para la dosificación de floculante en el proceso de sedimentación del espesador D-1304, en la planta de Hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

PRESENTADO POR:
Juan Erwin CCAHUAY HUAMANÍ
Fischer Saúl SAYAS PEZUA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO

HUANCAVELICA, PERÚ

2024



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En el Auditorium de la Facultad de Ingeniería Electrónica - Sistemas, a los **18** días del mes de **diciembre**, a horas **15:00** del año **2024**, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados con Resolución de Consejo de Facultad N° **147-2024-DFIES-UNH**, de fecha **03** de **octubre** de **2024**, conformado de la siguiente manera:

- PRESIDENTE :** **Dr. Javier Francisco MÁRQUEZ CAMARENA**
ORCID **0000-0002-0523-9569**
DNI N° **19930942**
- SECRETARIO :** **M. Sc. Esteban Edgar DE LA CRUZ VÍLCHEZ**
ORCID **0000-0003-3302-1249**
DNI N° **23983065**
- VOCAL :** **Mg. Janeth Bertha MARIÑO ARROYO**
ORCID **0000-0001-7753-384X**
DNI N° **07969419**

Con la finalidad de llevar a cabo el acto académico de sustentación de tesis, titulado: **“SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN EL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN DEL ESPESADOR D-1304, EN LA PLANTA DE HIDROMETALURGIA DE LA REFINERÍA NEXA RESOURCES - CAJAMARQUILLA”** Aprobado mediante Resolución de Consejo de Facultad N° **202-2024-DFIES-UNH**, de fecha **10** de **diciembre** de **2024**, donde fija la hora y fecha para el mencionado acto.

SUSTENTANTE (s):

Nombres y Apellidos : **Juan Erwin CCAHUAY HUAMANÍ**
D.N.I. N° : **47023835**

Nombres y Apellidos : **Fischer Saúl SAYAS PEZUA**
D.N.I. N° : **70556390**

ASESOR (a):

Nombres y Apellidos : **Dr. Hipólito CARBAJAL MORÁN**
ORCID : **0000-0002-1661-5363**
D.N.I. N° : **23709147**

Luego de haber absuelto las preguntas que fueron formuladas por los Miembros del Jurado, se procede con la deliberación con el resultado de:

Nombres y Apellidos del Autor : **Juan Erwin CCAHUAY HUAMANÍ**

APROBADO DESAPROBADO POR **Mayoría**

Nombres y Apellidos del Autor : **Fischer Saúl SAYAS PEZUA**

APROBADO DESAPROBADO POR **Mayoría**

Para constancia se expide la presente acta, en la ciudad de Pampas a los **18** días del mes de **diciembre** del año **2024**.


PRESIDENTE


SECRETARIO


VOCAL



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Por medio del presente y de acuerdo al siguiente detalle:

- Trabajo de investigación, titulado:
"SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN EL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN DEL ESPESADOR D-1304, EN LA PLANTA DE HIDROMETALURGIA DE LA REFINERÍA NEXA RESOURCES - CAJAMARQUILLA"
- Presentado por:
**SAYAS PEZUA, FISCHER SAUL
CCAHUAY HUAMANI, JUAN ERWIN**
- Docente asesor (a):
CARBAJAL MORAN, HIPOLITO
- Para obtener:
EI TÍTULO PROFESIONAL: INGENIERO(A) ELECTRÓNICO

La Unidad de Promoción, Difusión y Repositorio, **certifica que es un trabajo de investigación original**, se encuentra dentro del porcentaje permitido de coincidencia por la Universidad Nacional de Huancavelica.

Por tanto, en cumplimiento del Art.4° del Reglamento del Software Anti plagio de la Universidad Nacional de Huancavelica, se dictamina que el trabajo de investigación fue analizado por el software anti plagio **TURNITIN** (realizado por el docente Asesor), se expide el presente.

ORIGINALIDAD	SIMILITUD
87%	13%

El Certificado se expide el 15 de noviembre de 2024.

Firmado digitalmente por ESPINOZA
GUISPE Carlos Enrique FAU
20180014662<ca1
Módulo: Soy el autor del documento
Fecha: 15.11.2024 15:52:05 -05:00



Verificar la autenticidad del presente
documento en el siguiente QR.

Título

Sistema de control automático para la dosificación de floculante en el proceso de sedimentación del espesador D-1304, en la planta de Hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla

Autores

Juan Erwin CCAHUAY HUAMANÍ

Fischer Saúl SAYAS PEZUA

Asesor

Dr. Hipólito CARBAJAL MORÁN

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1661-5363>

DNI: 23709147

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestros familiares, cuyo inquebrantable apoyo han sido la base de este logro. A todos los colaboradores de Nexa Resources - Cajamarquilla, gracias por brindarnos la oportunidad de crecer profesionalmente y por su valiosa contribución en el desarrollo de esta investigación.

Agradecimiento

En primer lugar, agradecemos a la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la UNH, que por intermedio de los docentes nos proporcionaron las herramientas académicas y tecnológicas necesarias para nuestra formación profesional y emprender con el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Hipólito Carbajal Morán, asesor de la tesis, por las orientaciones y apoyo; sus conocimientos, paciencia y consejos han sido fundamentales para el desarrollo y finalización de esta investigación.

Al equipo de la Planta de Hidrometalurgia de la Refinería Nexa Resources - Cajamarquilla, por su colaboración y disposición para implementar y probar el Sistema de Control Automático para la Dosificación de Floculante, donde el profesionalismo y apoyo han sido esenciales para culminar con esta tesis.

Finalmente, agradecemos a todos los que, de una u otra manera, han contribuido a la culminación de esta tesis, extendemos nuestros más sinceros agradecimientos, ya que sus aportes y apoyo han sido importantes para alcanzar este logro académico.

Los tesistas

Tabla de contenidos

Acta de sustentación.....	ii
Certificado de similitud.....	iii
Título.....	iv
Autores.....	v
Asesor.....	vi
Dedicatoria.....	vii
Agradecimiento.....	viii
Tabla de contenidos.....	ix
Tabla de contenido de figuras.....	xiii
Tabla de contenido de tablas.....	xvi
Resumen.....	xvii
Abstract.....	xviii
Introducción.....	xix
CAPÍTULO I.....	21
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
1.1. Descripción del problema.....	21
1.2. Formulación del problema.....	24
1.2.1. Problema general.....	24
1.2.2. Problemas específicos.....	24
1.3. Objetivos.....	25
1.3.1. Objetivo general.....	25
1.3.2. Objetivos específicos.....	25
1.4. Justificación.....	26
1.4.1. Justificación económica.....	26
1.4.2. Justificación tecnológica.....	26
1.4.3. Justificación social.....	26
1.4.4. Justificación ecológica.....	27
1.5. Limitaciones.....	27

CAPÍTULO II	28
MARCO TEÓRICO	28
2.1. Antecedentes.....	28
2.2. Bases teóricas	33
2.2.1. Hidrometalurgia del zinc	33
2.2.2. Proceso de obtención de zinc en Nexa Resources – Cajamarquilla.....	35
2.2.2.1. Recepción y almacenamiento de concentrados	37
2.2.2.2. Tostación	37
2.2.2.3. Producción de ácido sulfúrico	38
2.2.2.4. Lixiviación.....	38
2.2.2.5. Etapa de reducción ácida	40
2.2.2.6. Pre-neutralización.....	40
2.2.2.7. Precipitación y filtración de goethita.....	40
2.2.2.8. Lixiviación súper ácida.....	41
2.2.2.9. Purificación.....	41
2.2.2.10. Electrodeposición	43
2.2.2.11. Fusión y moldeado.....	44
2.2.3. Proceso de sedimentación con floculante en hidrometalurgia.....	44
2.2.4. Dosificación de floculante	45
2.2.5. Controladores CompactLogix 5370.....	46
2.2.6. FactoryTalk View Studio.....	50
2.2.7. Accionadores neumáticos	52
2.2.7.1. Actuador neumático de piñón y cremallera Delval Serie 21 ..	54
2.2.8. Variador de frecuencia.....	54
2.2.8.1. Variador de frecuencia PowerFlex serie 520.....	55
2.2.9. Medidores de nivel.....	56
2.2.9.1. Medidores de nivel de líquido	57
2.2.9.2. Medidores de nivel de sólidos	58
2.2.10. Controlador automático	59

2.2.10.1. Control en lazo abierto y lazo cerrado.....	60
2.3. Definición de términos	61
2.4. Hipótesis	63
2.4.1. Hipótesis general.....	63
2.4.2. Hipótesis específicas.....	63
2.5. Variables	64
2.5.1. Variable independiente	64
2.5.2. Variable dependiente	64
2.6. Operacionalización de variables	64
CAPÍTULO III.....	66
MATERIALES Y MÉTODOS	66
3.1. Ámbito temporal y espacial.....	66
3.2. Tipo de investigación.....	67
3.3. Nivel de investigación	67
3.4. Métodos de investigación	68
3.4.1. Implementación del sistema de control automático.....	69
3.4.1.1. Subsistema de control automático para detección del volumen de sedimentación de pulpa.....	70
3.4.1.2. Subsistema de control automático para inyección de floculante a la pulpa en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304	73
3.4.1.3. Programación e integración al sistema SCADA.....	76
3.5. Diseño de investigación.....	90
3.6. Población, muestra y muestreo	91
3.6.1. Población	91
3.6.2. Muestra	91
3.6.3. Muestreo	92
3.7. Técnicas e instrumentos para recolección de datos	92
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	92

CAPÍTULO IV	95
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	95
4.1. Análisis de información.....	95
4.2. Prueba de hipótesis	102
4.3. Discusión de los resultados.....	108
4.3.1. De la Implementación del Sistema Automático y su eficacia	108
4.3.2. De la comparación con antecedentes	109
4.3.3. De las implicaciones de los resultados	110
Conclusiones	111
Recomendaciones.....	113
Referencias bibliográficas.....	115
Anexos	120
Anexo A. Matriz de consistencia	121
Anexo B. Diagramas	122
Anexo C. Datos de muestras	127
Anexo D. Fotografías	137

Tabla de contenido de figuras

Figura 1.	Producción de Zinc refinado en la planta hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources-Cajamarquilla durante los años 2020-2023.....	22
Figura 2.	Diagrama de proceso de obtención de zinc en la refinería de Cajamarquilla.	36
Figura 3.	Efectos del agente floculante sobre partículas en suspensión.	46
Figura 4.	Controlador CompactLogix 5370 - L1 con terminales de E/S integrados.	48
Figura 5.	Controlador CompactLogix 5370 – L2 con terminales de E/S integrados.	49
Figura 6.	Controlador CompactLogix 5370 – L3 con módulos de E/S.....	50
Figura 7.	Plataforma de FactoryTalk View Studio.....	51
Figura 8.	(a) Estructura externa del accionador neumático de piñón y cremallera de doble efecto y retorno a resorte, Delval Serie 21, y (b) estructura interna del accionador.....	54
Figura 9.	Conexiones del variador de frecuencia PowerFlex serie 520.	56
Figura 10.	(a) Vista externa del medidor óptico de nivel de líquido W100-2, y (b) diagrama de conexión emisor-receptor.....	58
Figura 11.	Sistemas de medición de nivel de sólidos fijos y continuos.	59
Figura 12.	Diagrama de control en lazo abierto.	60
Figura 13.	Diagrama de control en lazo cerrado.....	61
Figura 14.	Localización de la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla.....	67
Figura 15.	Diagrama de bloques de la metodología seguida para la implementación del sistema de control automático para la dosificación de floculante.	68
Figura 16.	Diagrama de procesos (a) subsistema de control automático para detección del volumen de sedimentación de la pulpa y (b) subsistema	

de control automático para inyección de dosis de floculante a la pulpa.....	69
Figura 17. Diagrama P&ID del subsistema de control automático para detección del volumen de sedimentación de pulpa.	70
Figura 18. Tablero de muestreo de pulpa, a) ubicación de los actuadores neumáticos y b) ubicación de los sensores ópticos.	71
Figura 19. Instalación del tablero de control de válvulas neumáticas.	71
Figura 20. Diagrama P&ID del subsistema de control automático para inyección de floculante a la pulpa.	73
Figura 21. Instalación de tablero de variador de frecuencia.....	74
Figura 22. Diagrama de integración del sistema SCADA.....	76
Figura 23. Instalación del Switch de comunicaciones del sistema SCADA en el tablero de PLC.....	77
Figura 24. Modo de operación manual del sistema SCADA.	87
Figura 25. Modo automático en etapa de muestreo.....	88
Figura 26. Modo automático en etapa de sedimentación.	89
Figura 27. Modo automático en etapa de lavado.....	90
Figura 28. Interface principal del sistema de control automático para la dosificación de floculante en el proceso de sedimentación del espesador D-1304.....	96
Figura 29. Interface de monitoreo del subsistema de control automático para detección de sedimentación de pulpa, y para inyección de floculante.....	96
Figura 30. Interface del panel de configuración.	97
Figura 31. Interface del panel de permisivos e interlocks.	98
Figura 32. Histograma de la distribución de datos en % (a) A_Pre_test, (b) P_Pre_test, (c) Q_Pre_test y (d) OEE_Pre_test.	101
Figura 33. Histograma de la distribución de datos en % (a) A_Post_test, (b) P_Post_test, (c) Q_Post_test y (d) OEE_Post_test.	102

Figura 34. (a) Distribución de Z y p-value de la prueba de Wilcoxon, (b) histograma del promedio y mediana de los datos de “A” pre y post test (%).	103
Figura 35. Histograma del promedio y mediana de los datos de “P” pre y post test (%).	105
Figura 36. Histograma del promedio y mediana de los datos de “Q” pre y post test (%).	106
Figura 37. (a) Distribución de Z y p-value de la prueba de Wilcoxon, (b) histograma del promedio y mediana de los datos de OEE pre y post test (%).	107
Figura 38. Diagrama de la etapa Pre-neutralización.....	122
Figura 39. Diagrama de tablero de control de floculante.	123
Figura 40. Diagrama de tablero de muestreo de floculante.....	124
Figura 41. Diagrama de tablero de válvulas neumáticas.....	125
Figura 42. Diagrama de tablero de distribución de floculante.....	126

Tabla de contenido de tablas

Tabla 1.	Duración del subproceso de toma de muestra y volumen de sedimentación en la etapa de Pre-neutralizado de la pulpa con floculante.....	23
Tabla 2.	Operacionalización de variables.....	64
Tabla 3.	Instrumentos empleados en el subsistema de detección del volumen de sedimentación de pulpa.	72
Tabla 4.	Equipo de bombeo de floculante del espesador D-1304.....	74
Tabla 5.	Decisiones	75
Tabla 6.	Casos posibles de operación del variador.	75
Tabla 7.	Data Type del programa CPX_PRENEUTRA.	78
Tabla 8.	Rutinas de programación del PLC CPX_PRENEUTRA.....	81
Tabla 9.	Objetos globales del sistema SCADA.....	84
Tabla 10.	Pantallas y faceplates.	86
Tabla 11.	Observaciones con datos perdidos sustituidos.	99
Tabla 12.	Pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov de las variables A_Pre_test, P_Pre_test, Q_Pre_test y OEE_Pre_test.	100
Tabla 13.	Pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov de las variables A_Post_test, P_Post_test, Q_Post_test y OEE_Post_test.	101
Tabla 14.	Prueba de Rangos con signo de Wilcoxon (unilateral a la derecha).	103
Tabla 15.	Prueba de Rangos con signo de Wilcoxon (unilateral a la derecha).	104
Tabla 16.	Prueba de Rangos con signo de Wilcoxon (bilateral).	106
Tabla 17.	Prueba de Rangos con signo de Wilcoxon (unilateral a la derecha).	107
Tabla 18.	Muestras Pre-test y Post-test del volumen de sedimento, acción del variador y duración de proceso.	127
Tabla 19.	Cálculo de Pre-test y Post-test de la disponibilidad “A” (%), rendimiento “P” (%), calidad “Q” (%) y eficacia general del equipo “OEE” (%).	132

Resumen

La tesis aborda la problemática del proceso de dosificación manual de floculante en el espesador D-1304 de la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources - Cajamarquilla, que resulta ineficiente debido a las demoras en el muestreo, lavado y sedimentación de la pulpa, lo que genera variaciones en la inyección del floculante. El objetivo principal fue determinar la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia mencionada. Para lograrlo, se emplearon equipos como el PLC CompactLogix 5370, sensores ópticos de nivel para la detección del volumen de sedimentación en probeta de 1000 ml, válvulas y actuadores neumáticos para toma de muestras y la sedimentación, y una bomba con motor eléctrico para la dosificación de la pulpa de mineral con floculante. La metodología utilizada fue inductivo-deductiva, tomándose durante 10 días muestras pre y post test. Los resultados se analizaron mediante la prueba no paramétrica de Wilcoxon, demostrando una mejora de la disponibilidad para detección del volumen de sedimentación de la pulpa en más de 5.825%, mejora del rendimiento de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación en más de 6.115%, en cuanto a la calidad de la dosificación de floculante en el proceso de sedimentación se mantuvo igual que el proceso manual, y la mejora de la eficacia general (OEE) de dosificación de floculante fue superior a 11.45%. Por lo que se concluye, que fue significativa la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.

Palabras clave: Dosificación automática, floculante, sistema de control, sedimentación, optimización de procesos.

Abstract

The thesis addresses the problem of the manual flocculant dosing process in the D-1304 thickener of the hydrometallurgy plant of the Nexa Resources - Cajamarquilla refinery, which is inefficient due to delays in the sampling, washing and sedimentation of the pulp, which generates variations in the flocculant injection. The main objective was to determine the improvement of the overall flocculant dosing efficiency in the sedimentation process, by implementing an automatic control system in the pre-neutralization stage of the D-1304 thickener, in the hydrometallurgy plant mentioned above. To achieve this, equipment such as the PLC CompactLogix 5370, optical level sensors for detecting the sedimentation volume in a 1000 ml test tube, valves and pneumatic actuators for sampling and sedimentation, and a pump with an electric motor for dosing the mineral pulp with flocculant were used. The methodology used was inductive-deductive, taking pre- and post-test samples for 10 days. The results were analyzed using the Wilcoxon non-parametric test, showing an improvement of the availability for detection of the slurry sedimentation volume by more than 5.825%, improvement of the flocculant injection performance to the slurry in the sedimentation process by more than 6.115%, as for the quality of the flocculant dosing in the sedimentation process remained the same as the manual process, and the improvement of the overall efficiency (OEE) of flocculant dosing was higher than 11.45%. Therefore, it is concluded that the improvement of the overall flocculant dosing efficiency in the sedimentation process was significant when implementing an automatic control system in the pre-neutralization stage of the D-1304 thickener.

Keywords: Automatic dosing, flocculant, control system, sedimentation, process optimization.

Introducción

En la actualidad, la principal exportación de Perú consiste en zinc concentrado, el cual es enviado a otros países para su proceso de refinación. En términos de volumen, la mayoría de estas exportaciones tienen como destinos principales a China, Corea del Sur, España, Brasil y Japón, países donde se lleva a cabo el refinamiento del zinc [1]. Esto posiciona a China no solo como el principal productor de zinc concentrado a nivel mundial, sino también como el principal refinador, ya sea utilizando insumos locales o importados. Por otra parte, Perú también realiza exportaciones de zinc refinado, aunque en menor cantidad, ya que solo una empresa, Nexa Resources Perú, se dedica a esta actividad [2].

Nexa Resources Perú se abastece de sus unidades mineras ubicadas en Cerro Lindo, Atacocha y El Porvenir para obtener los insumos necesarios, los cuales luego son procesados en la refinería de Cajamarquilla. Esta instalación, caracterizada por su avanzada tecnología, lleva a cabo el procesamiento metalúrgico de concentrados de zinc provenientes de diversos productores. La Refinería Cajamarquilla se especializa en la producción de zinc refinado con una pureza del 99,995%. Además de su enfoque en el procesamiento de concentrados de zinc, la planta se dedica a la comercialización de zinc refinado de alta pureza, aleaciones en diversas formas y otros subproductos.

Con este proyecto se pretende implementar un sistema de control automático para dosificar de manera eficiente con floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación de la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources - Cajamarquilla.

La tesis está estructurada en 04 capítulos: En el Capítulo I, se aborda el planteamiento del problema; se presenta la descripción del problema, formulación del problema, objetivos, y justificación de la investigación. En el Capítulo II, se expone el marco teórico; presentando los antecedentes de trabajos similares como artículos

científicos y trabajos de tesis que guiaron el desarrollo de la tesis; también se establecieron las bases teóricas referidos al control automático, dosificación, floculantes, procesos de sedimentación de espesador, PLC Compact Logix 5370 y módulos de entrada/salida discretos y analógicos, procesos industriales y comunicación Ethernet. Así mismo, se definen los términos utilizados, se establecen las hipótesis, variables y su operacionalización. En el Capítulo III, se describe los materiales y métodos; presentando el ámbito temporal y espacial, tipo, nivel método y diseño de investigación; población, muestra y muestreo, técnicas e instrumentos a emplearse en la recolección de datos y las técnicas de procesamiento y análisis de datos. En el Capítulo IV, se presenta los resultados; que comprende el análisis de información, prueba de hipótesis y la discusión de los resultados.

Finalmente, se presenta las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y los anexos; donde se encuentra la información complementaria de dieron soporte al trabajo desarrollado.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Las plantas de producción de la refinería de Zinc de Nexa Resources - Cajamarquilla se encuentran en el distrito de San Juan de Lurigancho - Chosica, en la provincia de Lima, departamento de Lima. Están situadas a la altura del km 9.5 de la carretera central, en el desvío hacia el puente Huachipa. La refinería está emplazada en las afueras del área metropolitana de Lima.

La eficiencia de los procesos en la industria hidrometalurgia es importantes para garantizar la calidad del producto final y reducir costos operativos. En este contexto, el espesador D-1304 juega un papel crucial en la planta de hidrometalurgia de la Refinería Nexa Resources en Cajamarquilla, desempeñando un papel fundamental en el proceso de sedimentación para la obtención de productos metalúrgicos de alta pureza [3].

El proceso de sedimentación en el espesador D-1304 implica la dosificación precisa de floculante FLOPAM PHP-40, un polímero aniónico soluble en agua que facilita la

aglomeración de partículas sólidas en suspensión, permitiendo una separación eficiente del líquido y los sólidos [4]. La dosificación manual actual produce variaciones significativas, afectando la eficiencia del proceso y generando costos adicionales.

Por otro lado, la producción de Zinc refinado depende en forma externa de la explotación minera e en forma interna de la etapa de pre-neutralización, donde es necesario la dosificación con floculante a la pulpa. Dependiendo de la dosificación de floculante la producción de Zinc puede variar. En la planta de hidrometalurgia de la refinera Nexa Resources-Cajamarquilla durante los años 2020-2023 se refinaron un total de 1'289,049.67 t de Zinc (ver Figura 1); presentando picos altos de producción mensual de hasta 30,163.345 t en el año 2021, también existen picos bajos de producción mensual como 13,157.209 t en el mismo año. La producción mensual a lo largo de los meses de estos años siempre fueron variable.

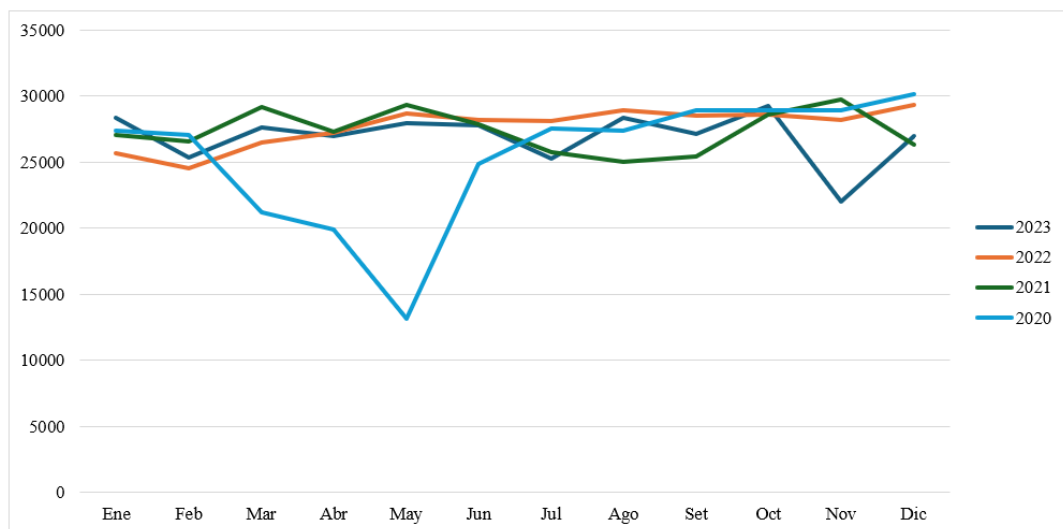


Figura 1. Producción de Zinc refinado en la planta hidrometalurgia de la refinera Nexa Resources-Cajamarquilla durante los años 2020-2023.

Nota. Información obtenida del área de operaciones de Nexa Resources -2024.

En el área de hidrometalurgia, en la sección 40 en el espesador D-1304, la dosificación de floculante se realiza de manera manual, el operador de la etapa de Pre - neutralizado realiza la toma de muestra cada 30 minutos de la parte del ingreso al espesador D-1304 (Pulpa con floculante) y en menos de 3 min debe verificar el volumen de sedimentación de la pulpa, según el procedimiento operacional este volumen debe estar entre 350 ml – 400 ml tomando en cuenta que la probeta de muestra es de 1000 ml, si el nivel de sedimentación es mayor que este valor solicita al operador aumente la dosificación de floculante, si el nivel de sedimentación está muy por debajo del nivel esperado, solicita a otro operario que se baje la dosificación de floculante de manera manual, el ingreso de floculante está controlado por un variador de frecuencia.

El tiempo de duración del subproceso de toma de muestra demanda en total tiempos que superan 238 s y el volumen de sedimentación de la pulpa con floculante en probeta de muestreo es variante tal como se muestra en la Tabla 1, cuyos datos fueron obtenidos del área de operaciones de Nexa Resources.

Tabla 1. Duración del subproceso de toma de muestra y volumen de sedimentación en la etapa de Pre-neutralizado de la pulpa con floculante.

Nº	Tiempo de recirculación de muestra (s)	Tiempo de lavado (s)	Tiempo de sedimentación (s)	Volumen de sedimentación en probeta de 1000 ml	Total tiempo (s)
1	45	11	185	410	241
2	48	12	183	405	243
3	43	13	182	380	238
4	41	12	187	370	240
5	41	16	182	365	239
6	48	14	182	365	244
7	48	13	183	355	244
8	48	15	182	345	245
9	50	12	182	362	244
10	44	11	185	375	240

Nota. Información obtenida del área de operaciones de Nexa Resources -2024.

Para los operadores realizar este procedimiento implica desgaste físico, exposición a sustancias químicas peligrosas, riesgo de caídas a nivel, quemaduras. Para cumplir estos requerimientos es necesario contar con un subsistema de control de nivel de sedimentación. Por lo que se planteó este proyecto de investigación donde se implementará un sistema de control automático para dosificar de Floculante en el proceso de sedimentación del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources - Cajamarquilla. Esto no solo optimizará la calidad del producto final, sino que también reducirá el consumo de floculante y los costos asociados, contribuyendo así a la sostenibilidad y rentabilidad de la operación.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources - Cajamarquilla?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuál es la mejora de la disponibilidad para detectar el volumen de sedimentación de la pulpa en el rango de 350 - 400 ml en las muestras en probeta de 1000 ml tomados cada 30 min, al implementar el subsistema de control automático?
- b) ¿Cuál es la mejora del rendimiento de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación, al implementar el subsistema de control automático de una bomba en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304?

- c) ¿Cuál es la mejora de la calidad de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, con el sistema de control automático implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la mejora de la disponibilidad para detectar el volumen de sedimentación de la pulpa en el rango de 350 - 400 ml en las muestras en probeta de 1000 ml tomados cada 30 min, al implementar el subsistema de control automático.
- b) Determinar la mejora del rendimiento de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación, al implementar el subsistema de control automático de una bomba en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.
- c) Determinar la mejora de la calidad de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, con el sistema de control automático implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación económica

Al desarrollar la dosificación de pulpa de mineral con el floculante de manera automática en el proceso de pre-neutralizado, la compañía reducirá gran cantidad de tiempo para el proceso de sedimentación, esto conllevaría a menor consumo de energía y mayor producción. Por otro lado, la compañía ocupará a los personales en otras actividades productivas, generando un ahorro económico.

1.4.2. Justificación tecnológica

La automatización del proceso de dosificación de floculante se lleva a cabo mediante una serie de técnicas tecnológicas avanzadas. Esto incluye el uso de controladores lógicos programables (PLC), actuadores electroneumáticos, sistemas de comunicación por fibra óptica y Ethernet, así como software industrial para la interfaz HMI y la programación. El sistema de control desarrollado e implementado se basa en tecnología de vanguardia, proporcionando una solución efectiva al problema. La lógica de funcionamiento del sistema CPX_PRENEUTRA se implementó en el controlador PLC CompactLogix 5370-L3 con procesador 2MB y para el desarrollo de la programación se utilizó el software Control Logix V20; mientras que la interface HMI se implementó en FactoryTalk View Site Edition.

1.4.3. Justificación social

Las organizaciones industriales se enfocan principalmente en lograr y demostrar un rendimiento de alta eficiencia en sus operaciones para mejorar la calidad de lo que producen, haciéndolos más rentables, alineándose con sus políticas y objetivos corporativos, y la refinería no es la excepción. En este sentido, la Compañía Minera Nexa Resources se compromete en el ámbito de la producción a reducir el impacto ambiental y social de todas sus actividades mineras. Además, la empresa prioriza la

integridad y seguridad de sus trabajadores, evitando exponerlos directamente a riesgos asociados con este tipo de operaciones.

1.4.4. Justificación ecológica

La implementación de este sistema de automatización, favorece un control optimizado del proceso de dosificación, lo que minimiza las pérdidas de material, consumo de energía entre otros. Este enfoque ofrece una ventaja ambiental significativa, al contribuir a la preservación de las instalaciones en buen estado, lo que a su vez ayuda a reducir la contaminación de suelos y cuerpos de agua.

1.5. Limitaciones

El estudio se limita a la implementación de un sistema de control automático para dosificar con floculante a la pulpa de mineral, considerando la optimización de la toma de muestras en el proceso de sedimentación del espesador D-1304, en la Planta de Hidrometalurgia de la Refinería Nexa Resources – Cajamarquilla. En la que se considera varios aspectos; en primer lugar, el sistema automático, aunque mejora la eficiencia de la dosificación del floculante, depende de la correcta calibración y funcionamiento continuo de los sensores ópticos asociados al PLC CompactLogix 5370 y otros componentes, lo que podría ser susceptible a fallos técnicos o malfuncionamientos. Además, la metodología de muestreo empleada, con intervalos de 30 minutos y un rango de 350-400 ml en muestras de 1000 ml, puede no capturar adecuadamente variaciones más rápidas en el proceso, limitando la precisión en situaciones de alta fluctuación. La integración del variador de frecuencia PowerFlex y la electrobomba añade complejidad al sistema, requiriendo un mantenimiento constante para asegurar su óptimo rendimiento.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

La investigación se desarrolló tomando como antecedentes trabajos desarrollados por diferentes investigadores:

M. A. A. Laurente Ambrocio, 2023 [5], en el trabajo de tesis “Mejoramiento de la velocidad de sedimentación del relave con el floculante AR-3913 de la planta DCT– Unidad de Producción Carahuacra – Yauli- 2021”, el estudio se realizó en la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Los estudios experimentales, fueron de nivel de investigación explicativa el problema del aumento de la velocidad de sedimentación con el floculante AR-3913 en plantas DCT. El muestreo incluyó densidad de espuma en la alimentación, análisis del tamaño de partículas, gravedad específica, prueba de sedimentación en buretas de un litro y prueba a escala industrial. Utilizamos 16.032 litros de muestras de celulosa en el laboratorio. Los resultados muestran una gravedad específica de 2.90, un tamaño de partícula de D50 de 93 micras y D80 de 157 micras, ambos inferiores a 200 micras. Una prueba de sedimentación sin

floculante mostró una velocidad de sedimentación de 0.71 cm/min y una altura de compactación de 6.80 cm en 2 horas. Al comparar los floculantes MT-4219 y AR-3913, se encontró que el floculante AR-3913 tenía una mejor velocidad de sedimentación y alcanzó una altura de compactación de 5.3 cm en 45 minutos, 10 minutos menos que el MT-4219. Largo interior 5.4 cm. En las pruebas de grado industrial, el desbordamiento se mantuvo en 6.07 NTU y el sub-flujo se mantuvo en 67.56 % de sólidos, lo que cumplió con los parámetros de rendimiento especificados, y la dosis de floculante fue de 26.17 ppm.

R. H. Palli Calla [6], desarrolló el trabajo de tesis “Dimensionamiento y optimización de un sedimentador convencional de relaves de cobre en una planta de procesamiento de 850 TMD”, en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. El diseño del dimensionamiento se fundamentó en los ensayos de velocidad de sedimentación llevados a cabo en el laboratorio de la Planta Concentradora Santa Lucía en Puno, como resultado del tratamiento de mineral de cobre. Ante la creciente escasez de agua para los procesos minero-metalúrgicos, se ha evaluado la tecnología de relaves como una solución viable. Esta tecnología se centra en densificar los relaves para luego transportarlos a la presa correspondiente. La mejora del sedimentador se alcanzó a través de un proceso de separación sólido-líquido, el cual incluyó pruebas de espesamiento en laboratorio. Estas pruebas se realizaron utilizando distintas concentraciones y tipos de floculantes por tonelada, aplicados a pulpas diluidas que simulan muestras de relaves de cobre.

Arevalo y Urcuhuaranga en el año 2022 [7], desarrollaron el trabajo de tesis “Optimización de la densidad de pulpa de relave mediante la aplicación de la técnica Box Behnken en la planta de filtrado en una mina en la Libertad”, en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas . Buscaron implementar una metodología para evaluar la densidad de pulpa con el fin de mejorar esta variable en la gestión de operaciones de la planta de filtrado de relave de flotación de Consorcio Minero Horizonte en Pataz, La Libertad, se implementó la técnica de Box-Behnken para optimizar el impacto de

la variabilidad en la densidad de pulpa durante el proceso de filtrado. Como resultado de esta optimización, el valor operativo estándar de la densidad de pulpa se incrementó de 1500 g/L a 1570 g/L. Esta mejora condujo a la reducción de problemas operativos, como la carga circulante, la capacidad de filtrado y la humedad del relave filtrado, disminuyendo esta última en un promedio del 15%, alcanzando así el valor estándar establecido por la empresa.

Ticona Apaza, 2018 [8], realizó el trabajo de tesis “Propuesta de automatización en la preparación de floculante para su dosificación en el embalse de la presa de relaves Enlozada”, en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa; donde sostiene que la ejecución del tratamiento de relaves es crucial para recuperar el agua y maximizar la concentración de sólidos con el fin de construir el dique para embalse. Para la supervisión y control eficiente del proceso, que suele desarrollarse en áreas extensas y remotas, se ha vuelto indispensable el uso de actuadores, sensores, controladores lógicos programables, y la implementación de redes industriales para la comunicación entre estos dispositivos. Los resultados de este estudio subrayan los aspectos clave para lograr una operación y supervisión eficaces en la disposición de relaves, particularmente en el proceso de concentración de minerales, donde se destaca la importancia del uso de floculantes y su dosificación en el embalse de relaves.

Cutipa Gonzales, 2017 [9], en el trabajo de tesis “Automatización de un sistema de recuperación de agua de relave”, desarrollado en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Implementó un controlador óptimo para recuperar agua de relave para su reutilización en los procesos de minería; implementando un sistema de recuperación de agua de relave siendo el control programado en PLCs, integrando a un protocolo de comunicaciones los dispositivos que son parte de la automatización del sistema para recuperar agua de relave; también se implementó una interface HMI con programación para simular el sistema. Como resultado el sistema implementado reduce el consumo de agua y la contaminación al expulsar una solución con baja carga contaminante al medio ambiente.

R. C. Pillajo Correa, 2022 [10], desarrolla la tesis de posgrado “Evaluación del sistema de floculación de la planta de tratamiento “Paluguillo”, en la Universidad Politécnica Salesiana. El propósito principal fue analizar el rendimiento del sistema de floculación en la planta, que enfrentaba dificultades al procesar más de 530 l/s, a pesar de haber sido diseñada para operar con un caudal de 600 l/s, esta instalación convencional implementa procesos de mezcla de alta velocidad, floculantes, sedimentadores, filtros y desinfección. Se evaluaron elementos como el patrón de flujo en cada unidad, la existencia de zonas no definidas, la ocurrencia de cortocircuitos y el tiempo de retardo. Los resultados de este análisis servirán como base para identificar oportunidades de mejora en la eficiencia del sistema y para planificar un trabajo de optimización en los equipos de floculación de plantas.

E. D. Inofuente Mamani, 2022 [11], desarrolló la tesis “Tratamiento de aguas de los relaves de la mina artesanal San José de Quispipata II SMRL con coagulante químico más floculante (catiónico–aniónico)”, en la Universidad Peruana Unión. El propósito de este estudio fue evaluar el tratamiento de aguas residuales provenientes de relaves generados por la mina artesanal San José de Quispipata II S.M.R.L utilizando elementos químicos, ya sea coagulantes catiónicos o aniónicos junto con floculantes. Se aplicó el método del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, para determinar la dosis apropiada de la combinación de coagulantes como sulfatos y sales, y floculante como Zufloc 400 o Floquat 4440, utilizando 12 dosis de reactivos. El tratamiento 5, correspondiente a la dosis 8, demostró resultados superiores en la reducción de la turbidez (2.4 UNT - 99.5 % de remoción). Se logró una remoción del 99% para elementos como Al, Fe, Be, Cr(VI), Pb, Tl, Cd, V y Sb; un 90% para Zn, Cu, Ag, As, Ba y Ni; un 80% para Co, CaCO₃ y Mo; un 50% para Ca, Hg y K; un 30.59% para Na; un 22.67% para Mg; y un 14.50% para Se. Estos resultados cumplen con los estándares establecidos para efluentes líquidos en actividades minero-metalúrgicas. Se concluye que el uso de coagulantes y floculantes químicos es viable para el tratamiento de aguas residuales en la minería artesanal.

C. Y. Jara Rojas y K. Ticse Vila, 2022 [12], desarrolló la tesis “Separación sólido–líquidos en espesadores de relaves de la minera Shouxin SA 2020”, en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. El propósito de este estudio fue analizar la eficacia de la separación de sólidos y líquidos en los espesadores de relaves de Minera Shouxin S.A en 2020. El proceso de flotación permitió obtener concentrados de Cu, Fe y Zn, generando relaves mineros de Cu en forma de suspensión de sólidos en líquido, que fueron tratados mediante los espesadores de la empresa. Los resultados se basaron en la preparación de muestras de pulpa, donde se registraron los tiempos y niveles de sedimentación de los relaves de Cu. Se calculó una dosis de floculantes de 100 gramos por tonelada, siendo el floculante Diamond A95 el más adecuado, con una velocidad de sedimentación de 90 gramos por tonelada al 38.93%. En conclusión, el proceso de separación de sólidos y líquidos mostró altas velocidades de sedimentación en los relaves de concentrados de Cu, con una pérdida de mineral en el relave notablemente baja.

C. Chassagne y Z. Safar, 2020 [13], en la investigación “Modelling flocculation: Towards an integration in large-scale sediment transport models”, establece que para modelar adecuadamente el cambio de tamaño de partícula que se produce en diferentes condiciones ambientales, se suelen utilizar modelos de floculación basados en las denominadas Ecuaciones de Balance Poblacional (PBE). Estos modelos tienen que ser lo suficientemente eficientes para implementarse en modelos de transporte numérico, y como los PBE completos requieren mucho tiempo para ejecutarse y dependen de una gran cantidad de parámetros desconocidos a priori, es necesario realizar simplificaciones. Los parámetros del modelo se pueden encontrar fácilmente a partir de mediciones de laboratorio. A diferencia de la mayoría de los modelos, las clases de partículas que proponen no están definidas por el tamaño de las partículas, sino en términos de composición del sedimento mineral. Una clase está compuesta por partículas de sedimentos minerales (no floculadas), otra por partículas de sedimentos floculadas y una tercera por partículas orgánicas. Se da el balance de masa entre clases y la forma de obtener su correspondiente velocidad media de sedimentación. El

balance de masa y las velocidades de sedimentación son los parámetros de entrada requeridos para todos los modelos de transporte de sedimentos. La simplicidad de las expresiones derivadas y su vínculo con variables mensurables las convierte en buenos candidatos para su futura implementación en dichos modelos.

K. Beleño Saenz y otros, 2022 [14], desarrollaron la investigación “Tratamiento de aguas residuales en la industria metalúrgica”, un proyecto en el que se concibió y puso en marcha una instalación prototipo para tratar aguas residuales provenientes de una planta de metalurgia, se aplicaron conocimientos técnicos para automatizar. Se optó por el uso de Arduino para procesar datos, utilizando sensores ubicados en los tanques y controlando las bombas de suministro, así como el motor agitador del proceso. En el tratamiento químico, se eligió CaO y un floculante polimérico comercial para reducir las cantidades de sólidos solubles, disueltos y sedimentables. El tratamiento, realizado según el diseño durante 30 minutos, logró una disminución del 9.2% en los sólidos disueltos, del 44.4% en los sólidos en suspensión y del 93% en los sólidos totales e iones metálicos, alcanzando valores dentro de los parámetros aceptables. Se logró una recuperación del 75% en el tratamiento de las aguas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Hidrometalurgia del zinc

El zinc es un metal importante que contribuye a la mejora de la calidad de vida en diversos aspectos, ya que es un elemento natural que ha sido ampliamente utilizado por la humanidad desde el siglo XIII [15]. Ocupa el tercer lugar en el consumo de metales no férreos, después del aluminio y el cobre. La aplicación del zinc, al igual que la de otros metales, está condicionada por sus propiedades. Debido a su alta resistencia a la corrosión y moderada dureza, el zinc se emplea principalmente como una capa protectora en piezas de acero y en la producción de aleaciones, siendo la más significativa la aleación con cobre.

Respecto al empleo final del Zn, el área de la construcción representa el 45% del consumo, transportes un 25%, fabricación de máquinas y equipamiento un 11%, obras públicas un 10% y el 9% que resta se destina a baterías eléctricas y otros usos. Los minerales de zinc se presentan en muchas formas, y la esfalerita o esfalerita es el sulfuro de zinc ZnS que se extrae con más frecuencia. Estos minerales contienen aproximadamente un 10% de hierro y de 40 a 60% de Zn. La esmitsonita (carbonato de zinc: $ZnCO_3$), la calamina (silicato de zinc: $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$, con un contenido de zinc hasta 54%) y la franklinita que representan otros minerales de los cuales el zinc suele ser extraído [16].

La hidrometalurgia es una especialización dentro de la metalurgia extractiva que se centra en la extracción y recuperación de metales mediante el uso de soluciones líquidas, ya sean acuosas u orgánicas [17]. Este proceso se basa en concentrar soluciones que contienen iones metálicos de interés, los cuales se separan y aíslan de manera específica debido a reacciones reversibles y diferencias físicas en las soluciones. Como resultado, se halla una solución que contiene el ion deseado, lista para la siguiente etapa productiva.

La hidrometalurgia comprende la separación altamente selectiva de un componente metálico y su transformación que alcanzar su forma final listo para comercializar, ya sea en la forma de metales, aleaciones o compuestos.

El proceso hidrometalúrgico está compuesto de tres procesos principales:

- Lixiviación
- Concentración y purificación
- Precipitación

Separar sólidos-líquidos es un proceso crítico en la mayoría de los tratamientos e hidrometalurgia, especialmente después de procesos como lixiviación, clarificación previa al intercambio iónico, extracción con solventes y precipitación. Este proceso es esencial tanto para recuperar líquidos o soluciones portantes como para obtener sólidos

de alta calidad, como ocurre en la cristalización o precipitación.

La separación de sólidos y líquidos de una mezcla puede llevarse a cabo mediante métodos mecánicos y térmicos. Los métodos térmicos, como el secado y la vaporización, permiten una separación completa de la mezcla, algo que los métodos mecánicos no logran por sí solos. No obstante, debido al alto consumo energético asociado, las operaciones térmicas rara vez se utilizan de manera independiente en las industrias metalúrgicas. Generalmente, se emplean en combinación con métodos mecánicos para reducir la humedad residual en la fase sólida.

En hidrometalurgia, se utilizan dos principios fundamentales para la separación: sedimentación y filtración. Estos procesos deben considerarse como complementarios. La sedimentación se encarga de separar las partículas más densas que el líquido, las cuales tienen una velocidad de sedimentación suficiente para depositarse en el fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente viable. La filtración, por otro lado, se ocupa de separar partículas con densidades cercanas a la del líquido, que tienen una velocidad de sedimentación baja o que pueden ser suspendidas por diversos factores, y que, por lo tanto, no se eliminan sedimentando.

2.2.2. Proceso de obtención de zinc en Nexa Resources – Cajamarquilla

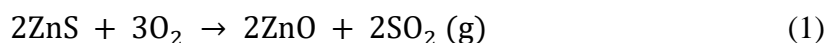
Nexa Resources de Cajamarquilla tiene una planta hidrometalúrgica que produce Zn metálico a partir de concentrados de sulfuro de Zn. Esta planta utiliza los siguientes procesos principales para producir zinc metálico: Tostación, Lixiviación, Purificación, Electrodeposición, y Fusión y moldeo (ver Figura 2).

2.2.2.1. Recepción y almacenamiento de concentrados

La refinería de Cajamarquilla se encarga del procesamiento de diversos concentrados de Zn provenientes de distintas empresas mineras, entre estas se tiene Brocal, SIMSA, Milpo, Cerro Lindo, Quiruvilca, y otras. El concentrado es recibido, pesado y descargado en el almacén, donde se organiza en pilas. Utilizando maquinaria de carga, se lleva a cabo combinaciones de concentrados con el ZnO que recircula en el horno de fusión de cátodos, siendo el objetivo de lograr una humedad de 8 a 10% y una concentración promedio de zinc superior al 52% [18].

2.2.2.2. Tostación

En esta instalación, se realiza la conversión de los sulfuros del concentrado en óxidos correspondientes, utilizando la energía liberada por la combustión auto-exotérmica de los sulfuros al reaccionar con el oxígeno del aire, que es introducido a través de un soplador (ver Ecuación 1). El resultado es la calcina, que se empleará en la siguiente fase del proceso.



En la refinería, la tostación de los concentrados de zinc se realiza en dos hornos de lecho fluidizado. Uno de estos hornos tiene una superficie de 100 m² y es capaz de tostar 10.08 toneladas por metro cuadrado al día, recibiendo alrededor de 54,000 m³ de aire por hora a través de los inyectores de su parrilla. El segundo horno, más grande, cuenta con 123 m² y una capacidad de 10.56 toneladas por metro cuadrado al día, siendo alimentado con aproximadamente 72,000 m³ de aire por hora mediante 48 inyectores [18].

El proceso de tostación se lleva a cabo a temperaturas entre 900 y 930 °C, durante el cual se introducen concentrados y escorias de zinc resultantes de la fusión de cátodos. Bajo condiciones óptimas de calor y oxígeno, se produce una reacción

exotérmica que oxida los sulfuros de zinc, además de la interacción del azufre presente en otros elementos de los concentrados con el oxígeno del aire.

El hierro presente en los concentrados es fundamental para determinar la calidad de la calcina resultante. A partir de los 600 °C y durante el calentamiento hasta los 900 °C en el lecho del horno de lecho fluidizado, el hierro se oxida y se combina con los óxidos de zinc, cobre, cadmio y otros elementos, formando compuestos conocidos como ferritas.

2.2.2.3. Producción de ácido sulfúrico

La generación de H₂SO₄ se obtiene del procesamiento del dióxido de azufre (SO₂) obtenido en tostación. Las plantas de ácido operan de manera autotérmica, es decir, son autógenas y no requieren una fuente externa que dote de calor. Esto sucede con una concentración de SO₂ del 6.8% en volumen y un flujo de gas entrante al convertidor de 85,000 Nm³/h en la planta 1 y 114,000 Nm³/h en la planta 2. Cuando la concentración de SO₂ cae por debajo de este nivel, se pone en marcha un sistema de precalentamiento para compensar la falta de intercambio de energía. El resultado es la obtención de ácido sulfúrico con una pureza del 98.5% [18].

2.2.2.4. Lixiviación

El proceso de lixiviación incluye una serie de subprocesos diseñados para extraer la mayor cantidad posible de zinc de la calcina, transformándolo en sulfato de zinc para su posterior purificación y electrodeposición. Además, la lixiviación es esencial para eliminar el hierro del sistema, produciendo goetita como residuo [18].

La separación de las pulpas generadas en cada subetapa se lleva a cabo en espesadores, donde se consigue aislar las soluciones ricas en zinc de los lodos que aún contienen restos de zinc y que pueden ser reutilizados en el proceso de lixiviación. Los residuos obtenidos en esta fase son sometidos a filtración en una zona específica de

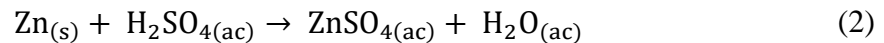
filtros, lo que permite recuperar el zinc líquido antes de que los desechos sean depositados en las pozas, evitando así pérdidas innecesarias.

Un subproducto con alto contenido de plomo (Pb) y plata (Ag) se dirige a la etapa de flotación, mientras que el relave de esta etapa se envía, junto con el residuo de goetita, a las pozas de desecho.

Las subetapas de la lixiviación son:

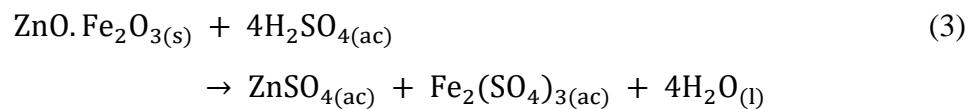
a. Lixiviación neutra

El producto calcinado obtenido del proceso de cocción se alimenta a un recipiente de reacción de lixiviación neutra, donde la mezcla de solución del proceso de goetita se neutraliza con una solución ácida regenerada por electrólisis. El objetivo de esta operación es disolver el sulfato de zinc y la mayor parte del óxido de zinc presente en el material tostado y calcinado por acción con la solución ácida. El ZnO reacciona con rapidez con H₂SO₄ formando sulfato de Zn.



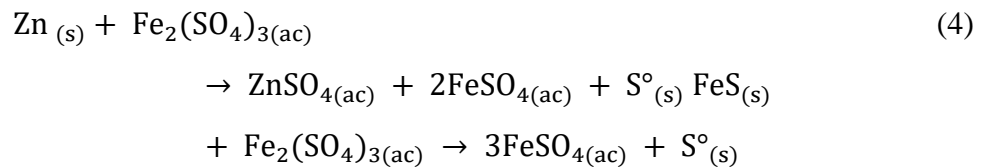
b. Lixiviación ácida caliente

La operación se realiza dentro de un intervalo de temperatura comprendido entre 85 y 90 °C. El propósito principal consiste en llevar a cabo la lixiviación de las ferritas (ZnO.Fe₂O₃) derivadas de la calcina, las cuales no fueron disueltas en el proceso de lixiviación neutra. La reacción fundamental se representa en la Ecuación 3.



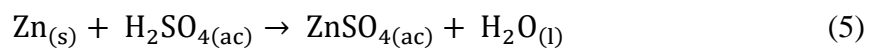
2.2.2.5. Etapa de reducción ácida

En este paso, el concentrado de zinc agregado reduce el sulfato ferroso a sulfato ferroso en un ambiente ácido y a una temperatura de funcionamiento de 80 °C hasta 85 °C. La reacción correspondiente a este paso se muestra en la Ecuación 4. La solución líquida resultante se envía a neutralización preliminar mientras el producto sólido pasa a través del filtro.



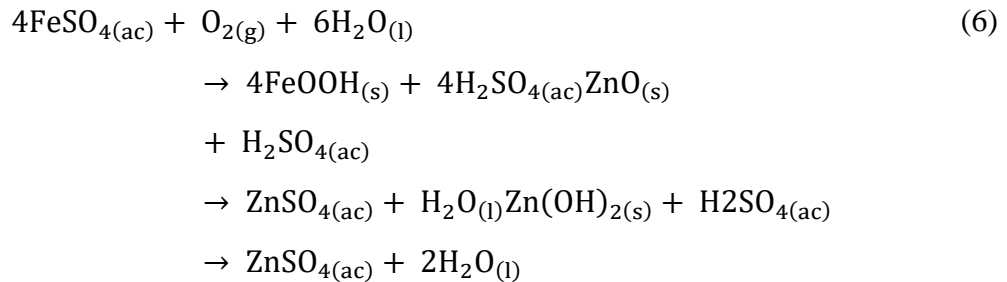
2.2.2.6. Pre-neutralización

El propósito de introducir la calcinación en esta etapa es reducir la acidez del rebose resultante de la reducción del ácido. El objetivo es reducir la cantidad de calcinación necesaria para precipitar el indio o la goethita con el fin de minimizar las pérdidas de zinc sin lixiviación en el residuo de goethita. La reacción en esta etapa se muestra en la Ecuación 5.



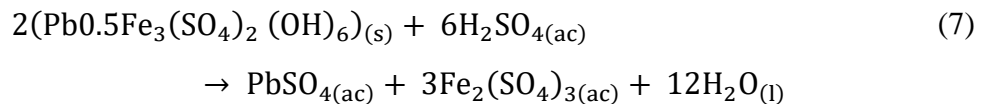
2.2.2.7. Precipitación y filtración de goethita.

En esta fase donde se precipita la goethita y dado que la reacción de precipitación de goethita produce ácido sulfúrico, se agregan materiales quemados al tanque para ajustar el pH y mantener el ambiente requerido. Además, se introduce oxígeno en el tanque para oxidar el hierro ferroso (Fe^{2+}) en la solución de alimentación a hierro (Fe^{3+}). La oxidación del hierro en ambientes con pH alto promueve la precipitación del hierro en forma de goethita, un residuo de hierro precipitado que es fácilmente filtrable y estable para su excreción [18]. Las reacciones que ocurren durante la precipitación de goethita se muestran en la Ecuación 6.



2.2.2.8. Lixiviación súper ácida.

Esta operación se realiza a 95°C con vapor y ácido sulfúrico de 98,5%. La meta general es descomponer la ferromanita de plomo en situaciones extremas [18]. La reacción más importante se presenta en la Ecuación 7. La resultante va a la fase de reducción ácida, y la suspensión, compuesta en su mayoría por PbSO₄ y AgSO₄, se envía a la etapa de flotación de plata.



2.2.2.9. Purificación

Este proceso tiene como objetivo apartar el Cu, Cd, Co y Ni de la solución proveniente de la lixiviación mediante la utilización de polvo de zinc [18]. En el proceso de separación, se requiere el empleo de filtros para eliminar estos elementos. Llevándose a cabo en dos subprocesos de purificación:

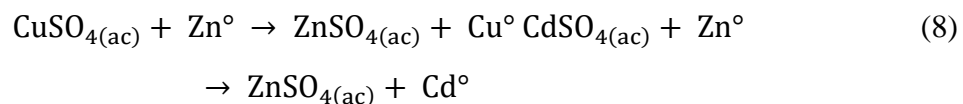
a. Purificación fría

En esta etapa, los elementos precipitados son el cobre (Cu) y el cadmio (Cd), así como el arsénico (As), antimonio (Sb), germanio (Ge), entre otros en menor cantidad. La duración de las reacciones se estableció en 30 minutos, durante los cuales el Cu y alrededor del 90% del Cd se precipitan. La duración del tiempo de reacción es crucial, ya que el Cd tiende a disolverse después de una hora y media. El pH se mantiene entre

4.5 y 4.7, presentando variaciones la temperatura de 60 °C hasta 70 °C. El polvo de Zn utilizado en esta fase tiene un tamaño de malla inferior a 200 μm. Es beneficioso considerar agregar polvo de zinc en el segundo reactor lo que hace posible eliminar con alta eficiencia el Cd que podría pasar desapercibido.

La existencia de As y Sb favorecen la precipitación con anticipación del cobalto y, del níquel. Por lo tanto, altos contenidos de As y Sb en la solución neutra provocan la precipitación parcial de Co y Ni durante la purificación en frío. Estos elementos acompañan a los lodos de Cu-Cd durante el repulpado, resultando en un contenido no deseado de cobalto y níquel en la solución de CdSO₄ que se dirige a la planta de Cd [18].

La solución filtrada purificada en frío pasa a la segunda etapa de purificación, que se denomina purificación térmica. Por otro lado, la torta de filtración procedente de la filtración se envía al tratamiento de residuos de cobre-cadmio, donde se regenera el exceso de zinc y cadmio disuelto. Las reacciones químicas que ocurren en la etapa de purificación en frío se presentan en la Ecuación 8.



b. Purificación caliente

En la purificación caliente, se eliminan el cobalto (Co), níquel (Ni) y otras impurezas como el germanio (Ge). Este proceso se lleva a cabo a 90 °C y mediante la adición de polvo de Zn, tartrato de Sb y potasio (C₈H₄K₂O₁₂Sb₂·3H₂O), así como sulfato de Pb (PbSO₄). El polvo de Zn utilizado en esta fase tiene un tamaño de malla inferior a 75 μm lo que garantiza la cinética de reacción y evitando excesivo consumo. La rapidez de cementación es directamente proporcional al área del Zn, dando el polvo más actividad. Utilizar polvo grueso requeriría genera pérdida de actividad. La

duración de las reacciones debe ser de una hora y media a temperaturas de 90 a 95 °C [18].

c. Enfriamiento de la solución pura.

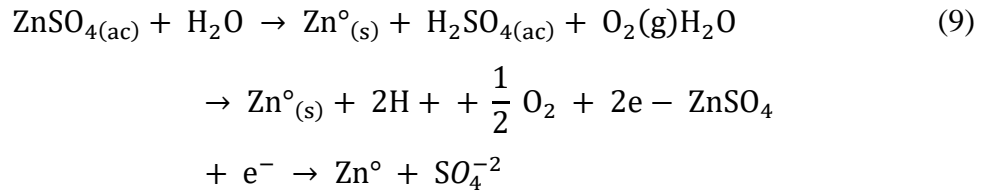
Tras el proceso de purificación, la temperatura de la solución se aproxima a 90 °C. La solución resultante de la purificación caliente se envía inicialmente hacia la torre de refrigeración y posteriormente pasa a la copa de precipitación de sólidos, comúnmente conocida como "copa de champagne". En seguida, la solución se envía a la siguiente torre de refrigeración, conformando así un sistema de refrigeración doble. Como resultado de este sistema, la solución purificada se enfría a alrededor de 40 °C antes de ser enviada a la sección de la casa de celdas [18].

2.2.2.10. Electrodeposición

El proceso de electrólisis tiene como objetivo la producción de láminas de zinc catódico, las cuales serán enviadas a las plantas de fusión. La planta de electrólisis está compuesta por 3 casas de celda con las siguientes características:

- La primera casa de celda, denominada sección 70, consta de 232 celdas con 49 ánodos y 48 cátodos por celda.
- La segunda casa de celda, denominada sección 73, tiene 36 celdas con 57 ánodos y 56 cátodos por celda.
- La tercera casa de celda, denominada sección 75, cuenta con 94 celdas con 123 ánodos y 122 cátodos por celda.

Cada cátodo tiene dimensiones de 1600 x 900 x 70 mm de espesor, con un peso de 35 kg cada uno. Los ánodos tienen dimensiones de 1545 x 843 x 12 mm y pesan 178 kg cada uno. La reacción global que se produce se muestra en la Ecuación 9.



2.2.2.11. Fusión y moldeado

Por generación de campos electromagnéticos se fusiona las láminas de Zn, en un crisol alrededor del cual están enrolladas alambres de generación magnética. Este proceso es llevado a cabo en los hornos de inducción, los cuales operan a una temperatura que oscila entre 490 °C y 520 °C. Se utiliza NH₄Cl como fundente en este proceso.

El zinc fundido es transferido desde el horno de fusión mediante bombas centrífugas hacia el sistema de canales, donde se distribuye a las plantas de aleaciones. Posteriormente, llega a las líneas Sheppard y Outotec, donde se obtienen barras de Zn que son enviados a diversos mercados internos como externos.

2.2.3. Proceso de sedimentación con floculante en hidrometalurgia

En hidrometalurgia, el proceso de sedimentación con floculante es fundamental para la separación y purificación de los componentes metálicos. La floculación es una técnica que aglomera partículas desestabilizadas en microfloculos y, posteriormente, en aglomerados más grandes llamados flóculos. Esto favorece la sedimentación al aumentar el tamaño de las partículas.

Para formar aglomerados aún más grandes, se añaden productos llamados floculantes. Estos pueden ser minerales, naturales o sintéticos. En la minería, los floculantes sintéticos son los más utilizados. Los floculantes sintéticos (no iónicos, aniónicos y catiónicos) deben ser adaptables a diferentes tipos de minerales. La selección del tipo de floculante se basa en consideraciones como la granulometría, el tipo de mineral, el porcentaje de sólidos y la densidad de la pulpa. Se realizan pruebas

a nivel de laboratorio y a escala industrial para determinar el floculante más adecuado [19].

El sedimento formado por los flóculos se procesa para extraer los metales valiosos. Esto puede implicar técnicas como la precipitación, la electrólisis o la extracción con solventes. Por lo que, la sedimentación con floculante permite concentrar las soluciones de iones metálicos, facilitando la recuperación eficiente de los metales deseados [19]. Es un paso crucial en la obtención de diversos metales a partir de mineral concentrado en la hidrometalurgia.

2.2.4. Dosificación de floculante

La dosificación con la cantidad adecuada de floculante permite a las partículas aglutinarse en pequeñas cantidades con peso específico que superas al de los líquidos denominados flóculos (floc) [20]. Se distinguen 2 aspectos fundamentales:

- a. Desestabilizar partículas en suspensión, eliminando las fuerzas que ocasionan la separación.
- b. El desplazamiento de estas partículas dentro del líquido permite que entren en contacto, a menudo estableciendo puentes entre sí y formando una estructura tridimensional coagulado.

La floculación genera la aglutinación de materiales pequeños desestabilizados formando coágulos de gran dimensión [20]. De esta forma, se consigue un aumento considerable del tamaño y la densidad de las partículas coaguladas, aumentando por tanto la velocidad de sedimentación de los flóculos (ver Figura 3).

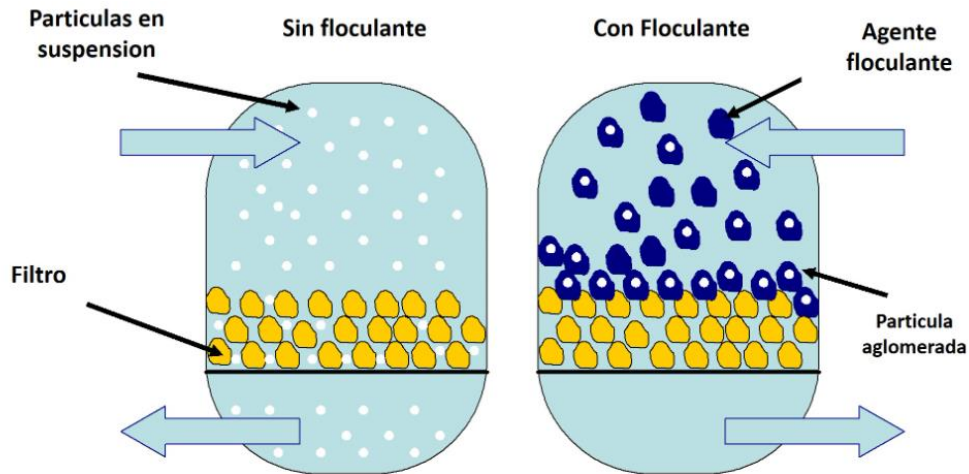


Figura 3. Efectos del agente floculante sobre partículas en suspensión.

Nota. Imagen obtenida de Acti-chemical [20]

2.2.5. Controladores CompactLogix 5370

En 2012, Rockwell Automation lanzó los controladores 5370 L1, L2 y L3, que proporcionaban un controlador de bajo coste, habilitado para Ethernet/IP y de alto rendimiento en un factor de forma un 40 por ciento más pequeño. Los controladores CompactLogix 5370 representan la cuarta generación de la serie CompactLogix. El controlador CompactLogix serie 5370 proporciona muchas de las mismas mejoras que el ControlLogix 5570 (serie 7, L7) con respecto al ControlLogix 5560 (serie 6, L6), entre las que se incluyen las siguientes:

- Doble capacidad de rendimiento gracias a una CPU de doble núcleo más potente
Adopción de la moderna memoria SDRAM
- Sustitución del puerto serie de 9 patillas por un puerto USB 2.0 (los programas se transfieren 200 veces más rápido por USB 2.0 que por el puerto serie).
- La sustitución de la tarjeta de memoria CompactFlash por una tarjeta de memoria Secure Digital (SD)

- Se ha añadido el módulo de almacenamiento de energía (ESM) y se ha eliminado la necesidad de una batería de litio.
- Utiliza los módulos de E/S 1769 existentes Integra el control de movimiento a través de Ethernet

Posibilidad de almacenar comentarios de programa y descripciones de etiquetas en el controlador (con firmware V21 y superior).

a. Controlador CompactLogix 5370 - L1

El controlador CompactLogix 5370 - L1 es un sustituto directo significativamente más pequeño de los controladores CompactLogix L23 con E/S incorporadas (ver Figura 4). Uno de los aspectos más interesantes del L1 es que su módulo de E/S integradas sólo está disponible con las E/S digitales integradas [21]. Este PLC CompactLogix - L1 incorpora lo siguiente:

- Una tarjeta de memoria SD
- Dos puertos Ethernet Un puerto USB 2.0
- Módulos de E/S de puntos integrados
- Ampliable con módulos de E/S de 6 u 8 puntos
- Fuente de alimentación integrada Control de movimiento integrado

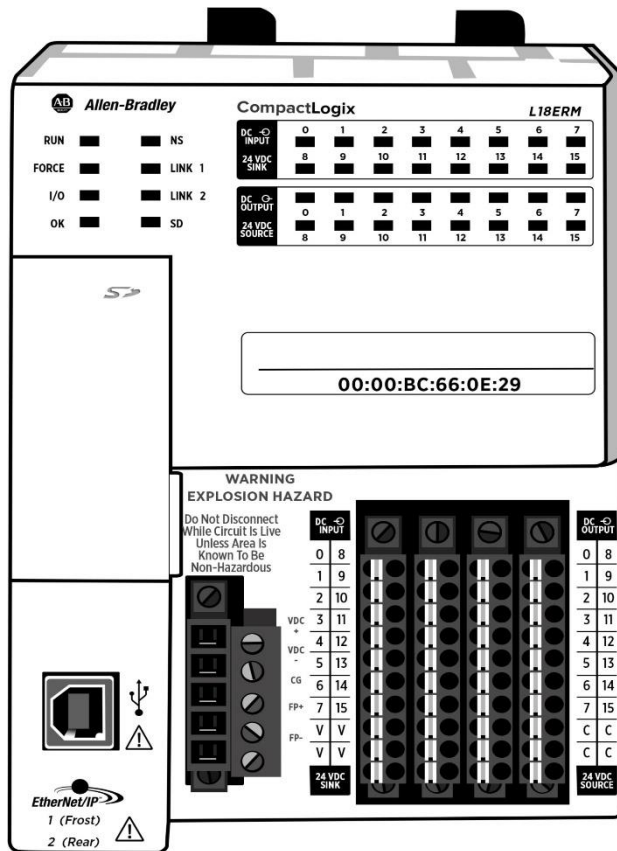


Figura 4. Controlador CompactLogix 5370 - L1 con terminales de E/S integrados.

Nota. Imagen obtenida de [21, p. 55]

b. Controlador CompactLogix 5370 – L2

El controlador CompactLogix 5370 L2 es otro sustituto directo de los controladores CompactLogix con E/S integradas (ver Figura 5). A diferencia del controlador L1, el controlador L2 viene en múltiples factores de forma de E/S embebidas: entradas digitales, combinación de entradas digitales y analógicas, entradas analógicas de alta resolución y entradas universales [21]. El controlador CompactLogix L2 incorpora lo siguiente: Una tarjeta de memoria SD

- Dos puertos Ethernet Un puerto USB 2.0

- Módulos de E/S 1769 integrados Ampliable con 4 módulos de E/S 1769 integrados Fuente de alimentación integrada
- Control de movimiento integrado

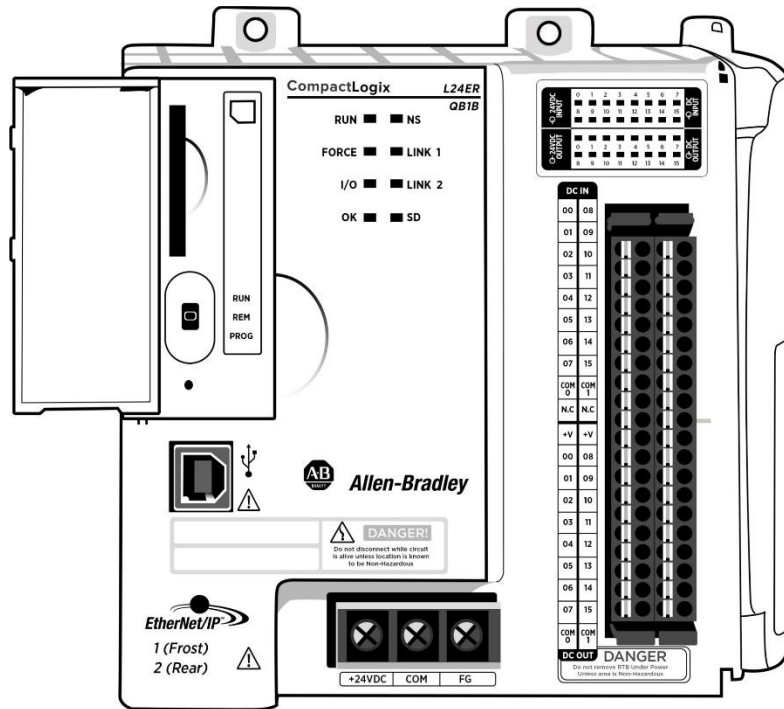


Figura 5. Controlador CompactLogix 5370 – L2 con terminales de E/S integrados.

Nota. Imagen obtenida de [21, p. 56]

c. Controlador CompactLogix 5370 – L3

Los controladores CompactLogix 5370 - L3 de cuarta generación (ver Figura 6) sustituyen directamente a la línea CompactLogix L3x [21]. El factor de forma CompactLogix L3 admite todos los módulos de E/S, fuentes de alimentación y cables 1769 utilizados anteriormente con los controladores L32E y L35E. El controlador de la serie L3 incorpora lo siguiente:

- Una tarjeta de memoria SD
- Dos puertos Ethernet Un puerto USB 2.0

- De 8 a 30 módulos de E/S 1769
- Los módulos 1769 pueden colocarse a la izquierda o a la derecha de la fuente de alimentación Un módulo de fuente de alimentación
- Disponible en versiones de 1 MB, 2 MB y 3 MB Versión de seguridad disponible
- Gestor de fases compatible
- Compatible con instrucciones de alarma (ALMA, ALMD) Compatible con Studio 5000 versión 20+

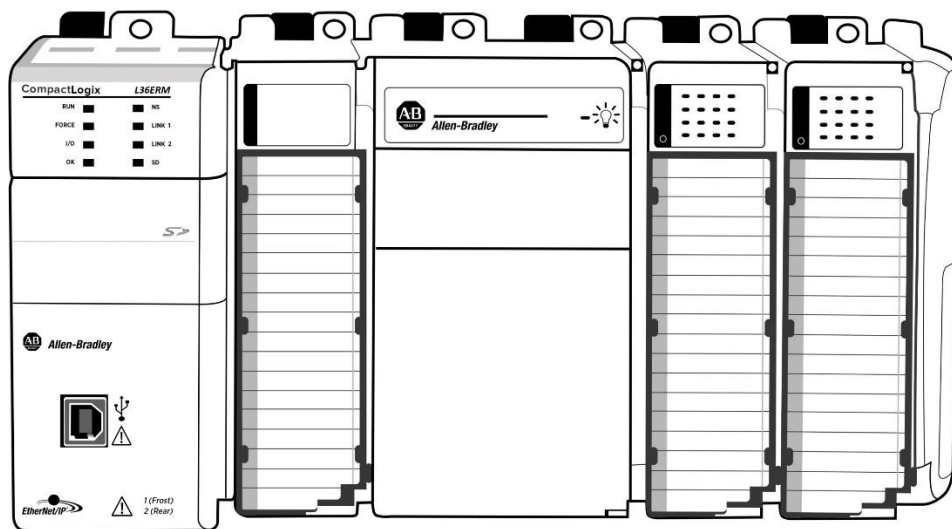


Figura 6. Controlador CompactLogix 5370 – L3 con módulos de E/S.

Nota. Imagen obtenida de [21, p. 57]

2.2.6. FactoryTalk View Studio

FactoryTalk View Studio es una plataforma de software de Interfaz Hombre-Máquina (HMI) desarrollado por Rockwell Automation. Permite obtener una visión clara y precisa de las operaciones en tiempo real y proporciona una interfaz para que los operadores y técnicos interactúen con los sistemas de automatización [22]. FactoryTalk View Studio contiene a View Site Edition y View Machine Edition para las aplicaciones (ver Figura 7).

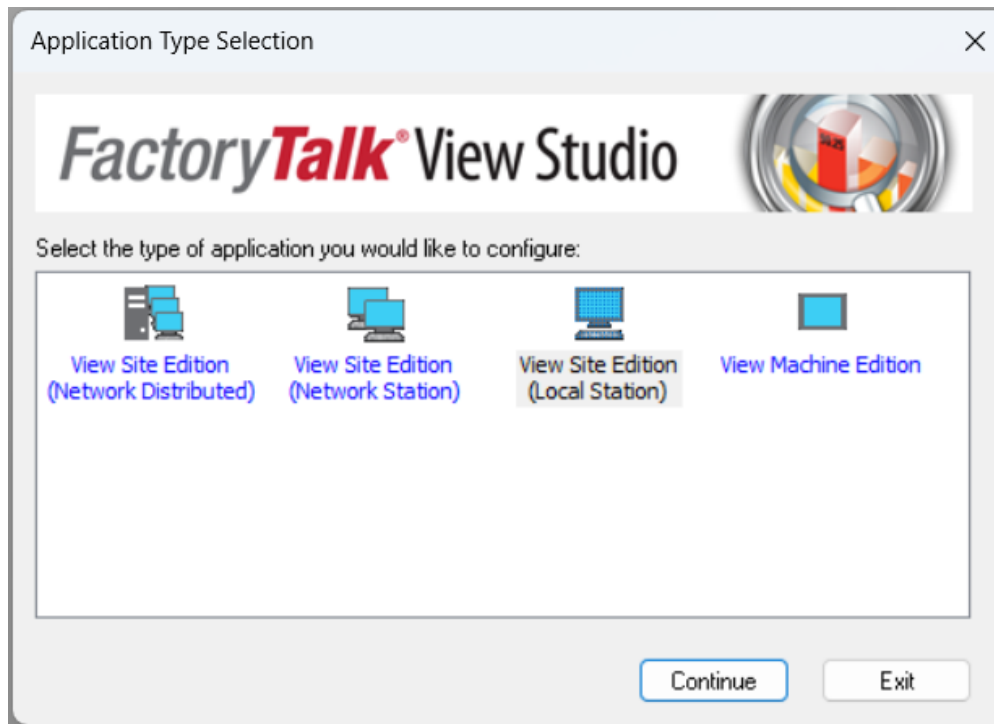


Figura 7. Plataforma de FactoryTalk View Studio.

Nota. Imagen obtenida al iniciar el software FactoryTalk View Studio

a. FactoryTalk View Site Edition

FactoryTalk View SE aborda los requisitos de una moderna Interfaz de Interacción hombre -máquina (HMI), conectando a los dispositivos con la información esencial para desempeñar sus funciones laborales. Mediante la fusión de hardware y software de producción, herramientas que posibilitan el acceso a información crucial y respaldo para adoptar nuevas tecnologías, FactoryTalk View SE simplifica la obtención de información necesaria para tomar decisiones más informadas y rápidas. Ya sea en una única estación de trabajo o en un sistema distribuido más complejo, FactoryTalk View SE proporciona una solución flexible que se adapta a diversas necesidades [22]. son características de este software:

- Proporciona un historial general desde la HMI a nivel de máquinas, independientes hasta visualizaciones robustas con distribución que abarca toda la planta o empresa.
- Ofrece una biblioteca de plantillas y un lenguaje de programación común para obtener las mejores mediciones sobre rendimientos de equipos o máquinas.
- Permite gestionar la producción, generando imágenes de las máquinas a usuarios de diferentes niveles dentro de la empresa.

b. FactoryTalk View Machine Edition (ME)

Por otro lado, FactoryTalk View Machine Edition (ME), es una aplicación versátil de interface que da solución especializada para equipos de interface de operador a nivel de máquina. Formando parte esencial de aplicación para visualizaciones de Rockwell Automation, ofrece gráficos de alta calidad, la capacidad de cambiar de idioma en tiempo real y optimiza el tiempo de puesta en operación gracias a un entorno de desarrollo compartido [22], son características de este software:

- Es una aplicación de HMI que da soluciones para interface hombre-máquina.
- Incluye gráficos, así como, permite gestionar usuarios, cambiar idioma entre otros.
- Se utiliza en aplicaciones que usan PCs o Paneles “PanelView Plus” de Rockwell Automation.

2.2.7. Accionadores neumáticos

Los accionadores neumáticos son dispositivos esenciales en la automatización industrial; el fluido para trabajar en la neumática es principalmente aire comprimido (nitrógeno, oxígeno y otros gases), cuando el aire se comprime, almacena energía, al liberarse, se utiliza para realizar trabajo en el recipiente, la ley de los gases perfectos relaciona presión, volumen, temperatura y cantidad de gas ($pV=nRT$) [23]. La presión absoluta es la diferencia con el vacío, mientras que la presión relativa es la diferencia

entre absoluta y atmosférica. En el SI, la unidad de presión es el Pascal (Pa), aunque también se utiliza el bar.

La potencia está directamente relacionada con la fuerza, la cual guarda proporción con la diferencia de presión con el aire en el trayecto y la presión atmosférica (ver Ecuación 10).

$$\begin{aligned} P &= F \cdot v = p \cdot Q & (10) \\ F \cdot v &= F \cdot \frac{d}{t} = \frac{W}{t} \\ Q &= \frac{V}{t} = A \cdot \frac{d}{t} = A \cdot v \end{aligned}$$

Donde:

P: potencia

p: presión

F: fuerza

Q: caudal del fluido

v: velocidad

W: trabajo

A: sección

V: volumen

t: tiempo

Las características de los accionadores neumáticos son:

- Transportan y almacenan potencia mecánica mediante la diferencia de presiones entre el aire comprimido y el atmosférico.
- No necesitan circuito para retornar, ya que se puede expulsar directamente al espacio.
- Son limpios, no contaminan.
- Tienen baja sensibilidad a la temperatura y son antideflagrantes.
- La potencia desarrollada depende de la presión y el caudal del aire.

- La compresibilidad del fluido limita la calidad de los movimientos realizables.

2.2.7.1. Actuador neumático de piñón y cremallera Delval Serie 21

Este actuador es de piñón y cremallera de doble efecto y retorno a resorte (ver Figura 8). Su estructura está fabricada en aluminio extruido anodizado duro, con una superficie interna rectificada para reducir la fricción y aumentar la solidez y la vida útil [24]. El rango de presión para operar es de 3 a 8 bar (45 a 120 psi). Cumple con todos los requisitos ISO 5211 para el montaje en válvulas. Ofrece diferentes acoples para adaptarse a diversos vástagos, como los doble D, cuadrados, redondos con chaveta o personalizados.



Figura 8. (a) Estructura externa del accionador neumático de piñón y cremallera de doble efecto y retorno a resorte, Delval Serie 21, y (b) estructura interna del accionador.

Nota. Imagen obtenida de la página web del fabricante [24].

2.2.8. Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia (VFD), llamado convertidor de frecuencia o controlador de velocidades variables, es un dispositivo diseñado para ajustar la velocidad de un motor de corriente alterna (AC) al controlar la frecuencia de la energía eléctrica que se le suministra [25].

Funcionamiento:

- Los VFD funcionan bajo el principio de que la velocidad del motor depende de la frecuencia de la energía AC que se suministra y la cantidad de polos del estator.
- La velocidad del motor debería concordar con la exigencia del proceso, utilizando la energía requerida.
- El VFD regula la velocidad de acuerdo a las necesidades del proceso, optimizándose el consumo de energía del 20% al 70% [25].
- Los VFD son también conocidos como drivers de frecuencia ajustable en corriente alterna (AFD).

Ventajas:

- Mejora la eficiencia energética al ajustar la velocidad del motor según las necesidades reales.
- Reduce las emisiones de CO₂ y los costos de energía.
- Alarga la vida útil de los equipos y previene paradas inesperadas.

2.2.8.1. Variador de frecuencia PowerFlex serie 520

Los VFD CA PowerFlex serie 520 de Allen-Bradley, combina innovación y facilidad de uso e integración en procesos reduciendo el tiempo necesario para diseñar y entregar máquinas de mayor calidad [26]. Están diseñados para aplicaciones que requieren control de velocidad variable y precisión en la operación de motores eléctricos de diferentes potencias (ver Figura 9).

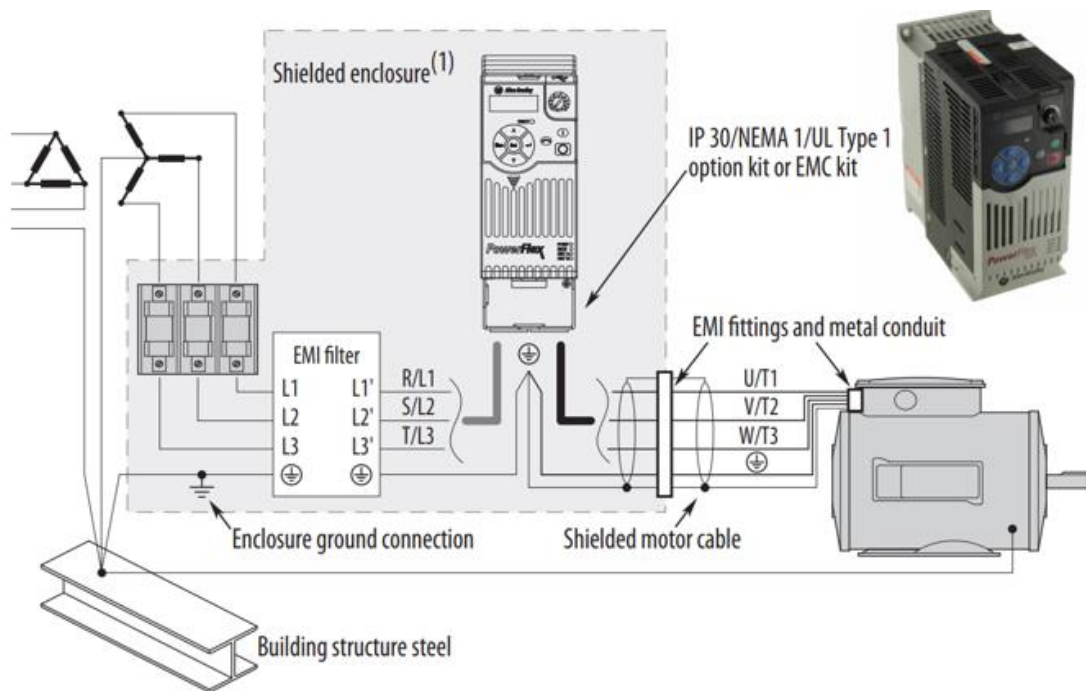


Figura 9. Conexiones del variador de frecuencia PowerFlex serie 520.

Nota. Imagen adaptada del manual del fabricante [26, p. 25].

Los variadores de frecuencia PowerFlex serie 520 se configuran desde Studio 5000™ LogixDesigner. Los perfiles Add-On (AOP) para los variadores de CA PowerFlex serie 520 son configurados en el entorno de Logix.

Asimismo, PowerFlex serie 520 requiere de comunicación EtherNet/IP, al configurar de forma automática es capaz de reemplazar los parámetros a otros dispositivos de manera ágil.

2.2.9. Medidores de nivel

En el ámbito industrial, la medición de nivel garantiza el correcto funcionamiento de los procesos y mantiene un equilibrio adecuado de materiales. La incorporación de instrumentos microprocesados en la medición de variables como el nivel, presión y la temperatura ofrece la posibilidad de agregar "inteligencia" a la medición del nivel.

Los dispositivos para medir nivel de líquidos, obtienen la lectura de la altura de los líquidos tomando en cuenta una línea de referencia, el cual puede ser por diferencia de presiones, o desplazamientos por flotadores ocasionados por el líquido en los tanques. Asimismo, se pueden aprovechar características eléctricas de los líquidos u otros parámetros para medir el nivel respectivo.

2.2.9.1. Medidores de nivel de líquido

Los medidores de nivel de líquido son dispositivos diseñados para medir y controlar la altura de los líquidos en un contenedor o tanque, utilizando diversos principios de funcionamiento. Entre ellos se encuentran los medidores por flotador, que utilizan un flotador mecánico o con contactos magnéticos para indicar el nivel; los medidores por presión, que miden la presión ejercida por el líquido para determinar su altura; los medidores por capacitancia, que detectan cambios en la capacitancia entre un electrodo y el líquido; los medidores por radar, que envían pulsos de radar o microondas reflejados en la superficie del líquido; los medidores por ultrasonido, que usan ondas ultrasónicas para medir el tiempo de vuelo de las ondas reflejadas; los medidores por conductividad, que miden el cambio en la conductividad eléctrica entre sensores; y los medidores de visualización, que proporcionan una lectura directa mediante indicadores visuales [27]. Cada tipo ofrece distintas ventajas y es adecuado para aplicaciones específicas dependiendo del líquido, las condiciones del entorno y los requisitos de precisión.

2.2.9.1.1. Medidor óptico de nivel de líquido W100-2

El medidor de nivel óptico W100-2 contiene fotocélulas miniatura WS/WE100-2P1439 (también conocidas como W100-2), son dispositivos compactos utilizados en aplicaciones de detección y control [28].

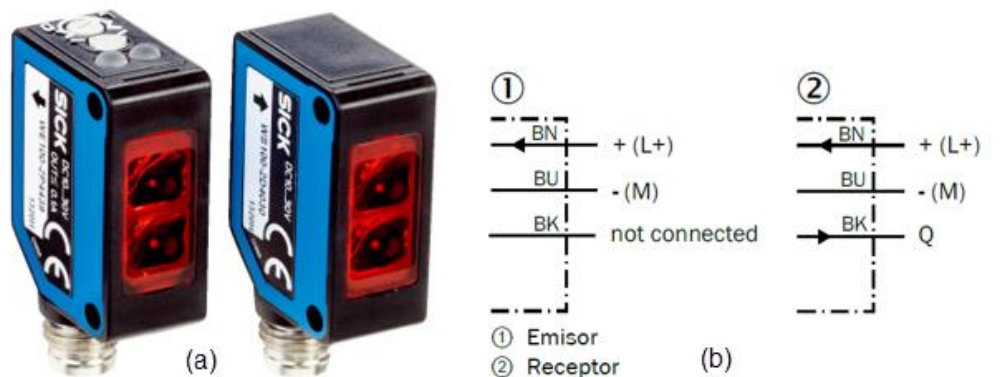


Figura 10. (a) Vista externa del medidor óptico de nivel de líquido W100-2, y (b) diagrama de conexión emisor-receptor.

Nota. Imagen obtenida del manual del fabricante [28].

Características principales:

- Principio funcional: Son barreras emisor-receptor que utilizan luz roja visible.
- Dimensiones: Tienen un tamaño de 11 mm x 31 mm x 20 mm.
- Alcance de detección máximo: Pueden detectar objetos a una distancia de hasta 33 metros.
- Distancia de conmutación: Funcionan en un rango de 0 metros a 20 metros.
- Ajuste de sensibilidad: Se realiza mediante un potenciómetro de 270°.
- Tensión de alimentación: Operan con una tensión de 10 V DC a 30 V DC.
- Salida conmutada: Utilizan PNP como modo de conmutación.
- Tipo de conexión: Vienen con un conector M8 de 4 polos.
- Protección: Tienen una clasificación de IP67 (protección contra polvo y agua).
- Material de la carcasa: Fabricadas en plástico (ABS/PC/POM).

2.2.9.2. Medidores de nivel de sólidos

Los medidores de nivel de sólidos son dispositivos diseñados para medir y controlar la altura de materiales sólidos en silos, tanques o contenedores, empleando diversos

principios de funcionamiento según las características del material y las condiciones de operación [27]. Entre ellos se encuentran los medidores por radar, que utilizan pulsos reflejados en la superficie del sólido; los medidores por ultrasonido, que detectan ondas ultrasónicas reflejadas; los medidores por capacitancia, que miden cambios en la capacitancia entre un electrodo y el material; los medidores por radiofrecuencia (RF), que detectan interrupciones en señales de radio; los medidores por láser, que miden la distancia mediante la reflexión de un haz láser; los medidores por contacto, que usan elementos mecánicos como palas o varillas para detectar el nivel; y los medidores por vibración, que emplean cambios en la frecuencia de vibración al interactuar con el sólido. Cada tipo ofrece ventajas específicas, adaptándose a diferentes aplicaciones y materiales para proporcionar mediciones precisas y confiables. En la Figura 11 se presentan equipos para medir nivel de sólidos fijos y continuos.

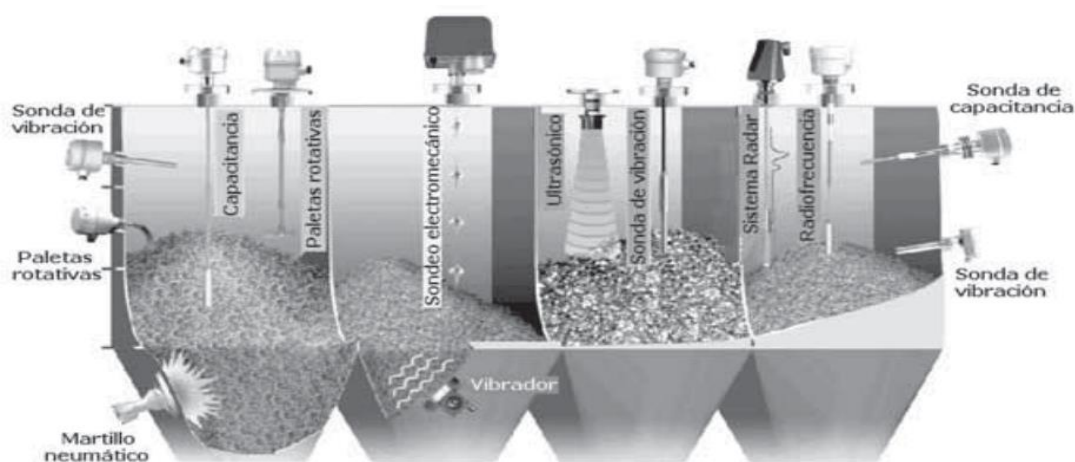


Figura 11. Sistemas de medición de nivel de sólidos fijos y continuos.

Nota. Adaptado de [27].

2.2.10. Controlador automático

Un controlador automático es un dispositivo o sistema que regula y ajusta el funcionamiento de otros equipos o procesos sin intervención humana directa,

utilizando principios de control automático para mantener condiciones deseadas [29]. Este controlador recibe datos de sensores que monitorean variables como temperatura, presión o nivel, y utiliza algoritmos predefinidos para comparar estos datos con valores de referencia. Basado en esta comparación, el controlador envía señales de ajuste a los actuadores o dispositivos de control, como válvulas o motores, para modificar el proceso en tiempo real y garantizar que se mantengan los parámetros dentro de los rangos especificados.

2.2.10.1. Control en lazo abierto y lazo cerrado

Se pueden controlar procesos mediante un determinado tipo de control, estos son control en lazo abierto y lazo cerrado. Se caracterizan porque la información o datos de procesos sea o no realimentada al controlador para iniciar la acción correctora adecuada [29].

El control en lazo abierto no realimenta la información del proceso del controlador (ver Figura 12).

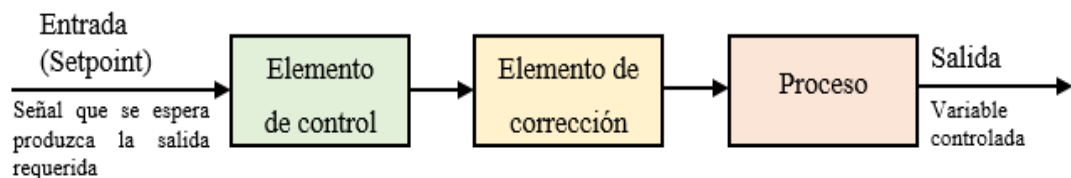


Figura 12. Diagrama de control en lazo abierto.

Cuando el control es de lazo cerrado, los datos de la variable controlada de un determinado proceso se obtienen por medio de sensores y se utiliza como entrada al controlador. Un algoritmo a la entrada del controlador detecta el error y genera una señal que es enviado al controlador que dará la orden de corrección.

La señal de salida que es la variable controlada se envía a un elemento final de control, el cual permitirá manipular una entrada al proceso para mantener en el valor

deseado. Este circuito cerrado proporciona un esfuerzo continuo para mantener la variable controlada en la posición de referencia o punto de consigna (ver Figura 13).

En todo proceso de control se tiene tres variables a considerar:

- Variable controlada (CV). Es la variable que sale del proceso y que condiciona al medio para tomar acciones correctivas.
- Variable manipulada (MV). Es la que se obtiene luego del elemento correctos y que va hacia el proceso.
- Variable de perturbación (DV). Es toda variable influenciadora que actúa indirectamente sobre la controlada, generalmente se da en el proceso.

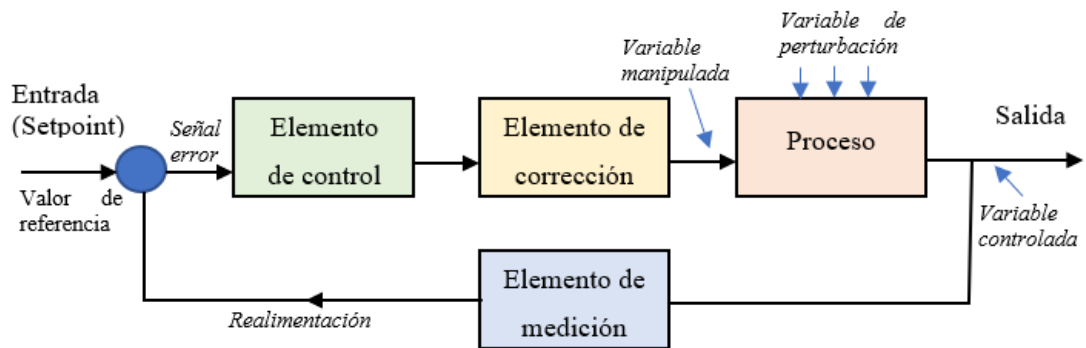


Figura 13. Diagrama de control en lazo cerrado.

2.3. Definición de términos

Control automático: es un proceso que regula la operación de un sistema sin intervención humana directa.

Dosificación: la dosificación se refiere al acto y el efecto de determinar una dosis, que es una porción o cantidad de floculante que se agregará a la pulpa de mineral.

Espesador: es un equipo utilizado en el procesamiento de minerales para recuperar agua y concentrar los sedimentos. Su función principal es separar las fases sólida y líquida de una pulpa de relave mediante la acción de la gravedad.

Floculante: se trata de compuestos químicos empleadas para inducir la floculación, es un proceso que desestabiliza partículas suspendidas en líquido. Su función principal es reducir la repulsión existente entre partículas y obtener flóculos de mayor tamaño.

Lazo abierto: no utiliza retroalimentación. Adecuado para variables predecibles y con margen de error grande.

Lazo cerrado: utiliza retroalimentación constante. Consta de sensores que detectan parámetros relevantes y envían información al circuito de control. Los actuadores modifican físicamente el comportamiento del sistema según las señales del circuito.

Pulpa de mineral: una pulpa de mineral se define como mezcla de sólido y líquido en suspendidos. Es decir, dentro del sector de la minería, la pulpa es un fluido homogéneo compuesto por uno o varios minerales suspendidos en agua.

Planta de hidrometalurgia: la hidrometalurgia es una parte de la metalurgia que permite extracción de minerales, se basa en los procesos extractivos que se producen en medios acuosos. Las plantas de hidrometalurgia permiten la extracción selectiva de metales mediante operaciones como la lixiviación, concentración, purificación y precipitación.

PLC: es el acrónimo de controladores lógicos programables.

Pre-neutralizado: implica una acción previa para preparar una sustancia o un líquido antes de someterlo a un proceso más amplio de neutralización o tratamiento.

Probeta: es un instrumento de medición volumétrica utilizado para determinar el volumen de sedimentación.

Refinería: se refiere principalmente a una planta donde se aplican procesos químicos en la industria minera. Refinar mineral es una parte importante de la metalurgia. Dependiendo del tipo de mena, se emplean procesos diferidos para la extracción, recuperación y purificación de metales y minerales de alto valor como el zinc.

Sedimentación: este proceso consiste en separar, por efectos de la gravedad de las fases sólida y líquida, un material diluido. El objetivo es obtener una suspensión de material concentrado (con mayor cantidad de sólidos) y un líquido claro.

Sistema de control: un sistema de control consta de hardware y software interconectados. Recibe datos de variables externas (entradas), las procesa y genera acciones (salidas) para modificar el proceder del sistema o su entorno.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Es significativa la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla.

2.4.2. Hipótesis específicas

- a) Es significativa la mejora de la disponibilidad para detectar el volumen de sedimentación de la pulpa en el rango de 350 - 400 ml en las muestras en probeta de 1000 ml tomados cada 30 min, al implementar el subsistema de control automático.
- b) Es significativa la mejora del rendimiento de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación, al implementar el subsistema de control automático de una bomba en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.

- c) Es significativa la mejora de la calidad de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, con el sistema de control automático implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.

2.5. Variables

2.5.1. Variable independiente

Sistema de Control Automático.

2.5.2. Variable dependiente

Dosificación de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación de la etapa de pre-neutralizado del espesador D-1304.

2.6. Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables del estudio se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Operacionalización de variables.

Variable independiente	Definición operativa	Indicadores	Instrumentos
Sistema de Control Automático	El sistema de Control Automático al estar implementado en un PLC CompactLogix 5370, interconectado con sensores ópticos de nivel para detección del volumen de sedimentación de la pulpa y como actuadores se emplearán actuadores neumáticos y motor eléctrico, para la toma de muestras y para la dosificación de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación del espesador D-1304.	<ul style="list-style-type: none"> - Alcance de sensores (cm) - Activación de actuadores neumáticos (on-off). - Velocidad de bomba (rev/min) 	<ul style="list-style-type: none"> - PLC CompactLogix 5370 - Sensores infrarrojos - Válvulas y actuadores neumáticos. - Variador de frecuencia. - Motor de inducción.

Variable dependiente	Definición conceptual	Indicadores	Prueba
<p>Dosificación de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación de la etapa de pre-neutralizado del espesador D-1304.</p>	<p>La dosificación de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación del espesador D-1304, permitirá mantener el volumen de sedimentación de las muestras en el rango de 350 - 400 ml, el que se realizará de forma constante cada 30 min en una probeta de 1000 ml, en el que se determinará los diferentes factores del OEE.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidad “A” (%) - Rendimiento “P” (%) - Calidad “Q” (%) - Eficacia general del equipo “OEE” (%) 	<p>Prueba estadística no paramétrica</p>

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito temporal y espacial

El trabajo de la implementación y prueba de eficacia general del sistema de control automático para la dosificación de floculante en el proceso de sedimentación del espesador D-1304 (ver Figura 38 del Anexo B), se llevó a cabo en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla, localizado en el distrito de San Juan de Lurigancho - Chosica, en la provincia y departamento de Lima localizado a una latitud de $-11^{\circ}58'15''$ S y longitud de $-76^{\circ}53'08''$ O (ver Figura 14).

Luego de implementar el Sistema de Control Automático, en los meses de mayo-junio del 2024, se procedió con las pruebas de dosificación de Floculante en el Proceso de Sedimentación del Espesador D-1304, en la Planta de Hidrometalurgia de la Refinería Nexa Resources – Cajamarquilla, con el que se determinó la mejora de la eficacia de este proceso en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.

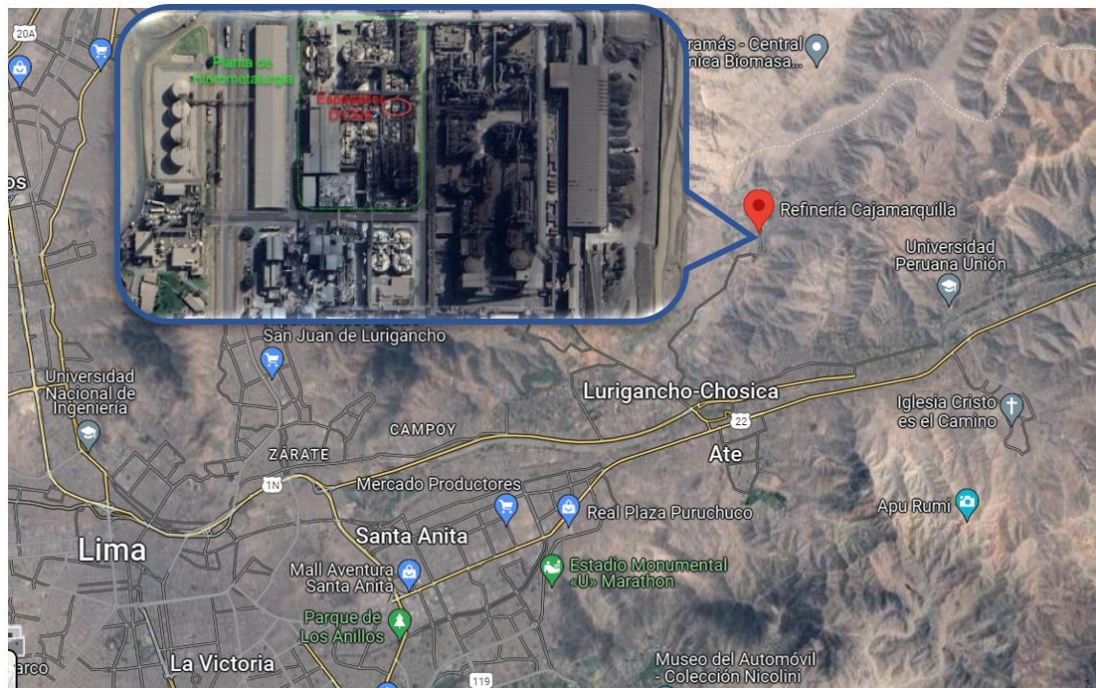


Figura 14. Localización de la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla.

Nota. Imagen obtenida con Google Earth.

3.2. Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo experimental, orientada a resolver los problemas de productividad con la automatización de un proceso [30], [31]. Se planteó el problema y se integró las variables controladas en el proceso para mejorar la adaptabilidad de un controlador On-Off sobre PLC e integrado al sistema SCADA con interface cliente desarrollado en FactoryTalk View SE, mejorando el proceso de muestreo para la adecuada aplicación de floculante y mejorar la sedimentación en el espesador D-1304.

3.3. Nivel de investigación

Por los objetivos, el nivel de investigación de este estudio es aplicativo, donde se implementó un sistema de control automático para la dosificación de floculante en el

proceso de sedimentación del espesador D-1304, empleando un controlador en lazo cerrado integrado a un PLC, comprobando la eficacia de su operación con la reducción del tiempo de ejecución de procesos, incluyendo el muestreo, donde se produce el asentamiento de la pulpa con floculante en la etapa de pre - neutralizado del espesador en mención.

3.4. Métodos de investigación

Se empleó el método inductivo-deductivo; las mediciones fueron tomados antes y después de implementar el sistema de control automático propuesto, empleando el método inductivo, para luego deducir la eficacia general del sistema de control automático que permite la dosificación del floculante para la sedimentación en el espesador D-1304.

La secuencia metodológica implica la implementación del sistema de control automático (Figura 15). Subdividido en 02 subsistemas de control automático y el muestreo de las variables en análisis.

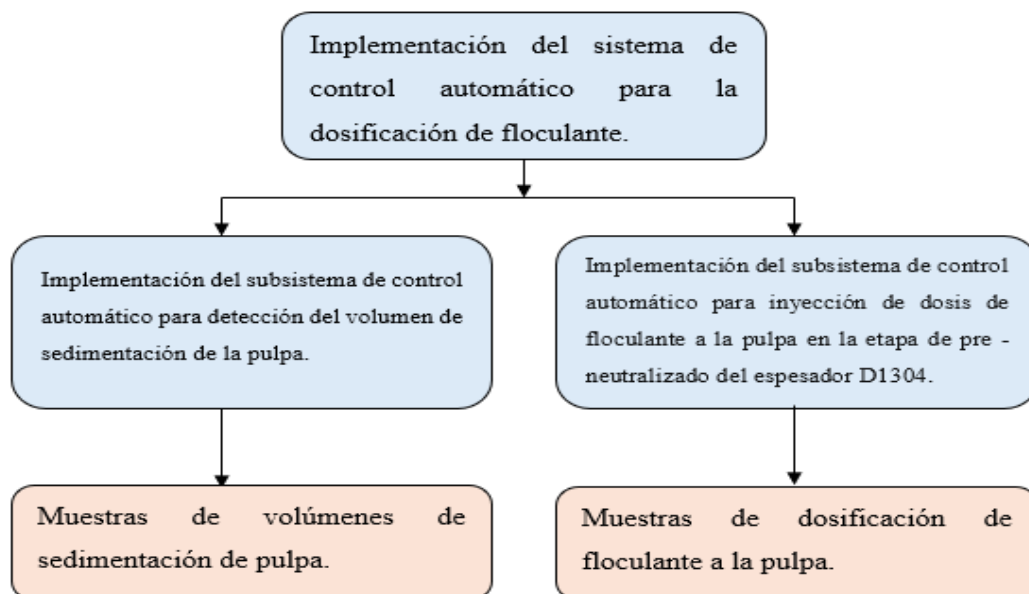


Figura 15. Diagrama de bloques de la metodología seguida para la implementación del sistema de control automático para la dosificación de floculante.

3.4.1. Implementación del sistema de control automático

Para la implementación del sistema de control automático se siguió los siguientes procesos metodológicos; en un principio se implementó el subsistema de control automático para detección del volumen de sedimentación de la pulpa; y en segundo lugar se implementó el subsistema de control automático para inyección de dosis de floculante a la pulpa en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, con la finalidad de obtener material adecuado para su sedimentación (ver Figura 16).

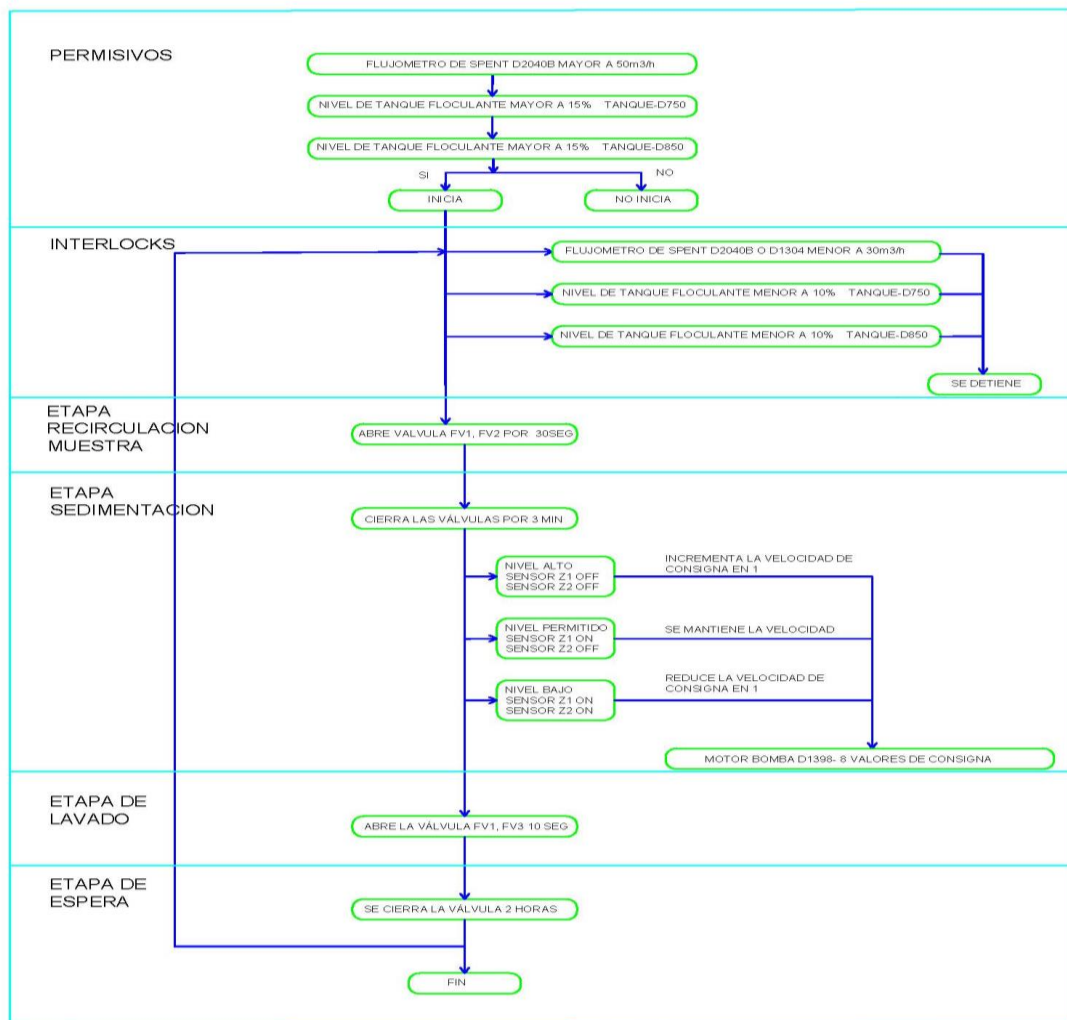


Figura 16. Diagrama de procesos (a) subsistema de control automático para detección del volumen de sedimentación de la pulpa y (b) subsistema de control automático para inyección de dosis de floculante a la pulpa

3.4.1.1. Subsistema de control automático para detección del volumen de sedimentación de pulpa

El subsistema de control automático para detección del volumen de sedimentación de pulpa responde al diagrama P&ID de la Figura 17. Las válvulas neumáticas (FV1, FV2 y FV3) que permiten el paso de pulpa y agua hacia la probeta o pozo son contralados desde un PLC (FC). En la probeta se mide el nivel de sedimentación en base a sensores de luz infrarroja (LSL y LSH), la salida se descarga en el espesador D-1304.

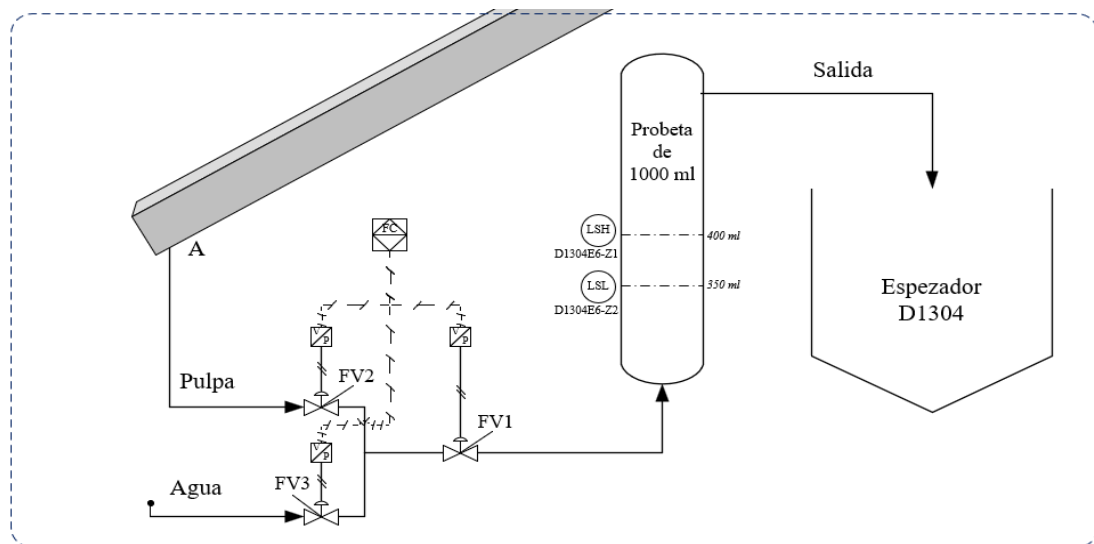


Figura 17. Diagrama P&ID del subsistema de control automático para detección del volumen de sedimentación de pulpa.

Este subsistema fue implementado en un tablero donde se activan los actuadores desde las válvulas neumáticas (ver Figura 18a), se localiza en la parte superior del tanque espesador, facilitando el ingreso y salida de la pulpa en la probeta de 1000 ml. Así mismo, se instalaron dos sensores ópticos (ver Figura 18b) que indica el nivel de sedimentación, enviando una señal digital hacia PLC, con un setpoint calibrado en 350 – 400 ml.

Antes de la instalación del mencionado tablero (Figura 18), se realizó el montaje de los ductos para el recorrido de la pulpa, desde el ducto alimentador del tanque hacia la

probeta del tablero de muestreo. Se instaló el ducto de descarga para desechar la pulpa desde el tablero de muestreo hacia el tanque espesador D-1304.

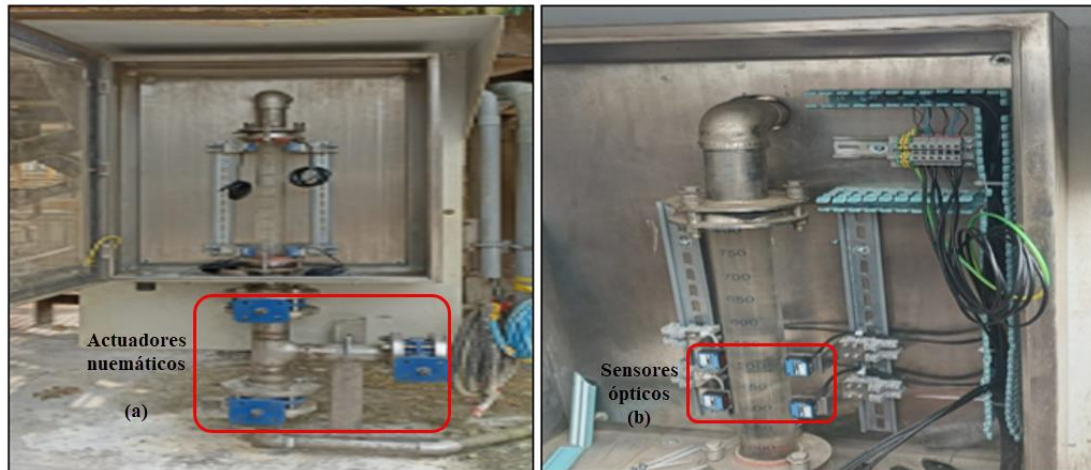


Figura 18. Tablero de muestreo de pulpa, a) ubicación de los actuadores neumáticos y b) ubicación de los sensores ópticos.

Nota. Imagen obtenida de la etapa pre - neutralizado.

Las válvulas neumáticas (40-XV-1000, 40-XV-1200 y 40-XV-1300) son controladas desde un tablero (Figura 19), comandados por el PLC Compact Logix 5370-L3



Figura 19. Instalación del tablero de control de válvulas neumáticas.

Nota. Imagen obtenida de la etapa pre - neutralizado.

Los instrumentos empleados en este subproceso: probeta, tres válvulas neumáticas con actuadores y dos sensores ópticos, se asociaron con tags digitales, cuya descripción y servicios se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Instrumentos empleados en el subsistema de detección del volumen de sedimentación de pulpa.

Instrumentos		
Tag	Descripción	Servicio
D-1304E6 - FV1 <i>40-XV-1300</i>	Válvula de probeta	Apertura o cierre de flujo de ingreso a probeta de muestreo
D-1304E6 - FV2 <i>40-XV-1000</i>	Válvula de pulpa	Apertura o cierre de flujo de pulpa de los espesadores
D-1304E6 - FV3 <i>40-XV-1200</i>	Válvula de agua	Apertura o cierre de flujo de agua
D-1304E6 - Z1 <i>40-YIT-1100</i>	Sensor de posición	Detecta el nivel alto de pulpa en la probeta de muestreo
D-1304E6 - Z2 <i>40-YIT-1200</i>	Sensor de posición	Detecta el nivel bajo de pulpa en la probeta de muestreo

Este subsistema obedece a la siguiente secuencia: previo al iniciar la medición es necesario abrir la válvula 40 - XV - 1000 y 40 - XV - 1300 y mantenerlas en ese estado durante 30 segundos para recircular la pulpa y garantizar que la medición del nivel de sedimentación se realice con una pulpa fresca. Posteriormente a ello, se cierran todas las válvulas y se inicia la obtención del nivel de sedimentación. Seguidamente se esperará un determinado tiempo para evaluar el estado de las variables del proceso y el nivel de sedimentación en la probeta, para aumentar o disminuir la velocidad de la bomba de dosificación. A este tiempo se denomina “Tiempo DOSON”, el cual es ajustable. Luego de ello, se abren las válvulas 40 - XV - 1200 y 40 - XV - 1300 y se mantienen en ese estado durante 10 segundos para realizar la limpieza de la probeta. Finalmente, se cierran todas las válvulas hasta el siguiente periodo de escaneo.

3.4.1.2. Subsistema de control automático para inyección de floculante a la pulpa en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304

De acuerdo al nivel de sedimentación en este subsistema se realiza la inyección de dosis de floculante a la pulpa por medio del controlador CompactLogix 5370-L3 (Figura 20).

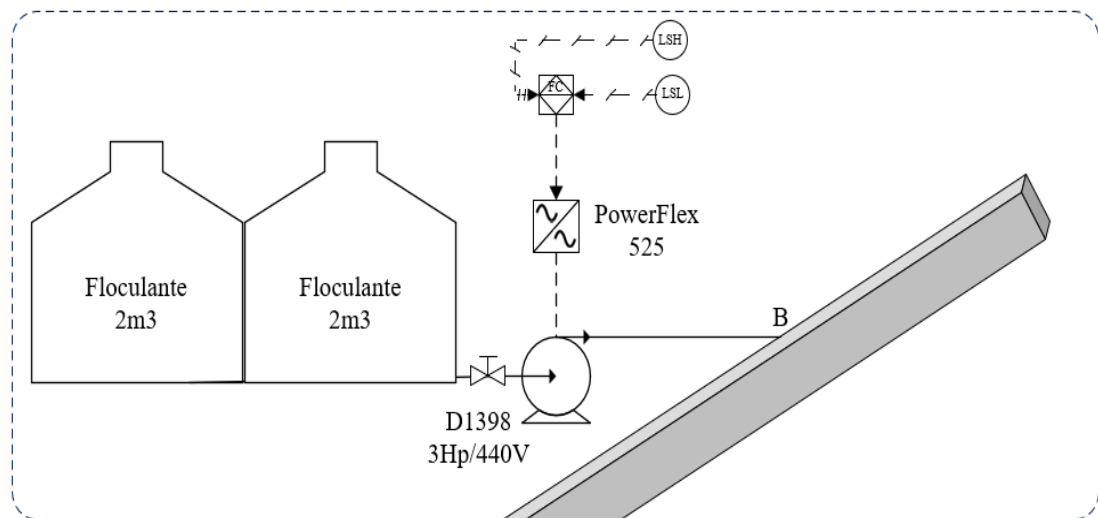


Figura 20. Diagrama P&ID del subsistema de control automático para inyección de floculante a la pulpa.

El variador de frecuencia (PowerFlex 525) para el control de flujo del floculante, fue instalado sobre un tablero (Figura 21), este flujo depende del nivel sedimentado en la probeta instalada en la parte superior del tanque, que corresponde al subsistema de sedimentación.



Figura 21. Instalación de tablero de variador de frecuencia

Nota. Imagen obtenida de la etapa pre - neutralizado.

El equipo de bombeo de floculante principal se identificó con Tag 40 - PPZ - D1398 (Tabla 4) el cual realiza la inyección en el punto “B” de la Figura 20.

Tabla 4. Equipo de bombeo de floculante del espesador D-1304.

Equipo principal		
Tag	Descripción	Servicio
40 - PPZ - D1398	Bomba dosificadora	Bombeo de floculante del espesador D-1304

La acción de control del floculante obedece directamente al nivel de sedimentación. Por ejemplo: si el valor del pozo de alimentación está por encima del rango de especificación, la decisión a tomar es subir floculante un paso (Tabla 5). Cabe resaltar que para cualquier variable que se encuentra dentro del rango de especificación, la decisión a tomar es mantener la velocidad de floculante.

Tabla 5. Decisiones

VARIABLE	RANGO	DESICIÓN
Densidad UF	Encima del rango de especificación	Bajar floculante un paso
Densidad UF	Debajo del rango de especificación	Subir floculante un paso
Lodo	Encima del rango de especificación	Bajar floculante un paso
Lodo	Debajo del rango de especificación	Subir floculante un paso
Pozo Alim (Equipo)	Encima del rango de especificación	Bajar floculante un paso
Pozo Alim (Equipo)	Debajo del rango de especificación	Subir floculante un paso

A partir de la Tabla 5, se procede elaborar la Tabla 6, donde se tienen 27 casos posibles de operación para el variador.

Tabla 6. Casos posibles de operación del variador.

Ítem	Pozo	Decisión variable pozo	Lodo	Decisión variables pozo-lodo	Densidad U/F	Decisión variables pozo - densidad	Decisión variables pozo-lodo - densidad
1	ALTO	Subir	ALTO	Subir	ALTO	Mantener	Mantener
2	ALTO	Subir	ALTO	Subir	BAJO	Subir	Subir
3	ALTO	Subir	ALTO	Subir	DENTRO	Subir	Subir
4	ALTO	Subir	BAJO	Subir	DENTRO	Subir	Subir
5	ALTO	Subir	BAJO	Subir	ALTO	Bajar	Bajar
6	ALTO	Subir	BAJO	Subir	BAJO	Subir	Subir
7	ALTO	Subir	DENTRO	Subir	ALTO	Mantener	Mantener
8	ALTO	Subir	DENTRO	Subir	BAJO	Subir	Subir
9	ALTO	Subir	DENTRO	Subir	DENTRO	Subir	Subir
10	BAJO	Bajar	ALTO	Mantener	ALTO	Bajar	Bajar
11	BAJO	Bajar	ALTO	Mantener	BAJO	Subir	Subir
12	BAJO	Bajar	ALTO	Mantener	DENTRO	Mantener	Mantener
13	BAJO	Bajar	BAJO	Bajar	DENTRO	Bajar	Bajar
14	BAJO	Bajar	BAJO	Bajar	ALTO	Bajar	Bajar
15	BAJO	Bajar	BAJO	Bajar	BAJO	Subir	Subir
16	BAJO	Bajar	DENTRO	Bajar	ALTO	Bajar	Bajar
17	BAJO	Bajar	DENTRO	Bajar	BAJO	Subir	Subir
18	BAJO	Bajar	DENTRO	Bajar	DENTRO	Bajar	Bajar
19	DENTRO	Mantener	ALTO	Subir	ALTO	Bajar	Bajar
20	DENTRO	Mantener	ALTO	Subir	BAJO	Subir	Subir
21	DENTRO	Mantener	ALTO	Subir	DENTRO	Subir	Subir
22	DENTRO	Mantener	BAJO	Mantener	DENTRO	Mantener	Mantener
23	DENTRO	Mantener	BAJO	Mantener	BAJO	Subir	Subir
24	DENTRO	Mantener	BAJO	Mantener	ALTO	Bajar	Bajar
25	DENTRO	Mantener	DENTRO	Mantener	ALTO	Bajar	Bajar
26	DENTRO	Mantener	DENTRO	Mantener	BAJO	Subir	Subir
27	DENTRO	Mantener	DENTRO	Mantener	DENTRO	Mantener	Mantener

Nota. Elaborado en base a la Tabla 5.

3.4.1.3. Programación e integración al sistema SCADA

La integración al sistema SCADA, se intervino en las paradas del proceso del tanque D-1304, se realizaron paradas y arranques procedimentales para prevenir daños en la infraestructura, equipos o accidentes que conllevarían a pérdidas económicas considerables en la refinería. El diagrama del sistema SCADA implementado se presenta en la Figura 22. El PLC esclavo CompactLogix 1769-L33ER es el encargado de controlar el subproceso de detección de volumen de sedimentación; mientras que el PLC CompactLogix 5370-L3 se encarga de controlar el subproceso de inyección de floculante a la pulpa.

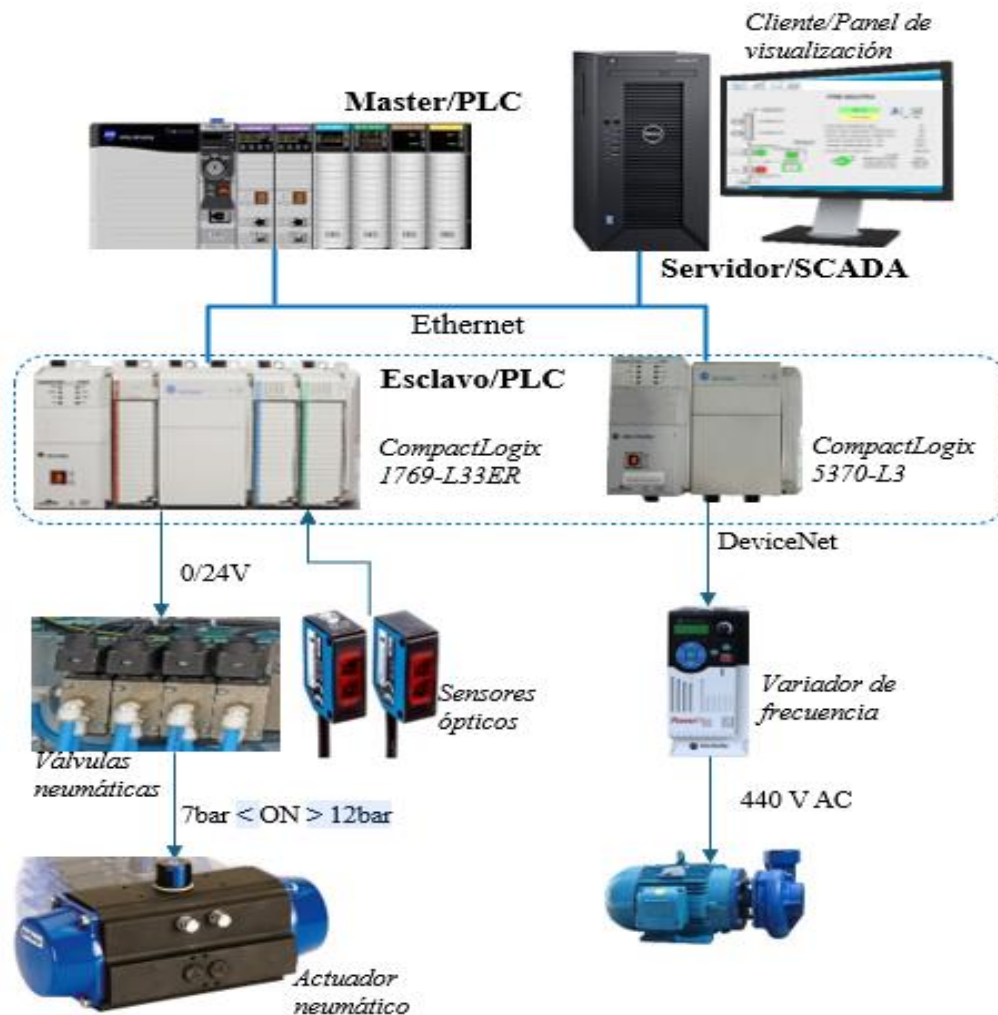


Figura 22. Diagrama de integración del sistema SCADA

Para la comunicación del sistema SCADA, se instaló el tablero del PLC, en la parte superior del tanque espesador, ubicado lo más próximo posible al proceso (Figura 23), con la finalidad de facilitar el cableado de control y comunicación, mediante Switch con protocolo Ethernet, hacia el tablero de control de válvulas neumáticas, asimismo, al tablero del variador de frecuencia y por último al tablero del sistema de control distribuido (DCS) existente.



Figura 23. Instalación del Switch de comunicaciones del sistema SCADA en el tablero de PLC.

Nota. Imagen obtenida de la etapa pre - neutralizado.

3.4.1.3.1. Programación del PLC

La lógica de funcionamiento del subsistema de control automático para detección de volumen de sedimentación se implementó en controladores CompactLogix, con archivo denominado “CPX_PRENEUTRA”, para el desarrollo de la programación se utilizó el software RSLogix v20. A continuación, se detallan los Data Type definidos y las rutinas creadas.

- Data Type del Programa.

Los Data Type que se han definido para el desarrollo de la programación se presentan y describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Data Type del programa CPX_PRENEUTRA.

Data type																																	
Nombre	Descripción	Contenido																															
Entradas	Define el estado y tags de los sensores de posición	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data Type</th> <th>Style</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SensorFotoElectrico1</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>SensorFotoElectrico2</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>⊕ TagSensorFotoElectrico1</td> <td>STRING</td> <td></td> </tr> <tr> <td>⊕ TagSensorFotoElectrico2</td> <td>STRING</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Name	Data Type	Style	SensorFotoElectrico1	BOOL	Decimal	SensorFotoElectrico2	BOOL	Decimal	⊕ TagSensorFotoElectrico1	STRING		⊕ TagSensorFotoElectrico2	STRING																
Name	Data Type	Style																															
SensorFotoElectrico1	BOOL	Decimal																															
SensorFotoElectrico2	BOOL	Decimal																															
⊕ TagSensorFotoElectrico1	STRING																																
⊕ TagSensorFotoElectrico2	STRING																																
Interlocks	Define los interlocks (nivel mínimo de tanque espesador, nivel mínimo de flujo de spent) del sistema para su detención	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data Type</th> <th>Style</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PerdidaComunicacion</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinNivelTanque1</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinNivelTanque2</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinFlujoSpent</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>Manual</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>Automatico</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinNivelTanque1Mask</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinNivelTanque2Mask</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinFlujoSpentMask</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> </tbody> </table>		Name	Data Type	Style	PerdidaComunicacion	BOOL	Decimal	MinNivelTanque1	BOOL	Decimal	MinNivelTanque2	BOOL	Decimal	MinFlujoSpent	BOOL	Decimal	Manual	BOOL	Decimal	Automatico	BOOL	Decimal	MinNivelTanque1Mask	BOOL	Decimal	MinNivelTanque2Mask	BOOL	Decimal	MinFlujoSpentMask	BOOL	Decimal
Name	Data Type	Style																															
PerdidaComunicacion	BOOL	Decimal																															
MinNivelTanque1	BOOL	Decimal																															
MinNivelTanque2	BOOL	Decimal																															
MinFlujoSpent	BOOL	Decimal																															
Manual	BOOL	Decimal																															
Automatico	BOOL	Decimal																															
MinNivelTanque1Mask	BOOL	Decimal																															
MinNivelTanque2Mask	BOOL	Decimal																															
MinFlujoSpentMask	BOOL	Decimal																															
Motor	Define la frecuencia y velocidad de consigna (Set Point) y retroalimentación (Feedback) así como los comandos de arranque y detención	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data Type</th> <th>Style</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FrecuenciaReferencia</td> <td>REAL</td> <td>Float</td> </tr> <tr> <td>VelocidadFeedback</td> <td>REAL</td> <td>Float</td> </tr> <tr> <td>FrecuenciaFeedback</td> <td>REAL</td> <td>Float</td> </tr> <tr> <td>FrecuenciaIndice</td> <td>INT</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>StartStop</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>VelocidadReferencia</td> <td>REAL</td> <td>Float</td> </tr> <tr> <td>⊕ Tag</td> <td>STRING</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Name	Data Type	Style	FrecuenciaReferencia	REAL	Float	VelocidadFeedback	REAL	Float	FrecuenciaFeedback	REAL	Float	FrecuenciaIndice	INT	Decimal	StartStop	BOOL	Decimal	VelocidadReferencia	REAL	Float	⊕ Tag	STRING							
Name	Data Type	Style																															
FrecuenciaReferencia	REAL	Float																															
VelocidadFeedback	REAL	Float																															
FrecuenciaFeedback	REAL	Float																															
FrecuenciaIndice	INT	Decimal																															
StartStop	BOOL	Decimal																															
VelocidadReferencia	REAL	Float																															
⊕ Tag	STRING																																

Operación	Define los estados, las etapas, los tiempos actuales de cada una de las etapas del proceso	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data Type</th> <th>Style</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Estado</td><td>INT</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>Etapas</td><td>INT</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>ManualAuto</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>InicioSecuencia</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>EstadoAnterior</td><td>INT</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>StAuto</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>TiempoRecirculacion</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoLavado</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoSedimentacion</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoEspera</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoOperacion</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoOperacionAnterior</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> </tbody> </table>	Name	Data Type	Style	Estado	INT	Decimal	Etapas	INT	Decimal	ManualAuto	BOOL	Decimal	InicioSecuencia	BOOL	Decimal	EstadoAnterior	INT	Decimal	StAuto	BOOL	Decimal	TiempoRecirculacion	REAL	Float	TiempoLavado	REAL	Float	TiempoSedimentacion	REAL	Float	TiempoEspera	REAL	Float	TiempoOperacion	REAL	Float	TiempoOperacionAnterior	REAL	Float
Name	Data Type	Style																																							
Estado	INT	Decimal																																							
Etapas	INT	Decimal																																							
ManualAuto	BOOL	Decimal																																							
InicioSecuencia	BOOL	Decimal																																							
EstadoAnterior	INT	Decimal																																							
StAuto	BOOL	Decimal																																							
TiempoRecirculacion	REAL	Float																																							
TiempoLavado	REAL	Float																																							
TiempoSedimentacion	REAL	Float																																							
TiempoEspera	REAL	Float																																							
TiempoOperacion	REAL	Float																																							
TiempoOperacionAnterior	REAL	Float																																							
Parámetros	Define los parámetros de configuración del proceso como los límites máximos y mínimos de las variables de decisión (densidad, nivel y tiempo de duración de las etapas), la cantidad de motores y las velocidades de consigna del motor.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data Type</th> <th>Style</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>DensidadMin</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>NivelLodoMin</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>DensidadMax</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>NivelLodoMax</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoMuestreo</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoLavado</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoSedimentacion</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoRecirculacion</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>NumMotor</td><td>INT</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>ConsignasMotorHz</td><td>REAL[9]</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoEspera</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> </tbody> </table>	Name	Data Type	Style	DensidadMin	REAL	Float	NivelLodoMin	REAL	Float	DensidadMax	REAL	Float	NivelLodoMax	REAL	Float	TiempoMuestreo	REAL	Float	TiempoLavado	REAL	Float	TiempoSedimentacion	REAL	Float	TiempoRecirculacion	REAL	Float	NumMotor	INT	Decimal	ConsignasMotorHz	REAL[9]	Float	TiempoEspera	REAL	Float			
Name	Data Type	Style																																							
DensidadMin	REAL	Float																																							
NivelLodoMin	REAL	Float																																							
DensidadMax	REAL	Float																																							
NivelLodoMax	REAL	Float																																							
TiempoMuestreo	REAL	Float																																							
TiempoLavado	REAL	Float																																							
TiempoSedimentacion	REAL	Float																																							
TiempoRecirculacion	REAL	Float																																							
NumMotor	INT	Decimal																																							
ConsignasMotorHz	REAL[9]	Float																																							
TiempoEspera	REAL	Float																																							

Permisivos	Define los permisos (nivel mínimo de los tanques espesador, nivel mínimo de flujo de spent) del sistema para su arranque	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data Type</th> <th>Style</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MinFlujoSpent</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinNivelTanque1</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinNivelTanque2</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>Manual</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>Automatico</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinFlujoSpentMask</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinNivelTanque1Mask</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>MinNivelTanque2Mask</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> </tbody> </table>	Name	Data Type	Style	MinFlujoSpent	BOOL	Decimal	MinNivelTanque1	BOOL	Decimal	MinNivelTanque2	BOOL	Decimal	Manual	BOOL	Decimal	Automatico	BOOL	Decimal	MinFlujoSpentMask	BOOL	Decimal	MinNivelTanque1Mask	BOOL	Decimal	MinNivelTanque2Mask	BOOL	Decimal
Name	Data Type	Style																											
MinFlujoSpent	BOOL	Decimal																											
MinNivelTanque1	BOOL	Decimal																											
MinNivelTanque2	BOOL	Decimal																											
Manual	BOOL	Decimal																											
Automatico	BOOL	Decimal																											
MinFlujoSpentMask	BOOL	Decimal																											
MinNivelTanque1Mask	BOOL	Decimal																											
MinNivelTanque2Mask	BOOL	Decimal																											
Proceso	Engloba todos los data type del proceso (variables, parámetros, interlocks, permisos)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data Type</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+ Variables</td> <td>Variables</td> </tr> <tr> <td>+ Parametros</td> <td>Parametros</td> </tr> <tr> <td>+ Interlocks</td> <td>Interlocks</td> </tr> <tr> <td>+ Permisivos</td> <td>Permisivos</td> </tr> <tr> <td>+ Operacion</td> <td>Operacion</td> </tr> <tr> <td>+ Nombre</td> <td>STRING</td> </tr> </tbody> </table>	Name	Data Type	+ Variables	Variables	+ Parametros	Parametros	+ Interlocks	Interlocks	+ Permisivos	Permisivos	+ Operacion	Operacion	+ Nombre	STRING													
Name	Data Type																												
+ Variables	Variables																												
+ Parametros	Parametros																												
+ Interlocks	Interlocks																												
+ Permisivos	Permisivos																												
+ Operacion	Operacion																												
+ Nombre	STRING																												
Salidas	Engloba los data type de las válvulas de proceso y los comandos para el energizado de los sensores de posición	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data Type</th> <th>Style</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+ ValvulaLavado</td> <td>Valvula</td> <td></td> </tr> <tr> <td>+ ValvulaProbeta</td> <td>Valvula</td> <td></td> </tr> <tr> <td>+ ValvulaMuestra</td> <td>Valvula</td> <td></td> </tr> <tr> <td>SensorFoto1Energizado</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>SensorFoto2Energizado</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> </tbody> </table>	Name	Data Type	Style	+ ValvulaLavado	Valvula		+ ValvulaProbeta	Valvula		+ ValvulaMuestra	Valvula		SensorFoto1Energizado	BOOL	Decimal	SensorFoto2Energizado	BOOL	Decimal									
Name	Data Type	Style																											
+ ValvulaLavado	Valvula																												
+ ValvulaProbeta	Valvula																												
+ ValvulaMuestra	Valvula																												
SensorFoto1Energizado	BOOL	Decimal																											
SensorFoto2Energizado	BOOL	Decimal																											
Válvula	Define el estado, comando, tag para cada una de las válvulas de proceso	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data Type</th> <th>Style</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Bobina</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>Comando</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>Estado</td> <td>BOOL</td> <td>Decimal</td> </tr> <tr> <td>+ Tag</td> <td>STRING</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Name	Data Type	Style	Bobina	BOOL	Decimal	Comando	BOOL	Decimal	Estado	BOOL	Decimal	+ Tag	STRING													
Name	Data Type	Style																											
Bobina	BOOL	Decimal																											
Comando	BOOL	Decimal																											
Estado	BOOL	Decimal																											
+ Tag	STRING																												

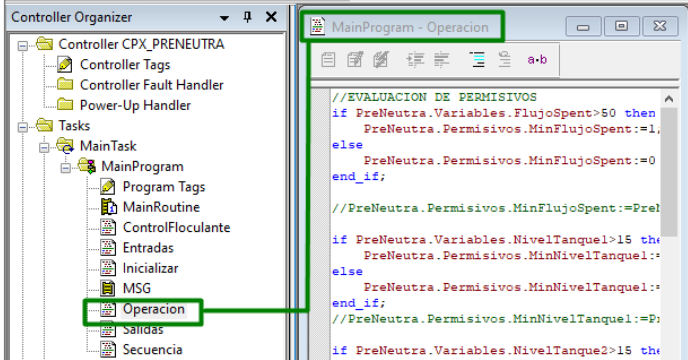
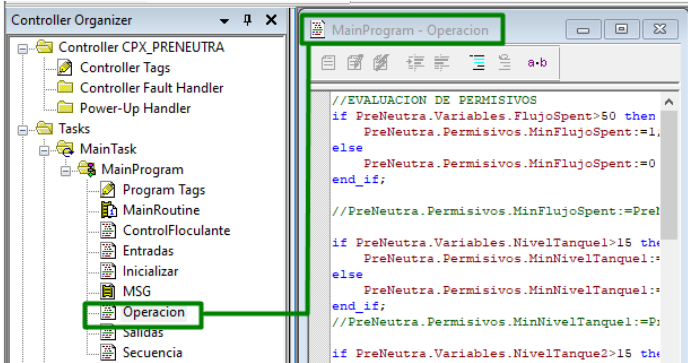
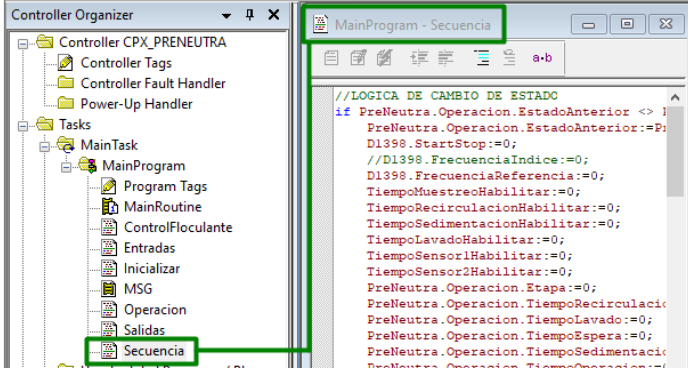
Variables	Define las variables de proceso del sistema (nivel de lodo de los espesadores, tiempos de sedimentación en probeta de muestreo, densidad de underflow)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data Type</th> <th>Style</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Densidad</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>NivelLodo1</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>NivelLodo2</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoPozo1</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>TiempoPozo2</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>PorcentajeDosificacion</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>IndiceNivelLodo</td><td>INT</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>IndiceDensidad</td><td>INT</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>IndiceNivelPozo</td><td>INT</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>DensidadTiempo8</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>NivelLodoTiempo8</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>AnteriorDensidad</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>AnteriorNivelLodo1</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>AnteriorNivelLodo2</td><td>REAL</td><td>Float</td></tr> <tr><td>DensidadHabilitado</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>NivelLodo2Habilitado</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>NivelLodo1Habilitado</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>DensidadRango</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>NivelLodo1Rango</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> <tr><td>NivelLodo2Rango</td><td>BOOL</td><td>Decimal</td></tr> </tbody> </table>	Name	Data Type	Style	Densidad	REAL	Float	NivelLodo1	REAL	Float	NivelLodo2	REAL	Float	TiempoPozo1	REAL	Float	TiempoPozo2	REAL	Float	PorcentajeDosificacion	REAL	Float	IndiceNivelLodo	INT	Decimal	IndiceDensidad	INT	Decimal	IndiceNivelPozo	INT	Decimal	DensidadTiempo8	BOOL	Decimal	NivelLodoTiempo8	BOOL	Decimal	AnteriorDensidad	REAL	Float	AnteriorNivelLodo1	REAL	Float	AnteriorNivelLodo2	REAL	Float	DensidadHabilitado	BOOL	Decimal	NivelLodo2Habilitado	BOOL	Decimal	NivelLodo1Habilitado	BOOL	Decimal	DensidadRango	BOOL	Decimal	NivelLodo1Rango	BOOL	Decimal	NivelLodo2Rango	BOOL	Decimal
		Name	Data Type	Style																																																													
		Densidad	REAL	Float																																																													
		NivelLodo1	REAL	Float																																																													
		NivelLodo2	REAL	Float																																																													
		TiempoPozo1	REAL	Float																																																													
		TiempoPozo2	REAL	Float																																																													
		PorcentajeDosificacion	REAL	Float																																																													
		IndiceNivelLodo	INT	Decimal																																																													
		IndiceDensidad	INT	Decimal																																																													
		IndiceNivelPozo	INT	Decimal																																																													
		DensidadTiempo8	BOOL	Decimal																																																													
		NivelLodoTiempo8	BOOL	Decimal																																																													
		AnteriorDensidad	REAL	Float																																																													
		AnteriorNivelLodo1	REAL	Float																																																													
		AnteriorNivelLodo2	REAL	Float																																																													
		DensidadHabilitado	BOOL	Decimal																																																													
		NivelLodo2Habilitado	BOOL	Decimal																																																													
		NivelLodo1Habilitado	BOOL	Decimal																																																													
		DensidadRango	BOOL	Decimal																																																													
NivelLodo1Rango	BOOL	Decimal																																																															
NivelLodo2Rango	BOOL	Decimal																																																															

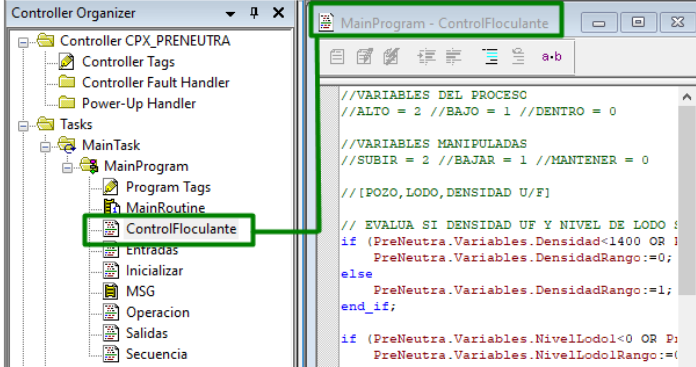
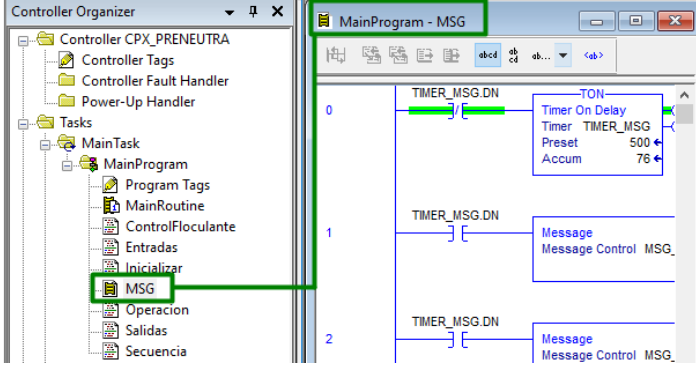
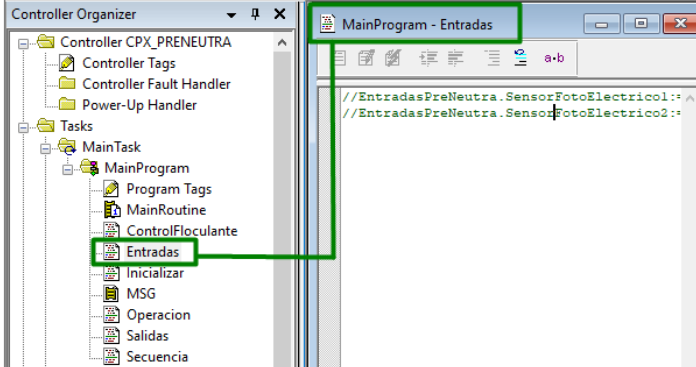
- Rutinas del Programa.

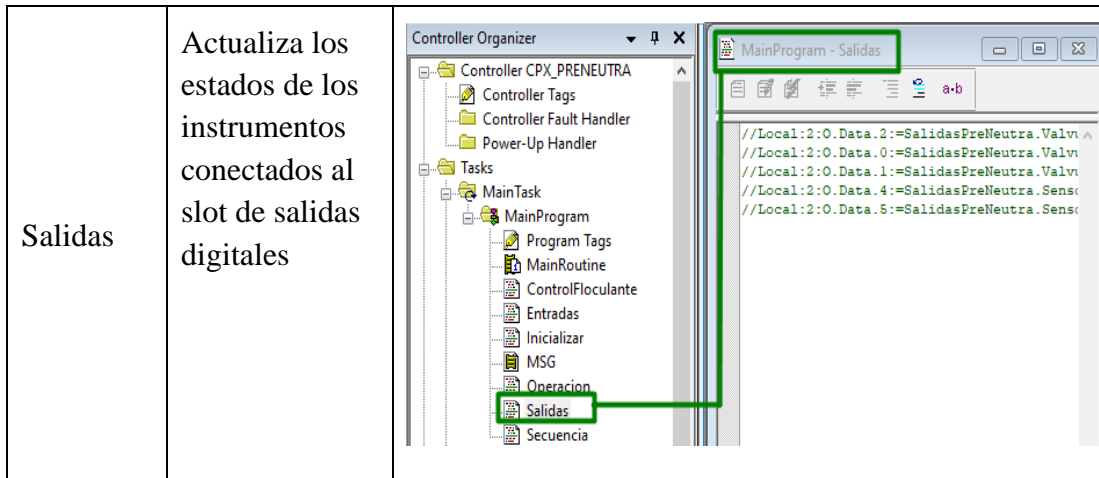
Las Rutinas que se han definido para el desarrollo de la programación se presentan y describen en la Tabla 8.

Tabla 8. Rutinas de programación del PLC CPX_PRENEUTRA.

RUTINAS		
Nombre	Descripción	Contenido
Main Routine	Realiza el llamado de todas las rutinas del programa (Inicializar, Operación, Secuencia, Control Floculante, Entradas y Salidas)	

<p>Inicializar</p>	<p>Inicializa todas las variables del proceso a sus valores por defecto (estados, parámetros). Define todas las matrices de decisión del sistema.</p>	 <p>The screenshot shows the 'Controller Organizer' on the left with 'Operacion' selected under 'MainProgram'. The right window displays the following code:</p> <pre> //EVALUACION DE PERMISIVOS if PreNeutra.Variables.FlujoSpent>50 then PreNeutra.Permisivos.MinFlujoSpent:=1; else PreNeutra.Permisivos.MinFlujoSpent:=0; end_if; //PreNeutra.Permisivos.MinFlujoSpent:=Pre if PreNeutra.Variables.NivelTanque1>15 th PreNeutra.Permisivos.MinNivelTanque1:: else PreNeutra.Permisivos.MinNivelTanque1:: end_if; //PreNeutra.Permisivos.MinNivelTanque1:=P; if PreNeutra.Variables.NivelTanque2>15 th </pre>
<p>Operación</p>	<p>Gestiona la operación del proceso (evalúa permisos, interlocks y los modos de operación manual y automático)</p>	 <p>The screenshot shows the 'Controller Organizer' on the left with 'Operacion' selected under 'MainProgram'. The right window displays the following code:</p> <pre> //EVALUACION DE PERMISIVOS if PreNeutra.Variables.FlujoSpent>50 then PreNeutra.Permisivos.MinFlujoSpent:=1; else PreNeutra.Permisivos.MinFlujoSpent:=0; end_if; //PreNeutra.Permisivos.MinFlujoSpent:=Pre if PreNeutra.Variables.NivelTanque1>15 th PreNeutra.Permisivos.MinNivelTanque1:: else PreNeutra.Permisivos.MinNivelTanque1:: end_if; //PreNeutra.Permisivos.MinNivelTanque1:=P; if PreNeutra.Variables.NivelTanque2>15 th </pre>
<p>Secuencia</p>	<p>Implementa la lógica de secuencia de funcionamiento del sistema (muestreo, sedimentación, lavado y espera)</p>	 <p>The screenshot shows the 'Controller Organizer' on the left with 'Secuencia' selected under 'MainProgram'. The right window displays the following code:</p> <pre> //LOGICA DE CAMBIO DE ESTADO if PreNeutra.Operacion.EstadoAnterior <> 1 PreNeutra.Operacion.EstadoAnterior:=P; D1398.StartStop:=0; //D1398.FrecuenciaIndice:=0; D1398.FrecuenciaReferencia:=0; TiempoMuestreoHabilitar:=0; TiempoRecirculacionHabilitar:=0; TiempoLavadoHabilitar:=0; TiempoSedimentacionHabilitar:=0; TiempoSensor1Habilitar:=0; TiempoSensor2Habilitar:=0; PreNeutra.Operacion.Etapa:=0; PreNeutra.Operacion.TiempoRecirculaci PreNeutra.Operacion.TiempoLavado:=0; PreNeutra.Operacion.TiempoEspera:=0; PreNeutra.Operacion.TiempoSedimentacion PreNeutra.Operacion.TiempoOperacion:=0; </pre>

<p>Control Floculante</p>	<p>Define los estados, las etapas, los tiempos de duración de cada una de las etapas del proceso</p>	 <p>The screenshot shows the 'Controller Organizer' on the left with 'ControlFloculante' highlighted under 'MainProgram'. The main window displays the ladder logic code for 'MainProgram - ControlFloculante', including variable declarations and conditional logic for density and lodo levels.</p>
<p>MSG</p>	<p>Realiza la mensajería con los PLC CLX_4050 y AMEC_D2255 . Define la línea de vida para la comunicación</p>	 <p>The screenshot shows the 'Controller Organizer' with 'MSG' highlighted. The main window displays the ladder logic diagram for 'MainProgram - MSG', featuring a 'Timer On Delay' block and message control blocks connected to 'TIMER_MSG.DN'.</p>
<p>Entradas</p>	<p>Actualiza los estados de los instrumentos conectados al slot de entrada digitales</p>	 <p>The screenshot shows the 'Controller Organizer' with 'Entradas' highlighted. The main window displays the ladder logic code for 'MainProgram - Entradas', showing comments for digital input sensors like 'EntradasPreNeutra.SensorFotoElectrico1'.</p>



3.4.1.3.2. Configuración del sistema SCADA

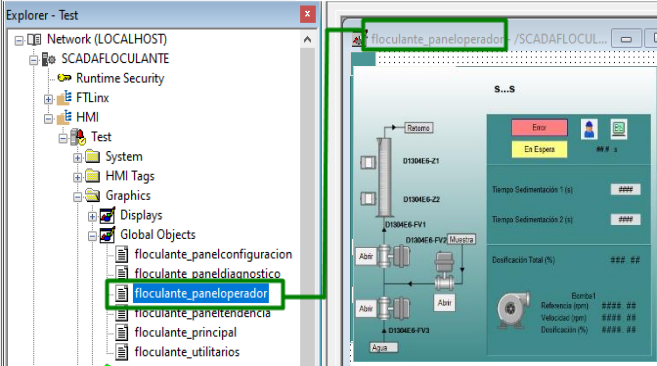
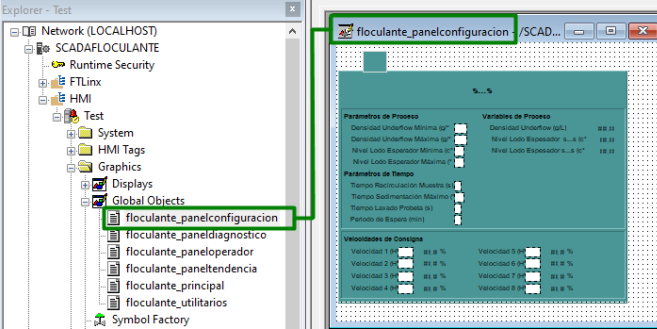
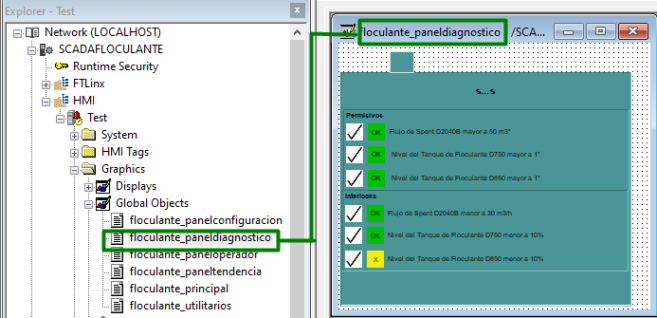
Para la configuración del sistema SCADA se establecieron los objetos globales, pantallas y faceplates.

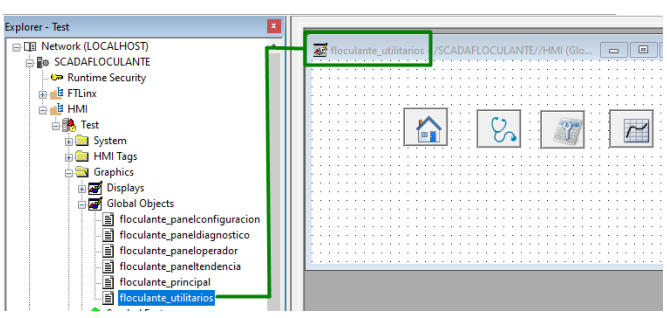
- **Objetos globales**

Los objetos globales que se han definido para la configuración del HMI del sistema se presentan y describen en la Tabla 9.

Tabla 9. Objetos globales del sistema SCADA.

Objetos globales		
Nombre	Descripción	Contenido
Objeto Principal	<p>Engloba a todos los objetos globales (objeto operador, configuración, diagnóstico y utilitarios).</p>	

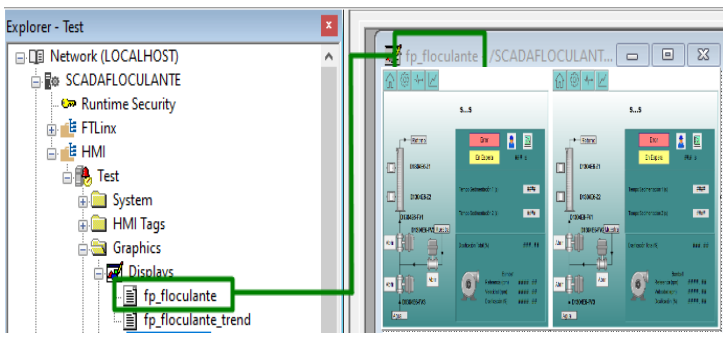
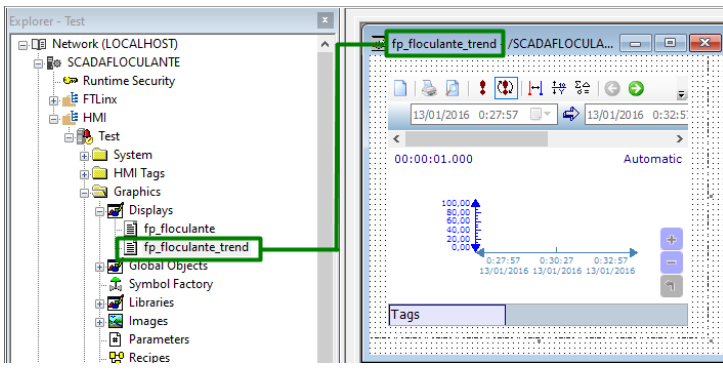
<p>Objeto Operador</p>	<p>Define la interfaz de control y monitoreo del proceso (instrumentos, equipos, variables de proceso y modos de control)</p>	
<p>Objeto Configuración</p>	<p>Define la interfaz para la configuración de los parámetros de proceso, tiempo de secuencia y velocidad de consigna de la bomba</p>	
<p>Objeto Diagnóstico</p>	<p>Define la interfaz para la habilitación y monitoreo de los permisos e interlocks del sistema</p>	

<p>Objeto Utilitarios</p>	<p>Define los botones de navegación entre los objetos globales del sistema</p>	
---------------------------	--	--

- Pantallas y faceplates

Las pantallas que se han definido para la configuración del HMI del sistema se presentan y describen en la Tabla 10.

Tabla 10. Pantallas y faceplates.

Objetos globales		
Nombre	Descripción	Contenido
<p>Pantalla HMI Floculante</p>	<p>Ventana del HMI donde se controla y monitorea el sistema de dosificación de floculante</p>	
<p>Faceplate de Tendencias</p>	<p>Faceplate donde se visualiza las variables historiadas del sistema</p>	

3.4.1.3.3. Pruebas del sistema.

Las pruebas se realizaron en el sistema en su modo de operación manual y automático; así como en todas las etapas de su secuencia de funcionamiento (muestreo, sedimentación y lavado).

- Modo manual

La Figura 24, muestra el sistema en modo manual, la cual permite operar la apertura y cierre de todas las válvulas del sistema de manera independiente. La velocidad de consigna de la bomba D1398 es definida por el operador a través de su respectivo faceplate, asimismo, se muestra las válvulas D-1304E6-FV1 y D-1304E6-FV2 abiertas y la válvula D-1304E6-FV3 cerrada.

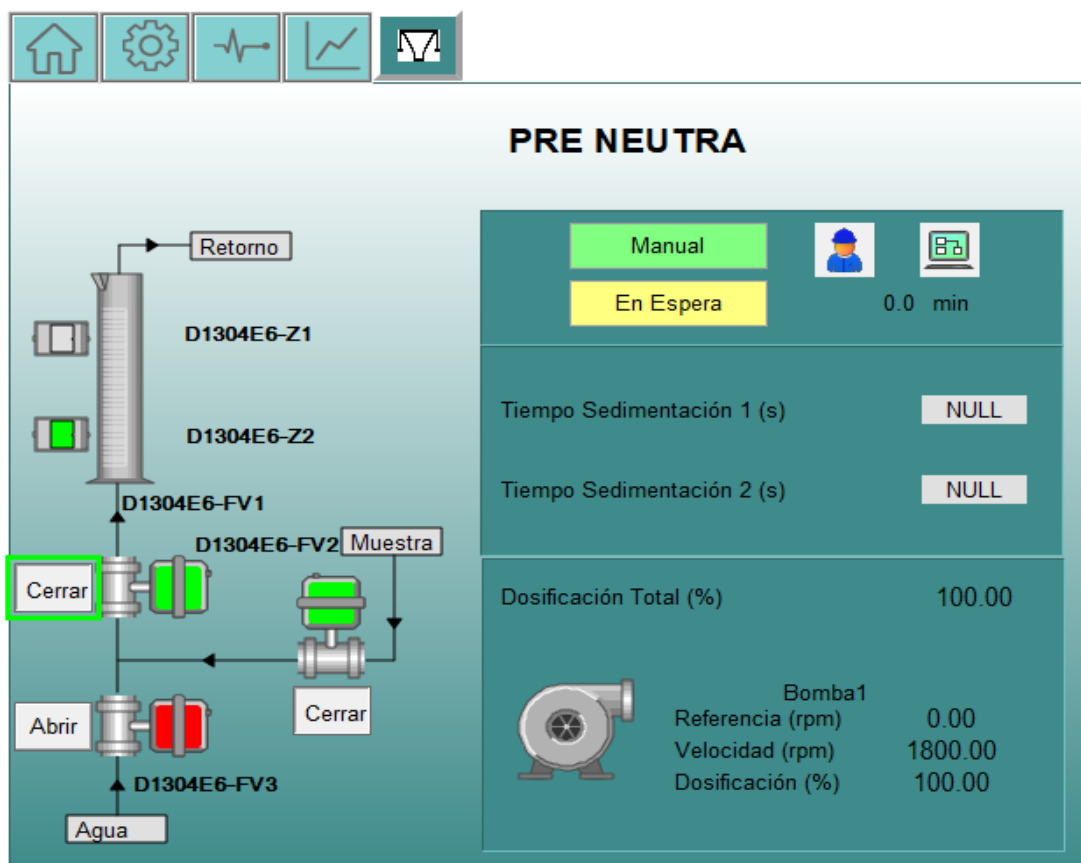


Figura 24. Modo de operación manual del sistema SCADA.

Nota. Pantalla de interface implementada en FactoryTalk View SE V13.

- Modo automático etapa de muestreo

La Figura 25, muestra el sistema en modo automático en la etapa de muestreo, las válvulas D-1304E6-FV1 y D-1304E6-FV2 abiertas y la válvula D-1304E6-FV3 cerrada.

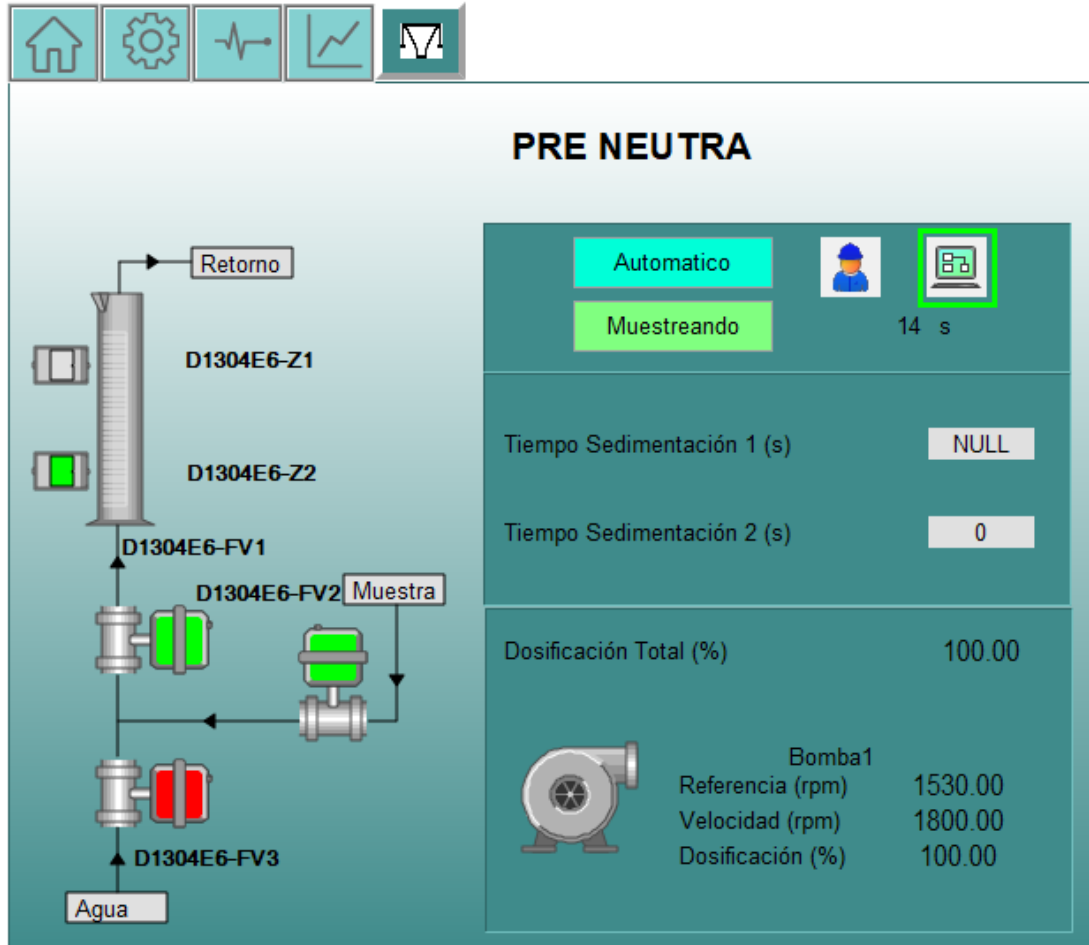


Figura 25. Modo automático en etapa de muestreo.

Nota. Pantalla de interface implementada en FactoryTalk View SE V13.

- Modo automático en etapa de sedimentación.

La Figura 26. Muestra el sistema en modo automático en la etapa de sedimentación, las válvulas D-1304E6-FV1, D-1304E6-FV2 y D-1304E6-FV3 se encuentran cerradas.

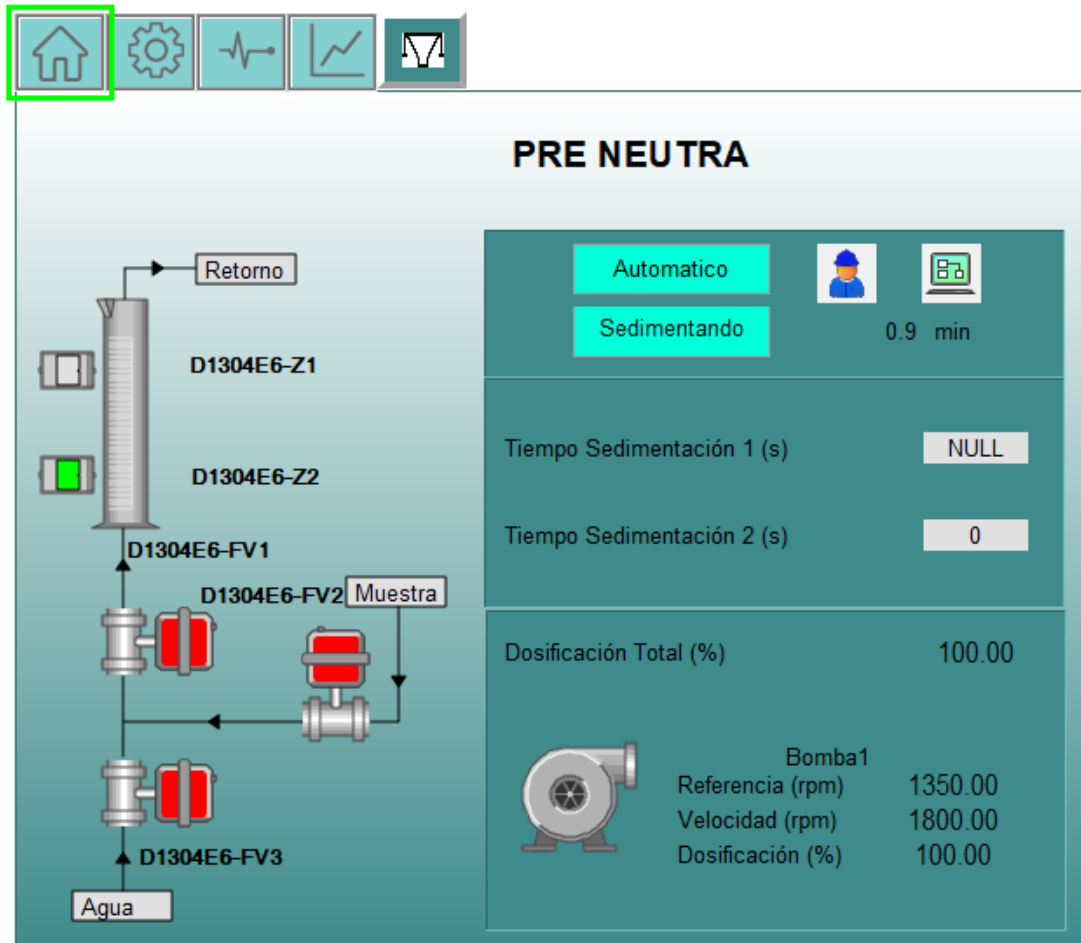


Figura 26. Modo automático en etapa de sedimentación.

Nota. Pantalla de interface implementada en FactoryTalk View SE V13.

- Modo automático en etapa de lavado.

La Figura 27, muestra el sistema en modo automático en la etapa de lavado, las válvulas D-1304E6-FV1 y D-1304E6-FV3 se encuentran abiertas y la válvula D-1304E6-FV2 se encuentra cerrada.

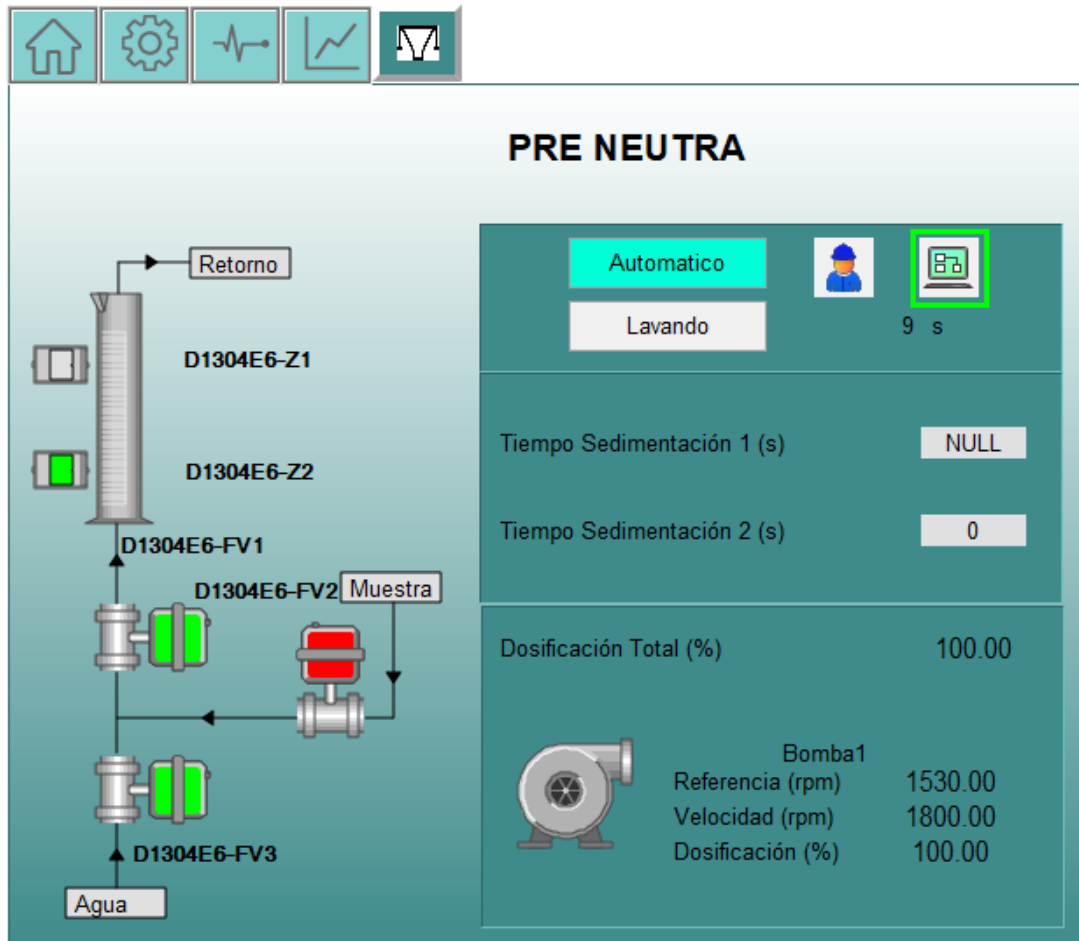


Figura 27. Modo automático en etapa de lavado.

Nota. Pantalla de interface implementada en FactoryTalk View SE V13.

3.5. Diseño de investigación

Se utilizó el diseño pre-experimental con mediciones Pre-test y Post-test para determinar la eficiencia en la dosificación de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación de la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources - Cajamarquilla.

El estudio de caso Pre-test y Post-test consiste en medir antes de administrar un estímulo o tratamiento a un mismo grupo y después realizar una nueva medición [32, p. 141]. Las mediciones Pre-test fueron hechos de manera manual sin la intervención del “Sistema de control automático para la dosificación de floculante”, mientras que las

mediciones Post-test se realizaron empleando el sistema de control automático implementado.

El esquema del diseño de investigación utilizado es el siguiente:



Donde:

UA1 Unidad de análisis (eficacia general de dosificación)

O₁ Medición Pre-test de la eficacia general de dosificación durante 10 días.

X Sistema de Control Automático para la dosificación de floculante.

O₂ Medición Post-test de la eficacia general de dosificación durante 10 días.

La diferencia (O₂ – O₁) representa la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, el cual es consecuencia de la mejora del volumen de sedimentación de minerales dentro del rango de 350 - 400 ml en las muestras en probeta de 1000 ml tomados de acuerdo a protocolo establecido.

3.6. Población, muestra y muestreo

3.6.1. Población

La población fue de 200 muestras donde se verificó el volumen de sedimentación del mineral para establecer la cantidad de ingreso de floculante al proceso. Se tomaron durante los meses de marzo-abril, siendo este un universo o conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones [33, p. 174].

3.6.2. Muestra

Durante el desarrollo del trabajo en la refinería, las muestras fueron tomadas cada 30 min; haciendo un total de 20 lecturas por día de acuerdo a lo establecido en el protocolo de procedimientos para la toma de muestras, verificando el volumen de sedimentación

de minerales en el rango establecido (350-400 ml) para establecer la velocidad de la bomba que está relacionado con la cantidad de ingreso de floculante al proceso. Las muestras de estudio antes de implementar el sistema de automatización fueron en total 180, que se obtuvieron en 10 días en el mes de abril del año 2024, con datos perdidos por un día que corresponde a 20 muestras; y las muestras después de la implementación del sistema de automatización fueron 200 sin datos perdidos, estas muestras se tomaron en el mes de mayo del año 2024. Las muestras se presentan en la Tabla 18 del Anexo C, donde a cada volumen de sedimento muestreado le corresponde una acción del variador, así mismo se representa la duración de cada proceso de muestro, siendo el óptimo 220 s.

3.6.3. Muestreo

El muestreo fue intencional en base al protocolo de muestreo establecido (cada 30 min) por 10 días, con fijación de las consignas (Setpoint) de las variables controladas (Volumen de sedimento), y monitoreados desde la interface SCADA del controlador que fue implementado en FactoryTalk View SE V13.

3.7. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

Se utilizó la técnica de la observación, quiere decir los datos se obtuvieron midiendo el volumen de sedimento de la etapa pre-neutralizado, cuyos valores se registraron en una hoja Excel, por medio del sistema de control automático implementado, los que posteriormente se trasladaron a la ficha de muestras Pre-test y Post-test del Anexo C.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Como técnica de procesamiento de los datos se empleó el cálculo de la eficacia general del equipo OEE (Overall Equipment Effectiveness) del sistema de automatización implementado, donde se prueba el funcionamiento u operación, considerando: ratio de disponibilidad, rendimiento y calidad del sistema automatizado implementado.

- La disponibilidad (A), es la relación del tiempo previsto para la ejecución del proceso y el tiempo de ejecución real del proceso, se calculó Ecuación 11 [34].

$$A (\%) = \frac{\text{Tiempo previsto}}{\text{Tiempo de ejecución real}} * 100 \quad (11)$$

- El rendimiento (P), conocido como tasa de proceso, mide la velocidad a la que el sistema de control automático de dosificación ejecuta el trabajo, considerando las unidades totales muestreadas por tiempo ideal entre tiempo de ejecución real [35], de acuerdo a la Ecuación 12.

$$P (\%) = \frac{\text{Unidades totales} \times \text{Tiempo de ejecución ideal}}{\text{Tiempo total de ejecución real}} * 100 \quad (12)$$

- La calidad (Q), también llamada rendimiento del proceso, representa las unidades muestreadas correctas como porcentaje de las unidades totales [36] de acuerdo a la Ecuación 13.

$$Q (\%) = \frac{\text{Número de mediciones correctas}}{\text{Número total de mediciones}} * 100 \quad (13)$$

- La eficiencia general del sistema de control automático, mide la eficiencia alcanzada en el proceso dosificación de floculante por el sistema de control automático [37], concretamente la eficacia con la que funciona el equipo. En términos sencillos, la OEE es la relación entre los factores A, P y Q que se presenta en la Ecuación 14.

$$OEE (\%) = A * P * Q \% \quad (14)$$

Los datos procesados se presentan en la Tabla 19 de muestras Pre-test y Post-test del Anexo C.

El análisis de los datos se realizó mediante el uso de la estadística descriptiva y pruebas estadísticas; se plantearon las hipótesis nulas (H_0) y se probaron mediante la comparación de medianas empleando el test de los rangos con signo de Wilcoxon para

dos muestras relacionadas (Ecuación 15 y 16) por tratarse de muestras de estudio con diseño Pre-test y Post-test que no tienen una distribución normal. El análisis de los datos se realizaron en línea mediante la aplicación web de acceso libre “Statistics Kingdom” [38].

$$W = \min(W^+, W^-) \quad (15)$$

Donde:

W : Estadístico de Wilcoxon.

W^+ : suma de los rangos con signo positivo.

W^- : suma de los rangos con signo negativo.

$$Z = \frac{W - \frac{n(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}} \quad (16)$$

Donde:

Z : Valor de la razón.

n : tamaño de la muestra.

Siendo $p\text{-valor} = \text{DISTR.NORM.ESTAND.N}(Z; \text{VERDADERO})$.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de información

El sistema automático se implementó con 02 componentes denominados: Subsistema de control automático para detección del volumen de sedimentación de pulpa y Subsistema de control automático para inyección de floculante a la pulpa en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, La interface del sistema SCADA (fp_prenuetra), desde donde se monitoreó y configuró los subprocesos, fue implementado en FactoryTalk View SE (Figura 28).

Desde la pantalla “fp_preneura” se accedió a la pantalla “fp_floculante”, donde se monitorea la ejecución del subsistema de control automático para detección de sedimentación de pulpa, así como el subsistema de control automático para inyección de floculante (Figura 29).



Figura 28. Interface principal del sistema de control automático para la dosificación de floculante en el proceso de sedimentación del espesador D-1304.

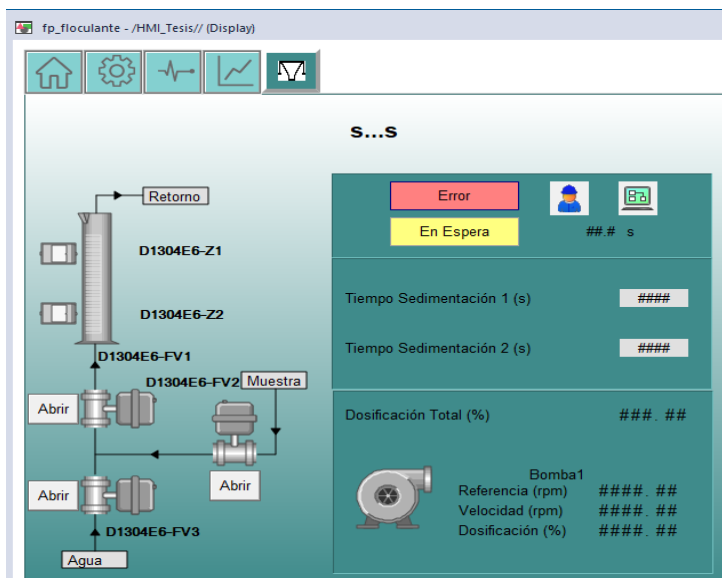


Figura 29. Interface de monitoreo del subsistema de control automático para detección de sedimentación de pulpa, y para inyección de floculante.

La pantalla “floculante_panelconfiguración” (Figura 30), permitió establecer los parámetros de tiempo de acuerdo al protocolo (“Tiempo de recirculación de muestra” (30 s), “Tiempo de sedimentación” / DOSON (180 s) y “Tiempo de lavado de probeta” (10 s)); así como las “Velocidades de consigna” de la bomba.



Figura 30. Interface del panel de configuración.

La pantalla “floculante_paneldiagnostico” (ver Figura 31) permite configurar los “Permisivos” e “Interlocks” que condicionan la operación del sistema de control automático.

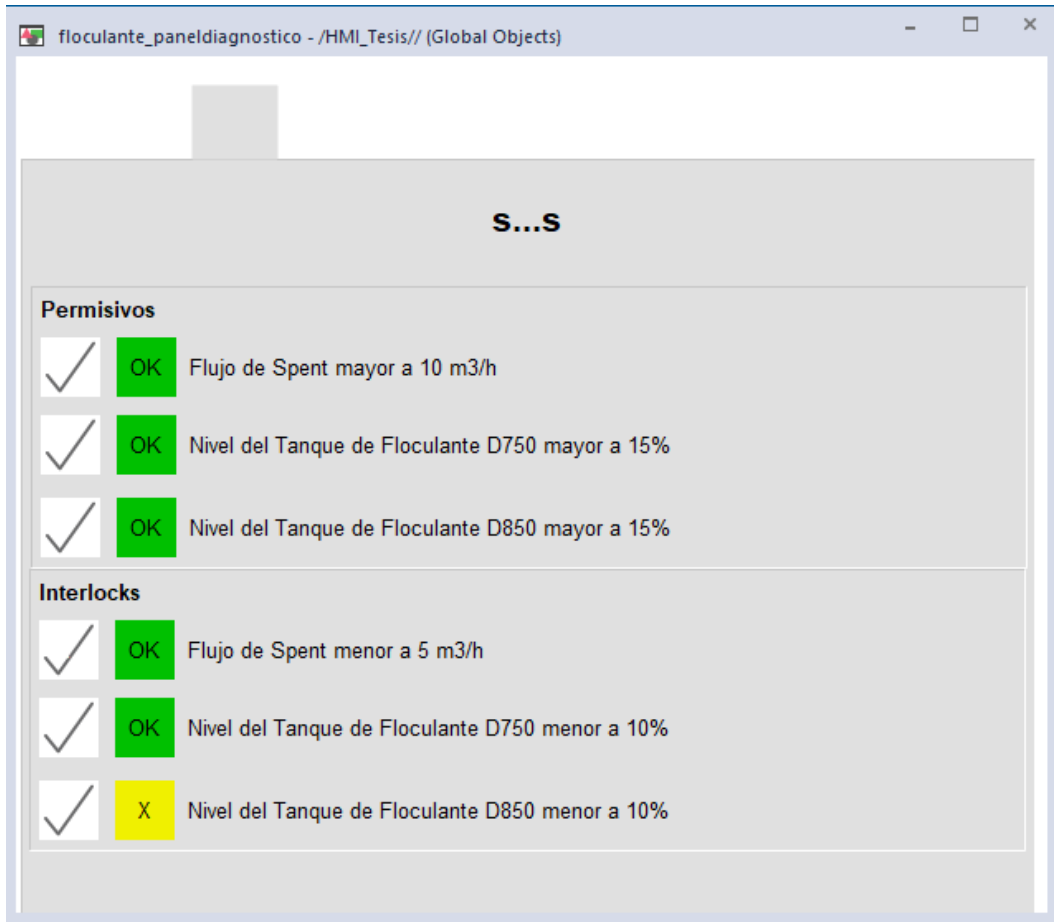


Figura 31. Interface del panel de permisos e interlocks.

Antes de la implementación del sistema de control automático, se tomaron las muestras de pre-test de forma manual, para el volumen de sedimento en el rango de 350 - 400 ml y la respectiva acción del variador, asociados al tiempo de duración establecido en protocolo (ver Anexo C), que involucra al “Tiempo de recirculación de muestra” (30 s) más “Tiempo de sedimentación” conocido como tiempo DOSON (180 s) más “Tiempo de lavado de probeta” (10 s), haciendo un total de 220 s. En vista que se perdieron datos de un día de muestreo que corresponde a las muestras 81 a 100, para los análisis respectivos se sustituyeron con la media, siendo estos 237 s (Tabla 11). Asimismo, presentó 19 acciones de corrección el variador para mantener el volumen de sedimento dentro del rango preestablecido.

Tabla 11. Observaciones con datos perdidos sustituidos.

Muestra (Run)	Duración_Proceso_Pre_test (s)
Obs81	237
Obs82	237
Obs83	237
Obs84	237
Obs85	237
Obs86	237
Obs87	237
Obs88	237
Obs89	237
Obs90	237
Obs91	237
Obs92	237
Obs93	237
Obs94	237
Obs95	237
Obs96	237
Obs97	237
Obs98	237
Obs99	237
Obs100	237

Una vez entrado en operación el sistema de control automático implementado, se tomaron las muestras de post-test de forma automática, para el volumen de sedimento en el rango de 350 - 400 ml y la respectiva acción del variador, asociados al tiempo de duración establecido en protocolo (ver Anexo C, Tabla 18), al igual que en el pre-test involucra al “Tiempo de recirculación de muestra” (30 s) más “Tiempo de

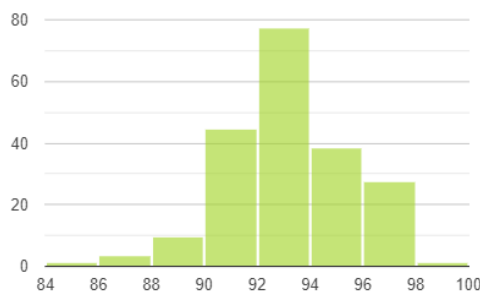
sedimentación” conocido como tiempo DOSON (180 s) más “Tiempo de lavado de probeta” (10 s). También, presentó 11 acciones de corrección el variador para mantener el volumen de sedimento dentro del rango preestablecido.

Se analizaron la distribución normal de los datos del Anexo C, Tabla 19, que corresponde a la disponibilidad (A), rendimiento (P), calidad (Q) y eficiencia general del sistema/equipo (OEE) Pre-test. Como los datos son mayores a 50, se usó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Tabla 12). Como $p\text{-valor} < 0.001$ es menor a $\alpha=0.05$ para la mayoría de las variables analizadas, se determina que estas variables no tienen una distribución normal, por lo que, se usó un estadístico no paramétrico para probar las hipótesis.

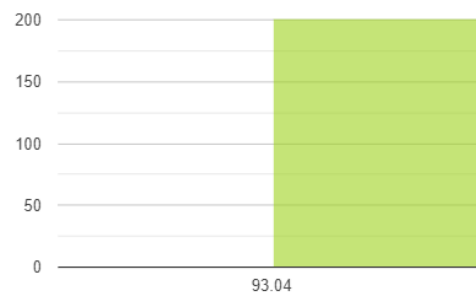
Tabla 12. Pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov de las variables A_Pre_test, P_Pre_test, Q_Pre_test y OEE_Pre_test.

Variable	Estadístico D	gl	p-valor
A_Pre_test	0.103	200	< 0.001
P_Pre_test		200	
Q_Pre_test	0.534	200	< 0.001
OEE_Pre_test	0.386	200	< 0.001

En la Figura 32, se presenta los histogramas de la distribución de datos Pre-test de A, P, Q y OEE.



(a)



(b)

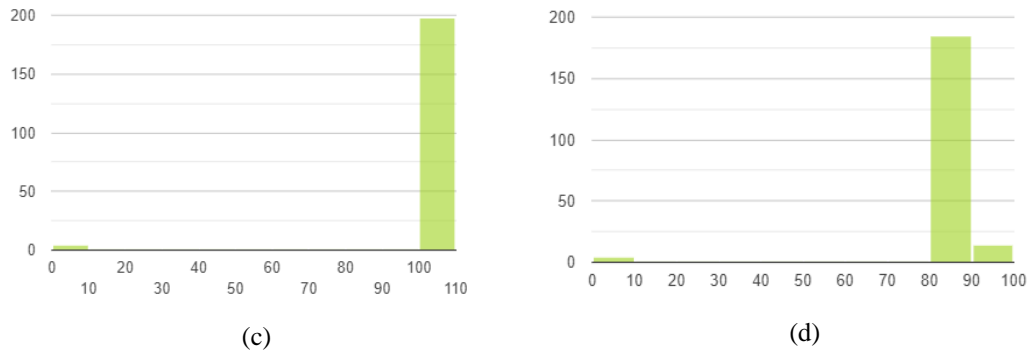


Figura 32. Histograma de la distribución de datos en % (a) A_Pre_test, (b) P_Pre_test, (c) Q_Pre_test y (d) OEE_Pre_test.

Nota. Gráfico obtenido con [39]

Asimismo, se analizaron la normalidad de los datos Post-test usando la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Tabla 13). Como $p\text{-valor} < 0.001$ es menor a $\alpha=0.05$ para la mayoría de las variables analizadas, se determina que estas variables no tienen una distribución normal, por lo que, se usó un estadístico no paramétrico para probar las hipótesis.

Tabla 13. Pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov de las variables A_Post_test, P_Post_test, Q_Post_test y OEE_Post_test.

Variable	Estadístico D	gl	p-valor
A_Post_test	0.192	200	< 0.001
P_Post_test		200	
Q_Post_test		200	
OEE_Post_test	0.190	200	< 0.001

En la Figura 33, se presenta los histogramas de la distribución de datos Post-test de A, P, Q y OEE.

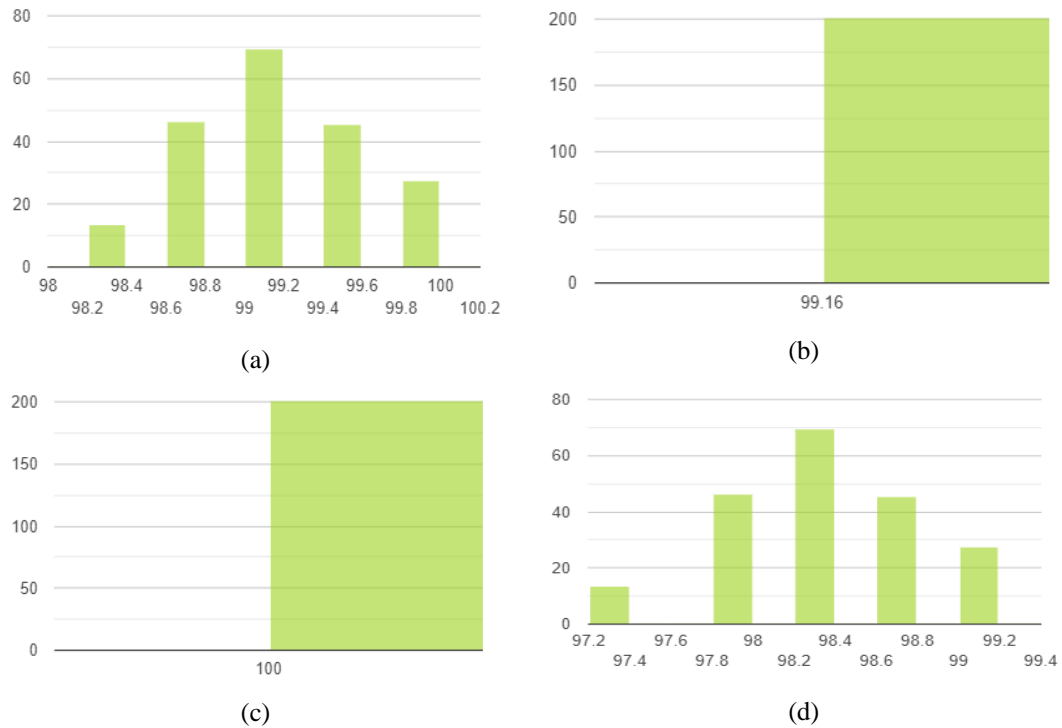


Figura 33. Histograma de la distribución de datos en % (a) A_Post_test, (b) P_Post_test, (c) Q_Post_test y (d) OEE_Post_test.

Nota. Gráfico obtenido con [39]

En vista de que los datos no siguen una distribución normal se optó por realizar las pruebas no paramétricas a las hipótesis.

4.2. Prueba de hipótesis

Hipótesis específica a: Es significativa la mejora de la disponibilidad para detectar el volumen de sedimentación de la pulpa en el rango de 350 - 400 ml en las muestras en probeta de 1000 ml tomados cada 30 min, al implementar el subsistema de control automático.

Hipótesis nula H_0 :

$$A_{Post_test} - A_{Pre_test} \leq 5.825\%$$

Hipótesis alternativa H_1 :

$$A_{Post_test} - A_{Pre_test} > 5.825\%$$

Por tratarse de datos de distribución no normal, con muestras dependientes, se emplea la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, cuyo resultado se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Prueba de Rangos con signo de Wilcoxon (unilateral a la derecha).

W, (W-, W+)	8595.5, (8595.5, 11504.5)
Z	1.774
Número de pares(N)	200
valor-p (unilateral)	0.03801
alfa	0.05

En la Figura 34, se presenta la distribución de Z y p-value de la prueba de Wilcoxon (a), e histograma del promedio y mediana de los datos del porcentaje de la disponibilidad “A” pre y post test (b).

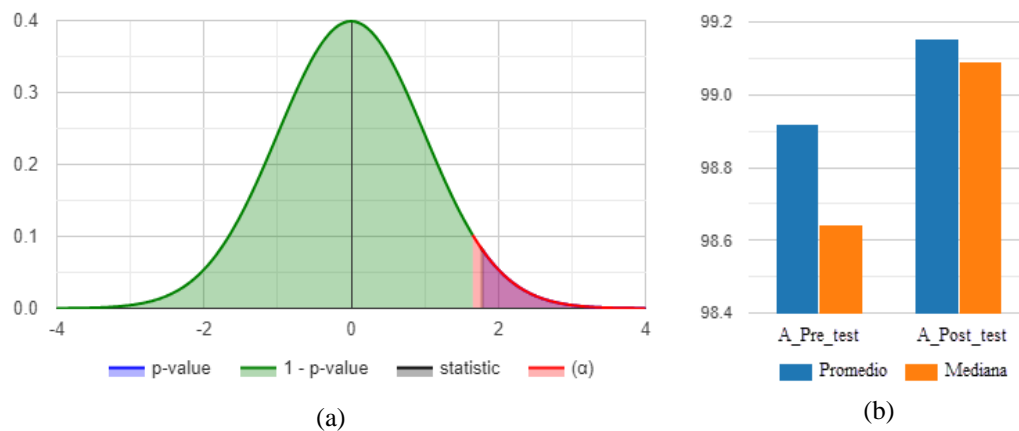


Figura 34. (a) Distribución de Z y p-value de la prueba de Wilcoxon, (b) histograma del promedio y mediana de los datos de “A” pre y post test (%).

Interpretación de la prueba:

De los valores obtenidos en la Tabla 14; como el valor-p (**0.03801**) es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H_0 , y aceptar la hipótesis alternativa H_1 . Por lo que, se concluye: *Es significativa la mejora de la disponibilidad para detectar el volumen de sedimentación de la pulpa en el rango de*

350 – 400 ml en las muestras en probeta de 1000 ml tomados cada 30 min, al implementar el subsistema de control automático.

Hipótesis específica b: Es significativa la mejora del rendimiento de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación, al implementar el subsistema de control automático de una bomba en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.

Hipótesis nula H_0 :

$$P_{Post_test} - P_{Pre_test} \leq 6.115 \%$$

Hipótesis alternativa H_1 :

$$P_{Post_test} - P_{Pre_test} > 6.115 \%$$

Por tratarse de datos de distribución no normal, con muestras dependientes, se emplea la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, cuyo resultado se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15. Prueba de Rangos con signo de Wilcoxon (unilateral a la derecha).

W, (W-, W+)	0, (0, 20100)
Z	14.1414
Número de pares(N)	200
valor-p (unilateral)	<0.0001
alfa	0.05

En la Figura 35, se presenta el histograma del promedio y mediana de los datos del porcentaje del rendimiento “P” pre y post test.

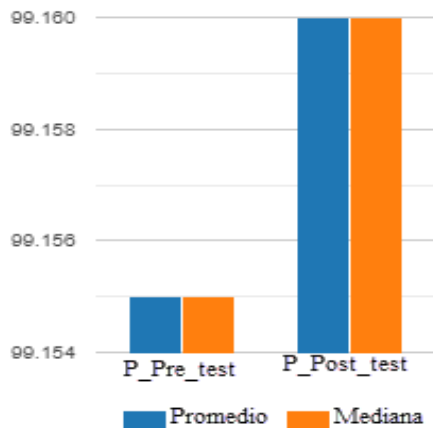


Figura 35. Histograma del promedio y mediana de los datos de “P” pre y post test (%).

Interpretación de la prueba:

De los valores obtenidos en la Tabla 15; como el valor-p (**<0.0001**) es menor que el nivel de significación alfa=0.05, se debe rechazar la hipótesis nula H_0 , y aceptar la hipótesis alternativa H_1 . Por lo que, se concluye: *Es significativa la mejora del rendimiento de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación, al implementar el subsistema de control automático de una bomba en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.*

Hipótesis específica c: Es significativa la mejora de la calidad de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, con el sistema de control automático implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.

Hipótesis nula H_0 :

$$Q_{Post_test} = Q_{Pre_test}$$

Hipótesis alternativa H_1 :

$$Q_{Post_test} \neq Q_{Pre_test}$$

Por tratarse de datos de distribución no normal, con muestras dependientes, se emplea la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, cuyo resultado se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16. Prueba de Rangos con signo de Wilcoxon (bilateral).

W, (W-, W+)	597, (19503, 597)
Z	-13.20
Número de pares(N)	200
valor-p (unilateral)	≈ 1
alfa	0.05

En la Figura 36, se presenta el histograma del promedio y mediana de los datos del porcentaje de la calidad “Q” pre y post test.

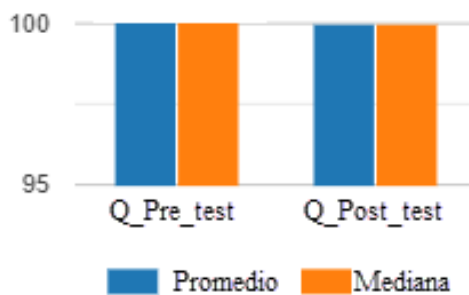


Figura 36. Histograma del promedio y mediana de los datos de “Q” pre y post test (%).

Interpretación de la prueba:

De los valores obtenidos en la Tabla 16; como el valor-p (≈**1**) es mayor que el nivel de significación alfa=0.05, se debe aceptar la hipótesis nula H_0 , y rechazar la hipótesis alternativa H_1 . Por lo que, se concluye: *No es significativa la mejora de la calidad de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, con el sistema de control automático implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.*

Hipótesis general: Es significativa la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla.

Hipótesis nula H_0 :

$$OEE_Post_test - OEE_Pre_test \leq 11.45 \%$$

Hipótesis alternativa H_1 :

$$OEE_Post_test - OEE_Pre_test > 11.45 \%$$

Por tratarse de datos de distribución no normal, con muestras dependientes, se emplea la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, cuyo resultado se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. Prueba de Rangos con signo de Wilcoxon (unilateral a la derecha).

W, (W-, W+)	8475.5, (8475.5, 11624.5)
Z	1.92
Número de pares(N)	200
valor-p (unilateral)	0.027
alfa	0.05

En la Figura 37, se presenta la distribución de Z y p-value de la prueba de Wilcoxon (a) e histograma del promedio y mediana de los datos del porcentaje de OEE pre y post test (b).

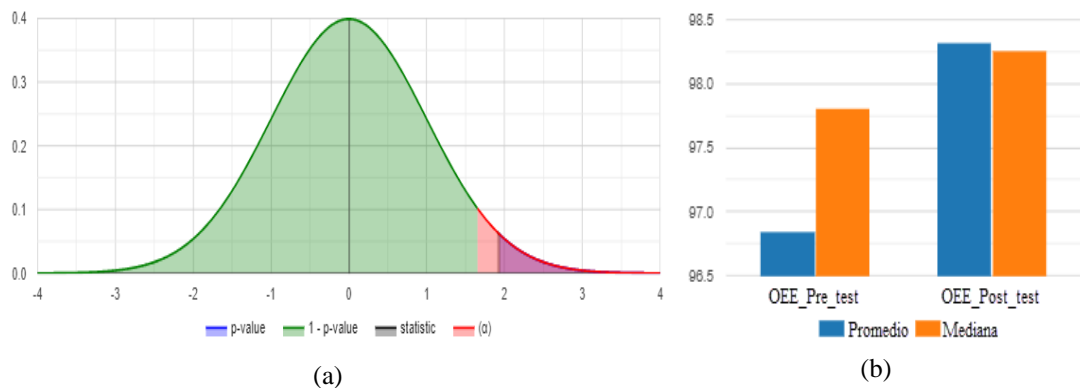


Figura 37. (a) Distribución de Z y p-value de la prueba de Wilcoxon, (b) histograma del promedio y mediana de los datos de OEE pre y post test (%).

Interpretación de la prueba:

De los valores obtenidos en la Tabla 17; puesto que el valor-p (**0.027**) es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H_0 , y aceptar la

hipótesis alternativa H_1 . Por lo que, se concluye: *Es significativa la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla.*

4.3. Discusión de los resultados

En la presente tesis se ha abordado el diseño e implementación de un sistema de control automático para mejorar la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación de pulpa de mineral en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla. La discusión de los resultados se fundamenta en la comparación de nuestros hallazgos con estudios previos relevantes, destacando tanto los logros como las áreas de mejora.

4.3.1. De la Implementación del Sistema Automático y su eficacia

La implementación del sistema automático de control en nuestro estudio ha demostrado ser una herramienta clave para mejorar la eficiencia del proceso de sedimentación. El subsistema de control automático para la detección del volumen de sedimentación y la inyección de floculante ha permitido una regulación precisa del proceso, como lo evidencia la reducción en el tiempo de sedimentación presentando una mejora de disponibilidad (A) superior a 5.825% con respecto al control manual. Asimismo, el rendimiento (P) de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación mejora en un 6.115%, mientras que la calidad (Q) de dosificación se mantiene igual en consecuencia la eficacia general (OEE) de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación es superior a 11.45%, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla.

4.3.2. De la comparación con antecedentes

El trabajo de Laurente Ambrocio (2023) proporciona un contexto valioso para la evaluación de la velocidad de sedimentación de relaves. En su estudio, el floculante AR-3913 mostró una velocidad de sedimentación significativamente mejorada en comparación con el floculante MT-4219. Esto es consistente con nuestros resultados, que muestran un rendimiento superior del floculante utilizado en el proceso automatizado. La velocidad de sedimentación obtenida con el AR-3913, con una altura de compactación de 5.3 cm en 45 minutos, confirma la efectividad de la selección del floculante para mejorar la eficiencia del proceso.

El trabajo de Palli Calla (2022) resalta la importancia de la optimización de sedimentadores mediante la separación sólido-líquido. La optimización de la densidad de pulpa y la mejora en la velocidad de sedimentación en nuestro estudio, con el uso del sistema SCADA para la dosificación precisa del floculante, complementa los hallazgos de Palli Calla. La reducción en el tiempo de sedimentación y la mayor compactación de los relaves indican un avance en la optimización del sedimentador, alineándose con las estrategias de mejoramiento propuestas.

En relación con la automatización del proceso, el trabajo de Ticona Apaza (2018) y Cutipa Gonzales (2017) destaca la importancia de la automatización para la dosificación precisa de floculantes y la recuperación de agua. Nuestros resultados, que incluyen la implementación de un sistema automático de control y monitoreo, demuestran una mejora en la consistencia y eficiencia del proceso de sedimentación. La automatización contribuyó a mantener el volumen de sedimento dentro del rango deseado y a reducir el tiempo de sedimentación, lo que resalta la efectividad de los sistemas de control propuestos.

El estudio de Inofuente Mamani (2022) muestra que el uso de coagulantes y floculantes químicos puede ser muy efectivo para el tratamiento de aguas residuales. En nuestro caso, la utilización del floculante en el proceso de sedimentación ha llevado

a una disminución significativa en el tiempo de sedimentación y un mejor control de la turbidez del efluente. Esto respalda la idea de que la combinación adecuada de floculantes puede mejorar notablemente el rendimiento del tratamiento de relaves.

4.3.3. De las implicaciones de los resultados

Los resultados obtenidos en esta tesis indican que la combinación de un sistema automatizado con la selección adecuada de floculantes puede llevar a una mejora significativa en la eficiencia del proceso de sedimentación de relaves. La reducción en el tiempo de sedimentación y el mejor control de los parámetros operacionales refuerzan la viabilidad de las técnicas propuestas. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para la optimización de procesos en plantas de tratamiento de pulpa de minerales, particularmente en contextos industriales donde la eficiencia y el control son críticos.

Conclusiones

Se implementó un sistema de control automático compuesto por el subsistema de para detección del volumen de sedimentación de pulpa y un subsistema de control automático para inyección de floculante a la pulpa en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, con los que se analizaron las mejoras de disponibilidad (A), rendimiento (P), calidad (Q) y la eficacia general del sistema implementado en la dosificación de floculante en el proceso de sedimentación en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla.

Al evaluar la mejora de la disponibilidad (A), mediante la prueba no paramétrica de Wilcoxon, para detectar el volumen de sedimentación de la pulpa en el rango de 350 - 400 ml en las muestras en probeta de 1000 ml tomados cada 30 min, con el subsistema de control automático implementado; se determinó que la mejora es superior a 5.825% con respecto al control del proceso de forma manual.

Al evaluar la mejora del rendimiento (P), mediante la prueba no paramétrica de Wilcoxon, de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación, con el subsistema de control automático de una bomba implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304; se determinó que la mejora es superior a 6.115% con respecto al control del proceso de forma manual.

Al evaluar la mejora de la calidad (Q) comparando medianas, también mediante la prueba no paramétrica de Wilcoxon, de la dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, con el sistema de control automático implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304; se determinó que no existe mejora significativa en la calidad de la dosificación de floculante con respecto al control de proceso de forma manual.

Finalmente, al evaluar la mejora de la eficacia general (OEE) de dosificación de floculante, usando la prueba no paramétrica de Wilcoxon, en el proceso de sedimentación, con el sistema de control automático implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinera Nexa Resources – Cajamarquilla; se determinó una mejora del OEE superior a 11.45%. por lo que la implementación del sistema automático para la dosificación del floculante demuestra ser efectiva en la mejora de la velocidad de sedimentación de la pulpa de mineral.

Recomendaciones

Aunque la implementación del sistema automático ha mostrado mejoras significativas en disponibilidad, rendimiento y eficacia general (OEE), es recomendable realizar una revisión y ajuste continuo del sistema de control automático en lo siguiente:

- **Realizar mantenimientos periódicos** para asegurar que el subsistema de detección del volumen de sedimentación y el subsistema de inyección de floculante funcionen de manera óptima y sin fallos.
- **Actualizar el software y calibrar los sensores** con regularidad para mantener la precisión en la medición y dosificación del floculante.

Asimismo, para la correcta operación del sistema automático, es necesario que el personal a cargo esté adecuadamente capacitado, para el que se debe **desarrollar programas de formación** para operadores y técnicos sobre el uso y mantenimiento de este sistema automático, así como **establecer manuales y procedimientos operativos** detallados para guiar al personal en el manejo del sistema de control automático y en la resolución de posibles problemas. De esta manera, se asegurará la maximización de los beneficios obtenidos con la implementación del sistema automático de control, mantener altos estándares de calidad y eficiencia, y fomentar la innovación continua en el proceso de sedimentación de relaves en la planta de hidrometalurgia de Nexa Resources – Cajamarquilla.

Por otro lado, para continuar avanzando en la optimización y mejora del proceso de sedimentación y dosificación de floculantes, se debe explorar el uso de tecnologías avanzadas, como inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático, para mejorar la precisión y la adaptabilidad del sistema de control automático; integrando algoritmos de IA para la predicción y ajuste dinámico de la dosificación del floculante basado en condiciones en tiempo real y datos históricos. También, investigar sobre la influencia de parámetros ambientales sobre el proceso, como variaciones en la densidad de pulpa,

la temperatura, y el pH, afectan el proceso de sedimentación y la dosificación de floculantes; realizando experimentos variando estas condiciones y evaluando su impacto en la velocidad de sedimentación y en la calidad del proceso. Estos estudios pendientes tienen el potencial de proporcionar mejoras significativas en el proceso de sedimentación, la eficiencia de la dosificación de floculantes y la sostenibilidad ambiental, contribuyendo al desarrollo continuo y a la innovación en el campo de la hidrometalurgia y el tratamiento de minerales.

Referencias bibliográficas

- [1] D. Quiroz, B. Kuepper, E. Achterberg, C. Rajeevan, y W. Warmerdam, “Towards a just energy transition”, *Labour rights risks Lat. Am. Min. Sect.*, pp. 11–17, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://cutt.ly/YwZoHxwH>
- [2] J. A. De Lima, E. L. Martins, G. P. P. Gonzales, y T. T. Filho, “Current Efficiency Increase in Zinc Electrodeposition at Cajamarquilla Refinery BT - PbZn 2020: 9th International Symposium on Lead and Zinc Processing”, A. Siegmund, S. Alam, J. Grogan, U. Kerney, y E. Shibata, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 101–109.
- [3] O. F. Cardoza Ramos, “Incremento de la recuperación de zinc en el proceso de lixiviación empleando la metodología Seis Sigma en la empresa Nexa Resources Cajamarquilla”, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/10897>
- [4] Ingeniería Liquid Technologies, “Floculantes”. Consultado: el 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://floculantes.com/>
- [5] M. A. A. Laurente Ambrocio, “Mejoramiento de la velocidad de sedimentación del relave con el floculante AR-3913 de la planta DCT– Unidad de Producción Carahuacra – Yauli- 2021”, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2917>
- [6] R. H. Palli Calla, “Dimensionamiento y optimización de un sedimentador convencional de relaves de cobre en una planta de procesamiento de 850 TMD”, Universidad Nacional de San Agustín, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/1905>
- [7] L. E. Arevalo y F. C. Urcuhuaranga, “Optimización de la densidad de pulpa de relave mediante la aplicación de la técnica box benhken en la planta de filtrado en una mina en la Libertad”, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10757/667300>
- [8] J. A. Ticona Apaza, “Propuesta de automatización en la preparación de

- floculante para su dosificación en el embalse de la presa de relaves Enlozada”, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8325>
- [9] R. A. Cutipa Gonzales, “Automatización de un sistema de recuperación de agua de relave”, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3372>
- [10] R. C. Pillajo Correa, “Evaluación del sistema de floculación de la planta de tratamiento “Paluguillo”, Universidad Politécnica Salesiana, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23873>
- [11] E. D. Inofuente Mamani, “Tratamiento de aguas de los relaves de la mina artesanal San José de Quispipata II SMRL con coagulante químico más floculante (catiónico–aniónico)”, Universidad Peruana Unión, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12840/6080>
- [12] C. Y. Jara Rojas y K. Ticse Vila, “Separación sólido–líquidos en espesadores de relaves de la minera Shouxin SA 2020”, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.14067/6263>
- [13] C. Chassagne y Z. Safar, “Modelling flocculation: Towards an integration in large-scale sediment transport models”, *Mar. Geol.*, vol. 430, p. 106361, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106361>.
- [14] K. Beleño Saenz *et al.*, “Tratamiento de aguas residuales en la industria metalúrgica”, *Comput. Electron. Sci. Theory Appl.*, vol. 3, núm. 1, pp. 19–33, 2022.
- [15] L. Hoeber y S. Steinlechner, “A comprehensive review of processing strategies for iron precipitation residues from zinc hydrometallurgy”, *Clean. Eng. Technol.*, vol. 4, p. 100214, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100214>.
- [16] R. Moreno Antonio, *Separación Sólido - Líquido en Hidrometalurgia*. 2014. [En línea]. Disponible en:

<https://es.scribd.com/document/207509908/Separacion-Solido-Liquido-en-Hidrometalurgia>

- [17] Wikipedia, “Hidrometalurgia”. Consultado: el 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Hidrometalurgia>
- [18] S. L. Ayala Romero, J. F. Castro Caballero, R. A. Reyes Garibay, y B. J. Vásquez Delgado, “Proceso de obtención de Zinc en la Refinería de Cajamarquilla”, Lima, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/download/66185956/PROCESO_DE_OBTENCION_DE_ZINC_EN_LA_REFINERIA_DE_CAJAMARQUILLA.pdf
- [19] K. Martinez, “Uso de floculantes en sedimentadores”. Consultado: el 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/actualidad-empresarial/arenas-floculantes-en-sedimentadores/>
- [20] Acti, “Floculación: ¿Qué es?” Consultado: el 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.acti-chemical.com/es/blog/la-floculacion>
- [21] A. Scott, *Learning RSLogix 5000 Programming: Build Robust PLC Solutions with ControlLogix, CompactLogix, and Studio 5000/RSLogix 5000*. Packt Publishing Ltd, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://cutt.ly/qwBqTVtK>
- [22] Rockwell Automation, “FactoryTalk View - Software de HMI”. Consultado: el 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rockwellautomation.com/es-mx/products/software/factorytalk/operationsuite/view.html>
- [23] A. Brunete, P. S. Segundo, y R. Herrero, *Introducción a la Automatización Industrial*. 2018. [En línea]. Disponible en: https://bookdown.org/alberto_brunete/intro_automatica/actuadoresneumaticos.html
- [24] Casaval, “Actuador neumático de Piñón y Cremallera Delval Serie 21”. Consultado: el 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://casaval.net/productos/actuador-neumatico-de-pinon-y-cremallera->

deltorq-serie-21/

- [25] ABB, “Qué es un variador de frecuencia: Definición, cómo funciona, características y ventajas”. [En línea]. Disponible en: <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>
- [26] Allen-Bradley, *Especificaciones del variador de CA PowerFlex serie 520*. 2018. [En línea]. Disponible en: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/520-td001_-es-e.pdf
- [27] A. Creus, *Instrumentación industrial*, 8a ed. México: Alfaomega, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://ebooksacademicos.blogspot.com/2013/09/instrumentacion-industrial-antonio.html>
- [28] SICK, *WS/WE100-2P4439 fotocélulas miniatura*. 2019. [En línea]. Disponible en: https://cdn.sick.com/media/pdf/2/52/652/dataSheet_WS-WE100-2P4439_6052368_es.pdf
- [29] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 5a ed. España: Pearson, 2010.
- [30] J. Cegarra, *Metodología de la Investigación Científica y Tecnológica*. 2004. [En línea]. Disponible en: https://books.google.com.pe/books/about/Metodología_de_la_investigación_cient.html?hl=es&id=8SA8KZyurk4C
- [31] C. Espinoza, “Metodología de investigación tecnológica Pensando en sistemas”, 2014.
- [32] Hernández, “Metodología de la investigación.”, 2014.
- [33] R. Hernández, C. Fernández, y M. del P. Baptista, *Metodología de la investigación*, 6°. México, 2014.
- [34] Z. Q. Bai, M. Dai, Q. Y. Wei, y Z. S. Zhang, “An OEE Improvement Method Based on TOC”, en *2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/M2VIP.2018.8600875.

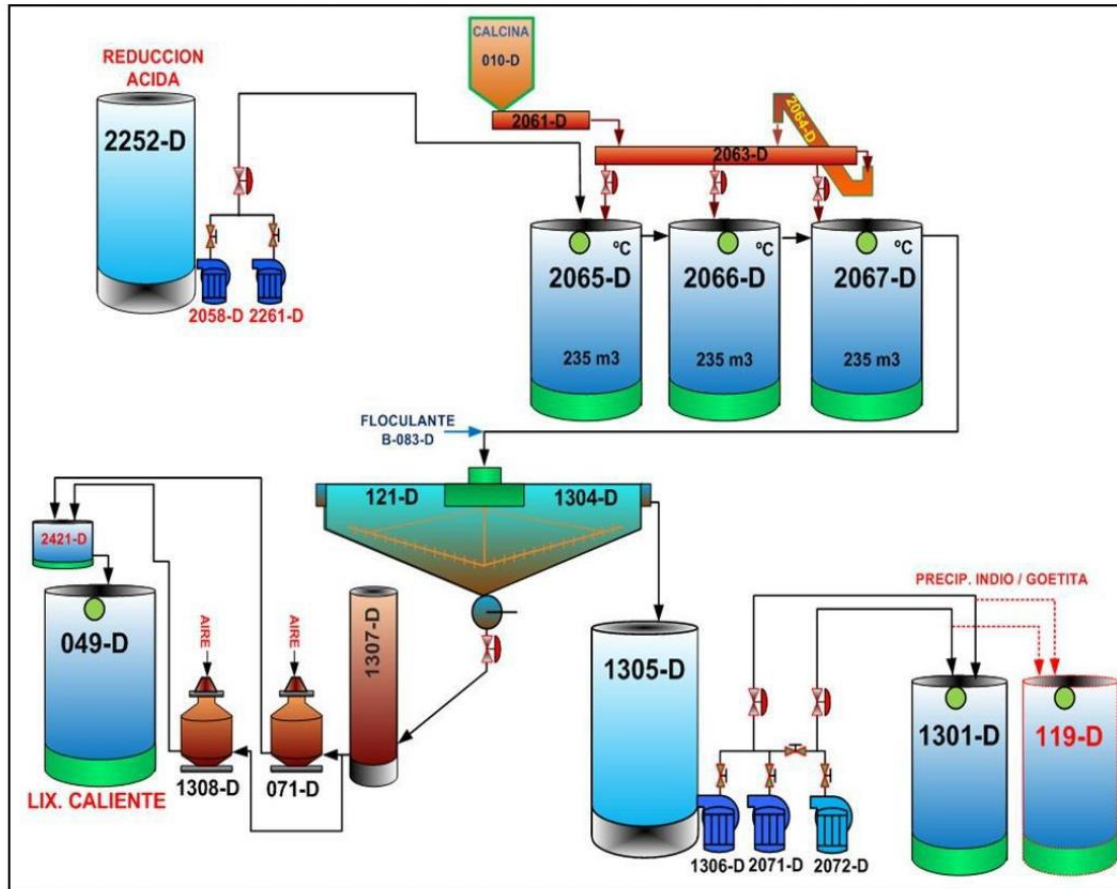
- [35] L. K. Herng y Q. C. Hee, “New Benchmarked Standard in Yield and OEE Improvement - SENS PSSO STS Gen2 Taper Performance Improvement with Breakthrough Innovative Solutions”, en *2018 IEEE 38th International Electronics Manufacturing Technology Conference (IEMT)*, 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/IEMT.2018.8511730.
- [36] K. E. Chong y K. C. Ng, “Relationship between overall equipment effectiveness, throughput and production part cost in semiconductor manufacturing industry”, en *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2016, pp. 75–79. doi: 10.1109/IEEM.2016.7797839.
- [37] S. Bhade y S. Hegde, “Improvement of Overall Equipment Efficiency of Machine by SMED”, *Mater. Today Proc.*, vol. 24, pp. 463–472, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.298>.
- [38] Statistics Kingdom, “Paired Wilcoxon Sign Rank Test”. [En línea]. Disponible en: https://www.statskingdom.com/175wilcoxon_signed_ranks.html
- [39] Statistics Kingdom, “Shapiro-Wilk Test Calculator”. [En línea]. Disponible en: <https://www.statskingdom.com/shapiro-wilk-test-calculator.html>
- [40] N. Cajamarquilla, “Minería que se mueve con el mundo”. [En línea]. Disponible en: <https://www.nexaresources.com/>

Anexos

Anexo A. Matriz de consistencia

Título: Sistema de Control Automático para la Dosificación de Floculante en el Proceso de Sedimentación del Espesador D-1304, en la Planta de Hidrometalurgia de la Refinería Nexa Resources – Cajamarquilla					
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DEFINICIÓN	METODOLOGÍA
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General			
¿Cuál es la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources - Cajamarquilla?	Determinar la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla.	Es significativa la mejora de la eficacia general de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, al implementar un sistema de control automático en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304, en la planta de hidrometalurgia de la refinería Nexa Resources – Cajamarquilla.		El sistema de Control Automático al estar implementado en un PLC CompactLogix 5370, interconectado con sensores ópticos de nivel para detección del volumen de sedimentación de la pulpa y como actuadores se emplearán actuadores neumáticos y motor eléctrico, para la toma de muestras y para la dosificación de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación del espesador D-1304.	Tipo: La investigación es de tipo experimental. Nivel: Corresponde al nivel aplicativo. Método: En esta investigación se empleó el método inductivo-deductivo, que permitió dosificar de manera eficiente con floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación de la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304.
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas			
<ul style="list-style-type: none"> ➤ ¿Cuál es la mejora de la disponibilidad para detectar el volumen de sedimentación de la pulpa en el rango de 350 - 400 ml en las muestras en probeta de 1000 ml tomados cada 30 min, al implementar el subsistema de control automático? ➤ ¿Cuál es la mejora del rendimiento de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación, al implementar el subsistema de control automático de una bomba en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304? ➤ ¿Cuál es la mejora de la calidad de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, con el sistema de control automático implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304? 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Determinar la mejora de la disponibilidad para detectar el volumen de sedimentación de la pulpa en el rango de 350 - 400 ml en las muestras en probeta de 1000 ml tomados cada 30 min, al implementar el subsistema de control automático. ➤ Determinar la mejora del rendimiento de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación, al implementar el subsistema de control automático de una bomba en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304. ➤ Determinar la mejora de la calidad de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, con el sistema de control automático implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Es significativa la mejora de la disponibilidad para detectar el volumen de sedimentación de la pulpa en el rango de 350 - 400 ml en las muestras en probeta de 1000 ml tomados cada 30 min, al implementar el subsistema de control automático. ➤ Es significativa la mejora del rendimiento de inyección de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación, al implementar el subsistema de control automático de una bomba en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304. ➤ Es significativa la mejora de la calidad de dosificación de floculante en el proceso de sedimentación, con el sistema de control automático implementado en la etapa de pre - neutralizado del espesador D-1304. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sistema de Control Automático. ➤ Dosificación de floculante a la pulpa en el proceso de sedimentación de la etapa de pre-neutralizado del espesador D-1304. 	<p style="text-align: center;">Variable Independiente:</p> <p style="text-align: center;">Variable Dependiente:</p>	<p style="text-align: center;">Diseño de investigación: El diseño fue pre - experimental con pre y post - test.</p>

Anexo B. Diagramas



LEYENDA

Etapa de Pre-neutralización
(Tanques de pre-neutralización)
2065-D, 2066-D, 2067-D

010-D (alimentación de calcina)

2252-D (solución de reducida de reducción
ácida)

121-D, 1304-D (espesadores de separación
S/L)

1305-D (tanque de recepción de O/F del
espesador)

1301-D (etapa de precipitación de indio)

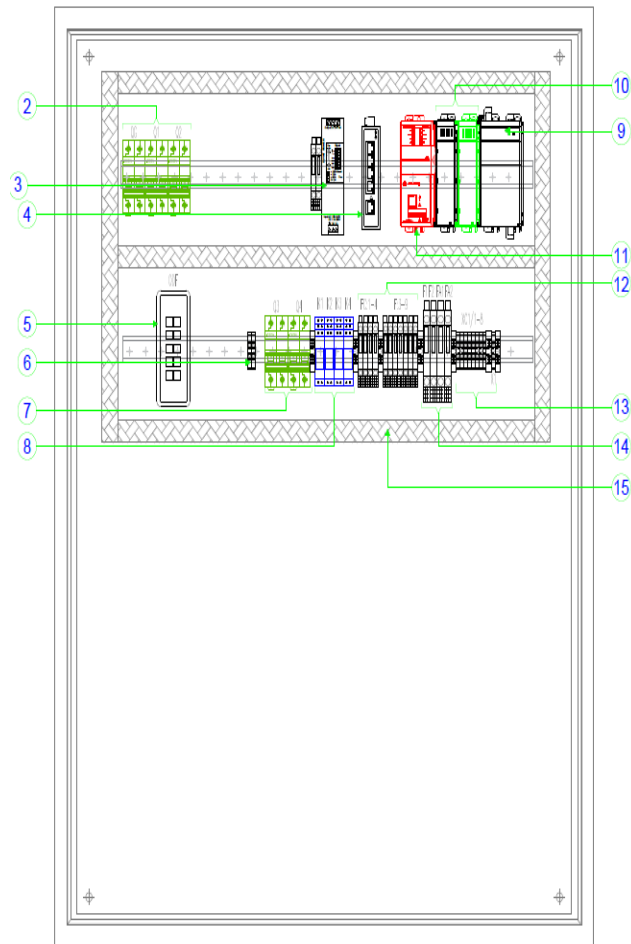
119-D (etapa de precipitación de goethita)

1307-D (tanque de recepción del U/F del
espesador)

1308-D, 071-D (bombas neumáticas para

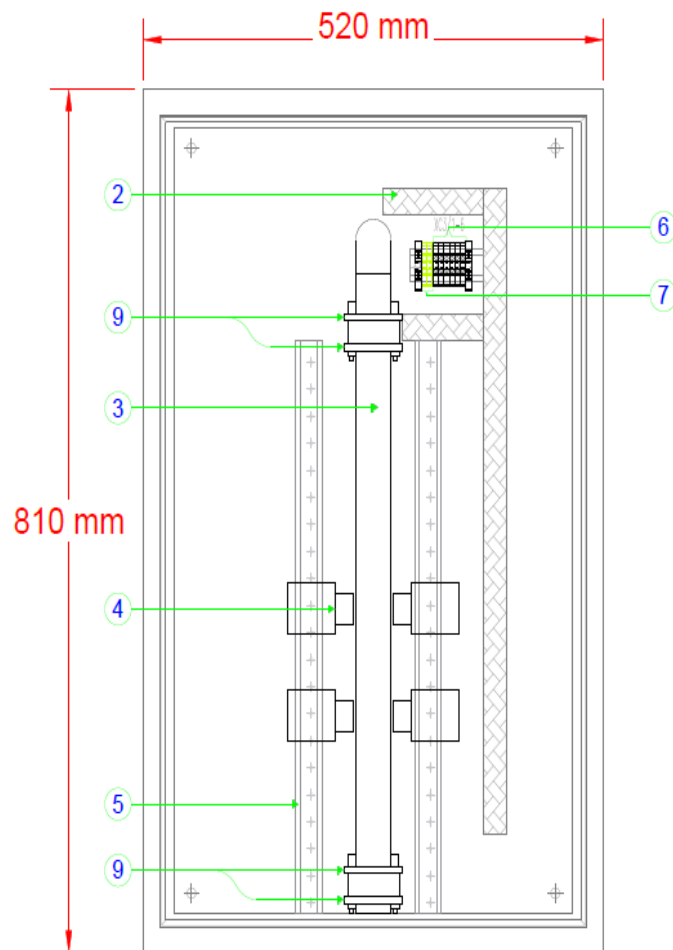
Figura 38. Diagrama de la etapa Pre-neutralización.

Nota. Obtenido de Nexa-Cajamarquilla [40].



LEYENDA					
SÍMBOLO	POS	DESCRIPCIÓN	CANT	MARCA	CATALOGO
	1	TABLERO 850X1050X350mm, IP65, PLANCHA ACERO 1.5mm	01	EKA	
Q0, Q1, Q2	2	ITM. 2x4A, Llave térmica Act9 iC60N 2P 4A curva C	03	SCHNEIDER ELECTRIC	A9F74204
G1	3	FUENTE DE ALIMENTACION 140/240C/5	01	PHOENIX CONTACT	QUINTI-PS/
I	4	STRATIX 2000	01	SCHNEIDER ELECTRIC	LC1D18F7
ODF	5	DID (DISTRIBUIDOR INTERNO ÓPTICO - ODF)	01	FURUKAWA	BW12
	6	Borne de conexión 4mm2 color VERDE AMARILLO	02	SCHNEIDER ELECTRIC	
Q3, Q4	7	ITM. 2x4A, Llave térmica Act9 iC60N 2P 4A curva C	02	SCHNEIDER ELECTRIC	A9F74204
K1, K2, K3, K4	8	Zelio Relay - Encative rsz - contacto independiente - 10A- bobina 24VDC	04	SCHNEIDER ELECTRIC	RSZE1S4BM
A1	9	COMPACTLOGIX 4A POWER SUPPLY 120/240V AC	01	ALLEN BRADLEY	1769-PA4
A1	10	COMPACTLOGIX 1600 20.1-26.4V DC MODULE	02	ALLEN BRADLEY	1769-0B16
A1	11	COMPACTLOGIX 5370-L3 PROCESSOR 2MB	01	ALLEN BRADLEY	1769-L33ER
F01-01, F03-03	12	Bornas tipo tornillo porta fusibles Negro, 24	11		
XC1/1- XC1/8, X1	13	Borne de conexión 4mm2 color beige	09		
F1, F2, FA1, FA2	14	Bornas tipo tornillo porta fusibles Negro, 54	04		
	15	Carileta 25x60mm	-	-	
	16	PANEL VIEW	01	-	2711P-T10C2209P

Figura 39. Diagrama de tablero de control de floculante.



LEYENDA				
SIMBOLO	POS	DESCRIPCIÓN	CANT.	MARCA
TAG	1	ROTULO DE TABLERO	01	EKA
	2	Caraleta 25x60mm	-	EKA
	3	TUBO DE VIDRIO GRADUADAS, 1 1/2", 500mm DE ALTO.	01	SCHOTT
S	4	FOTOCELULAS MINIATURA	04	SICK SENSOR INTELLIGENCE
	5	RIEL DIN	-	EKA
X4:1-6	6	BORNE DE CONEXIÓN 4mm2 COLOR BEIGE	06	SCHNEIDER ELECTRIC
	7	BORNE DE CONEXIÓN 4mm2 COLOR VERDE AMARILLO	02	SCHNEIDER ELECTRIC
	8	TABLERO 520X810X205mm, IP65, PLANCHA ACERO 1.5mm	01	EKA
	9	Bridas con asientos 1 1/2" (DN40) modelo SOCKET WEL DINC ANSI B1.56 INOX	02	

Figura 40. Diagrama de tablero de muestreo de floculante.

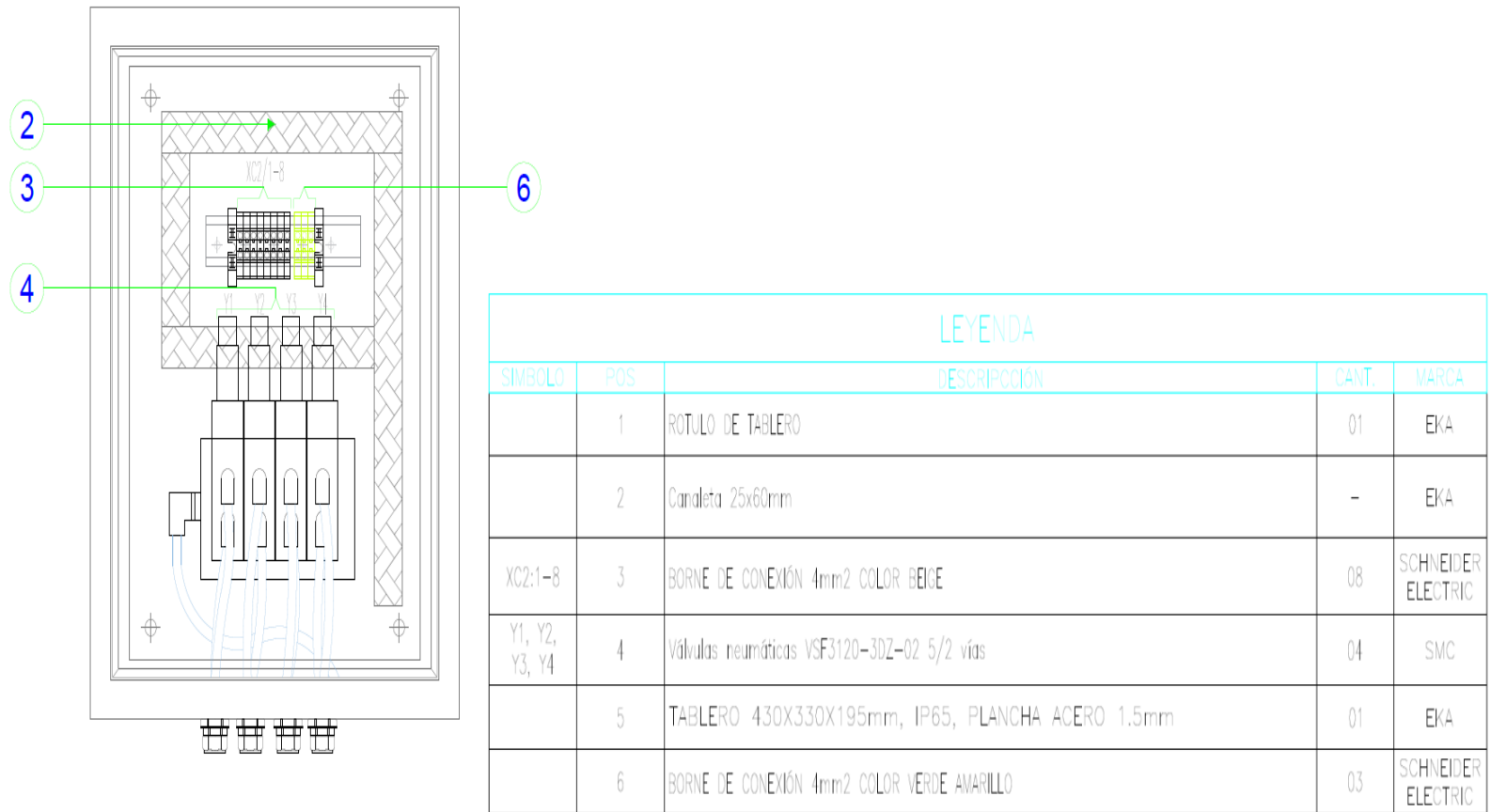


Figura 41. Diagrama de tablero de válvulas neumáticas.

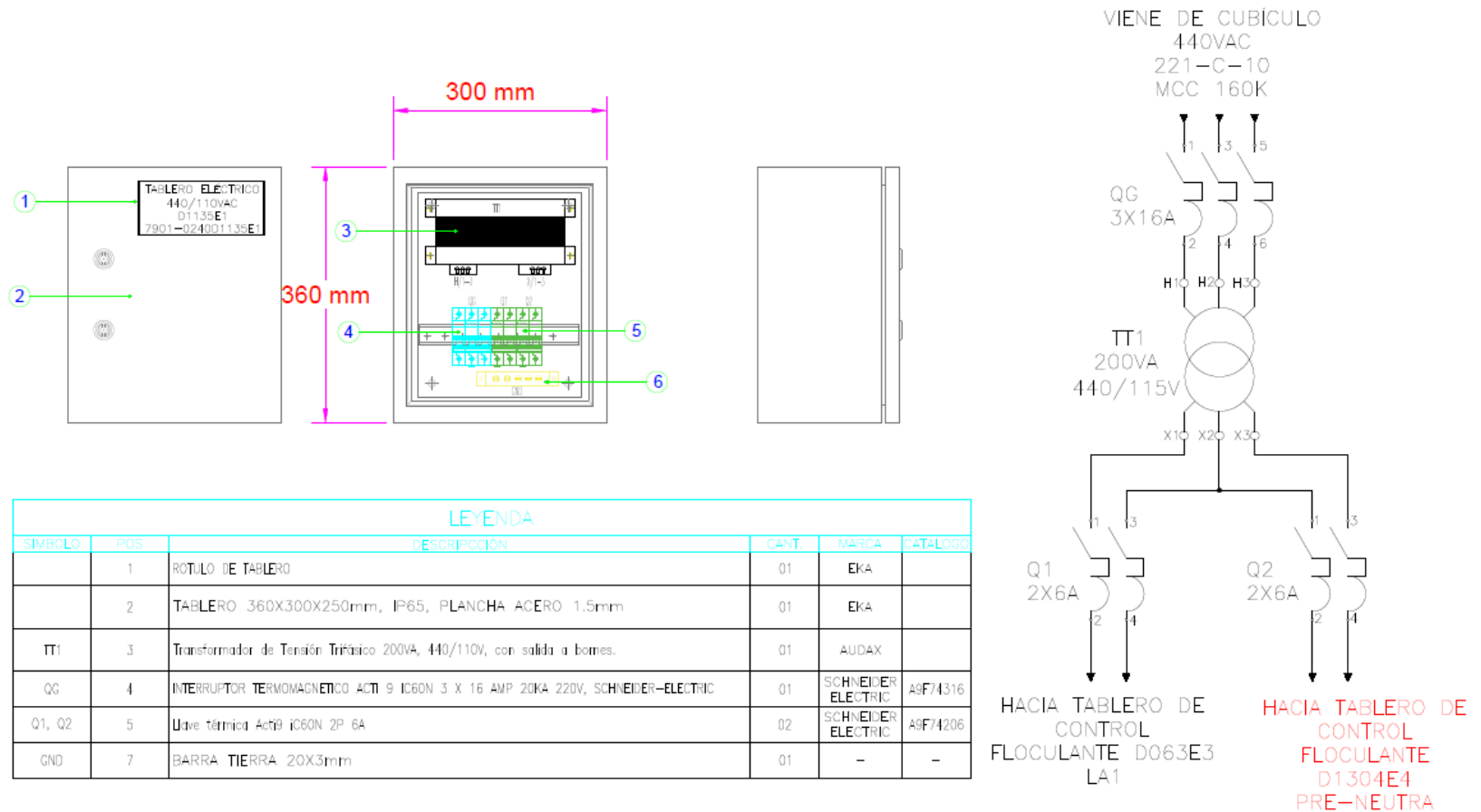


Figura 42. Diagrama de tablero de distribución de floculante.

Anexo C. Datos de muestras

Tabla 18. Muestras Pre-test y Post-test del volumen de sedimento, acción del variador y duración de proceso.

Muestra (Run)	Pre-test			Post-test		
	Volumen_ Sedimento_ Pre_test	Acción_ Variador_ Pre_test	Duración_ Proceso_ Pre_test (s)	Volumen_ Sedimento_ Post_test	Acción_ Variador_ Post_test	Duración_ Proceso_ Post_test (s)
1	Alto	Subir	244	Bajo	Bajar	223
2	Alto	Subir	243	Dentro	Mantener	223
3	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	221
4	Dentro	Mantener	229	Dentro	Mantener	223
5	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	222
6	Dentro	Mantener	230	Dentro	Mantener	220
7	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	224
8	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	222
9	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	223
10	Dentro	Mantener	230	Dentro	Mantener	222
11	Dentro	Mantener	232	Dentro	Mantener	222
12	Dentro	Mantener	228	Dentro	Mantener	221
13	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	224
14	Bajo	Bajar	245	Dentro	Mantener	223
15	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	223
16	Dentro	Mantener	239	Dentro	Mantener	222
17	Dentro	Mantener	231	Dentro	Mantener	221
18	Dentro	Mantener	239	Dentro	Mantener	222
19	Dentro	Mantener	233	Dentro	Mantener	224
20	Dentro	Mantener	230	Dentro	Mantener	221
21	Bajo	Subir	252	Bajo	Bajar	222
22	Bajo	Bajar	245	Dentro	Mantener	223
23	Bajo	Bajar	229	Dentro	Mantener	220
24	Dentro	Mantener	228	Dentro	Mantener	222
25	Dentro	Mantener	225	Dentro	Mantener	222
26	Dentro	Mantener	242	Dentro	Mantener	221
27	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	222
28	Dentro	Mantener	234	Dentro	Mantener	223
29	Dentro	Mantener	232	Dentro	Mantener	222
30	Dentro	Mantener	235	Dentro	Mantener	220
31	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	223
32	Alto	Subir	249	Dentro	Mantener	221

33	Dentro	Mantener	242	Dentro	Mantener	221
34	Dentro	Mantener	238	Dentro	Mantener	220
35	Dentro	Mantener	234	Dentro	Mantener	222
36	Dentro	Mantener	239	Dentro	Mantener	221
37	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	221
38	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	221
39	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	221
40	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	220
41	Bajo	Bajar	251	Bajo	Bajar	223
42	Bajo	Bajar	247	Dentro	Mantener	223
43	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	221
44	Dentro	Mantener	227	Dentro	Mantener	223
45	Dentro	Mantener	228	Dentro	Mantener	221
46	Dentro	Mantener	238	Dentro	Mantener	222
47	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	221
48	Dentro	Mantener	227	Dentro	Mantener	222
49	Dentro	Mantener	229	Dentro	Mantener	221
50	Dentro	Mantener	231	Dentro	Mantener	222
51	Dentro	Mantener	230	Dentro	Mantener	222
52	Dentro	Mantener	239	Dentro	Mantener	221
53	Dentro	Mantener	239	Dentro	Mantener	220
54	Dentro	Mantener	229	Dentro	Mantener	223
55	Dentro	Mantener	238	Dentro	Mantener	223
56	Dentro	Mantener	227	Dentro	Mantener	221
57	Dentro	Mantener	235	Dentro	Mantener	223
58	Dentro	Mantener	238	Dentro	Mantener	222
59	Dentro	Mantener	232	Dentro	Mantener	222
60	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	221
61	Alto	Bajar	247	Alto	Subir	223
62	Alto	Subir	244	Dentro	Mantener	222
63	Alto	Subir	235	Dentro	Mantener	220
64	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	220
65	Dentro	Mantener	234	Dentro	Mantener	221
66	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	222
67	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	221
68	Dentro	Mantener	229	Dentro	Mantener	223
69	Dentro	Mantener	244	Dentro	Mantener	221
70	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	221
71	Dentro	Mantener	238	Dentro	Mantener	224
72	Dentro	Mantener	227	Dentro	Mantener	222
73	Dentro	Mantener	231	Dentro	Mantener	222
74	Bajo	Bajar	244	Dentro	Mantener	223
75	Dentro	Mantener	238	Dentro	Mantener	222
76	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	221
77	Dentro	Mantener	225	Dentro	Mantener	222

78	Dentro	Mantener	239	Dentro	Mantener	222
79	Dentro	Mantener	242	Dentro	Mantener	224
80	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	221
81	Dentro	Mantener	237	Alto	Subir	224
82	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	221
83	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
84	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
85	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	223
86	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	220
87	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	223
88	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
89	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
90	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
91	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	224
92	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	223
93	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	220
94	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
95	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	221
96	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	223
97	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
98	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	223
99	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
100	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	220
101	Alto	Subir	247	Bajo	Bajar	224
102	Dentro	Mantener	239	Dentro	Mantener	222
103	Dentro	Mantener	235	Dentro	Mantener	222
104	Dentro	Mantener	242	Dentro	Mantener	221
105	Dentro	Mantener	242	Dentro	Mantener	222
106	Dentro	Mantener	239	Dentro	Mantener	223
107	Dentro	Mantener	229	Dentro	Mantener	222
108	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	222
109	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	221
110	Dentro	Mantener	245	Dentro	Mantener	220
111	Dentro	Mantener	243	Dentro	Mantener	220
112	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	220
113	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	223
114	Dentro	Mantener	235	Dentro	Mantener	222
115	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
116	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	220
117	Dentro	Mantener	231	Dentro	Mantener	222
118	Dentro	Mantener	230	Dentro	Mantener	223
119	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	220
120	Dentro	Mantener	228	Dentro	Mantener	222
121	Alto	Subir	252	Alto	Subir	223
122	Dentro	Mantener	230	Dentro	Mantener	222

123	Dentro	Mantener	233	Dentro	Mantener	220
124	Dentro	Mantener	243	Dentro	Mantener	222
125	Dentro	Mantener	243	Dentro	Mantener	223
126	Dentro	Mantener	234	Dentro	Mantener	220
127	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	222
128	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	224
129	Dentro	Mantener	231	Dentro	Mantener	220
130	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	223
131	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	223
132	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	221
133	Dentro	Mantener	229	Dentro	Mantener	222
134	Dentro	Mantener	238	Dentro	Mantener	222
135	Dentro	Mantener	230	Dentro	Mantener	222
136	Dentro	Mantener	229	Dentro	Mantener	222
137	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	222
138	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	221
139	Dentro	Mantener	230	Dentro	Mantener	223
140	Dentro	Mantener	235	Dentro	Mantener	222
141	Alto	Subir	244	Alto	Subir	222
142	Dentro	Mantener	245	Dentro	Mantener	221
143	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	224
144	Dentro	Mantener	233	Dentro	Mantener	221
145	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	222
146	Dentro	Mantener	238	Dentro	Mantener	222
147	Dentro	Mantener	238	Dentro	Mantener	220
148	Dentro	Mantener	232	Dentro	Mantener	223
149	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	221
150	Bajo	Bajar	240	Dentro	Mantener	221
151	Dentro	Mantener	242	Dentro	Mantener	221
152	Dentro	Mantener	224	Dentro	Mantener	223
153	Dentro	Mantener	231	Dentro	Mantener	223
154	Dentro	Mantener	234	Dentro	Mantener	220
155	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	223
156	Dentro	Mantener	239	Dentro	Mantener	223
157	Dentro	Mantener	226	Dentro	Mantener	221
158	Dentro	Mantener	233	Dentro	Mantener	224
159	Dentro	Mantener	227	Dentro	Mantener	222
160	Dentro	Mantener	234	Dentro	Mantener	222
161	Alto	Bajar	257	Alto	Subir	224
162	Alto	Subir	250	Dentro	Mantener	221
163	Alto	Subir	235	Dentro	Mantener	221
164	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
165	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	222
166	Dentro	Mantener	229	Dentro	Mantener	224
167	Dentro	Mantener	234	Dentro	Mantener	220

168	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	220
169	Dentro	Mantener	243	Dentro	Mantener	223
170	Dentro	Mantener	232	Dentro	Mantener	222
171	Dentro	Mantener	225	Dentro	Mantener	223
172	Dentro	Mantener	235	Dentro	Mantener	223
173	Dentro	Mantener	235	Dentro	Mantener	223
174	Dentro	Mantener	239	Dentro	Mantener	222
175	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	221
176	Dentro	Mantener	233	Dentro	Mantener	221
177	Dentro	Mantener	234	Dentro	Mantener	222
178	Dentro	Mantener	244	Dentro	Mantener	222
179	Dentro	Mantener	231	Dentro	Mantener	221
180	Alto	Subir	234	Alto	Subir	223
181	Alto	Subir	244	Alto	Subir	222
182	Dentro	Mantener	236	Dentro	Mantener	222
183	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	220
184	Dentro	Mantener	225	Dentro	Mantener	220
185	Dentro	Mantener	240	Dentro	Mantener	221
186	Dentro	Mantener	225	Dentro	Mantener	223
187	Dentro	Mantener	227	Dentro	Mantener	220
188	Dentro	Mantener	231	Dentro	Mantener	221
189	Dentro	Mantener	229	Dentro	Mantener	221
190	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222
191	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	221
192	Dentro	Mantener	242	Dentro	Mantener	223
193	Dentro	Mantener	228	Dentro	Mantener	222
194	Dentro	Mantener	232	Dentro	Mantener	220
195	Dentro	Mantener	234	Dentro	Mantener	222
196	Dentro	Mantener	242	Dentro	Mantener	223
197	Dentro	Mantener	235	Dentro	Mantener	222
198	Dentro	Mantener	230	Dentro	Mantener	223
199	Dentro	Mantener	241	Dentro	Mantener	223
200	Dentro	Mantener	237	Dentro	Mantener	222

Nota. La duración del proceso óptimo involucra el “Tiempo de recirculación de muestra” (30 s) más “Tiempo de sedimentación” conocido como tiempo DOSON (180 s) más “Tiempo de lavado de probeta” (10 s), haciendo un total de 220 s.

Tabla 19. Cálculo de Pre-test y Post-test de la disponibilidad “A” (%), rendimiento “P” (%), calidad “Q” (%) y eficacia general del equipo “OEE” (%).

Muestra (Run)	Pre-test				Post-test			
	A_Pre-test (%)	P_Pre-test (%)	Q_Pre-test (%)	OEE_Pre_test (%)	A_Post-test (%)	P_Post-test (%)	Q_Post-test (%)	OEE_Post_test (%)
1	90.16	93.04	100.00	83.89	98.65	99.16	100.00	97.82
2	90.53	93.04	100.00	84.23	98.65	99.16	100.00	97.82
3	92.82	93.04	100.00	86.36	99.54	99.16	100.00	98.70
4	96.06	93.04	100.00	89.38	98.65	99.16	100.00	97.82
5	91.28	93.04	100.00	84.93	99.09	99.16	100.00	98.26
6	95.65	93.04	100.00	89.00	100.00	99.16	100.00	99.16
7	93.22	93.04	100.00	86.73	98.21	99.16	100.00	97.38
8	93.22	93.04	100.00	86.73	99.09	99.16	100.00	98.26
9	91.28	93.04	100.00	84.93	98.65	99.16	100.00	97.82
10	95.65	93.04	100.00	89.00	99.09	99.16	100.00	98.26
11	94.82	93.04	100.00	88.22	99.09	99.16	100.00	98.26
12	96.49	93.04	100.00	89.78	99.54	99.16	100.00	98.70
13	91.66	93.04	100.00	85.28	98.21	99.16	100.00	97.38
14	89.79	93.04	100.00	83.54	98.65	99.16	100.00	97.82
15	92.82	93.04	100.00	86.36	98.65	99.16	100.00	97.82
16	92.05	93.04	100.00	85.65	99.09	99.16	100.00	98.26
17	95.23	93.04	100.00	88.60	99.54	99.16	100.00	98.70
18	92.05	93.04	100.00	85.65	99.09	99.16	100.00	98.26
19	94.42	93.04	100.00	87.85	98.21	99.16	100.00	97.38
20	95.65	93.04	100.00	89.00	99.54	99.16	100.00	98.70
21	87.30	93.04	0.00	0.00	99.09	99.16	100.00	98.26
22	89.79	93.04	100.00	83.54	98.65	99.16	100.00	97.82
23	96.06	93.04	100.00	89.38	100.00	99.16	100.00	99.16
24	96.49	93.04	100.00	89.78	99.09	99.16	100.00	98.26
25	97.77	93.04	100.00	90.97	99.09	99.16	100.00	98.26
26	90.90	93.04	100.00	84.58	99.54	99.16	100.00	98.70
27	93.22	93.04	100.00	86.73	99.09	99.16	100.00	98.26
28	94.01	93.04	100.00	87.47	98.65	99.16	100.00	97.82
29	94.82	93.04	100.00	88.22	99.09	99.16	100.00	98.26
30	93.61	93.04	100.00	87.10	100.00	99.16	100.00	99.16
31	93.22	93.04	100.00	86.73	98.65	99.16	100.00	97.82
32	88.35	93.04	100.00	82.20	99.54	99.16	100.00	98.70
33	90.90	93.04	100.00	84.58	99.54	99.16	100.00	98.70
34	92.43	93.04	100.00	86.00	100.00	99.16	100.00	99.16
35	94.01	93.04	100.00	87.47	99.09	99.16	100.00	98.26
36	92.05	93.04	100.00	85.65	99.54	99.16	100.00	98.70
37	93.22	93.04	100.00	86.73	99.54	99.16	100.00	98.70
38	91.28	93.04	100.00	84.93	99.54	99.16	100.00	98.70

39	91.66	93.04	100.00	85.28	99.54	99.16	100.00	98.70
40	91.66	93.04	100.00	85.28	100.00	99.16	100.00	99.16
41	87.64	93.04	100.00	81.54	98.65	99.16	100.00	97.82
42	89.06	93.04	100.00	82.86	98.65	99.16	100.00	97.82
43	91.66	93.04	100.00	85.28	99.54	99.16	100.00	98.70
44	96.91	93.04	100.00	90.17	98.65	99.16	100.00	97.82
45	96.49	93.04	100.00	89.78	99.54	99.16	100.00	98.70
46	92.43	93.04	100.00	86.00	99.09	99.16	100.00	98.26
47	91.66	93.04	100.00	85.28	99.54	99.16	100.00	98.70
48	96.91	93.04	100.00	90.17	99.09	99.16	100.00	98.26
49	96.06	93.04	100.00	89.38	99.54	99.16	100.00	98.70
50	95.23	93.04	100.00	88.60	99.09	99.16	100.00	98.26
51	95.65	93.04	100.00	89.00	99.09	99.16	100.00	98.26
52	92.05	93.04	100.00	85.65	99.54	99.16	100.00	98.70
53	92.05	93.04	100.00	85.65	100.00	99.16	100.00	99.16
54	96.06	93.04	100.00	89.38	98.65	99.16	100.00	97.82
55	92.43	93.04	100.00	86.00	98.65	99.16	100.00	97.82
56	96.91	93.04	100.00	90.17	99.54	99.16	100.00	98.70
57	93.61	93.04	100.00	87.10	98.65	99.16	100.00	97.82
58	92.43	93.04	100.00	86.00	99.09	99.16	100.00	98.26
59	94.82	93.04	100.00	88.22	99.09	99.16	100.00	98.26
60	91.28	93.04	100.00	84.93	99.54	99.16	100.00	98.70
61	89.06	93.04	0.00	0.00	98.65	99.16	100.00	97.82
62	90.16	93.04	100.00	83.89	99.09	99.16	100.00	98.26
63	93.61	93.04	100.00	87.10	100.00	99.16	100.00	99.16
64	91.28	93.04	100.00	84.93	100.00	99.16	100.00	99.16
65	94.01	93.04	100.00	87.47	99.54	99.16	100.00	98.70
66	93.22	93.04	100.00	86.73	99.09	99.16	100.00	98.26
67	93.22	93.04	100.00	86.73	99.54	99.16	100.00	98.70
68	96.06	93.04	100.00	89.38	98.65	99.16	100.00	97.82
69	90.16	93.04	100.00	83.89	99.54	99.16	100.00	98.70
70	91.66	93.04	100.00	85.28	99.54	99.16	100.00	98.70
71	92.43	93.04	100.00	86.00	98.21	99.16	100.00	97.38
72	96.91	93.04	100.00	90.17	99.09	99.16	100.00	98.26
73	95.23	93.04	100.00	88.60	99.09	99.16	100.00	98.26
74	90.16	93.04	100.00	83.89	98.65	99.16	100.00	97.82
75	92.43	93.04	100.00	86.00	99.09	99.16	100.00	98.26
76	92.82	93.04	100.00	86.36	99.54	99.16	100.00	98.70
77	97.77	93.04	100.00	90.97	99.09	99.16	100.00	98.26
78	92.05	93.04	100.00	85.65	99.09	99.16	100.00	98.26
79	90.90	93.04	100.00	84.58	98.21	99.16	100.00	97.38
80	93.22	93.04	100.00	86.73	99.54	99.16	100.00	98.70
81	92.82	93.04	100.00	86.36	98.21	99.16	100.00	97.38
82	92.82	93.04	100.00	86.36	99.54	99.16	100.00	98.70
83	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26

84	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26
85	92.82	93.04	100.00	86.36	98.65	99.16	100.00	97.82
86	92.82	93.04	100.00	86.36	100.00	99.16	100.00	99.16
87	92.82	93.04	100.00	86.36	98.65	99.16	100.00	97.82
88	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26
89	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26
90	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26
91	92.82	93.04	100.00	86.36	98.21	99.16	100.00	97.38
92	92.82	93.04	100.00	86.36	98.65	99.16	100.00	97.82
93	92.82	93.04	100.00	86.36	100.00	99.16	100.00	99.16
94	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26
95	92.82	93.04	100.00	86.36	99.54	99.16	100.00	98.70
96	92.82	93.04	100.00	86.36	98.65	99.16	100.00	97.82
97	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26
98	92.82	93.04	100.00	86.36	98.65	99.16	100.00	97.82
99	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26
100	92.82	93.04	100.00	86.36	100.00	99.16	100.00	99.16
101	89.06	93.04	100.00	82.86	98.21	99.16	100.00	97.38
102	92.05	93.04	100.00	85.65	99.09	99.16	100.00	98.26
103	93.61	93.04	100.00	87.10	99.09	99.16	100.00	98.26
104	90.90	93.04	100.00	84.58	99.54	99.16	100.00	98.70
105	90.90	93.04	100.00	84.58	99.09	99.16	100.00	98.26
106	92.05	93.04	100.00	85.65	98.65	99.16	100.00	97.82
107	96.06	93.04	100.00	89.38	99.09	99.16	100.00	98.26
108	91.66	93.04	100.00	85.28	99.09	99.16	100.00	98.26
109	91.66	93.04	100.00	85.28	99.54	99.16	100.00	98.70
110	89.79	93.04	100.00	83.54	100.00	99.16	100.00	99.16
111	90.53	93.04	100.00	84.23	100.00	99.16	100.00	99.16
112	91.28	93.04	100.00	84.93	100.00	99.16	100.00	99.16
113	92.82	93.04	100.00	86.36	98.65	99.16	100.00	97.82
114	93.61	93.04	100.00	87.10	99.09	99.16	100.00	98.26
115	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26
116	92.82	93.04	100.00	86.36	100.00	99.16	100.00	99.16
117	95.23	93.04	100.00	88.60	99.09	99.16	100.00	98.26
118	95.65	93.04	100.00	89.00	98.65	99.16	100.00	97.82
119	93.22	93.04	100.00	86.73	100.00	99.16	100.00	99.16
120	96.49	93.04	100.00	89.78	99.09	99.16	100.00	98.26
121	87.30	93.04	100.00	81.23	98.65	99.16	100.00	97.82
122	95.65	93.04	100.00	89.00	99.09	99.16	100.00	98.26
123	94.42	93.04	100.00	87.85	100.00	99.16	100.00	99.16
124	90.53	93.04	100.00	84.23	99.09	99.16	100.00	98.26
125	90.53	93.04	100.00	84.23	98.65	99.16	100.00	97.82
126	94.01	93.04	100.00	87.47	100.00	99.16	100.00	99.16
127	91.66	93.04	100.00	85.28	99.09	99.16	100.00	98.26
128	92.82	93.04	100.00	86.36	98.21	99.16	100.00	97.38

129	95.23	93.04	100.00	88.60	100.00	99.16	100.00	99.16
130	92.82	93.04	100.00	86.36	98.65	99.16	100.00	97.82
131	91.66	93.04	100.00	85.28	98.65	99.16	100.00	97.82
132	92.82	93.04	100.00	86.36	99.54	99.16	100.00	98.70
133	96.06	93.04	100.00	89.38	99.09	99.16	100.00	98.26
134	92.43	93.04	100.00	86.00	99.09	99.16	100.00	98.26
135	95.65	93.04	100.00	89.00	99.09	99.16	100.00	98.26
136	96.06	93.04	100.00	89.38	99.09	99.16	100.00	98.26
137	93.22	93.04	100.00	86.73	99.09	99.16	100.00	98.26
138	92.82	93.04	100.00	86.36	99.54	99.16	100.00	98.70
139	95.65	93.04	100.00	89.00	98.65	99.16	100.00	97.82
140	93.61	93.04	100.00	87.10	99.09	99.16	100.00	98.26
141	90.16	93.04	100.00	83.89	99.09	99.16	100.00	98.26
142	89.79	93.04	100.00	83.54	99.54	99.16	100.00	98.70
143	93.22	93.04	100.00	86.73	98.21	99.16	100.00	97.38
144	94.42	93.04	100.00	87.85	99.54	99.16	100.00	98.70
145	91.28	93.04	100.00	84.93	99.09	99.16	100.00	98.26
146	92.43	93.04	100.00	86.00	99.09	99.16	100.00	98.26
147	92.43	93.04	100.00	86.00	100.00	99.16	100.00	99.16
148	94.82	93.04	100.00	88.22	98.65	99.16	100.00	97.82
149	91.28	93.04	100.00	84.93	99.54	99.16	100.00	98.70
150	91.66	93.04	100.00	85.28	99.54	99.16	100.00	98.70
151	90.90	93.04	100.00	84.58	99.54	99.16	100.00	98.70
152	98.21	93.04	100.00	91.38	98.65	99.16	100.00	97.82
153	95.23	93.04	100.00	88.60	98.65	99.16	100.00	97.82
154	94.01	93.04	100.00	87.47	100.00	99.16	100.00	99.16
155	91.28	93.04	100.00	84.93	98.65	99.16	100.00	97.82
156	92.05	93.04	100.00	85.65	98.65	99.16	100.00	97.82
157	97.34	93.04	100.00	90.57	99.54	99.16	100.00	98.70
158	94.42	93.04	100.00	87.85	98.21	99.16	100.00	97.38
159	96.91	93.04	100.00	90.17	99.09	99.16	100.00	98.26
160	94.01	93.04	100.00	87.47	99.09	99.16	100.00	98.26
161	85.60	93.04	0.00	0.00	98.21	99.16	100.00	97.38
162	88.00	93.04	100.00	81.88	99.54	99.16	100.00	98.70
163	93.61	93.04	100.00	87.10	99.54	99.16	100.00	98.70
164	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26
165	91.28	93.04	100.00	84.93	99.09	99.16	100.00	98.26
166	96.06	93.04	100.00	89.38	98.21	99.16	100.00	97.38
167	94.01	93.04	100.00	87.47	100.00	99.16	100.00	99.16
168	93.22	93.04	100.00	86.73	100.00	99.16	100.00	99.16
169	90.53	93.04	100.00	84.23	98.65	99.16	100.00	97.82
170	94.82	93.04	100.00	88.22	99.09	99.16	100.00	98.26
171	97.77	93.04	100.00	90.97	98.65	99.16	100.00	97.82
172	93.61	93.04	100.00	87.10	98.65	99.16	100.00	97.82
173	93.61	93.04	100.00	87.10	98.65	99.16	100.00	97.82

174	92.05	93.04	100.00	85.65	99.09	99.16	100.00	98.26
175	91.28	93.04	100.00	84.93	99.54	99.16	100.00	98.70
176	94.42	93.04	100.00	87.85	99.54	99.16	100.00	98.70
177	94.01	93.04	100.00	87.47	99.09	99.16	100.00	98.26
178	90.16	93.04	100.00	83.89	99.09	99.16	100.00	98.26
179	95.23	93.04	100.00	88.60	99.54	99.16	100.00	98.70
180	94.01	93.04	100.00	87.47	98.65	99.16	100.00	97.82
181	90.16	93.04	100.00	83.89	99.09	99.16	100.00	98.26
182	93.22	93.04	100.00	86.73	99.09	99.16	100.00	98.26
183	92.82	93.04	100.00	86.36	100.00	99.16	100.00	99.16
184	97.77	93.04	100.00	90.97	100.00	99.16	100.00	99.16
185	91.66	93.04	100.00	85.28	99.54	99.16	100.00	98.70
186	97.77	93.04	100.00	90.97	98.65	99.16	100.00	97.82
187	96.91	93.04	100.00	90.17	100.00	99.16	100.00	99.16
188	95.23	93.04	100.00	88.60	99.54	99.16	100.00	98.70
189	96.06	93.04	100.00	89.38	99.54	99.16	100.00	98.70
190	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26
191	92.82	93.04	100.00	86.36	99.54	99.16	100.00	98.70
192	90.90	93.04	100.00	84.58	98.65	99.16	100.00	97.82
193	96.49	93.04	100.00	89.78	99.09	99.16	100.00	98.26
194	94.82	93.04	100.00	88.22	100.00	99.16	100.00	99.16
195	94.01	93.04	100.00	87.47	99.09	99.16	100.00	98.26
196	90.90	93.04	100.00	84.58	98.65	99.16	100.00	97.82
197	93.61	93.04	100.00	87.10	99.09	99.16	100.00	98.26
198	95.65	93.04	100.00	89.00	98.65	99.16	100.00	97.82
199	91.28	93.04	100.00	84.93	98.65	99.16	100.00	97.82
200	92.82	93.04	100.00	86.36	99.09	99.16	100.00	98.26

Nota. La duración óptima del proceso se considera 220 s, lo que representa el 100 % de eficiencia del proceso.

Anexo D. Fotografías



Foto 1. Montaje de soportes con guardas para tablero de muestreo



Foto 2. Montaje de tablero neumático



Foto 3. Montaje de tablero variador



Foto 4. Habilitación de tubo de probeta



Foto 5. Montaje de equipos en el tablero de control



Foto 6. Montaje de equipos en el tablero de variador



Foto 7. Montaje de actuadores para el tablero de muestreo



Foto 8. Conexión de tablero de control



Foto 9. Energización, verificación de tensión.