



**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA  
Y URBANISMO**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TESIS**

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE  
ESPEMIENTO DE RELAVE FINAL EN LA  
PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE PARA  
MEJORAR LA PRODUCCIÓN PARA EL AÑO 2018**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO INDUSTRIAL**

**Autor:**

**Bach. Palomino Banda, Roger**  
(ORCID: 0000-0002-9967-005)

**Asesor:**

**Mg. Reyes Vásquez, Wilson Dennis**  
(ORCID: 0000-0001-7275-8046)

**Línea de Investigación  
Infraestructura, Tecnológica y Medio Ambiente  
Pimentel –Perú**

**2021**

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE  
ESPESAMIENTO DE RELAVE FINAL EN LA PLANTA  
CONCENTRADORA DE COBRE PARA MEJORAR LA  
PRODUCCIÓN PARA EL AÑO 2018**

**APROBACIÓN DEL JURADO**

---

**Mg. Reyes Vásquez, Wilson Dennis**  
Asesor

---

**Dr. Vásquez Coronado Manuel Humberto**  
Presidente del Jurado de Tesis

---

**Mg. Armas Zavaleta José Manuel**  
Secretario del Jurado de Tesis

---

**Mg. Reyes Vásquez Wilson Dennis**  
Vocal del Jurado de Tesis

## **DEDICATORIA**

- ✓ A Dios, por el camino recorrido.
- ✓ Dedico a mi padre y mis hermosos hijos, a todas las personas que me ayudaron en el desarrollo de mi proyecto. y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo lograr mi objetivo.
- ✓ A mis hermanos, compañeros de trabajo, tíos, primos, abuelos y amigos. Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

## **AGRADECIMIENTO**

- ✓ A Dios a mi padre e hijo Bill que desde el cielo me guía y apoyo espiritual en el transcurso de mi vida y hacer posible todo lo bueno en nuestro camino, por estar con nosotros en cada paso que damos, por fortalecer nuestros corazones e iluminar nuestras mentes y por haber puesto en el camino a aquellas personas que han sido de soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.
  
- ✓ A mis maestros por su invaluable apoyo en mi formación profesional. Su apoyo y confianza en mi trabajo y sus capacidades para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable en el desarrollo de esta tesis.

# **AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE RELAVE FINAL EN LA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN PARA EL AÑO 2018**

## **AUTOMATION PROPOSAL OF THE FINISH THICKENING THICKENING PROCESS IN THE CONCENTRATOR PLANT OF COPPER TO IMPROVE THE PRODUCTION FOR THE YEAR 2018**

*Roger Palomino Banda<sup>1</sup>*

### **RESUMEN**

*La presente investigación tuvo como objetivo automatizar el proceso de espesamiento de relave final para mejorar la producción en la planta concentradora de cobre objeto de estudio, para el año 2018. Este se ejecuta de forma manual en base a la experticia de los operadores, por lo cual, frecuentemente se presentan desviaciones en la variables de proceso y alto consumo de floculante. Como solución se propone el diseño e implementación de un sistema de control experto, que se encargue del monitoreo y toma de decisiones. Se aplicó un enfoque metodológico del tipo mixto, para el desarrollo de una investigación del tipo descriptivo pre-experimental. Empleando la entrevista y observación directa, para la recolección de datos.*

*La población estuvo compuesta por ocho (08) trabajadores de la planta con una muestra intencional conformada por dos (02) trabajadores). Se emplearon las herramientas matriz FODA y diagrama de Ishikawa, para el diagnóstico de la situación actual. Se desarrollaron la filosofía de control, diagramas lógicos, y el set de reglas para la lógica difusa que regiría al sistema. Se obtuvo un sistema capaz de controlar automáticamente el proceso de forma eficiente minimizando los gastos de floculante, energía eléctrica, y mantenimiento, al tiempo que optimizo todos los parámetros asociados con el funcionamiento de este proceso. La evaluación costo – beneficio empleo los indicadores económicos VPN, TIR y PD (ó PRI), que como resultado determinaron que la implantación de este sistema es factible, teniendo un periodo de retorno de la inversión (PRI) dentro del mismo año de la inversión.*

**Palabra Clave:** automatización, espesamiento de relave, sistema experto, análisis costo – beneficio.

---

<sup>1</sup> Adscrito a la escuela profesional de Ingeniería Industrial, pregrado, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, email: [pbandaroger@crece.uss.edu.pe](mailto:pbandaroger@crece.uss.edu.pe) y Código ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9967-005>

## ABSTRACT

*This investigation propurse was the tailing thickeners process automation to improve the copper plant production for 2018 year. The tailing thickeners process is fulfill handly based in operator experience, and because of that, frecuntly process parameters runs out of normal set and flocculant consumption increase. As a solution, this investigation propose the design and implementation of expert control system who got the responsibility of supervise and control the tailing thickeners process. The methodological approach was mixture, for an pre-experimental descriptive investigation typ, using. Interview and direct observation for dat recollection.*

*The population was composed with eight (08) plant workers and the sample was intentionally two workers (operation and maintenance supervisors). During the investigation development SWOT and Cause – Efecct (Ishikawa diagram) tools were use to find de the cause of the problem, as well as, to find the streghnt, weakness, opportunities, and threats previously to the automation design and implement. The control logic development include the control philosophy, logic diagrams (loops and blocks), and the fuzzy logic rules set for the expert control system. Has result, tailing thickeners process automation was completed such as the new control system was able minimize de flocculant consumption, energy and maintenance costs, at the time that all process parameter were optimized. Once the system was develop, a cost –benefit analys was fulfill in wich NVP, IRR, P were the indicators used. The analisis results shows that project was technical and economical feasible, having a payback period (PP) in the investment year.*

**Key Word:** automatizaiton, tailing thickeners, expert system, cost – benefit analisis.

<sup>1</sup> Egresado de Ingeniería Industrial, Escuela de Ingeniería Industrial, Facultada de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Universidad Señor de Sipán, Pimentel-Chiclayo, Perú, [pbandaroger@crece.uss.edu.pe](mailto:pbandaroger@crece.uss.edu.pe) , Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9967-005X>

## ÍNDICE

APROBACIÓN DEL JURADO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iii
RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
ÍNDICE.....	vii
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>13</b>
<b>I. INTRODUCCION .....</b>	<b>14</b>
1.1. Realidad Problemática. ....	14
1.2. Trabajos Previos. ....	17
1.2.1. Nivel internacional. ....	17
1.2.2. Nivel nacional.....	20
1.3. Teorías relacionadas al tema.....	21
1.3.1. Automatización del proceso de operación de los espesadores de relave final. 21	
1.3.2. Mejorar la producción en la planta concentradora de cobre.....	40
1.4. Formulación del problema.....	46
1.4.1. Problema general. ....	46
1.4.2. Problemas específicos.....	46
1.5. Justificación.....	47
1.6. Hipótesis.....	48
1.6.1. Hipótesis general. ....	48
1.6.2. Hipótesis Específicas .....	48
1.7. Objetivos de la Investigación. ....	48
1.7.1. Objetivo general. ....	48
1.7.2. Objetivos específicos.....	49
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>50</b>
<b>II. MATERIAL Y MÉTODO.....</b>	<b>51</b>
2.1. Tipo y diseño de investigación .....	51
2.1.1. Tipo de investigación. ....	51
2.1.2. Diseño de la investigación. ....	51

2.1.3.	Métodos de Investigación.....	51
2.2.	Población y Muestra.....	52
2.2.1.	La población.....	52
2.2.2.	La muestra.....	52
2.3.	Variables y operacionalización.....	52
2.3.1.	Variable independiente.....	52
2.3.2.	Variable dependiente.....	52
2.3.3.	Operacionalización.....	53
2.4.	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos, validez y información.....	55
2.4.1.	Fuentes de información e informantes.....	55
2.4.2.	Técnica de recolección de datos.....	55
2.4.3.	Instrumentos de recolección de datos.....	55
2.4.4.	Validez y confiabilidad de instrumentos.....	55
2.5.	Procedimiento para la recolección de datos.....	55
2.6.	Criterios éticos.....	56
2.7.	Criterios de rigor científico.....	57
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>59</b>
<b>III. RESULTADOS.....</b>		<b>60</b>
3.1.	Diagnóstico de la Planta Concentradora Objeto de Estudio.....	60
3.1.1.	Información general.....	60
3.1.2.	Descripción del proceso de espesamiento de relave actual.....	60
3.1.3.	Parámetros de operación.....	63
3.1.4.	Otros sistemas componentes del espesamiento de relave.....	63
3.1.5.	Análisis de la problemática.....	67
3.1.6.	Situación actual de la variable dependiente.....	72
3.2.	Discusión de resultados.....	72
3.3.	Propuesta de investigación.....	77
3.3.1.	Fundamentación.....	77
3.3.2.	Objetivos de la propuesta.....	79
3.3.3.	Desarrollo de la propuesta.....	80
3.3.4.	Situación de la variable dependiente con la propuesta.....	112
3.3.5.	Análisis costo beneficio de la implementación del sistema experto para el proceso de espesamiento de relave.....	113

<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>118</b>
<b>IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>119</b>
4.1. Conclusiones .....	119
4.2. Recomendaciones .....	121
4.3. REFERENCIAS .....	122
ANEXOS .....	126

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de floculante y aplicaciones en la industria minera.....	38
Tabla 2. Operacionalización de variables.....	53
Tabla 3. Criterios éticos de la investigación.....	56
Tabla 4. Operación de los espesadores de relave previo la automatización.....	72
Tabla 5. Matriz de reglas difusas para modo de control por torque. ....	82
Tabla 6. Matriz de reglas difusas para modo por nivel de agua clara. ....	83
Tabla 7. Matriz de reglas difusas para modo por cajón SUU-036. ....	84
Tabla 8. Matriz de reglas difusas para modo por fracción de sólidos en descarga del espesador. ....	85
Tabla 9. Matriz de reglas difusas para modo por turbidez de agua clara. ....	86
Tabla 10. Comparación parámetros de producción antes y después de la automatización. .....	113
Tabla 11. Comparación de gasto energético antes y después de la automatización.....	114
Tabla 12. Comparación de gasto de mantenimiento antes y después de la automatización. .....	115
Tabla 13. Flujo de caja por año y acumulador .....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pasos para desarrollar un sistema experto.....	31
Figura 2. Fase de operación de espesador. ....	34
Figura 3. Elementos estructurales básicos de un espesador de relave.....	35
Figura 4. Diagrama esquemático de los espesador de relave. ....	62
Figura 5. Prueba Sedimentación.....	64
Figura 6. Diagrama esquemático del proceso de recuperación de Aguas. ....	66
Figura 7. Pirámide de Control. ....	81
Figura 8. Modos de Control Experto Espesadores de Relaves.....	87
Figura 9. Conjuntos difusos para cambio en flujo de floculantes. ....	91
Figura 10. Conjuntos difusos para cambio1 en flujo de descarga. ....	92
Figura 11. Conjuntos difusos para cambio2 en flujo de descarga. ....	93
Figura 12. Comportamiento de una variable en el tiempo. ....	94
Figura 13. Pantalla del sistema experto de espesamiento de relave de la planta concentradora objeto de estudio.....	95
Figura 14. Diagrama de bloques del lazo de control de nivel de lodos en espesador de relaves 0510-TKF- 026. ....	97
Figura 15. P&ID de lazo de control de nivel de lodos en tanque espesador de relaves 0510- TKF-0026.....	97
Figura 16. Diagrama de bloques del lazo de control de nivel de lodos en espesador de relaves 0510-TKF- 027. ....	99
Figura 17. P&ID de lazo de control de nivel de lodos en tanque espesador de relaves 0510- TKF-0027.....	99
Figura 18. Diagrama de bloques del lazo de control de nivel del cajón de agua recuperada del espesador de relaves por las bombas 0510-PPC-0129@0132. ....	101
Figura 19. P&ID de lazo de control de nivel del cajón de agua recuperada del espesador de relaves por las bombas 0510-PPC-0129@0132.....	101
Figura 20. Diagrama de bloques del lazo de control de densidad por válvula DV-09342 . en la descarga underflow del tanque espesador de relaves 0510-TKF-0026.....	103
Figura 21. P&ID de lazo de control de densidad por válvula DV-09342 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0026.....	103

Figura 22. Diagrama de bloques del lazo de control de densidad por la válvula DV-09352 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0026. ....	105
Figura 23. P&ID de lazo de control de densidad por la válvula DV-09352 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0026.....	105
Figura 24. Diagrama de bloques del lazo de control de densidad por válvula DV-09442 . en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0027.....	107
Figura 25. P&ID de lazo de control de densidad por válvula DV-09442 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0027.....	107
Figura 26. Diagrama de bloques del lazo de control de densidad por la válvula DV-09452 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0027.....	109
Figura 27. P&ID de lazo de control de densidad por la válvula DV-09452 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0027.....	109
Figura 28. Estructura general de lógica configurada del sistema experto de espesamiento relave.....	110
Figura 29. Variable de entrada del sistema experto de espesamiento de relave.....	111
Figura 30. Variable de salida del sistema experto de espesamiento de relave.....	111
Figura 31. Red de señales sistema experto de espesadores de relave.....	112

# **CAPITULO I**

## I. INTRODUCCION

### 1.1. Realidad Problemática.

En el escenario mundial, la actividad minera es sin duda alguna de las industrias y procesos productivos más importantes desarrollados por el hombre, impulsando la economía de diferentes naciones. El informe publicado por la organización International Council on Mining & Metal (ICMM), así lo confirma al indicar que para el periodo comprendido entre 2002 a 2010 la tasa de desarrollo del producto interno bruto (PIB) de las naciones fue superada por el valor nominal de la producción de mineral del mundo, mostrando esta última una mayor evolución con respecto al PIB (2012).

En este sentido, el sector minero enfrenta una realidad innegable donde para ser competitivo en el mercado nacional e internacional se obliga contar con procesos automatizados de producción en función de disminuir los tiempos y costos de operación. Inclusive, aquellas empresas, fábricas o plantas que cuenten con procesos automatizados deben cada cierto tiempo realizar actualizaciones tecnológicas, bien sea por obsolescencia, por fin de la vida útil de los componentes, para incrementar la productividad o para el cumplimiento de regulaciones nacionales e internacionales.

Para las actividades de minería la incorporación de innovaciones tecnológicas se ha convertido en una necesidad para la sostenibilidad a largo plazo de sus operaciones. Sin embargo, el éxito de estos modelos no solo radica en el empleo de avances tecnológicos por si solos. Será necesario que se considere el uso de tecnologías probadas en aplicaciones similares, así como la capacitación del personal y contratación de expertos en la materia, aspectos necesarios para la óptima operación de equipos y sistemas automatizados (Cipriano, 2015)

Uno de los procesos importantes dentro de las plantas concentradoras de cobre son los sistemas de relaves de agua. Estos sistemas manejan volúmenes considerables de agua, los cuales se han incrementado en los últimos años por la modificación de legislaciones para hacer la actividad más atractiva para inversionistas. Al respecto Riveros (2015), manifiesta como en países como Chile la modificación del Marco Legal en lo referente a las leyes de yacimientos mineros, ocasiono un aumento en las operaciones que causo el crecimiento de los relaves, ya que, que por cada tonelada de mineral se producen 30 toneladas de relave. En este sentido, contar con tecnologías eficientes que permitan recuperar y reducir consumo el agua será crucial para procesos realmente eficientes y rentables.

La diferencia entre la aplicación de procesos tecnológicamente avanzados es significativa, ya que, el agua que se emplea en la minería del cobre para procesos como la molienda, flotación, filtros, entre otros, varía entre los 0,4 m<sup>3</sup> a 1,6 m<sup>3</sup> por tonelada de mineral, de acuerdo con la experiencia de países como Australia, Chile, y Argentina, entre otros (Cabrejos, 2011). Este escenario nos presenta un diferencial de 1,2 m<sup>3</sup> (300%) entre el proceso tecnológicamente más efectivo versus su contra parte con menor presencia tecnológica, sugiriendo el impacto significativo de la tecnología dentro de los procesos de minería.

Por otro lado, el incremento en la seguridad es relevante. Las fallas suscitadas en los espesadores de alta densidad del proceso de relave, así como, las fallas en las represas representan un alto riesgo para la vida de los operadores llegando al punto de haber arrebatado algunas vidas a causa de colapso en las represas en países como Brasil y Canadá (Kiernan, 2016; Walker, 2016). Estos problemas no solo atentan contra la integridad de las personas de forma directa, también lo hacen de forma indirecta, ya que de acuerdo a (Cruzado & Bravo, 2010) “los residuos provenientes de la actividad minera son materiales peligrosos capaces de romper los equilibrios de los ecosistemas, afectar la salud pública, degradar cuerpos de agua y modificar paisajes naturales” (p.25), generando daños colaterales económicos perjudicando dinamismos beneficiosos, como el cultivo orgánico, la piscicultura, zonificadas en función de un aprovisionamiento poco adecuados o por peligros subsecuentes.

Específicamente en Perú, a pesar de que recursos como el cobre con legislaciones insipientes de 3,0% resultan poco rentables, la carencia del rubro cuprífero y la acentuación en la demanda, ha generado el surgimiento en palabras de (Riveros, 2014) de “depósitos con contenidos no mayores a 0,2%, que son factibles económicamente sólo si son explotados a gran escala, lo cual, a su vez, requiere un mayor uso de agua y genera una mayor cantidad de relaves como desecho” (p.54). este factor combinado con la aun persistente actividad tradicional en el método y conducción de los relaves con procesos no modernizados, acentúa el alto requerimiento de consumo del recurso hídrico, del cual se estima que el 95% que ingresa a una planta concentradora termina en la cubeta del depósito, en donde el residuo se evapora, se recupera parcialmente, o está contenida en los concentrados.

Por otro lado, dirigir esfuerzos hacia la mejora en los procesos de relave aplicando avances tecnológicos será de gran ayuda para evitar la contaminación ambiental, teniendo en cuenta casos como los de la ciudad de Lima donde la cercanía de las represas de relave

a las aguas del río Rímac han afectado al mismo (Usrrestegui, 2014), y los instrumentos de monitoreo y de control juegan un rol fundamental para evitar y/o mitigar estos escenarios. Contextualizando, en la planta concentradora de cobre objeto de estudio, la situación es similar a otras empresas explotadoras de cobre del país al manejar sus procesos mayoritariamente de forma semiautomatizada. Particularmente, el sistema de espesamiento de relave no cuenta con señales de monitoreo y control mínimas necesarias que faciliten la operación y toma de decisiones por parte del operador, generando un mayor gasto de química flocculante y un mayor gasto de mantenimiento debido a operaciones inadecuadas al no contar con herramientas de supervisión que permitan la toma de decisión oportuna.

Este proceso opera con una capacidad de diseño de 140.000 tm/día de mineral procesado, que produce un caudal de relave proveniente de los circuitos de flotación rougher y cleneer scavenger que son dirigidos hacia los espesadores de alta densidad con capacidad para manejar 12,781 m<sup>3</sup>/hora de agua de relave, alimentados con pulpa de 37% sólidos en la que se agrega química flocculante a razón de 2g por tonelada de sólido. El agua tratada y recuperada en este proceso (aproximadamente 6500 m<sup>3</sup>/h), se envía hacia la presa de relave, y es reutilizada para dilución de flocculante. El resto se recircula hacia las piscinas de agua de procesos. Como resultado se obtiene una producción mensual de relave de 3, 905,600 tm.

La operación semiautomatizada de este proceso, con carencia de señales monitoreo y supervisión de las variables de proceso supone grandes problemas para la empresa y sus operadores. Decisiones importantes se dejan a criterio de operadores expertos quienes al no tener parámetros de medición en tiempo real dosifican inadecuadamente la mezcla de flocculante y realizan operaciones de control manual que terminan por ocasionar con cierta frecuencia que el producto este fuera de especificación. Esto aguas abajo ocasiona importantes situaciones problemáticas como:

- Producto fuera de especificación (agua de relave) con % de sólidos bajos y valores de turbidez del agua de reboce altos.
- Mayor consumo de química flocculante.
- Reducción de la obsolescencia programada del equipamiento y daño a la integridad mecánica y estructural de la presa de relave, equipos del sistema del espesador, unidades hidráulicas, y sistema de bombeo.
- Flujo de recuperación de agua de proceso m<sup>3</sup>/h deficiente en el reboce de los espesadores de relave.

- Mayor consumo de energía eléctrica al requerirse más horas de bombeo de agua desde la represa de relave
- Mayor gasto en labores de mantenimiento preventivo y correctivo de los recipientes, sistema de bombeo y estructuras civiles.
- Incremento de peligro en la integridad física del recurso humano, ambiente y terceros al verse comprometida la composición mecánica y estructural de los equipos, recipientes y estructuras civiles.

Considerando la situación problemática planteada, esta investigación propone automatizar el proceso de espesamiento de relave de la planta concentradora de cobre objeto de estudio como respuesta para el crecimiento de la producción de la organización al ofrecer al proceso y al operador las herramientas tecnológicas necesarias para monitorear y controlar el sistema de espesamiento de relave de forma automática. Esto en concordancia con Morales (2014) quien manifiesta que el sector minero de Perú busca la implementación de sistemas de control, especialmente aquellos que se encuentran diseñados bajo una arquitectura abierta que facilite la integración de diversos equipos para brindar una disponibilidad superior de los engranajes de creación, una adecuada gerencia de la energía y una supervisión periódica y sostenida de los procesos.

## **1.2. Trabajos Previos.**

### **1.2.1. Nivel internacional.**

En este apartado se puede mencionar en Chile a Figueroa, (2016) el cual en el 1er seminario de “**Control Avanzado y Optimización de Plantas de Procesamiento de Minerales, Atacama Valley E.I.R.L.**”, menciona que los sistemas expertos se presentan como opción para vencer los desafíos de la minería como lo son el aumentar de la producción y reducir costos, siendo uno de los métodos más viables para la implementación de estos sistemas en espesadores de relave una arquitectura modular (como por ejemplo alimentación de los relaves, nivel de agua clara, sistemas de rastras, descarga de sólidos). Por otro lado, el establecer los objetivos de automatización globales como; producción (T/h), recuperación final (%) flujo de agua recuperada ( $m^3/h$ ), además se puede incluir un sistema de dosificación inteligente de reactivos (colector, espumante, NaSH), es de gran relevancia, ya que, con estos, el sistema experto logro un aumento de la descarga en 1%, en la planta procesadora los colorados de minera la escondida.

Arenas (2015), en su investigación **“Estudio Experimental: Comparación del Potencial de Infiltración de Relaves Convencionales Versus Relaves Espesados con Metodología TTD Universidad de Chile”**, realizó un balance práctico del nivel de penetración de cuencas convencionales en contraposición con los relaves solidificados a través del método TTD. En consecuencia, se evaluó experimentalmente en una columna de salida de una extensión, la penetración en una superficie natural originada por el almacenamiento de capas de relave de disímiles concentraciones sólidas, con la aplicación de una estructura empírica contentiva de una probeta cilíndrica de acrílico de 20 cm de diámetro x 100 cm de altura donde se colocó 50 cm de superficie natural compactada, compuesto por sensores de humedad y un tensiómetro. Sucesivamente se almacenaron niveles de relave, contentivas de medidores de humedad, tensiómetro y medidor de temperatura. El esquema de ensayos comprendió: 2 muestras de relave y 1 muestra de suelo de fundación. Se elaboraron cuatro pruebas, dos por tipología de relave a dos diferentes concentraciones de sólidos.

Entre los resultados destacan el relave 1 (cobre), el relave tradicional y el concentrado con el método TTD, en donde infiltraron completamente la muestra de la superficie. Siendo oportuno citar que, la masa de relave espesado TTD pertenece a 1,85 veces la masa de relave convencional dispuesto y el recipiente con relave convencional recolectó un excedente de líquido que admitiría lograr una infiltración adicional de 12%. Para el relave 2 (oro y plata), la penetración obtenida en el experimento con relave espesado TTD logró el 50% de la muestra de suelo, por su parte, durante el ensayo con relave convencional, se infiltró el total de la muestra de suelo. La consistencia entre la masa de relave espesado y la masa del relave convencional equivale a 1,36. Concluye que la profundidad que alcanza la infiltración dentro del suelo de fundación depende de la cantidad de agua liberada por el relave hacia el subsuelo y de la curva de retención de agua del suelo.

Rivera (2012), en Santiago de Chile realizó el estudio **“Potencial de Recuperación Energética en Relaves de la Gran Minería, Factibilidad Técnico-Económica”**, persiguió como objetivo establecer, declarar y evaluar el nivel de restablecimiento eléctrico contentivo en el ramo minero a través del incremento de prácticas sustentables. Donde se planteó para la solución dos mecanismos. Primeramente, la producción eléctrica por medio de bombas como turbinas sobre relave ducto. Luego como segundo mecanismo la producción eléctrica con correas

regenerativas para la transferencia de relaves. Según la posibilidad práctica y financiera ambas son viables, el potencial de generación eléctrica de 33,5 GWh y 217 GWh respectivamente, el potencial de disminución del CO<sub>2</sub> es 21,4 KTon CO<sub>2</sub> 79 KTon CO<sub>2</sub>; Poblete (2012) concluye que la “recuperación energética cinética o gravitacional podría entregar entre un 5 a 10% del consumo original en la industria de la gran minería del cobre” (p.35).

Rivera (2012), realizó la investigación titulada “**Estudio Experimental del Potencial de Infiltración de Relaves Espesados TTD Depositados Directamente sobre Suelos Naturales**”, para la Universidad Nacional de Chile. Planteo como objetivo analizar las características geotécnicas que registran la penetración de líquido contenido en los relaves espesados hacia el subsuelo. La metodología consistió en simular la depositación de relaves espesados en terreno, para el cual se implementó un ensayo de laboratorio donde: 1) se midió la variación de la humedad del subsuelo cuando sobre él se ha depositado una capa de relave espesado; y 2) se midió la humedad del suelo a diferentes profundidades. La muestra estuvo conformada por tres relaves correspondientes a excedentes de los procesos de concentración por flotación de cobre, zinc y molibdeno. Concluye que “la infiltración en el suelo es producida principalmente inmediatamente después de la depositación del relave, y la humedad final que presentan los relaves para ambos suelos de fundación son similares” (p.25). Esto indicaría que la muestra no está en estado de afectación directa por la superficie de constitución y varía de acuerdo a la evaporación.

García (2007), en Santiago de Chile planteo una investigación “**Modelo del Balance Hídrico del Tranque de Relaves Ovejería**”. El objetivo consistió en construir un prototipo que represente el equilibrio del agua superficial del tanque de relaves Ovejería. Se recopiló la información con el enfoque cualitativo, mediante la investigación de otros estudios para realizar el nuevo modelo. Los resultados se obtuvieron mediante proyecciones de la producción de relave, y simulación de otros escenarios donde se vio un aumento de la producción. El autor concluye que la “operación del tranque de relaves Ovejería, se ha estado infiltrando un caudal promedio cercano a los 215 l/s en total, tomando en cuenta tanto las infiltraciones desde la cubeta como las que se producen desde el canal de contorno” (p.79). Por lo cual la acentuación para el traslado de la masa se considera cercana a los 9,5 l/s por cada KTPD de producto explotado que no es variante ante los aumentos.

### 1.2.2. Nivel nacional.

Escobar (2014), en el trabajo titulado **“Estudio de Recuperación de Agua de Relaves Empleando la Tecnología de Espesamiento en las Empresas Peruanas de la Región Tacna”**, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, plantea como objetivo efectuar un análisis de reutilización de las aguas teniendo como punto de partida los relaves de una procesadora de minerales. Con este trabajo fue posible dimensionar los espesadores y su capacidad, permitiendo predecir resultados a futuro, con lo que se pudo visualizar que la aplicación de la tecnología de relaves espesados se puede recuperar agua de manera significativa. Por otro lado, el autor expresa que “los relaves espesados de cobre presentan cizallamiento tal que, para una concentración de sólidos de 66% de valores iniciales sin cizallar, alrededor de 150Pa a valores cercanos e inferiores a 60Pa tras la aplicación de cizallamiento mecánico externo” (p.95).

Por su parte Cabrejos (2013), en la tesis **“Estudio de Pre-Factibilidad para la Recuperación de Agua a Partir de Relaves de Gran Minería de Cobre Mediante la Tecnología de Relaves Espesados”**, Universidad Nacional Ingeniería. El estudio muestra que es técnicamente viable la implementación de un sistema de tratamiento de agua a raíz de relaves de flotación de cobre con tecnologías de espesamiento. Específicamente en el tema de grandes tonelajes 100 000 t/d, esta concepción y estilo de procesamiento es aplicable en diversas plantas de Minería a mayor escala.

Balta y Vásquez (2010), en su investigación **“Diseño del Sistema de Control Automático del Proceso de Retratamiento del Relave en la Unidad Minera Orcopampa de la Empresa Buenaventura”**, se planteó el objetivo de crear la sistematización de las actividades de retratamiento del relave en la unidad minera Orcopampa. Como hipótesis formuló “si la automatización de planta de repulpado y cianuración en la unidad minera Orcopampa significaría asegurar un aumento en la eficiencia del procesamiento de oro” (p.20). Concluyeron que el proceso de “automatización permite recuperar el 95% de oro, es decir, por cada 10 gramos por tonelada se recupera 9.5 gramos dándonos más eficiencia en la recuperación de oro del mineral extraído, disminución de errores, velocidad de respuesta, mejoras en la producción” (p.210).

Lovera (2005), en la Investigación **“Modelización y Simulación de Procesos Metalúrgicos: Flotación, Filtración, Lixiviación y Espesamiento”**, presenta el patrón matemático de estos procedimientos y la interfaz de la base experimental

mediante los modelos concernientes. Concluye que “emplear modelos matemáticos para la simulación de procesos y operaciones metalúrgicas servirán para un mejor planeamiento y control de las variables industriales en plantas concentradoras” (p. 120).

Gonzales (2016), en la investigación titulada “**Diseño y Fabricación de Espesador de Relaves de Cobre de 15 metros Diámetro**”, Arequipa, Universidad Católica de Santa María, su objetivo se orientó hacia la creación del mecanismo del espesador de relaves de cobre por gravedad. Entre sus resultados mostró que utilizando un sistema eléctrico de una sola fase a base de agua que refleja el volumen de arrastre o dilución con un flujo másico de entrada de 682 Kg/s, de dilución 747 Kg/s y flujo másico diluido de 1430 kg/s lo que permite una reducción del 48% en concentración. Concluye que los “trabajos de fabricación deberán realizarse con cuidado teniendo presente las normas de seguridad ya sea para soldadura, rolado, y altura (si el trabajo a realizar se realiza a más de 2 metros del suelo deberá utilizarse un arnés de seguridad” (p.52), y deben estar monitoreados por un personal experto que certifique la apropiada disposición y manejo. A su vez, sugiere para la óptima aplicabilidad del equipamiento, el uso de floculantes que generen mayor velocidad de sedimentación.

### **1.3. Teorías relacionadas al tema**

#### **1.3.1. Automatización del proceso de operación de los espesadores de relave final.**

##### **1.3.1.1. Automatización.**

Este término proviene etimológicamente del griego que significa, auto: guiado por uno mismo, y en los procesos productivos industriales es referido a los sistemas informáticos y electromecánicos utilizados para intervenir equipamiento y operaciones industriales suplantando al recurso humano. Para Pérez (2016), a la automatización es “al acto y la consecuencia de automatizar. Este verbo, por su parte, alude a hacer que determinadas acciones se vuelvan automáticas (que se desarrollen por sí solas) y sin la participación directa de un individuo” (p.58). La automatización como disciplina en la ingeniería es extensa y no se reduce sólo a los sistemas de monitoreo. También incluye la maquinaria técnica y dispositivos de transmisión de señal, receptores finales como válvulas y actuadores, y aplicaciones de software.

### **1.3.1.2. Sistemas de control.**

Un sistema de control conduce secundariamente los datos de un procedimiento automatizado establecido. En palabras de (Travathan, 2006) “su objetivo es gobernar un sistema sin que el operador intervenga directamente sobre sus elementos. Este manipula valores de referencia y el sistema de control se encarga de transmitirlos al sistema controlado a través de los accionamientos de sus salidas” (p.87). Este sistema de monitoreo progresivo funciona, en general, con intervalos de frecuencia menor, denominadas señales y administra las actividades que conducen la intensidad de los módulos de potencia integrados.

Existen básicamente dos tipos distintos de sistemas aplicados para la supervisión de las operaciones en campo, los Sistemas de Control Distribuidos (DCS por sus siglas en inglés) y los Controladores Lógicos Programables (PLC por sus siglas en inglés). El primero era usado en el siglo pasado con fines netamente de procesamiento análogo, por su parte, el segundo tiene una usanza de función discreta (ceros y unos), más allá de esto en la actualidad paralelamente estos quipos se asemejan y pueden ser utilizados a la par indistintamente del proceso.

Un dispositivo que complementa perfectamente tanto aun DCS como un PLC son las interfaces hombre maquina (HMI por sus siglas en ingles). Estas funcionan como consolas de monitoreo y control o computadores industriales (tipo touch screen de aproximadamente 7 a 10 pulgadas en la actualidad), la cual le sirve al operador o panelista para visualizar el proceso o al mantenedor como dar soporte técnico.

### **1.3.1.3. Sistema de control distribuido (DCS)**

Los DCS como su nombre lo implica, involucran tres cualidades esenciales. Primeramente, se compone de pequeños set que funcionan como subsistemas semiautomáticos que recolectan, procesan y controlan información de campo. Segundo la cualidad de ser automáticos al incorporar control regulador avanzado, secuencias lógicas de control y lenguaje de programación. Por último, el ser un sistema que interconecta todos estos set distribuidos conformando un sistema robusto de control (MacMillan & Considine, 1999). En efecto, en esta modernidad las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMES) se

inclinan hacia la utilización de estos sistemas. Entre sus características más significativas se pueden mencionar:

- “Las Unidades interfaz con campo I/O separadas por tipos AI, AO, DI, DO, pulsos. También de cálculo (CPU) que pueden ser redundantes o no. O de almacenamiento de datos históricos”. (p.35).
- Pantallas de acceso para operación e ingeniería (MMI)” (p.35).
- “Gran capacidad de control y cálculo puede encargarse de las capas de control básico y supervisor, así como de balances de materia, etc. Mantiene registros de datos históricos y eventos” (p.37).
- Pueden realizarse estrategias de control complejas” (p.37).
- “Amplitud de comunicación con diversos computadores dispuestos para la gestión de los sistemas de información, supervisión de alto nivel y prototipos de algoritmos matemáticos, entre otros. Los cuales son versátiles en procedimientos sistemáticos e integrales que presentan paquetes “batch”. (p.37).

A su vez, es cierto el indicativo de cierta permisibilidad en la fusión de los signos y codificaciones analógicas y digitales, sin embargo, estos sistemas no están preconcebidos para la dinámica digital que implique mayor velocidad en la retroalimentación (enclaves de piezas, aparatos giratorios). Esto conlleva a la integración y robustecimiento de aplicaciones que unifican el DCS con PLC's, para operacionalizar las actividades. En oposición del DDC que es un procedimiento netamente centralizado, el DCS, como viene preestablecido, tranza los trabajos de intervención entre un subgrupo de chips en diversas localizaciones dentro de la procesadora y que se conectan por medio de la red, esto trasciende sus implicaciones en las refinerías, cervecerías y plantas de potencia, que están caracterizadas en alto porcentaje de valor con operaciones de arbitraje y control.

Motivado a su complejidad es difícil establecer estructuras estándares de DCS, ya que se han diseñado aproximadamente cincuenta sistemas multidiversos (Richardson, 1994) y cada uno posee características distintivas y propias, asemejándose en la representación de escala jerárquica conformado en niveles. Según Richardson (1994), un arquetipo frecuente radica en formar

cinco niveles. En el **nivel 1** o nivel de lazo se localizan los elementos que están en comunicación dentro del proceso:

**Módulos de control (CM)**, están constituidos por el sistema experto de espesadores de relaves, fue desarrollado en la plataforma OCS-4D<sup>®</sup> en dos aplicaciones. El esquema general de la lógica configurada para cada aplicación se muestra en la Figura 28.

**Módulos de adquisición de datos (DM)**, que se utilizan principalmente para recopilar grandes cantidades de datos del proceso.

**Controladores lógicos programables (PLC)**, que se emplean para paradas de emergencia y procesos discretos o por lotes y semi lotes” (p.49).

**En el nivel 2**, se ubican las consolas del operario, representan la interfaz hombre-máquina imprescindible del DCS y que se delimitan concretamente cerca del proceso. Las estaciones del operador presentan una visión holística del procedimiento en sus diferentes fases articuladas metódicamente permitiendo la focalización detallada en momentos precisos. La consola viene definida en las operaciones por lo general de un computador con monitor, teclado y ratón. Comenzando en la estación se efectúan comandos de instrucciones hacia los controladores (cambios de modo, “set point”, salida del controlador), requerimiento de datos, estadísticas, terminales y separación de estados de alarmas e informes de operación.

El **nivel 3**, se fundamenta en una computadora central o administrador (host) que se emplea para monitorear el proceso: “paradas y arranques automáticos, optimización, simulación de procesos e informes de tendencias de largo plazo. Aquí se produce la primera concentración masiva de información. En este nivel se sitúa lo que algunos han denominado la “interface de ingeniero” (p.58), por esto este nivel se conoce como estaciones de ingeniería. Las cuales están provistas de licencias administrativas sobre el DCS y fungen como instaladores del sistema, el diseño de lazos de control y el diseño de estrategias de control mejoradas.

El **nivel 4** **esgrime actividades de** desarrollo de funciones de programación de mantenimiento, inspección de la manufactura, grabación y toma de datos históricos de largo plazo, simulación y optimización.

El **nivel 5** es un centro neurálgico (*hub*) y se emplea en grandes organizaciones que gerencia sus operaciones en diversas plazas con referencia geoespacial de alto alcance. Con una zonificación centralizada con comunicación directa sustentada en tecnologías telefónicas o de cableado directo (fibra óptica) (Richardson, 1994). La gama de sintonía comunicacional es amplia, y viene versada por la pluralidad de escalas de un DCS y las unidades de un mismo nivel. Llevados a cabo por una línea vital de información, conducto expedito de ruta de datos (*data highway*). Desde décadas concurren diferentes proporciones de trayectos de datos. Al respecto los circuitos de transferencia con variados terminales (*multi-drop*) fueron los pioneros en el campo (TDC 2000 de Honeywell) (Richardson). Para estos autores, “son los más simples y de menor costo, pero no poseen la flexibilidad de otras configuraciones. La más flexible es la configuración en racimos o parcialmente en racimos de múltiples terminales” (p.422). Esta tipología de ordenación reduce la posibilidad de obstáculos en el procesamiento de datos, pero implica una alta inversión.

Al igual que la programación en anillo, ostenta una mayor eficacia en la volumetría de datos y menos margen de error de software y contrariedades en el hardware, pero precisa de una complejidad en la operatividad. En contraste, la configuración en estrella tiene menor capacidad de resistencia de fallas de software y hardware. Implica igualmente costos de inversión elevados, debido al copioso cableado que amerita. Un avance reciente radica en el empleo de redes de área local (LAN) de alta seguridad. Existen dos tipos fundamentales de LAN que tienen aplicabilidad en los DCS: las LAN de alto desempeño que usan cable coaxial como forma de transferencia de datos capaces de enviar a distancias de más de 3 kilómetros y las LAN de bajo costo que emplean pares de alambres entrelazados y asegurados que transmiten información a distancias de aproximadamente 300 metros.

Entre las LAN que se destinan en los DCS se puede citar Ethernet TCP/IP desarrollada por Siemens (Universidad de Alcalá). Según lo estipulado por (Richardson, 1994) todo trayecto de metadatos presenta un protocolo, el cual consiste en un conjunto de medidas que rigen la transmisión de información en el rango de perfil y es controlado por “comandos de

software desde la estación de ingeniería. Los protocolos de las rutas de datos son protocolos propietarios, es decir, dependen del fabricante del DCS” (p.67).

### **Objetivos**

- Identificar en un sistema las variables de entrada, salida e interferencia.
- Diferenciar un sistema de revisión en lazo abierto y cerrado.
- Identificar las funciones de monitoreo y su estructura.
- Diferenciar el control computarizado del manual.
- Detallar los beneficios y obstáculos del control automático versus el control manual.
- Especificar los beneficios y obstáculos del control en lazo abierto frente al control en lazo cerrado.
- Catalogar los sistemas de inspección.
- Exponer el trabajo de los sistemas de control simples.
- Diseñar sistemas de control.
- Conocer las fases a seguir en la generación de un sistema de control.

#### **1.3.1.4. Controlador lógico programable (PLC)**

Los PLC fueron introducidos en los años 70’s como reemplazo de los sistemas de control con redes, pensados originalmente para el manejo de señales discretas, sin embargo, hoy día pueden manejar todo tipo de señales I/O discretas o analógicas siendo ideales por su velocidad y tamaño para el control de equipos o maquinas específicas. Estos equipos pueden ser integrados o modulares (McMilan & Considine, 1999). Está compuesto principalmente de los siguientes elementos:

#### **Unidad de procesamiento central (CPU)**

En palabras de (McMilan & Considine, 1999) “CPU o unidad de Procesamiento central, que en el caso del PLC reside en un circuito integrado denominado Microprocesador o Microcontrolador, y es el encargado de controlar las operaciones del mismo” (p.97). El CPU se describe por razón del período que demanda en procesar 1 K de órdenes y comandos, y por el volumen de registros procesados en donde el dato de inicio oscila de un

milisegundo a unas decenas de milisegundos, y el segundo de 40 a más de 200 operaciones diferentes. Posteriormente, el PLC notifica extrínsecamente, las operaciones de servicio, renueva las salidas y las entradas. Por lo que el período de ejecución final puede estar duplicada en la actuación del programa.

### **Memoria**

Es el espacio de ubicación del programa y de los datos que se obtienen en la ejecución del programa. Están definidos dos tipos de memoria en función de su localización: la residente, que está adyacente al CPU y, la memoria externa, que puede ser extraída por el usuario para su transformación o reproducción. De estas se desprenden la volátil (RAM, EEPROM) y, no volátil (EPROM), según la funcionalidad. Por lo general las memorias manejadas en los programas van de 1 a 128 K.

### **Procesador de comunicaciones**

Las interacciones internas del CPU operan por un circuito prefijado con protocolos de tipo RS-232C, RS-485, Profibus, etc. según el creador y la calidad del PLC.

### **Módulos de entradas y salidas (I/O)**

En este caso la modulación comparativa entre los controles automáticos es necesario que el PLC obtenga retroalimentación con el exterior. Determinado a través de una interfaz de entrada y salida, que fluctúa desde seis PLC tipo micro, a varios cientos en PLC modulares.

### **Tarjetas modulares inteligentes**

Están configuradas para los PLC modulares, fichas con funciones definidas que exceptúan al microprocesador de las actividades que ameritan mayor demanda de velocidad y precisión. Estas tarjetas se llaman inteligentes por poseer un microprocesador en su interior para su operatividad.

### **Fuente de poder**

Es indispensable para la generación de voltaje que de fluidez a todos los elementos precitados puede ser externa o interna. En los casos de percances

del sistema eléctrico permite auxiliar el almacenamiento de información en la memoria volátil de tipo RAM, (hora, fecha y registros de contadores entre otros), se maneja una fuente auxiliar, pudiendo ser esta una pila interna una batería externa.

### **Elemento programador**

Es un emisor receptor de datos de uso aleatorio empleado para programar el PLC, el dispositivo comprende desde un teclado con una pantalla de línea de caracteres hasta una PC portátil, esto es en los casos de compatibilidad de los sistemas y los programas utilizados.

#### **1.3.1.5. Sensores y transductores.**

En este apartado, en las implicaciones de la automatización es necesaria la toma de las dimensiones del trabajo en campo, para determinar la situación del proceso controlado. Aquí se emplean sensores y transductores, vocablos comúnmente se emplean como sinónimos, aunque el transductor comprende más alto espectro. Este se concibe como un dispositivo que transforma el valor de una magnitud física en una señal eléctrica codificada, ya sea en forma analógica o digital. Para (Aiteco, 2019) los transductores que se usan para vincular a ordenadores programados por medio de las fases apropiadas, constituyen los siguientes elementos integradores:

#### **Clasificación de sensores según el tipo de señal de salida**

- “Analógicos, de señal de salida con un valor de corriente entre un rango previamente fijado (normalmente 0-10 V o 4-20 mA). (p.29)
- “Digitales, que transforman la variable medida en una señal digital, codificada en pulsos o en alguna codificación digital” (p, 29).
- Sensores “todo-nada” son aquellos que poseen dos estados, los cuales están separados por un valor umbral de la variable detectada.

#### **Clasificación de sensores según su fuente de alimentación**

- Los sensores pasivos requieren de una alimentación para efectuar funciones y los sensores activos generan la señal sin necesidad de alimentación externa.

### **Clasificación de sensores según el tipo de magnitud física a detectar**

- Posición lineal o angular.
- Desplazamiento o deformación.
- Velocidad lineal o angular
- Aceleración.
- Fuerza y par.
- Presión y Caudal.
- Temperatura.
- Presencia o proximidad.
- Táctiles.
- Intensidad lumínica.
- Sistemas de visión artificial

#### **1.3.1.6. Especificación de sensores.**

Según (ISA, 2005) “todos los sensores deben ser especificados a un punto tal que aseguren ciertos parámetros de funcionamiento. Estas especificaciones se pueden aplicar tanto a sensores como a actuadores, aunque no en todas son aplicables a todo sensor o actuador” (p.89).

**Precisión:** capacidad de reproductibilidad de un mismo valor luego de varias mediciones independientes, y cualidad de ser exacto. Como muestra se proporciona un sistema de medida de temperatura, exactitud 0,05 °C, en situaciones que su lectura fuese de 37,2 °C simboliza que la temperatura del ambiente oscila entre 37,15 y 37,25°C.

**Repetitividad:** capacidad de un transductor de una señal de salida cuando un mismo valor es medido (ISA, 2005), es decir, describe la destreza de la herramienta para conceder igual lectura en aplicaciones con duplicidad de valor del indicador medido.

**Sensibilidad:** detecta la variabilidad en los cambios de variables que presenta el instrumento.

**Resolución:** menor intervalo entre dos cantidades que pueden ser distinguidos uno del otro (ISA, 2005). Formula la calibración de los valores y la fluctuación de su graduación. Se define por los dígitos para variables de códigos digitales y de porcentaje de escala para herramientas de aguja.

**Rango:** región dentro de los límites inferior y superior que una cantidad puede ser medida, recibida o transmitida (ISA, 2005).

**Tiempo de respuesta:** (ISA, 2005) lo define como salida expresada en función del tiempo que resulta sobre la aplicación de una señal sobre una condición operativa específica. “La medición de cualquier variable de proceso puede implicar una demora que debe ser definida adecuadamente. Los tiempos de respuesta se definen en base al tiempo necesario para obtener una medida satisfactoria” (p.97).

**Histéresis:** propiedad de los elementos, tal que, el valor de la salida para una determinada entrada dependerá del histórico de entradas previas (ISA, 2005), es decir, es un “fenómeno de memoria que impone una histéresis a su respuesta donde un sistema de medición de presión podría indicar, los cambios de presión según si la presión anterior era más alta o más baja que la actual” (p.47).

#### **1.3.1.7. Sistema de control experto.**

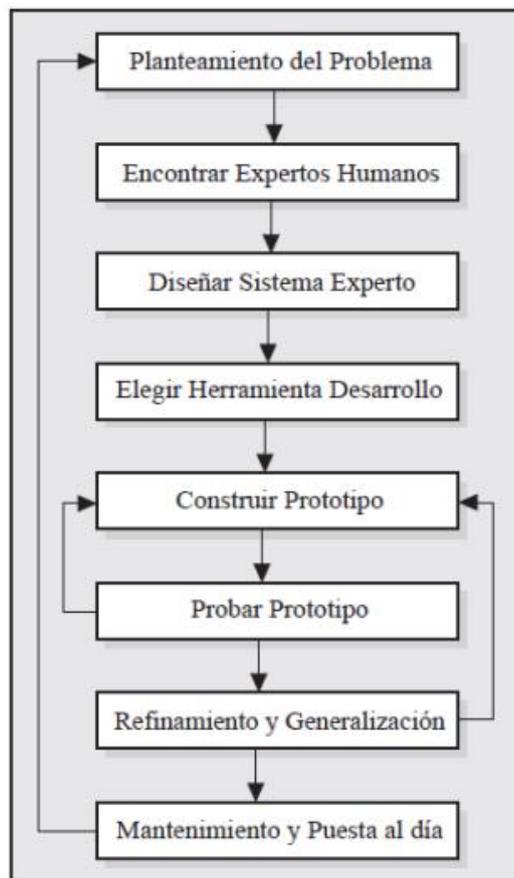
Algún tiempo atrás existía la corriente de pensamiento, caracterizada por prejuicios injerencistas que sugerían que situaciones como la exposición de teoremas, el reconocimiento de la voz y de ciertos patrones y juegos debían ser resueltos por los seres humanos, ya que estos poseen la habilidad de pensar, observar, memorizar, aprender, ver, oler, etc.). En cambio, esta visión evolucionó con los adelantos científicos en la era de la inteligencia artificial (IA). Motivado a la labor llevada a cabo en las últimas décadas por equipos multidisciplinarios de estudiosos, la experiencia ha demostrado que muchos problemas pueden abordarse y solventarse a través de las máquinas.

En este sentido podemos definir la IA según el postulado de Barr y Feigenbaum (1981), para quienes el concepto es “la parte de la ciencia relacionada con el diseño de sistemas computacionales inteligente, es decir, sistemas que exhiben las características que nosotros asociamos a la inteligencia en el comportamiento humano – comprensión del lenguaje, aprendizaje, razonamiento, resolución de problemas, etc.” (p.87). Justamente, los sistemas expertos un importante tema de interés dentro del campo de la inteligencia artificial. Para Castillo et al. (1997), estos son “sistemas informáticos que simulan a los expertos humanos en un área de

especialización dada” (p.62). Estos sistemas se componen principalmente de una sección conocida como base del conocimiento (información conocida) y de un motor de inferencia (razonamiento).

Basándonos en las teorías e ideas Weiss y Kulikowsky de 1984 (Castillo et al. (1997), podemos desarrollar un sistema experto siguiendo nueve pasos apreciables en la siguiente figura.

*Figura 1.* Pasos para desarrollar un sistema experto.



Fuente: Castillo et al. (1997).

#### **1.3.1.8. Lógica difusa.**

Para el investigador Aiteco (2019), “la lógica difusa es una técnica, desarrollada por Zadeh (Universidad de California en Berkeley), que permite la simulación del proceso de razonamiento humano un experto” (p.87). La lógica difusa (Fuzzy logic) plantea el pensamiento que, en un espacio determinado, no es factible con exactitud determinar el valor de una variable X, sino únicamente saber a menor nivel el grado de incidencia de cada

factor en juego. En este sentido la lógica tradicional ha formado convenientemente una parte del raciocinio innato esgrimiendo solamente valores falso o verdadero. Es evidente que las reflexiones humanas prefijan postulados de valor de verdad que no son deterministas.

Para el autor un “ejemplo, al calificar que el cielo es azul uno está tentado a graduar qué tan azul, e igualmente, si un vehículo se mueve rápido, también se está obligado a considerar qué tan rápido es el vehículo” (p.78). Esta representación, evidencia el pensamiento humano en la solución de problemas. Una característica de la lógica difusa la hace ideal para los sistemas expertos es que esta no necesita conocer el modelo matemático para utilizarlo. Dicho en otras palabras, un jugador de tenis no necesita conocer la ley de Newton para golpear la pelota. De esta misma manera la lógica difusa imita al operador (jugador de tenis) para responder al sistema (Lipták, 2006).

#### **1.3.1.9. Espesamiento de relave.**

El método del espesamiento es ampliamente la práctica de desaguado y separación de corrientes líquido/sólido con mayor uso en el mundo, ya que, la misma es una técnica de bajo costo con grandes beneficios al ofrecer una alta capacidad de procesamiento de agua y al proveer bajas fuerzas de corte en el medio, creando condiciones óptimas para la floculación (Gupta, 2006; Wills, 2006). Por su parte Shamma, et al. (2007), define el espesamiento como la separación de agua desde pulpas para reducir la humedad presente en estas, especialmente el espesamiento continuo por gravedad que busca acrecentar el volumen de los sólidos del sistema de provisión. Muchos procesos incluyen la dosificación de química floculante, la cual mejora o sirve de catalizador para la sedimentación de las partículas sólidas aglomerándolas, y produciendo como resultado mayor claridad en el agua recuperada (Schoenbrunn & Toronto, 1999). El propósito del espesamiento de relave según (Cabildo, 2016 es “recuperar el agua que se emplea en el proceso y entregar un relave con un contenido de sólidos mayor al que entra a los espesadores, tomando en consideración la planificación de operaciones” (p.20). El relave contiene una gran cantidad de agua, por lo tanto, se hace necesaria la etapa de espesamiento, la cual tiene dos objetivos:

- Ampliar el número de partículas densas en la pulpa.

- Recuperar la mayor cantidad de l para retornarla al proceso.
- Según lo manifestado por Cabildo (2016), las principales características de los procesos de espesamiento de relave son:
  - Se minimiza la contaminación ambiental por permeabilidad de aguas.
  - Se desintegra la generación de partículas, al limitar la pulpa espesada, impidiendo la propulsión de corrientes aéreas.
  - Se optimiza la calidad del Agua.
  - No altera el paisaje.
  - Estimula el equilibrio del yacimiento al allanar áreas disponibles

#### **1.3.1.10. Es pesadores de relave.**

El espesamiento de relave se da generalmente en grandes estanques denominados espesadores de relave. Según lo expresado por (Sette, 1996), estos equipos son estructuras de grandes diámetros con poca profundidad (en comparación con el diámetro), que sirven para separar el líquido claro localizado en la superficie del cuerpo de agua de la concentración elevada de sólidos contenidos en la pulpa y localizados en el fondo, pudiendo darse por baches o continuo, siendo este último la opción más aplicada. Por su parte González (2016), describe estos equipos como “grandes depósitos a los cuales llega por el centro o por un lado la suspensión o el lodo diluido permitiendo el rebose o rebalse del líquido que sobrenada, separándolo del lodo espeso que sale por el fondo del aparato” (p. 68). El espesador en operación se diferencia cuatro fases o zonas:

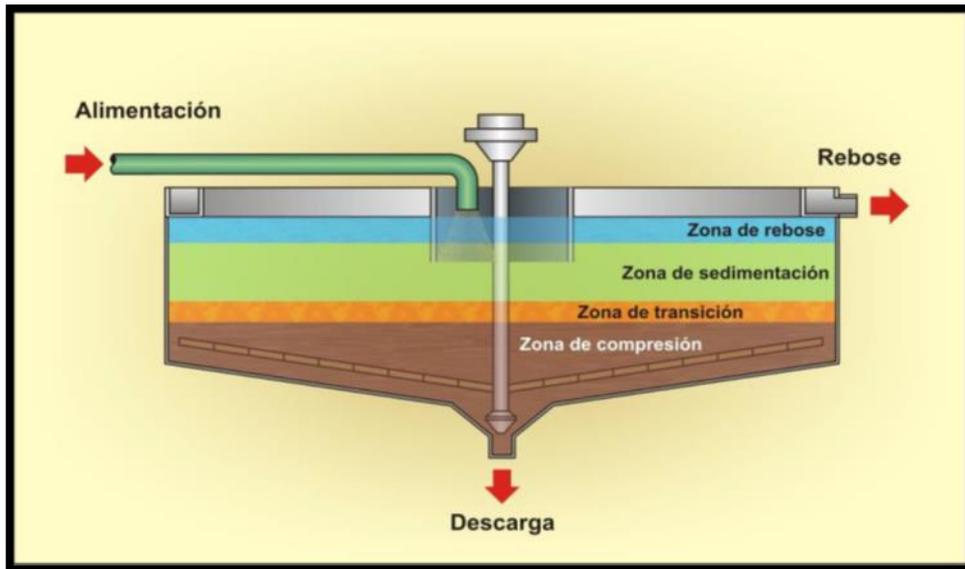
**Zona de rebose:** el agua clara sobrenadante que será recuperada del espesador mediante el rebose del mismo.

**Zona de sedimentación:** es la zona donde debe caer el relave y el floculante para aumentar la rapidez residual, todos los aditamentos sólidos y los flósculos tienden hacia el fondo del espesador.

**Zona de transición:** Zona donde se aglomeran los flóculos formados en la zona de sedimentación.

**Zona de compresión:** es la zona donde se concentran los sólidos por compresión entre los mismos. Se gana mayor porcentaje de sólidos cuando esta zona tiene mayor altura.

Figura 2. Fase de operación de espesador.



Fuente: Manual de Operación Espesador de Relave Autotec

Los espesadores de relave continuos pueden ser convencionales o de alta capacidad (high rate), dependiendo de la composición de la pulpa a tratar y del tipo de floculante a emplear (Stelios Project Management, 2010). Ambas tecnologías cumplen con la clarificación del agua (overflow), y con la descarga de corrientes con mayor concentración de sólidos (underflow), difiriendo principalmente con la forma en que son alimentados. Los espesadores convencionales son aquellos que son alimentados desde la parte superior del equipo, en los cuales la bandeja de alimentación descarga en la zona donde circula la pulpa, mezclándose con la capa de agua clarificada y diluyéndose hacia la zona de sedimentación. Este método se caracteriza porque puede emplear o no floculantes para su proceso (Betancourt & Concha, 2011). Por otro lado, los espesadores de alta capacidad son alimentados por debajo de la zona de sedimentación para potenciar el efecto del floculante, mezclando el floculante con la pulpa mineral en la bandeja de alimentación antes de inyectarla al equipo (Betancourt & Concha, 2011).

#### 1.3.1.11. Elementos estructurales básicos de los espesadores de relave.

Como lo indican Gupta y Yan (2006), los elementos estructurales que conforman al equipo son:

**Tanque:** recipiente donde toma lugar el proceso de relave, el cual puede construido de materiales como acero, plástico, concreto u otro.

**Rastras:** son dispositivos que realizan movimientos circulatorios en la parte interna del depósito para transportar los sólidos sedimentados al punto de descarga. Su diseño dependerá de las características de la pulpa a tratar.

**Sistema de accionamiento:** son los mecanismos, generalmente hidráulicos o mecánicos, que impulsan las rastras.

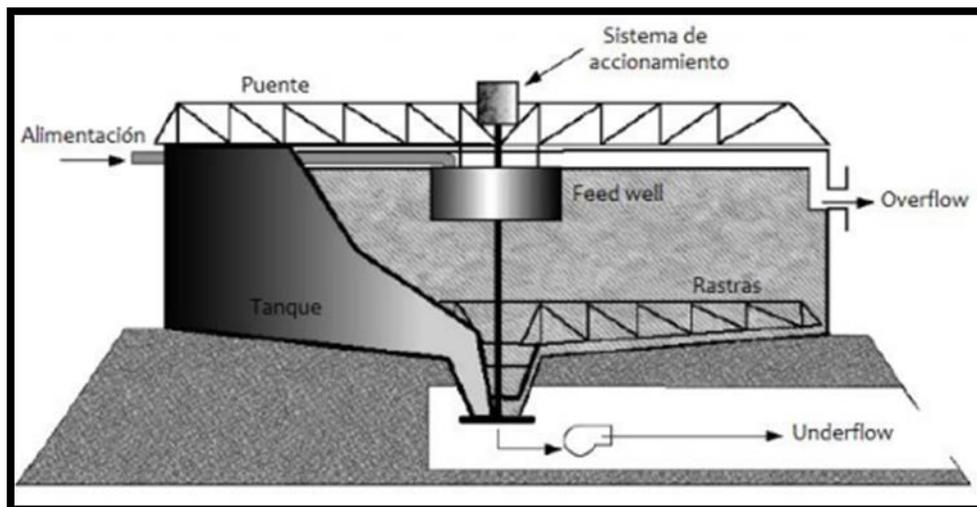
**Mecanismo de elevación de rastras:** son sistemas que permiten elevar las rastras ante situaciones de emergencia o anormales.

**Bandeja de alimentación (feed weel):** es el tubo o canaleta por medio del cual ingresa la pulpa al equipo. En los sistemas convencionales está ubicada en la parte superior y los equipamientos de superior capacidad se ubican en la zona de transición.

**Sistema de recuperación de overflow:** es la canaleta periférica ubicada en el borde interior o exterior del tanque, dentro del tope de la zona de rebose por donde se recupera el agua clarificada.

**Sistema de recuperación de underflow:** estructura cónica ubicada en el área céntrica del interior del recipiente por donde se descarga los sólidos del equipo. Este sistema puede ser descargado por gravedad o con la ayuda de sistemas de bombeo centrífugos o de desplazamiento positivo.

*Figura 3.* Elementos estructurales básicos de un espesador de relave.



Fuente: Gupta y Yan (2006).

### **1.3.1.12. Instrumentación y variables típicas de los espesadores de relave.**

**Torque:** es la fuerza de rotación, tal que al ser aplicada a un eje genera rotación (ISA, 2005). En los espesadores de relave esta fuerza está presente en las rastras, y su movimiento dentro de la pulpa de relave. Esta variable se mide mediante la presión que se necesita en el sistema hidráulico expresado en porcentaje.

**Altura de rastras:** este parámetro mide la altura de las rastras en operación normal y su desplazamiento en caso de emergencia.

**Nivel de cama:** los indicadores de nivel son los instrumentos empleados para medir la superficie de un líquido en un recipiente (ISA, 2005). En el caso de relave, estos miden la interface que divide la parte sólida de la parte líquida dentro del espesador.

**Presión de cama:** la presión es la medición de una fuerza aplicada a una unidad de área (ISA, 2005), que en el caso de la cama busca calcular la influencia en el área inferior del depósito espesador. Mide el nivel de carga en el espesador mediante el cálculo de la presión que ejercería el volumen de todo el espesador lleno de pulpa a la máxima.

**Turbidez de overflow:** la turbidez es la obstrucción óptica de la salida de lumínica por medio de una materia líquida, según (ISA, 2005) “es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido; mide el efecto de la dispersión que estas partículas presentan al paso de la luz; y es función del número, tamaño y forma de partículas” (p.74). Permite identificar el grado de optimización del líquido.

**Flujómetro:** dispositivo que mide el flujo o la cantidad de movimiento de un fluido en un conducto abierto o cerrado, componiéndose generalmente de un elemento primario y un elemento secundario de medición (ISA, 2005). Son de gran utilidad en el proceso de relave, ya que, facilitan el establecimiento del balance de masa dentro del espesador y sirven para determinar la tasa de dosificación de floculante.

**Densímetro:** es un instrumento empleado para determinar la densidad de una sustancia en unidades absolutas (ISA, 2005). La

variable densidad es de especial interés para medir la corriente de underflow y comprobar la consistencia de la masa que brota del espesador, sirviendo establecer parámetros de control en la sedimentación del equipo.

#### **1.3.1.13. Coagulación.**

Dentro de la operación del espesador de relave, (Lorenzo-Acosta, 2006) sostiene que es una de las operaciones más importantes, la coagulación-floculación, es un proceso donde las partículas se aglutinan en pequeñas masas, con peso específico superior al del agua, llamadas flóculos” (p.87), en donde estas logran una sedimentación eficiente.

##### **Tipos de coagulación.**

Según lo expresado por Andia, (2000), básicamente podemos encontrar las siguientes metodologías:

**Coagulación por adsorción:** Esta ocurre cuando el agua posee gran agrupación de partículas en estado disuelto; es por ello que al ser añadido el coagulante en el agua turbia los productos solubles de los coagulantes absorben los coloides y producen los flóculos de manera rápida.

**Coagulación por barrido:** Esta tipología de coagulación se evidencia en el momento que el agua presenta baja turbiedad y escasas partículas coloides; en este sentido dichas partículas son filtradas al generarse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico.

#### **1.3.1.14. Floculación.**

Para (Andia, 2000) es el “proceso que sigue a la coagulación, consiste en un proceso de agitación suave y continua del agua coagulada para coagular las partículas más pequeñas en flóculos de mayor tamaño y mayor peso capaces de ser removidos mediante sedimentación o filtración” (p.32). Aquí la rapidez y el tiempo intervienen representativamente en el tratamiento de este paso. Para (Nieto & Orellana, 2011) “si la velocidad es rápida y por tiempos muy prolongados, los flóculos pueden romperse y desestabilizarse, permitiendo

haciendo que se liberen, haciendo más difícil que se vuelven a unir dichas partículas Tipos de floculación” (p.36). A continuación, se muestran los floculantes típicos empleados según sus aplicaciones industriales para el sector minero.

*Tabla 1. Tipos de floculante y aplicaciones en la industria minera*

<b>Tipo de floculante</b>	<b>Aplicaciones industriales</b>		<b>Consumo usual (g/t)</b>
Aniónico	Espesamiento de pulpas, minerales y concentrados	Concentrados y relaves de carbón, plomo, cobre y zinc; lamas de fosfato y lodos de bauxitas	2,5 a 5
	Agente filtrante para filtración a presión y vacío	Concentrados minerales	50 a 500
	Desaguado centrifugo	Concentrados minerales y relaves	5 a 250
No iónicos	Espesamiento de pulpas, minerales y concentrados	Flotación de relaves auríferos, lamas de hierro, licores ácidos de uranio	1 a 50
	Agente filtrante para filtración a presión y vacío	Concentrados minerales	50 a 250
Catiónicos	Espesamiento de pulpas, minerales y concentrados	Concentrados y relaves de carbón, lamas de hierro	25 a 250
	Clarificación de agua de mina		5 a 50

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Day (2002)

En vista que en el ramo del mercado minero la gran mayoría de las pulpas presentan partículas cargadas negativamente, se estima que los

floculantes catiónicos al ser adsorbidos por éstas partículas sean las más idóneas; sin embargo esto es oportuno en los casos de neutralización de cargas y atracción del polímero a la superficie de la partículas, pero no es apto para los casos de atracción tipo parche cargado o tipo puente, en vista que el gran responsable es el peso molecular especial en los floculantes aniónicos (Wills, 2006)

### **Parámetros de la floculación.**

Según Andia (2000), los principios fundamentales de la floculación son los siguientes:

- Floculación Ortocinética (determinada por el nivel de agitación suministrada: mecánica o hidráulica).
- Gradiente de Velocidad (fuerza para mover la solución).
- Número de colisiones (impacto de los microflóculos).
- Tiempo de retención (lapso en que perdura el agua en el dispositivo de floculación).
- Viscosidad y volumen del floc.
- Cuerpo de lodos (los flóculos constituidos no deben depositarse en los módulos de floculación).

### **Sistemas de floculación.**

De acuerdo a Nieto & Orellana (2011) Los sistemas de floculación utilizados para efectuar la floculación son esencialmente de dos tipos:

- Sistemas hidráulicos. “El flujo del agua está influenciado por la gravedad y mecanismos como barreras, tabiques cámara de floculación conectadas entre serie. Este tipo de sistemas son utilizados en plantas de tratamiento de agua de pequeña magnitud debido a su bajo costo” (p.51).
- Sistemas mecánicos. “En estos sistemas la gradiente de velocidad requerido es proporcionado por la agitación lenta que realizan los dispositivos como paletas o rastrillo, lo cuales son accionados por un motor” (p.67).

## **1.3.2. Mejorar la producción en la planta concentradora de cobre.**

### **1.3.2.1. Producción de relaves.**

Para Meggyes (2008) “la tecnología de producción de relaves altamente densificados a muy baja humedad ha experimentado un progreso muy rápido desde sus inicios en 1995, al ofrecer ventajas técnico-económicas y beneficios ambientales considerables en el campo de la disposición de desechos mineros” (p.65). En la actualidad está determinado por el sistema legal y de conservación ecológicas, el imperativo por la sustentabilidad del agua, al igual que, los bajos costos de inversión son las bondades de los dispositivos superficiales de relaves espesados. Durante el procesamiento de espesamiento los relaves transitan por los espesadores en donde los sedimentos se sitúan en el fondo para ser movidos posteriormente a una superior viscosidad, para finalmente ser depositados en el área de disposición. Gran cantidad de líquido es extraída del nivel superior del espesador y retornada a la planta.

Según Meggyes (2008), “la principal diferencia en cuanto a la filosofía en el manejo de relaves convencionales, y el de los relaves espesados, radica en que en los sistemas de disposición de relaves convencionales las propiedades son fijadas por la planta” (p.57), es por ello que todos los muelles de aislamiento, estructuras de supervisión, métodos de traslado, etc., son delineados en función de las especificaciones de sus características; Por su parte en los sistemas de disposición de relaves espesados, los elementos son creados para responder a la topografía de la zona que este en consonancia con el entorno.

### **1.3.2.2. Análisis FODA.**

Para (Matriz foda, 2019) esta “es una herramienta de análisis que puede ser aplicada a cualquier situación, individuo, producto, empresa, etc., que esté actuando como objeto de estudio en un momento determinado del tiempo” (p.33). El método es ampliamente utilizado en los procesos de diagnóstico situacional o en los procesos de reingeniería como método para tomar una radiografía de la situación de estudio.

FODA es un acrónimo que significa:

- F: fortalezas
- O: oportunidades

- D: debilidades
- A: amenazas

También se conoce como DOFA (mismo significado iniciales que FODA) y SWOT (por sus siglas en inglés Strengths, Weakness, Opportunities, y Threats). Según lo descrito en el sitio web matriz FODA (2019), se describe el significado de todas las categorías que componen este diagrama:

- **“Fortalezas:** son las capacidades especiales con que cuenta la empresa, y que le permite tener una posición privilegiada frente a la competencia. Recursos que se controlan, capacidades y habilidades que se poseen, actividades que se desarrollan positivamente, etc.” (p.78).
- **“Oportunidades:** son aquellos factores que resultan positivos, favorables, explotables, que se deben descubrir en el entorno en el que actúa la empresa, y que permiten obtener ventajas competitivas” (p.78).
- **“Debilidades:** son aquellos factores que provocan una posición desfavorable frente a la competencia, recursos de los que se carece, habilidades que no se poseen, actividades que no se desarrollan positivamente, etc.” (p.78).
- **“Amenazas:** son aquellas situaciones que provienen del entorno y que pueden llegar a atentar incluso contra la permanencia de la organización” (p.78).

Con los resultados del estudio será posible plantearse estrategias para ampliar los fuertes y cultivar las coyunturas, al tiempo que se diseñan estrategias para mitigar las debilidades y amenazas.

### **1.3.2.3. Diagrama causa – efecto. Método de Ishikawa.**

Esta herramienta también como bosquejo de “espina de pescado” fue ideada gracias al Dr. Kaoru Ishikawa y utilizada por primera vez en 1952. Según (Aiteco, 2019) “es una herramienta desarrollada para facilitar el análisis de problemas y sus soluciones en temas como la calidad de los procesos, los productos y servicios” (p, 44). El método radica en concretar las dificultades (efecto) y posteriormente determinar las implicaciones (orígenes) que influyen la situación. Igualmente, se le llama:

## Diagrama Causa – Efecto

### Diagrama de espina de Pescado.

Para elaborar este esquema se deben seguir los pasos mencionados a continuación:

- Consolidar equipos de trabajo multidisciplinarios.
- Iniciar desde un plano en blanco. Para completar desde el comienzo.
- Esbozar de forma resumida la problemática (el empleo de la estrategia de los 5w+2h nos es indispensable).
- Determinar las tipologías donde se cataloguen el origen de la problemática. Comúnmente se enmarcan en las 4M (máquina, mano de obra, método y materiales).
- Precisar el factor de origen, a través de tormenta de ideas, tomando en consideración las clases y tipos de clases halladas, para ello el capital humano debe precisar cada clasificación, es aquí donde las causas se localizan en las espinas.
- Cuestionar dos veces el porqué de cada factor generador, a través del método de los cinco por qué. (Progressalean, 2019)

El esquema Ishikawa es una estrategia de fácil aplicación para detectar problemas (causa) y sus consecuencias (efectos), facilitando recoger diversas perspectivas sobre “posibles causas que generan el problema Es una técnica que propicia la participación e incrementando el conocimiento de los participantes sobre el problema que se estudia. Sin embargo, no es una herramienta para buscar soluciones, se utiliza para analizar y priorizar las causas” (p.55).

Como nos indica Aiteco (2019) aplicación tiene algunas ventajas como:

- Enfoca al grupo de trabajo en el problema
- Guía los esfuerzos hacia el descubrimiento de las causas del problema
- Impulsa la participación del equipo proyectando el conocimiento cada uno
- Facilita la evaluación de la causa potencial de un problema

Por otro lado (ITCILO, 2019), también presenta algunas desventajas como:

La simplicidad de un diagrama de espina de pescado puede representar tanto una fuerza como una debilidad. Una debilidad, porque la simplicidad de este tipo de diagrama puede dificultar la representación de la naturaleza tan interdependiente de problemas y causas en situaciones muy complejas. A menos que no se disponga de un espacio suficientemente grande como para dibujar y desarrollar el diagrama, puede ocurrir que no se cuente con las condiciones necesarias para ahondar en las relaciones de causa-efecto como sería deseable (p.23).

#### **1.3.2.4. Análisis costo – beneficio**

Antes de abordar el concepto de análisis costo- beneficio, definiremos los términos que componen esta herramienta. En primer lugar, se entiende como costos al “gasto económico que representa la fabricación de un producto o la prestación de un servicio” (p.57), por ejemplo:

- Inversión
- Capital de trabajo
- Mano de obra
- Materiales
- Combustibles

Luego tenemos los beneficios que en términos sencillos, son los ahorros, ingresos y bienestar social que se obtiene de un proyecto. Como expresan Smith, Carroll y Ashford (1995), los beneficios se terminan siendo medidos en términos de desempeño y satisfacción social y económica. Entre algunos ejemplos podemos mencionar:

- Ingresos por venta de productos o venta de servicios.
- Comisiones por ventas.
- Recuperación de valores residuales.
- Ahorro en mano de obra (Ej. proyecto automatización)
- Ahorro en consumo de energía (Ej. tecnologías eficientes)
- Ahorro en gastos de administración/ supervisión (Ej. control automático)

Por su parte, (Wakefield, 2012) manifiesta que en el caso específico de proyectos está “constituido por un conjunto de procedimientos que proporcionan las medidas de rentabilidad del proyecto mediante la

comparación de los costos previstos con los beneficios esperados al llevarlo a cabo” (p.367), haciendo extrapolación en términos de la representación monetaria de un plan de acción y sus impactos. Habiendo formulado el curso de acción de un proyecto se evalúan y comparan los costos, beneficios, y otros factores para luego plantearse si ¿el beneficio que ofrecerá el proyecto vale la pena el gasto? (Snell, 1997). Luego, se combinarán los resultados de este análisis con aspectos como la ética en los trabajadores, la confianza, las contribuciones jurídicas y la fidelidad del consumidor como aporte necesario en la asertiva toma de decisiones (Sociedad Latinoamericana para la Calidad, 2000).

Igualmente, la Sociedad Latinoamericana para la Calidad nos indica seis pasos para guiarnos en el uso esta herramienta:

- Como primer paso se debe realizar una lluvia de ideas sobre factores que se relacionen con cada una de sus decisiones.
- Establecer los costos que se relacionen con cada elemento.
- Determinar algunos exactos como la mano de obra mientras que otros se estimaran.
- Luego se establecerá los beneficios en dólares para cada decisión.
- Poner las cifras de los costos y beneficios totales en la forma de una relación donde los beneficios son el numerador y los costos son el denominador: beneficios / costos.
- Y por último se confronta el impacto del costo-beneficio para la planificación estratégica.

#### **1.3.2.5. Métodos para el análisis costo – beneficio**

Existen infinidad de estrategias a ser empleados en la determinación de beneficios de un proyecto y determinar su rentabilidad y factibilidad. Dentro de este abanico de opciones, las que ofrecen resultados más precisos son aquellas que consideran dentro de sus evaluación el tiempo y el valor del dinero a través del mismo. Tomando lo descrito por la Sociedad Latinoamericana para la Calidad (2000), y en virtud de las características propias de los avances de automatización se considerarán tres herramientas o indicadores económicos:

#### **Período de Devolución (PD)**

Es el periodo de tiempo en el cual se espera recuperar la inversión inicial de un proyecto de inversión de capital, es decir, devolución. Para la Sociedad Latinoamericana para la Calidad (2000) “es el tiempo requerido para recuperar el monto inicial de una inversión de capital (Sociedad Latinoamericana para la Calidad, 2000). Este indicador también es conocido como periodo de recuperación de la inversión (PRI)” (p.578). El cómputo es sencillo y como nos reseña el portal web Gestipolis (2019), se realiza como se explica a continuación:

$$PD = Z * \frac{Fz}{Fa}$$

Dónde:

Z = último periodo negativo

Fz = valor absoluto de último flujo de caja negativo acumulado.

Fa = valor del flujo de caja del siguiente periodo

### **Valor presente neto (VPN)**

Es uno de los indicadores más utilizados para la evaluación económica de proyectos de inversión de capital. El VPN sirve para determinar si una inversión cumple el objetivo de maximizar la inversión.

$$VPN = -I_0 \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + k)^t}$$

De acuerdo a (Vaquiro, 2019)

“I<sub>0</sub> = inversión inicial

F<sub>t</sub> = es la diferencia entre ingresos y gastos que esperados durante la vida útil de un proyecto de inversión.

k = tasa de descuento. Es la tasa de retorno requerida sobre una inversión que refleja la oportunidad perdida de gastar o invertir en el presente

n = número de periodos.

El resultado del VPN puede ser un valor positivo indicando que la empresa tendrá un incremento en su inversión, negativo indicando que la empresa reducirá su riqueza o cero lo que afirma que el monto no modificará su valor (THE TIIE, 2019).

### **Tasa de interna de retorno (TIR)**

Para (Restrepo, 2017) la regulación requerida para el retorno interno “es la tasa de interés o rentabilidad que genera un proyecto. Y se encarga de medir la rentabilidad de una inversión. Esto quiere decir, el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá esta, para los montos que no hayan sido retirados del proyecto” (p.39). La misma está estrechamente ligada al indicador del Valor Presente Neto (VPN), y se determina de la siguiente forma:

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = 0$$

Donde,

$I_0$  = inversión inicial

$F_t$  = es la discrepancia de las entradas y egresos que esperados durante la vida útil de los propósito de proyectos.

$n$  = número de periodos

El resultado del cálculo del TIR puede presentar tres escenarios. Primero, si el TIR es mayor a la variable  $k$  del VPN se acepta la inversión. Luego, si es igual a  $k$ , se debe evaluar e implementar mejoras para proceder con la inversión. Por último, si el valor del TIR es menor a  $k$  se debe rechazar la inversión (Restrepo, 2017).

## **1.4. Formulación del problema.**

### **1.4.1. Problema general.**

¿De qué manera la automatización del proceso de espesamiento de relave final mejora la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?

### **1.4.2. Problemas específicos.**

¿De qué manera la elaboración de un diagnóstico sobre la situación actual de operación de los espesadores de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?

¿De qué manera la selección de los elementos (equipos, instrumentos, sensores y componentes) para la automatización del proceso de espesamiento de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?

¿De qué manera el diseño e implantación un sistema de automatizado para el proceso de espesamiento de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?

¿De qué manera la realización de la evaluación costo beneficio antes y después de la automatización del proceso de espesamiento de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?

### **1.5. Justificación.**

Organizaciones e industrias de todos los sectores productivos están enfocados en obtener un alto desempeño en la dinámica operacional que optimice la calidad de los productos y servicios, sobre la base de sus políticas, funciones, misión y visión organizacional, dentro de las cuales la rama de la minería se hace presente en estas iniciativas y estrategias por alcanzar mejoras continuas que potencien sus procesos productivos. La planta concentradora de cobre objeto de estudio no es una excepción en materia de buscar incremento en sus beneficios con producción dentro de los estándares de calidad, procesos eficientes y con seguridad para sus trabajadores, ambiente y terceros. Por lo cual, con la automatización del proceso de espesamiento de relave final con la ejecución de engranajes técnicos se espera optimar la eficiencia en la recuperación de agua y porcentajes de sólidos, e incrementar la seguridad en las operaciones.

Esta mejora en el proceso de operación de espesamiento de relave final, optimizará la recuperación de altos porcentajes de sólidos y garantizará valores de turbidez dentro de los parámetros en el agua de proceso, y mejora las condiciones operacionales, ofreciendo más seguridad a los operadores. Por otro lado, reducirá el uso de energía, la utilización de reactivos (floculante) y prolongará la vida útil de los equipos. Esto se traduce en ahorros económicos en primer lugar al hacer un uso más eficiente de la energía (entre un 5 a 10%) lo que puede alcanzar hasta los 2 millones de dólares anuales en ahorro por este concepto considerando la experiencia de países como EEUU, Corea del Sur, China, México, Argentina, o Chile (Barrios, 2014). Igualmente el menor requerimiento de reactivos, y la disminución en la tasa de mantenimiento, reparación y reemplazo de piezas y equipos se reduce el gasto por esta naturaleza en las rutinas de la organización.

En lo social, los relaves son desechos del proceso minero y como tal son insumos tóxicos potencialmente dañinos para la armonía del medio ambiente y contraproducentes para la integridad de los individuos (Cruzado & Bravo, 2010), representando un gran peligro para el medio ambiente y para las comunidades. Por lo tanto, el tratamiento óptimo de los mismos es fundamental para garantizar o mitigar la posibilidad de una afectación negativa al medio ambiente. Por otro lado, del proceso, de acuerdo a los lineamientos de ley, el agua tratada es empleada para la agricultura o como materiales de construcción (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2012).

## **1.6. Hipótesis.**

### **1.6.1. Hipótesis general.**

Si se automatiza el proceso de espesamiento de relave final, entonces mejorará la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018.

### **1.6.2. Hipótesis Específicas**

Si se realiza un diagnóstico sobre la situación actual de operación de los espesadores de relave final, entonces nos permitirá tomar decisiones correctas para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.

Si se seleccionan elementos (equipos, instrumentos, sensores y componentes) para la automatización del proceso de espesamiento de relave final, entonces podremos tomar medidas correctivas para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.

Si se realiza diseño e implantación un sistema automatizado para el proceso de espesamiento de relave final, entonces nos permitirá mejorar la producción en el proceso de espesamiento de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.

Si se realiza la evaluación costo beneficio antes y después de la automatización del proceso de espesamiento de relave final de la planta concentradora de cobre, entonces determinaremos el beneficio en la mejora de la producción de la planta, en el año 2018.

## **1.7. Objetivos de la Investigación.**

### **1.7.1. Objetivo general.**

Automatizar del proceso de espesamiento de relave final para mejorar la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018.

### **1.7.2. Objetivos específicos.**

Diagnosticar y describir el proceso de operación de los espesadores de relave final para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.

Seleccionar los elementos (equipos, instrumentos, sensores y componentes) para la automatización del proceso de espesamiento de relave final para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.

Diseñar e implantar un sistema automatizado para el proceso de espesamiento de relave final para mejorar la producción de la planta concentradora de cobre en el año 2018

Evaluar y comparar los resultados del costo beneficio antes y después de la automatización del proceso de espesamiento de relave final en la planta concentradora de cobre para evidenciar la mejora en la producción en el año 2018

# CAPÍTULO II

## II. MATERIAL Y MÉTODO

### 2.1. Tipo y diseño de investigación

#### 2.1.1. Tipo de investigación.

En este estudio se utilizó un enfoque mixto debido la profundización y combinación de los métodos tanto cualitativos como cuantitativos, ya que según lo señalado por Bernal (2010), este enfoque brinda una mejor comprensión del problema y mejora el abordaje por parte de los investigadores. Permitiendo utilizar de forma creativa la combinación de ambos enfoques, utilizando diferentes técnicas e instrumentos de recolección de datos, lo cual contribuye en alcanzar deducciones certeras con el medio.

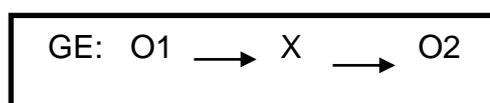
A su vez el tipo de investigación utilizado fue descriptivo, porque que su finalidad fue la exploración y fortalecimiento de los conocimientos poniendo en práctica los saberes adquiridos para el crecimiento investigativo científico y mejoras de los procesos. Especificando los elementos, particularidades y matices importantes de los individuos, equipos y procedimientos que fueron objeto de análisis (Hernández, 2003, Pág. 117).

#### 2.1.2. Diseño de la investigación.

Se categoriza como descriptivo pre-experimental, para lo cual se abordó el estudio y análisis de las variables: Automatización del proceso de operación de los espesadores de relave final y Mejorar la Producción en la Planta Concentradora de Cobre para el año 2018.

#### 2.1.3. Métodos de Investigación

Para realizar este proyecto de investigación se tomó en cuenta el método experimental. Este método nos permite definir por qué no se tiene grupo de control es decir de comparación, sólo se aplicarán los instrumentos en una única vez a la muestra de estudio, mediante mediciones periódicas aplicadas antes y después sobre la variable dependiente. (Hernández, 2003). Para lo cual el diseño de la investigación quedó representado con el siguiente esquema diagramado de la siguiente forma:



En donde:

GE: Grupo experimental.

O1: Representa las mediciones antes de la automatización (Producción de relaves)

O2: Representa las mediciones después de la Aplicación de los instrumentos

X: propuesta (automatización del proceso de espesamiento de relaves)

## **2.2. Población y Muestra.**

### **2.2.1. La población.**

Para este estudio la población lo conformarán trabajadores del área operaciones (8) y los procesos de espesamiento de relaves de la planta concentradora de cobre durante los 8 meses de enero -agosto del 2018.

### **2.2.2. La muestra.**

Integrada por:

- 2 Trabajadores de operaciones (Jefe de operaciones y Jefe de mantenimiento), los cuales fueron seleccionados mediante un muestreo no probabilístico de manera intencional.
- En el tratamiento de agua de reboce del overflow de los espesadores la muestra de turbidez (NTU) y el caudal de agua recupera (M<sup>3</sup>/H) se tomará a través de los instrumentos de campo y sensores.
- En el proceso de recuperación de relave en la descarga de underflow la muestra de densidad, % sólido y producción de relaves (tms) se tomará a través de los instrumentos de campo y sensores.
- El parámetro de operación de la unidad hidráulica de los espesadores el torque que genera las rastras.
- Las fases de espesamiento del espesador nivel interface de aguas clara y cama.
- Consumo, dosificación, dilución y consistencia del floculante PHP20.
- La Producción de aguas y relaves.

## **2.3. Variables y operacionalización.**

### **2.3.1. Variable independiente.**

Automatización del proceso de operación de los espesadores de relave final

### **2.3.2. Variable dependiente.**

Mejorar la producción en la Planta Concentradora de Cobre

### 2.3.3. Operacionalización.

Tabla 2. Operacionalización de variables

Variable	Definición	Objetivo	Dimensión	Indicadores	Técnicas
<b>Independiente:</b> AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE OPERACIÓN DE LOS ESPESADORES DE RELAVE FINAL	La automatización de los procesos productivos se establece como una herramienta fundamental que permite a las empresas un desarrollo propio, dinámico y competitivo, facilitando la relación entre las diferentes áreas de la organización o empresa	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diagnosticar y describir el proceso de operación de los espesadores de relave final para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, para el año 2018.</li> <li>2. Seleccionar los elementos (Equipos, instrumentos, sensores y actuadores) para la Automatización del proceso de espesamiento de relave final en la planta concentradora de cobre para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, para el año 2018</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Pasos y etapas en el proceso de operación</b></li> <li>• <b>Selección de Tecnología.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Función de los dispositivos, entradas y salidas</li> <li>• Pasos en el proceso</li> <li>• Características de Operación</li> <li>• Características de los Equipos</li> <li>• Rango de Operación</li> <li>• Rango del Costo de los equipos a utilizar.</li> <li>• Características de selección</li> <li>• Rendimiento y utilidad</li> <li>• Valores de utilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrevistas a los jefes de operadores y encargados de mantenimiento del proceso</li> <li>• Observación directa (Hoja de Inspección)</li> <li>• Técnica de fichaje de fuentes bibliográficas</li> </ul>

Variable	Definición	Objetivo	Dimensión	Indicadores	Técnicas
<b><i>Independiente:</i></b> AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE OPERACIÓN DE LOS ESPESADORES DE RELAVE FINAL	La automatización de los procesos productivos se establece como una herramienta fundamental que permite a las empresas un desarrollo propio, dinámico y competitivo, facilitando la relación entre las diferentes áreas de la organización o empresa	3. Diseñar e implementar un sistema de automatización en el proceso de espesamiento de relave final de cobre para mejorar la producción de la planta concentradora de cobre de la para el año 2018	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Dispositivos que intervienen en el proceso (sensores, transductores, variadores, etc.)</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variables a medir, controlar y monitorear</li> <li>• Secuencias y relaciones lógicas de las operaciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema experto de espesadores de relave</li> </ul>
<b><i>Dependiente:</i></b> MEJORAR LA PRODUCCIÓN EN LA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE	Mejorar el proceso de producción de la planta de cobre	4. Evaluar y comparar los resultados del costo beneficio antes y después de la automatización del proceso de espesamiento de relave final en la planta concentradora de cobre para evidenciar la mejora en la producción para el año 2018	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Evaluación de Resultados</b></li> <li>• <b>Parámetros de control</b></li> <li>• <b>Comparación de Costos</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lenguaje de programación del automatismo.</li> <li>• Diagrama de flujo de programación a lenguaje de programación</li> <li>• Revisión y pruebas del sistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ficha de control</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

## **2.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos, validez y información.**

Según (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014) “recolectar datos consiste en elaborar un plan detallado de procedimientos que nos conduzcan a reunir datos con un propósito específico” (p.195). Esta concepción permite establecer lo siguiente:

### **2.4.1. Fuentes de información e informantes.**

Trabajadores del Área de Operaciones, Fuentes bibliográficas y revisión teórica sobre las variables al objeto de estudio.

### **2.4.2. Técnica de recolección de datos.**

Se empleó la técnica un guion para entrevista estructurada, y la observación directa para la toma registro de los hechos.

### **2.4.3. Instrumentos de recolección de datos.**

Como instrumento se utilizó el guion de la entrevista y la ficha de observación por medio de una hoja de cotejos (hoja de inspección) de datos, para realizar la observación del proceso de producción, turbidez del agua, recuperación del agua, sólidos de relaves. Para los sólidos se utilizará el densímetro, que es un instrumento para determinar la densidad de un líquido sin evaluar antes su masa y volumen. Para la recuperación del agua se realizará mediante el flujómetro y la turbidez mediante el turbidímetro.

### **2.4.4. Validez y confiabilidad de instrumentos.**

Los datos se procesaron mediante el programa Excel, este facilitará la sistematización en tablas dinámicas y gráficas, a su vez garantiza la veracidad del instrumento con la aplicación **Alfa de Cronbach**. Permitiendo dilucidar las conclusiones de la investigación, y comprobación de la hipótesis de investigación.

## **2.5. Procedimiento para la recolección de datos.**

La sistematización que se siguió en la recogida de los datos fue la toma de datos de las muestras, medición de los parámetros de operación de los espesadores de relave para determinar las potencialidades y carencias del estudio y así evaluar la aprobación que presentaría en la organización. Los datos fueron recolectados utilizando la hoja de cotejo de datos de la observación la cual se realizará con el siguiente proceso:

### **Producción de relaves.**

- Se realizará la evaluación con el Densímetro cada 2 horas.
- Se realizará la evaluación con la Balanza Marcy.
- Se registrará en la hoja de cotejo de datos.

### **Recuperación del agua.**

- Se realizará la evaluación con el flujo metro.
- Se registrará en la hoja de cotejo de datos.

### **Turbidez.**

- Evaluación de la turbidez cada 2 horas con el turbidímetro.
- Registrar en la hoja de datos

### **Sistema experto**

- Evaluación del proceso de espesamiento
- Evaluación costo-beneficio

Se realizaron cuadros con los valores obtenidos de los parámetros de operación de los espesadores de relave, esgrimiendo la información en matrices, posteriormente se tabularon los resultados derivados por medio de cuadros estadísticos donde se denota el nivel porcentual de cada uno. Considerando cada gráfico se efectuó la representación visual de estos. Finalmente se abordaron las conclusiones, recomendaciones y consideraciones que fundamentan las mejoras futuras del proyecto y tener una visión holística de la meta.

## **2.6. Criterios éticos**

Los criterios éticos que se tomarán en cuenta para la investigación son los determinados por Noreña, Alcaraz-Moreno, Rojas y Rebolledo-Malpica (2012) que a continuación se detallan:

*Tabla 3. Criterios éticos de la investigación*

<b>CRITERIOS</b>	<b>CARACTERÍSTICAS ÉTICAS DEL CRITERIO</b>
<b>Consentimiento</b>	Los participantes estuvieran de acuerdo con ser

<b>informado</b>	informantes y reconocerán sus derechos y responsabilidades.
<b>Confidencialidad</b>	Se les informará la seguridad y protección de su identidad como informantes valiosos de la investigación.
<b>Observación participante</b>	Los investigadores actuarán con prudencia durante el proceso de acopio de los datos asumiendo su responsabilidad ética para todos los efectos y consecuencias que se derivaron de la interacción establecida con los sujetos participantes del estudio.

Fuente: Elaborado en base a: Noreña, A.L.; Alcaraz-Moreno, N.; Rojas, J.G.; y Rebolledo-Malpica, D. (2012). Aplicabilidad de los criterios de rigor y éticos en la investigación cualitativa. *Aquichan*, 12(3). 263-274. Disponible <http://aquichan.unisabana.edu.co/index.php/aquichan/article/view/1824/pdf>

## 2.7. Criterios de rigor científico

Igualmente, los criterios de rigor científico que se tomarán en cuenta para la investigación son los determinados por Noreña, Alcaraz-Moreno, Rojas y Rebolledo-Malpica (2012) que a continuación se detallan:

### a) **Credibilidad mediante el valor de la verdad y autenticidad**

Conllevarán a los resultados de las variables observadas y estudiadas mediante el reporte de los resultados sean reconocidos como verdaderos por los participantes; permanentemente se ejecutará la observación de las variables en su propio escenario y; donde se procederá a detallar la discusión mediante el proceso de la triangulación.

### b) **Transferibilidad y aplicabilidad**

La obtención de los resultados generará valiosa información para la generación del bienestar organizacional mediante la transferibilidad.

Se detallará el procedimiento desde el contexto donde se ejecutará la investigación incluyendo quienes serán los participantes en la investigación. Con lo referido a la recogida de los datos se determinará mediante el muestreo teórico, ya que se codificará y analizará de forma inmediata la información proporcionada. Por último, se procederá a la recogida exhaustiva de datos mediante el acopio de

información suficiente, relevante y apropiada mediante el cuestionario, la observación y la documentación.

**c) Consistencia para la replicabilidad**

Se tendrán los resultados a partir de la investigación mixta. Para determinar la consistencia de la investigación se efectuará la triangulación de la información (datos, investigadores y teorías) permitiendo el fortalecimiento del reporte de la discusión. El cuestionario a emplear para el recojo de la información será certificado por evaluadores externos para autenticar la pertinencia y relevancia del estudio por ser datos de fuentes primarias. Se detallará la coherencia del proceso de la recogida de los datos con su respectivo análisis e interpretación de los mismos, mediante el uso de los enfoques de la ciencia (empírico, crítico y vivencial).

**d) Confirmabilidad y neutralidad**

Los resultados que se determinen de la investigación tendrán veracidad en la descripción. La veracidad radicará en que los resultados serán contrastados con la literatura existente; con investigaciones de los contextos internacional, nacional y regional que tengan similitudes con las variables estudiadas con una antigüedad de cinco años.

**e) Relevancia**

Se investigará siempre con el propósito de alcanzar el logro de los objetivos planteados para la obtención de un mejor estudio de las variables y su amplia comprensión.

# CAPÍTULO III

### **III. RESULTADOS**

#### **3.1. Diagnóstico de la Planta Concentradora Objeto de Estudio.**

##### **3.1.1. Información general**

El desarrollo de esta investigación se realizó con los datos de la Planta Concentradora de la Empresa Minera las Bambas que tiene una capacidad de diseño de 140 mil toneladas métricas de mineral procesado por día, El relave proveniente de los circuitos de flotación Rougher Scavenger y Cleaner Scavenger es depositado en los 02 espesadores de alta densidad de 80m de diámetro con una capacidad de 6810m<sup>3</sup>/h, El espesador de acción continua se alimenta con pulpa de 37% sólidos. Un sistema de accionamiento (drive) hidráulico gira los rastrillos a una velocidad de 0,05 rpm que guían la pulpa del underflow hacia el centro del cono de descarga. El underflow descarga 62% sólidos, es descargado por gravedad a través del canal de concreto de 3.5m de ancho y 1.5m de altura, se descarga por gravedad con una claridad no superior a 200 ppm. El agua recuperada aproximadamente 6500 m<sup>3</sup>/h es impulsado por las bombas centrifugas hacia las piscinas de agua de procesos, de donde se alimenta agua a la planta concentradora por gravedad, el sistema de espesamiento de relave final es operado por personal competente.

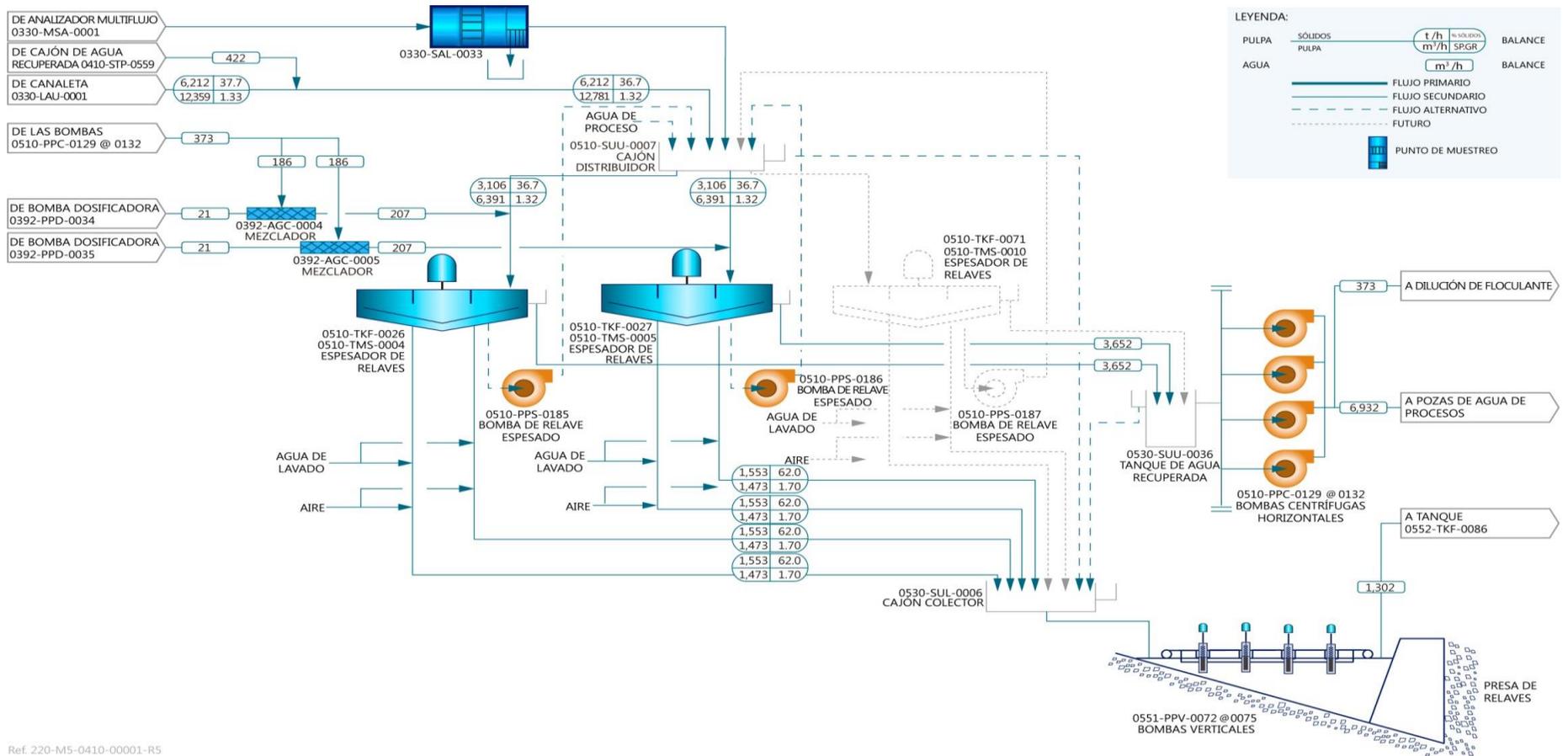
##### **3.1.2. Descripción del proceso de espesamiento de relave actual.**

El relave proveniente de los circuitos de flotación Rougher Scavenger y Cleaner Scavenger es depositado en el cajón de distribución SUU-0007. La operación de espesamiento se realiza por medio de 02 espesadores de alta densidad DELKOR de 80m con una capacidad de 6391m<sup>3</sup>/h. El espesador de acción continua se alimenta con pulpa de 37% sólidos (diseño), de un PH de entre 8,5 y 10. El floculante se agrega a una tasa de 20g por tonelada de sólidos a través de un (1) punto de dosificación en la tubería de alimentación y directamente por seis (6) puntos en el Feedwell. Un sistema de accionamiento (drive) hidráulico gira los rastrillos a una velocidad de 0,05 rpm que guían la pulpa del underflow hacia el centro del cono de descarga. En el evento de sobre torque en el drive, los cilindros, operados en forma independiente, levantan los rastrillos. El equipo está diseñado por un torque máximo de operación de 15 a 20% 10.000kNm, con nivel de cama de 5m. altura. El underflow descarga 62% sólidos (nominal) por gravedad depositado en el cajón SUL-0006, es descargado por gravedad a través del canal de concreto de 3.5m de

ancho y 1.5m de altura, con una pendiente de 2% hacia la presa de relaves y el líquido del rebalse (overflow) se descarga por gravedad, y su claridad no superior a 200 ppm en el cajón SUU-0036. El agua recuperada aproximadamente 6500 m<sup>3</sup>/h se utiliza para dilución de floculante y el resto se recircula hacia las piscinas de agua de procesos por medio de las bombas PPC-0129@0132. Cada uno con capacidad de bombero de 2500m<sup>3</sup>/h, de donde se alimenta agua a la planta concentradora por gravedad.

En la operación no siempre se toma las mejores decisiones del equipo y en el proceso, motivo por el cual presenta problemas y desviaciones de los parámetros de operaciones. Estos factores de desviación de operación incrementan el consumo de energía, reduce la vida útil de la presa de relave, presenta daño a los equipos del sistema del espesador, las unidades hidráulicas, bombas e incrementa el consumo de reactivos y costo.

Figura 4. Diagrama esquemático de los espesadores de relave.



Ref. 220-M5-0410-00001-R5

Fuente: P&ID de la Planta Concentradora Objeto de Estudio.

### **3.1.3. Parámetros de operación.**

#### **a. Torque.**

Para el espesador DELKOR el setting de la presión máxima está en 100 Bar (100%), siendo 75 Bar (50%) la presión de alarma, y la operación normal del espesador (bajo condiciones de diseño) debería trabajar entre 15 a 20 % de torque.

#### **b. Nivel de cama.**

Se cuenta con un sensor sonar marca hawk que tiene una sensibilidad de hasta 10 gramos de solido por metro cúbico. El rango de operación del espesador debe ser entre 4 a 5 metros de agua clara, esto para que la disposición del relave al caer del cono deflector sea en la zona floculada, si tenemos más de 5 metros la floculación será en el agua clara lo cual ocasionará que en el agua de proceso exista un exceso de floculante perjudicando a las otras áreas de proceso.

#### **c. Presión de cama.**

El rango del transmisor de presión se ubica entre 0 y 45 Psi/3bar/300Kpa.

#### **d. Dosificación de floculante.**

El floculante se agrega a una tasa de 20g por tonelada de sólidos a través de un (1) punto de dosificación en la tubería de alimentación y directamente por seis (6) puntos en el Feedwell.

#### **e. Dilución.**

El relave recepcionado en el cajón 0510-SUU-0007 debe estar a 37.5% de  $C_w$  de sólidos, en el cajón se debe diluir hasta 35% de  $C_w$  de sólidos, para que en el Vane Feedwell se llegue a una dilución de 12% de  $C_w$  de sólidos con la autodilución.

### **3.1.4. Otros sistemas componentes del espesamiento de relave.**

#### **a. Planta de floculante.**

El equipo que ha de proporcionar a Delkor es un sistema automático planta de floculante la preparación se efectúa en el taque 0392TKF0061 con una capacidad de 600 m<sup>3</sup>, la preparación se efectúa 1 kilogramos de floculante por 2 m<sup>3</sup> de agua proceso con una agitación mínima de una hora para la respectiva maduración del reactivo. El floculante preparado es transferido al tanque de almacenamiento el 0392TKF0020 por medio de las bombas 0392ZMF0004/07/08/11, y para luego ser dosificado a los espesadores, con las bombas 0392PPD0004/034@036. Antes de ingresar a los espesadores pasa por el proceso de la mezcla y dilución en (1 m<sup>3</sup> de

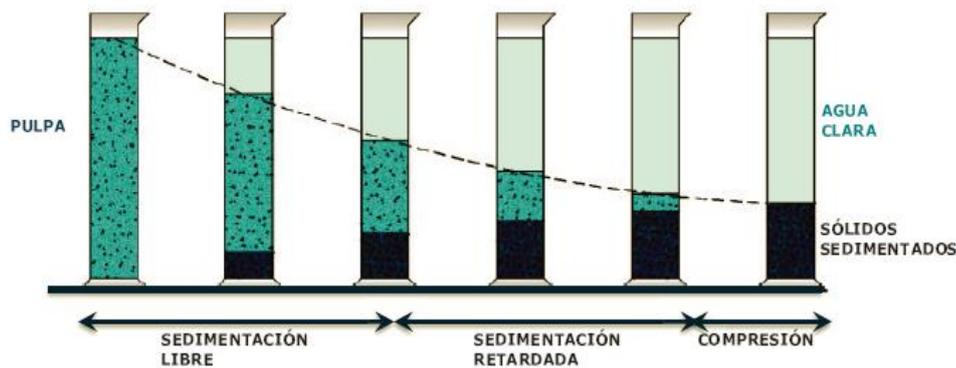
floculante por 10m<sup>3</sup> de agua proceso), con los mixer 0932AGC0004/0005. La dosificación de floculante es de acuerdo a la necesidad de operación. El floculante son polímeros de cadena abierta (hidrocarburo) con grupos cargados y pesos moleculares del orden de millones, las más comunes son las poliacrilamidas no iónicas

**b. Pruebas de sedimentación.**

Las pruebas de sedimentación nos permiten realizar en campo un test para evaluar la velocidad de sedimentación. Se realizan de 2 formas, una en la que se varia la concentración del floculante preparado y se mantiene la misma concentración de sólidos, en esta se evalúa la concentración optima de preparación.

En la segunda se modifica la concentración de sólidos en la pulpa y se utiliza la misma concentración del floculante preparado, esta para saber la dilución optima que se necesita en la pulpa.

*Figura 5. Prueba Sedimentación.*



Fuente: Manual operación espesador de relave Autotec

**c. Estación de balsas de la presa de relaves.**

La estación de balsas de la presa de relaves está ubicada en el interior de la laguna de aguas claras de la presa de relaves, a una altura de 3,985 msnm (aproximadamente). Esta estación cuenta con cuatro bombas verticales (0551-PPV-0072@0075), las cuales envían el agua de la laguna a una capacidad máxima de 4,500 m<sup>3</sup>/h hacia la estación re-elevadora.

**d. Estación re-elevadora.**

La estación re-elevadora está ubicada cerca de la presa de relaves, a una altura de 4,077 msnm aproximadamente). Esta estación cuenta con un tanque (0552-TKF-0086) de 1,200 m<sup>3</sup> de capacidad que recibe el agua que proviene de la estación de

balsas de la presa de relaves y de la estación booster No. 1, para luego enviarla mediante las bombas centrífugas horizontales (0552-PPC-0141@0144), una capacidad máxima de 4,500 m<sup>3</sup>/h hacia la estación booster intermedia No. 2.

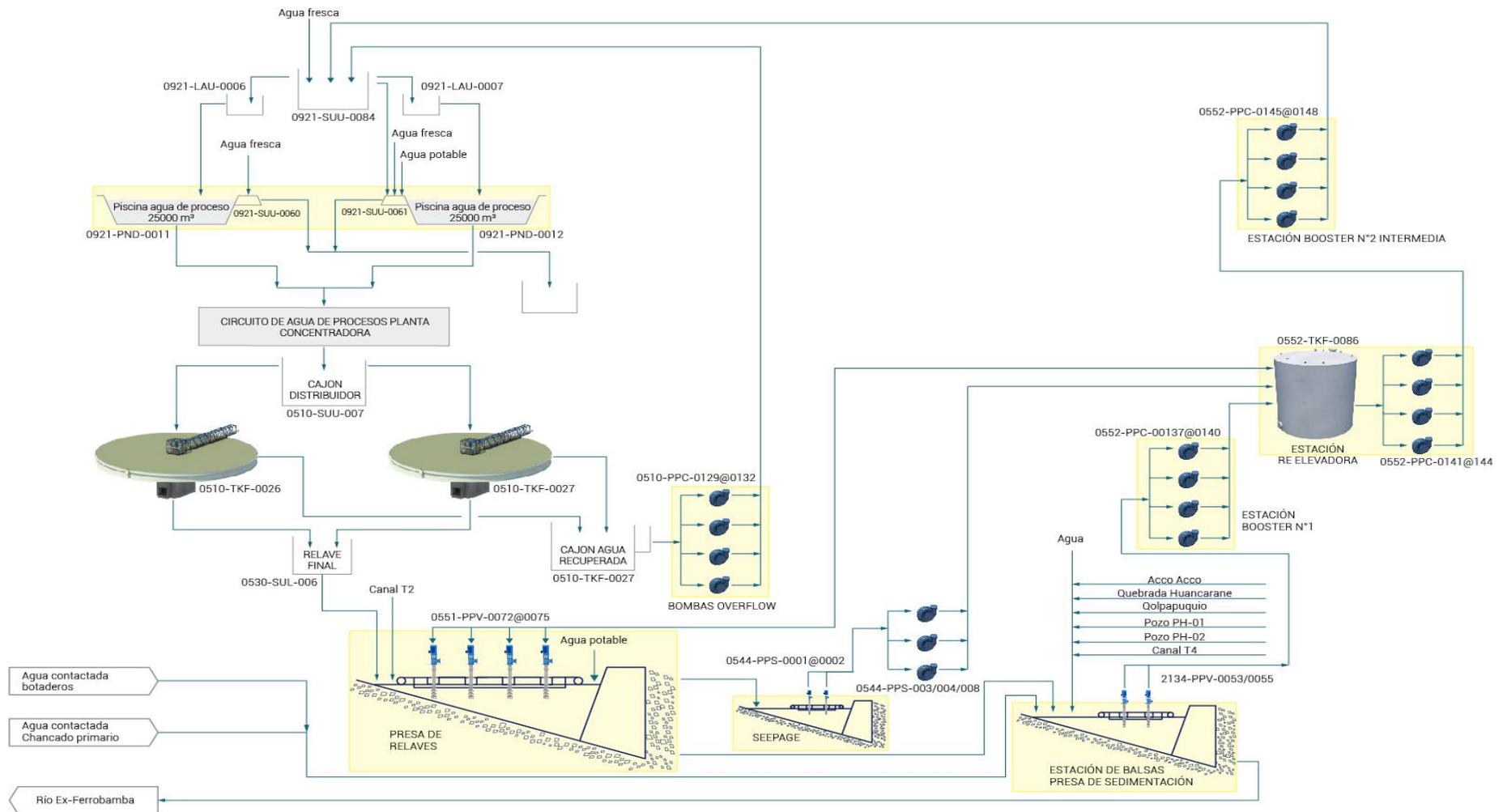
**e. Estación booster intermedia No. 2.**

La estación booster intermedia no. 2 está ubicada a una altura de 4,170 msnm y es alimentada por el agua proveniente de la estación re-elevadora, esta estación cuenta con cuatro bombas centrífugas horizontales (0552-PPC-0145@0148), las cuales elevan el agua proveniente de la estación re-elevadora hacia las pozas de agua de procesos.

**f. Piscinas de agua de proceso No. 11 y 12.**

Las 02 piscinas 0921PND0011/0012 de procesos de 25 000 m<sup>3</sup> de capacidad cada una, las piscinas están ubicadas a una elevación superior al concentrador de modo de alimentar de forma gravitacional a la planta concentradora. La alimentación de las piscinas es provista por el sistema de impulsión, que fusiona todas las aguas que se consideran de procesos para abastecer a las piscinas, adicionalmente las piscinas son alimentadas por agua recirculada desde los espesadores de relaves.

Figura 6. Diagrama esquemático del proceso de recuperación de Aguas.



Fuente: P&ID Planta Concentradora Objeto de Estudio

### **3.1.5. Análisis de la problemática**

#### **3.1.5.1. Entrevista al personal operador del proceso de Espesamiento final de relave.**

Para la obtención de información de referente a las condiciones del proceso de espesamiento final de relave, se diseñó e implemento una serie de preguntas dirigidas al personal operador y mantenedor de los equipos e instrumentos involucrados en el proceso (ver anexo 07). La misma consto de un libreto de 15 preguntas con las cuales se pudo conocer:

- La planta concentradora objeto de estudio cuenta con un Sistema de Control Distribuido (DCS) Invensys como cerebro de las operaciones de planta.
- De los procesos involucrados en el espesamiento final de relave, solo el sistema de protección del sistema hidráulico esta automatizado.
- La instrumentación de la planta trabaja bajo un régimen de alimentación eléctrica de 110 VAC.
- La comunicación de la instrumentación de la planta se realiza bajo protocolo Profibus y Obús.
- El sistema de control cuenta con reserva instalada (tarjetas de spare) para la conexión futura de señales de monitoreo y control.
- La planta no cuenta con sistemas dedicados a un proceso particular (por ejemplo BMS de hornos y calderas).
- Los equipos principales involucrados en el espesamiento final de relave son: espesadores, válvulas dardo, unidades hidráulicas, bombas de agua, motores eléctricos, válvula de descarga (cuchillas, pinch).
- Los instrumentos principales involucrados en el espesamiento final de relave son: sensor de interface, de torque, de presión de levante y giro, sensor de nivel de cajón de agua recuperada, presión de descarga, densímetro nuclear, flujómetros.

Según los datos proporcionados por el recurso humano en planta las variables normales y máximas de operación son:

- Ph : 10 a 11
- Nivel de interface: 3 a 5 metros
- Temperatura de motores 20 a 60°C

- Presión de descarga de relaves: 100 a 300 KPa
- Presión de descarga de bombas. 1350 Kpa promedio
- Flujos de descarga: condicionado al tonelaje procesado de 3000 a 6000 m<sup>3</sup>/Hr ambos espesadores
- % de sólidos de relaves. De 58 a 62 %
- Torque: 5 a 25
- Turbidez: 35 a 100 NTU
- Según la información suministrada por el personal de la planta, se requiere funciones automatizadas en el proceso tal que, sea más seguro y eficiente.
- Actualmente la operación del proceso de espesamiento final de relave se hace de forma manual en base a la experticia del operario de sala de control y de campo.
- Para los operadores las actividades de medición del nivel de interface, medición de turbidez del overflow, medición de torque, y medición del porcentaje de sólidos son las tareas de mayor dificultad.
- Los puntos críticos del proceso expresados por los operadores fueron: torque de espesadores, nivel de interface, densidad de relaves, y turbidez de agua recuperada.
- Como premisa para el diseño, los trabajadores de la planta expresaron que el sistema experto a implementar no debe ser un sistema dedicado, y que deberá integrarse al sistema de control existente.
- La dosificación de floculante se hace de forma manual en función de la experiencia de los operadores y de los parámetros preestablecidos.
- Hasta la fecha, no se tienen registros de accidentes o incidentes en el proceso de espesamiento final de relave.
- El plan de mantenimiento actual plantea mantenimiento correctivo cada seis meses y preventivos cada tres meses.
- Hasta la fecha, no se tienen registros paradas no programadas del proceso de espesamiento final de relave a causa de perturbaciones en el proceso.

### **3.1.5.2. Herramientas de diagnóstico**

#### **Identificación de puntos críticos con método causa – efecto.**

Los puntos críticos en el proceso de espesamiento de relaves se efectuó según el diagrama de Ishikawa, Es así que en el anexo 02 se muestran el diagrama con las principales causas que afectan a la deficiencia o desviación de los parámetros de Operación de los Espesadores de Relave, se encuentra en los métodos de operación, personal, máquinas y equipos, material (aguas y relaves). Como se detalla a continuación.

#### **Análisis FODA de planta concentradora objeto de estudio en el área de aguas y relaves.**

##### **a. Análisis de fortaleza.**

Considerando que las Fortalezas son los elementos positivos que posee la planta concentradora, se determinaron las siguientes fortalezas:

- La planta cuenta con un personal idóneo, capacitado y capaz de desempeñar las labores encomendadas con respecto a las áreas que desempeñan.
- Cuenta con maquinarias y equipos de excelente calidad lo cual brinda una mayor confianza en el desarrollo de las operaciones.
- Trabaja a pegado a la normativa vigente y los estándares establecidos de seguridad.
- Crear estrategias para optimizar la operación dentro de los parámetros de operación.
- Implementación de nuevos proyectos para optimizar la recuperación de agua de proceso y fresca.
- Interés por la gestión de seguridad y medio ambiente tanto a nivel nacional como internacional.
- El crecimiento empresarial para aumentar el índice de empleo y mantener las condiciones de inclusión laboral.
- Permanente inversión en tecnologías de información de punta como apoyo tecnológico para la gestión de la óptima operación de aguas y relaves.
- Adecuado clima laboral con una buena gestión del recurso humano.
- Existencia de política empresarial conducente a fortalecer y consolidar los procesos de operación.

- Se cuenta con capacidad económica, financiera para desarrollar proyectos e inversión, operacional y de infraestructura.
- En el área de aguas y relaves el desarrollo de trabajo es en equipo.
- Las políticas de la empresa con la seguridad, salud, medio ambiente y relaciones comunitarias.

**b. Análisis de oportunidades.**

Considerando las Oportunidades como elementos del ambiente que la planta concentradora objeto de estudio en el área de aguas y relaves que pueden ser aprovechadas para de sus metas y cumplimiento de sus objetivos; se han definidos y examinado las siguientes premisas:

- Asegurar la calidad y facilitar métodos de mejora continua.
- Facilitar la integración a nuevos mercados internacionales, a través de los convenios de libre Comercio.
- Mantenimiento de sistema democrático incide de manera positiva en la estabilidad económica, social, las alianzas estratégicas y convenios con las comunidades.
- La formalización empresarial que contribuye a aumentar la tasa de empleo y a mejorar las condiciones de inserción laboral.
- Innovadoras metodologías de formación al personal que labora en el área con desarrollo de cursos estratégicos con relacionados a la mejora continua de la operación.

**c. Análisis de debilidades.**

Las debilidades son elementos que nos pueden perjudicar en la realización de las operaciones de la empresa, e incluso lograr una disminución en la producción de recuperación de agua proceso afectando las operaciones de la planta concentradora y reduciendo la producción normal.

- Comunicación ineficiente entre las áreas operativas - administrativas y el área de recursos humanos que impide brindar un mejor servicio.
- Distribución inadecuada en cuanto a la infraestructura que dificultan el desarrollo de las actividades operativas y administrativas.
- Insuficiente relación armónica entre las áreas que conforman la planta concentradora.

- Deficiente personal de apoyo en el soporte de las áreas de Instrumentación y eléctricos.
- No se cuenta con un plan de capacitación estratégica dirigido al personal que permita contribuir con el logro de los objetivos del crecimiento de la empresa.
- Ineficiencia en el sistema de seguridad y salud ocupacional.
- Política remunerativa inferior al del mercado general según el rubro.
- Falta control de calidad.

**d. Análisis de amenazas.**

Considerando las Amenazas como los aspectos del ambiente que pudieran llegar a representar un peligro para el cumplimiento de los objetivos de las operaciones en el área de aguas y relaves, se han determinado y analizado las siguientes:

- Capacidad de bombeo de agua de proceso deficiente.
- No contar con una bomba de centrifuga horizontal de stand by.
- Capacidad Inadecuado de cajón de reboce.
- El consumo excesivo de Energía.
- Incremento en costo de mantenimiento correctivo y preventivo
- Fuga de aguas por los sellos mecánicos de las bombas.
- La continua presencia de espuma en los espesadores daña a los sellos mecánicos de las bombas de recuperación de agua de proceso.
- Reboce de agua proceso con turbidez de altos valores, afecta a los sellos mecánicos de agua las bombas centrifugas que alimenta el agua a las Piscinas.
- La descarga de los espesadores de relave con % sólidos 60.6 fuera de los parámetros de operación lo cual perjudica en la recuperación de agua de proceso y reduce la vida útil de la presa de relave.
- Política remunerativa del mercado más atractiva que la nuestra empresa, lo que puede ocasionar fuga de talentos del área.
- El encalichamiento de las tuberías metálicas del área.
- Tener escaso stop de agua fresca y proceso.

### 3.1.6. Situación actual de la variable dependiente

#### 3.1.6.1. Mediciones de parámetros operacionales y de producción previo la automatización.

A continuación, las tablas 4 muestran la información sobre los parámetros de operación y producción del proceso de relave de aguas tomadas entre enero y abril de 2018 previo la implantación del sistema experto:

Tabla 4. Operación de los espesadores de relave previo la automatización

Parámetros de Operación	Espesador	Espesador
	TKF-026	TKF-027
Horas de operación	12h	12h
Densidad de alimentación	1320g/L	1320g/L
Sólidos en la alimentación	37.4%	37%
Densidad de descarga	1620g/L	1630g/L
Promedio de % de sólidos descarga	60.14%	60.7%
Turbidez overflow	169ntu	170ntu
Flujo underflow	3000m <sup>3</sup> /h	2700m <sup>3</sup> /h
Flujo overflow	4074m <sup>3</sup> /h	4074m <sup>3</sup> /h
Tonelaje de descarga	2999TMH	2684TMH
Promedio torque de operación	18%	19%
Nivel de interface	4,5m	4,8m
Consumo total de floculante	380kg	380kg

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Discusión de resultados

#### a. ¿De qué manera la elaboración de un diagnóstico sobre la situación actual de operación de los espesadores de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?

Se obtiene un resultado favorable con la elaboración del diagnóstico de la situación actual de la operación de los espesadores de relave final, ya que, permitió tener un panorama de la filosofía de operación previa la automatización, las impresiones de los operadores y mantenedores de la planta, y un esquema general de cómo se comportan las variables de operación.

Por otro lado, se logró a identificar los puntos críticos en el operación de los espesadores de relaves gracias a la aplicación del diagrama de Ishikawa, el cual permitió identificar las causas que afectan a la deficiencia o desviación de los parámetros de operación de los espesadores de relave, que son los métodos de operación, personal, máquinas y equipos, material (aguas y relaves).

A través del diagrama causa – efecto se conoció que: la recuperación de % sólidos de relave y turbidez del agua de proceso con desviaciones de parámetros de operación normal sólidos bajos 60.6 % en la descarga de los espesadores, con turbidez altos 170 NTU del agua recuperada, en la recuperación de relave de 135470,8 tms/día, el volumen de agua recuperada 183261,5m<sup>3</sup>/día, el consumo de reactivo de 760 kilogramos de Floculante/día, la continua presencia de espuma en los espesadores, el reboce de agua proceso con turbidez de altos valores, afecta a los partes mecánicas de las bombas centrifugas, variación constante del mineral y granulometría, torques de rastras altos que afectan unidad hidráulica de los espesadores, de seguir con estos parámetros y condiciones de operación se incrementan los costos de producción al utilizar mayor cantidad de reactivos, energía y la disminución de la vida útil de los equipos y presa relave.

Esta información en conjunto de los resultados de la matriz FODA facilitó la identificación de puntos de atención dentro de las operaciones, en las cuales no siempre se tomaban las mejores decisiones por parte del equipo de operación y mantenimiento. Por este motivo se presentaban problemas en las condiciones de operación y desviaciones de los parámetros de operaciones.

Esta data de la condición actual de operación, permitió tomar la decisión de someter una propuesta de automatización de proceso de espesamiento de relave final en la planta concentradora de cobre considerando el requerimiento de los usuarios finales.

En este caso se demostró la hipótesis, ya que, se realiza un diagnóstico sobre la situación actual de operación de los espesadores de relave final, lo que permitió tomar decisiones correctas para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, para el año 2018.

**b. ¿De qué manera la selección de los elementos (equipos, instrumentos, sensores y componentes) para la automatización del proceso de espesamiento de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?**

Con la selección e identificación de los equipos, instrumentos y otros componentes principales que forman parte del sistema de espesamiento de relave y son necesarios para

la automatización se logró constatar que la planta cuenta con los equipos de campo necesarios para el proceso de automatización y que se cuenta con los elementos sensores y elementos finales de control requeridos para el buen funcionamiento de la nueva lógica de control.

La hipótesis referente a este apartado que comprobada, ya que, a través de los instrumentos y equipos seleccionados se podrá ejecutar cabalmente todas las instrucciones que requiere la nueva lógica de control para realizar las correcciones pertinentes al proceso y mejorar la producción de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.

**c. ¿De qué manera el diseño e implantación un sistema de automatizado para el proceso de espesamiento de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?**

Se logró desarrollar la automatización de los espesadores del relave en planta concentradora, para lo cual se procede a suministrar un software y servicios para un control avanzado completo, estándar, probado y de próxima generación. Esto permitió desarrollar una estrategia de control avanzado de deshidratación teniendo en cuenta los detalles específicos.

El sistema de control experto maximizará la recuperación de agua al maximizar el desbordamiento del espesante de los relaves. La densidad se localizara dentro de las limitaciones de la planta de rendimiento, par de espesante, densidad de flujo inferior, nivel de sedimentación, espesante, inventario de sólidos (presión) y turbidez de desbordamiento.

Con el sistema experto de espesamiento de relave final se ha tenido una mejora en los parámetros de la operación de los espesadores de relave final. Como se detalla a continuación en la recuperación de relave de 139343,0 tms/día, el volumen de agua recuperada 191871,0 m<sup>3</sup>/día, sólidos 62.1 % en la descarga de los espesadores, con turbidez 84 NTU del agua recuperada, el consumo de reactivo de 628.5 kilogramos de Floculante, con estos parámetros de operación se puede apreciar la mejora en la producción de aguas y relaves. La recuperación de relave con un incremento en la producción de relave toneladas métricas secas en 3% de 135470,8 tms/día a 139343,0 tms/día, la recuperación de agua de proceso del reboce de los espesadores se incrementa en 4% de 183261,5 m<sup>3</sup>/día a 191871,0 m<sup>3</sup>/día. Se logró demostrar la hipótesis que, con la automatización del proceso de espesamiento de relave final, tenemos una mejora en la producción de aguas y relaves, con los parámetros de operación dentro del rango o desviación permitida.

**d. ¿De qué manera la realización de la evaluación costo beneficio antes y después de la automatización del proceso de espesamiento de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?**

Se logró determinar costo – beneficio con la automatización del proceso de espesamiento de relave es atractivo para la organización, ya que, al optimizar el proceso de espesamiento de relave final dentro de los parámetros de operación, y mejorar la producción de aguas y relaves, se logró una reducción de costos en consumo de energía, reactivos, y mantenimiento de equipo significativos.

Al incrementar el bombeo de agua recuperada de los espesadores, se reduce las horas de bombeo del sistema de agua de proceso de presa relave las bombas centrifugas verticales de 2400 a 2325 horas y las bombas centrifugas horizontales 4753.7 a 4711.5 horas, con mejorar la recuperación de agua de proceso en los espesadores de relave se reduce las horas de bombeo del sistema de agua de proceso de la presa relave con los cual reducimos costo en el consumo de energía 5.430.407,00 kw/mes (\$.369.267,68) a 5.376.893,25 kw (\$. 365.628,74), una disminución en el costo de consumo de energía de \$. 3638.9 mensual.

En el mantenimiento de equipos de espesadores y bombas se observa una reducción, específicamente en mantenimiento correctivo, programado y mano de obra del personal directo y contratistas de \$. 273.074,49 a \$. 269.121,18 una reducción de costo de mantenimiento de \$. 3.953,31 mensual.

El consumo de floculante es variante se rige a las condiciones del mineral, la granulometría el mineral, el tipo de mineral y otros que son variantes en la operación de los espesadores de relave. Según el resultado en la medición del consumo de floculante la comparación del consumo antes de la automatización y con la automatización presenta una mejoría en la reducción. De 760 kg/día (\$. 2.857,6) a 728.5 kg/día (\$. 2.739,2) de floculante PHP 20. Con una reducción \$. 3.553,2 mensual.

Al automatizar el proceso de espesamiento de relave final se tendrá una reducción de costos en nuestra producción mensual de \$.11.145,4 y anual de \$.133.745,3. Esta reducción de costos generará incremento en las utilidades que percibirá la empresa.

Los procesos de control hoy en día en la industrialización han alcanzado la automatización de manera progresiva mediante los instrumentos de medición y control. El uso de dichos instrumentos ha tenido una mayor efectividad y vigilancia en los proceso los cual permite al operador contar con mayor capacidad de respuesta en tiempos reales obteniendo un proceso con menor variabilidad y un mayor control del proceso.

Según la hipótesis se realiza la evaluación costo beneficio de la automatización del proceso de espesamiento de relave final de la planta concentradora de cobre, y se logró determinar el costo beneficio para la mejora de la producción, para el año 2018.

### **Discusión de Resultados Nacional.**

A partir del hallazgo encontrado en la propuesta de automatización del proceso de espesamiento de relave final en la planta concentradora de cobre mejoró la producción, estos resultados guardan relación con los que sostiene Balta & Vásquez (2010), en su investigación **“diseño del sistema de control automático del proceso de retratamiento del relave en la unidad minera Orcopampa de la empresa Buenaventura”**, Se planteó el objetivo el diseño de la automatización más adecuada para el proceso de retratamiento del relave en la unidad minera Orcopampa. Dicha investigación concluyen que es de suma importancia las prácticas de campo cuantas veces sea necesario para lograr adquirir una mejor comprensión del sistema que se va a automatizar. Dicho proceso de automatización permite logro la recuperación del 95% de oro, lo que significa que 10 gramos por tonelada se recupera 9.5 gramos, dándonos más eficiencia en la recuperación del oro del mineral extraído, minimizando de esta manera el margen de errores, el tiempo de respuesta, y mejorando la producción. Por ello es acorde con lo que se halla en este estudio con respecto a mejorar la producción, en este caso la investigación desarrollada en los espesadores de relave, con la automatización se mejorará la producción de agua de proceso y una mejor comprensión del sistema experto de espesamiento realizar el muestreo continuo en campo de turbidez, densidad y % sólido, para corroborar los datos que da lectura el sistema experto de espesamiento.

A partir de los resultados de la propuesta de automatización del proceso de espesamiento de relave final en la planta concentradora de cobre se observa que mejoraría la producción, estos resultados guardan relaciono solo con que la recuperación de agua de proceso con el espesamiento de relave, así mismo optimizar nuestra recuperación de agua por la escases de agua en la zona sur por los problemas sociales que se tiene con las comunidades aledañas en los proyectos mineros, Escobar (2014), en la Tesis titulada **“estudio de recuperación de agua de relaves empleando la tecnología de espesamiento en las empresas peruanas de la región Tacna”**, Tacna. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, planteo realizar un estudio para la recuperación de aguas a partir de relaves de una planta de concentración de minerales en el sur del Perú. Entre los resultados obtuvieron excelentes resultados, con las cuales se pudieron dimensionar los espesadores,

junto con su capacidad, y poder predecir los resultados a futuro, y con lo que se pudo ver que con la aplicación de la tecnología de relaves espesados se puede recuperar agua de manera significativa.

Reológicamente los relaves espesados de cobre presentaron cizallamiento, como por ejemplo, se logró en una concentración de sólidos de 66%, y sin cizallar, se alcanza aproximadamente un 150Pa a valores próximos a 60Pa luego del cizallamiento mecánico externo.

### **Discusión de Resultados Internacional.**

A partir del resultado obtenido en la simulación de la propuesta de automatización del proceso de espesamiento de relave final en la planta concentradora de cobre mejoro la producción, estos resultados guardan relación con los que sostiene, Figueroa (2016), El 1er seminario de “**Control Avanzado y Optimización de Plantas de Procesamiento de Minerales, Atacama Valley E.I.R.L.**”, Chile, donde menciona que los sistemas expertos, que los desafíos de la minería es aumentar la producción y reducir costos, es por eso que para la implementación de un sistema experto en espesadores de relave se debe considerar; implementar módulos para cada espesador de relave (como por ejemplo alimentación de los relaves, nivel de agua clara, sistemas de rastras, descarga de sólidos; y establecer los objetivos de automatización, donde manifiesta que con el sistema experto se obtuvo un aumento de la descarga en 1%, en la planta procesadora los colorados de minera la escondida. Dentro de la automatización se busca los objetivos globales como; producción (T/h), recuperación final (%) flujo de agua recuperada (m<sup>3</sup>/h), además se puede incluir un sistema de dosificación inteligente de reactivos (colector, espumante, NaSH). Por ello es acorde en la automatización de proceso de espesamiento de relave se ha considerado las variables de operación nivel de agua clara, sistemas de rastras (torque), descarga de %sólidos, para diseñar la filosofía de operación de los espesad-ores, en el cual se ha tenido un resultado de mejora en la producción de agua y relave en los parámetros de operación en 1.3%.

## **3.3. Propuesta de investigación**

### **3.3.1. Fundamentación**

Para la presente investigación se propuso la automatización del proceso de espesamiento de relave final de la planta concentradora de cobre con el Sistema

Experto, para mejorar y optimizar la recuperación de % sólidos de relave y agua de proceso.

El sistema de control conduce secundariamente los datos de un procedimiento automatizado establecido. En palabras de (Travathan, 2006) “su objetivo es gobernar un sistema sin que el operador intervenga directamente sobre sus elementos. Este manipula valores de referencia y el sistema de control se encarga de transmitirlos al sistema controlado a través de los accionamientos de sus salidas” (p.87). Este sistema de monitoreo progresivo funciona, en general, con intervalos de frecuencia menor, denominadas señales y administra las actividades que conducen la intensidad de los módulos de potencia integrados.

Existen básicamente dos tipos distintos de sistemas aplicados para la supervisión de las operaciones en campo, los Sistemas de Control Distribuidos (DCS por sus siglas en inglés) y los Controladores Lógicos Programables (PLC por sus siglas en inglés). El primero era usado en el siglo pasado con fines netamente de procesamiento análogo, por su parte, el segundo tiene una usanza de función discreta (ceros y unos), más allá de esto en la actualidad paralelamente estos quipos se asemejan y pueden ser utilizados a la par indistintamente del proceso.

La operación semiautomatizada de este proceso, con carencia de señales monitoreo y supervisión de las variables de proceso supone grandes problemas para la empresa y sus operadores. Decisiones importantes se dejan a criterio de operadores expertos quienes al no tener parámetros de medición en tiempo real dosifican inadecuadamente la mezcla de floculante y realizan operaciones de control manual que terminan por ocasionar con cierta frecuencia que el producto este fuera de especificación. Esto aguas abajo ocasiona importantes situaciones problemáticas como:

- ✓ Producto fuera de especificación (agua de relave) con % de sólidos bajos y valores de turbidez del agua de reboce altos.
- ✓ Mayor consumo de química floculante.
- ✓ Reducción de la obsolescencia programada del equipamiento y daño a la integridad mecánica y estructural de la presa de relave, equipos del sistema del espesador, unidades hidráulicas, y sistema de bombeo.
- ✓ Flujo de recuperación de agua de proceso  $m^3/h$  deficiente en el reboce de los espesadores de relave.

- ✓ Mayor consumo de energía eléctrica al requerirse más horas de bombeo de agua desde la represa de relave
- ✓ Mayor gasto en labores de mantenimiento preventivo y correctivo de los recipientes, sistema de bombeo y estructuras civiles.
- ✓ Incremento de peligro en la integridad física del recurso humano, ambiente y terceros al verse comprometida la composición mecánica y estructural de los equipos, recipientes y estructuras civiles.

Considerando la situación problemática planteada, esta investigación propone automatizar el proceso de espesamiento de relave de la planta concentradora de cobre objeto de estudio como respuesta para el crecimiento de la producción de la organización al ofrecer al proceso y al operador las herramientas tecnológicas necesarias para monitorear y controlar el sistema de espesamiento de relave de forma automática. Esto en concordancia con Morales (2014) quien manifiesta que el sector minero de Perú busca la implementación de sistemas de control, especialmente aquellos que se encuentran diseñados bajo una arquitectura abierta que facilite la integración de diversos equipos para brindar una disponibilidad superior de los engranajes de creación, una adecuada gerencia de la energía y una supervisión periódica y sostenida de los procesos.

### **3.3.2. Objetivos de la propuesta**

El objetivo del espesamiento de relaves, es la recuperación de agua de las fracciones no valiosas de las etapas de flotación Rougher y Scavenger para su posterior recirculación a planta. Además, lograr una fracción de sólidos adecuada en la descarga del espesador para su posterior disposición. Esto conlleva a una optimización en el desempeño del espesador.

- Maximizar Recuperación de agua
- Fracción Sólidos Objetivo (~62%)
- Optimización desempeño del espesador
- Disminuyen horas de operación de los equipos, errores operacionales, incrementar la tasa de aseguramiento de la vida útil de los equipos al tener más garantías para el mantenimiento de la integridad mecánica de los equipos.

### **3.3.3. Desarrollo de la propuesta**

La presente propuesta tiene como propósito la automatización del proceso de espesamiento de relave final de la planta concentradora de cobre con el sistema experto. Para mejorar y optimizar la recuperación de % sólidos de relave y agua de proceso.

#### **3.3.3.1. Selección de elementos para la automatización del proceso de espesamiento final de relave.**

Los equipos principales involucrados en el proceso de espesamiento de final de relave son los siguientes:

- Cajón distribuidor de alimentación (0510- SUU-0007)
- Espesadores de Relaves (0510-TKF-0026/0027)
- Estanque de agua recuperada (0510-SUL-0036)
- Cajón descarga de colas (0530-SUL-0006)
- Bombas de agua recuperada (0510-PPV-0027/0028/0029/0030/0031)

#### **3.3.3.2. Instrumentos principales - selección de instrumentos.**

Para conseguir una mejor eficiencia y desempeño de los equipos es necesaria la selección de instrumentos principales según los criterios mencionados que favorezcan el diseño en la planta o en un proceso a manera de evitar incurrir en gastos innecesarios para la empresa.

Para ello se considera como instrumentos principales los siguientes:

- Sensor de nivel de interface agua clara.
- Flujo metro.
- Densímetro.
- Turbidímetro
- Válvulas dardo del cajón distribuidor
- Válvulas Pinch de descarga de espesadores.
- Válvulas de Cuchilla
- Transmisor de Presión.

La industria tiene procesos que requieren de ser controlados como la presión, temperatura, humedad, nivel, etc. Estos instrumentos aseguran el mantenimiento y el óptimo desarrollo del proceso y regulación de estas

variables en condiciones idóneas y también pueden ser utilizados para medir variables de tipo físico, transmitir información de un punto a otro, interpretar señales y mediante algoritmos decidir el funcionamiento del sistema. Dichos instrumentos son parte del proceso productivo, cuya finalidad es el desarrollo de las acciones de control. Los mismos pueden realizar las siguientes funciones: Captar una variable, acondicionar, transmitir, controlar, totalizar, registrar, o indicar la magnitud de una variable. Así como manifestar algún tipo de alarma o interrumpir una secuencia dada o transmitir o amplificar una señal.

### 3.3.3.3. Matriz de reglas difusas sistema de control experto espesadores de relave

El sistema experto para el proceso de espesamiento final de relave funcionará bajo el esquema mostrado a continuación:

*Figura 7. Pirámide de Control.*



Fuente: Elaboración propia.

Dentro de este esquema el sistema funcionara siguiendo un conjunto de reglas, programadas para controlar el ambiente donde se desarrolla. Dichas reglas fueron determinadas por experiencia y principios metalúrgicos ya instituidos, como por ejemplo si la condición es verdad, entonces se invoca a la acción.

### 3.3.3.4. Estructura de reglas: alcance del sistema experto

#### a. Control por torque de la rastra del espesador

Tabla 5. Matriz de reglas difusas para modo de control por torque.

$\varepsilon\tau / [d\varepsilon\tau / dt]$	<i>Negativa</i>	<i>Estable</i>	<i>Positiva</i>
<i>Ok</i>	Flujo de Descarga es Aumenta <i>Leve</i>	Flujo de Descarga es Sin <i>Cambios</i>	Flujo de Descarga es <i>Sin Cambios</i>
<i>Negativo</i>	Flujo de descarga es Aumenta Grande & <b>Si Cu/Fe <math>\geq \alpha \wedge AC &gt; \beta</math></b> Flujo de Floc Disminuye Normal <b>Si Cu/Fe <math>\geq \alpha \wedge AC &lt; \beta</math></b> Flujo de Floc Sin Cambios <b>Si Cu/Fe <math>&lt; \alpha \wedge AC &gt; \beta</math></b> Flujo de Floc Disminuye Grande <b>Si Cu/Fe <math>&lt; \alpha \wedge AC &lt; \beta</math></b> <i>Flujo de Floc Sin Cambios</i>	Flujo de Descarga es Aumenta <i>Normal</i>	Flujo de Descarga es <i>Aumenta Leve</i>
<i>Muy Negativo</i>	Flujo de Descarga es Aumenta Emergencia & <b>Si Cu/Fe <math>&gt; \alpha \wedge AC &gt; \beta</math></b> Flujo de Floc Disminuye Grande <b>Si Cu/Fe <math>\geq \alpha \wedge AC &lt; \beta</math></b> Flujo de Floc Disminuye Leve <b>Si Cu/Fe <math>&lt; \alpha \wedge AC &gt; \beta</math></b> Flujo de Floc Disminuye Grande <b>Si Cu/Fe <math>&lt; \alpha \wedge AC &lt; \beta</math></b> <i>Flujo de Floc Disminuye Leve</i>	Flujo de Descarga es Aumenta Grande & <b>Si Cu/Fe <math>&gt; \alpha \wedge AC &gt; \beta</math></b> Flujo de Floc Disminuye Normal <b>Si Cu/Fe <math>\geq \alpha \wedge AC &lt; \beta</math></b> Flujo de Floc Sin Cambios <b>Si Cu/Fe <math>&lt; \alpha \wedge AC &gt; \beta</math></b> Flujo de Floc Disminuye Leve <b>Si Cu/Fe <math>&lt; \alpha \wedge AC &lt; \beta</math></b> <i>Flujo de Floc Sin Cambios</i>	Flujo de Descarga es <i>Aumenta Normal</i>

Fuente: Elaboración control proceso MMG.

b. Control por agua clara

Tabla 6. Matriz de reglas difusas para modo por nivel de agua clara.

$\varepsilon\tau / [d\varepsilon\tau / dt]$	<i>Negativa</i>	<i>Estable</i>	<i>Positiva</i>
<b>Ok</b>	<p><b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Sin Cambios</p> <p><b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Disminuye Leve</i></p>	<p><b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Sin Cambios</p> <p><b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Sin Cambios</i></p>	<p><b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Leve</p> <p><b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Sin Cambios</p>
<b>Positivo</b>	<p><b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Leve</p> <p><b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Sin Cambios</i></p>	<p><b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Normal</p> <p><b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Aumenta Leve</i></p>	<p><b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Grande</p> <p><b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Normal &amp; Flujo de descarga es <i>Aumenta Normal</i></p>
<b>Muy Positivo</b>	<p><b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Normal</p> <p><b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Leve &amp; Flujo de descarga es <i>Aumenta Leve</i></p>	<p><b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Grande</p> <p><b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Normal &amp; Flujo de descarga es <i>Aumenta Normal</i></p>	<p><b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Grande</p> <p><b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Normal &amp; Flujo de descarga es <i>Aumenta Grande</i></p>

Fuente: Elaboración control proceso MMG.

c. **Control por cajón SUU-036**

Tabla 7. Matriz de reglas difusas para modo por cajón SUU-036.

$\varepsilon\tau / [d\varepsilon\tau / dt]$	<i>Negativa</i>	<i>Estable</i>	<i>Positiva</i>
<b>Ok</b>	Flujo de Descarga es Sin Cambios & <b>Si Solidos</b> =Negativo Floculante es Disminuye Normal <b>Si Solidos</b> =Muy Negativo Floculante es <i>Disminuye Grande</i>	Flujo de Descarga es Sin Cambios & <b>Si Solidos</b> =Negativo Floculante es Disminuye Normal <b>Si Solidos</b> =Muy Negativo Floculante es <i>Disminuye Grande</i>	Flujo de Descarga es Disminuye Leve & <b>Si Solidos</b> =Negativo Floculante es Disminuye Normal <b>Si Solidos</b> =Muy Negativo Floculante es <i>Disminuye Grande</i>
<b>Positivo</b>	Flujo de descarga es Disminuye Leve & <b>Si Solidos</b> =Negativo Floculante es Disminuye Normal <b>Si Solidos</b> =Muy Negativo Floculante es <i>Disminuye Grande</i>	Flujo de Descarga es Disminuye Leve & <b>Si Solidos</b> =Negativo Floculante es Disminuye Normal <b>Si Solidos</b> =Muy Negativo Floculante es <i>Disminuye Grande</i>	Flujo de Descarga es Disminuye Normal & <b>Si Solidos</b> =Negativo Floculante es Disminuye Normal <b>Si Solidos</b> =Muy Negativo Floculante es <i>Disminuye Grande</i>
<b>Muy Positivo</b>	Flujo de Descarga es Disminuye Grande & <b>Si Solidos</b> =Negativo Floculante es Disminuye Normal <b>Si Solidos</b> =Muy Negativo Floculante es <i>Disminuye Grande</i>	Flujo de Descarga es Disminuye Grande & <b>Si Solidos</b> =Negativo Floculante es Disminuye Normal <b>Si Solidos</b> =Muy Negativo Floculante es <i>Disminuye Grande</i>	Flujo de Descarga es Disminuye Emergencia & <b>Si Solidos</b> =Negativo Floculante es Disminuye Normal <b>Si Solidos</b> =Muy Negativo Floculante es <i>Disminuye Grande</i>

Fuente: Elaboración control proceso MMG.

d. Control por fracción de sólidos en descarga de espesador

Tabla 8. Matriz de reglas difusas para modo por fracción de sólidos en descarga del espesador.

$\varepsilon\tau / [d\varepsilon\tau / dt]$	<i>Negativa</i>	<i>Estable</i>	<i>Positiva</i>
<b>Muy Positivo</b>	Flujo de Descarga es <i>Disminuye Normal</i>	Flujo de Descarga es <i>Disminuye Grande</i> <b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Normal <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Aumenta Leve</i>	Flujo de Descarga es <i>Disminuye Emergencia</i> <b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Normal <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Aumenta Leve</i>
<b>Positivo</b>	Flujo de Descarga es <i>Disminuye Leve</i>	Flujo de Descarga es <i>Disminuye Normal</i> <b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Leve <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Sin Cambios</i>	Flujo de Descarga es <i>Disminuye Grande</i> <b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Leve <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Sin Cambios</i>
<b>Ok</b>	Flujo de Descarga es <i>Aumentar Leve</i>	<i>Sin Cambios</i>	Flujo de Descarga es <i>Disminuye Leve</i>
<b>Negativo</b>	Flujo de Descarga es <i>Aumenta Grande</i> <b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Disminuye Normal</i> <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Disminuye Grande</i>	Flujo de Descarga es <i>Aumenta Normal</i> <b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Disminuye Leve</i> <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Disminuye Normal</i>	Flujo de Descarga <i>Aumenta Leve</i>
<b>Muy Negativo</b>	Flujo de Descarga es <i>Aumenta Emergencia</i> <b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Disminuye Grande</i> <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Disminuye Grande</i>	Flujo de Descarga es <i>Aumenta Emergencia</i> <b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Disminuye Grande</i> <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Disminuye Grande</i>	Flujo de Descarga es <i>Aumenta Grande</i>

Fuente: Elaboración control proceso MMG.

e. **Control por turbidez en agua clara del espesador**

Tabla 9. Matriz de reglas difusas para modo por turbidez de agua clara.

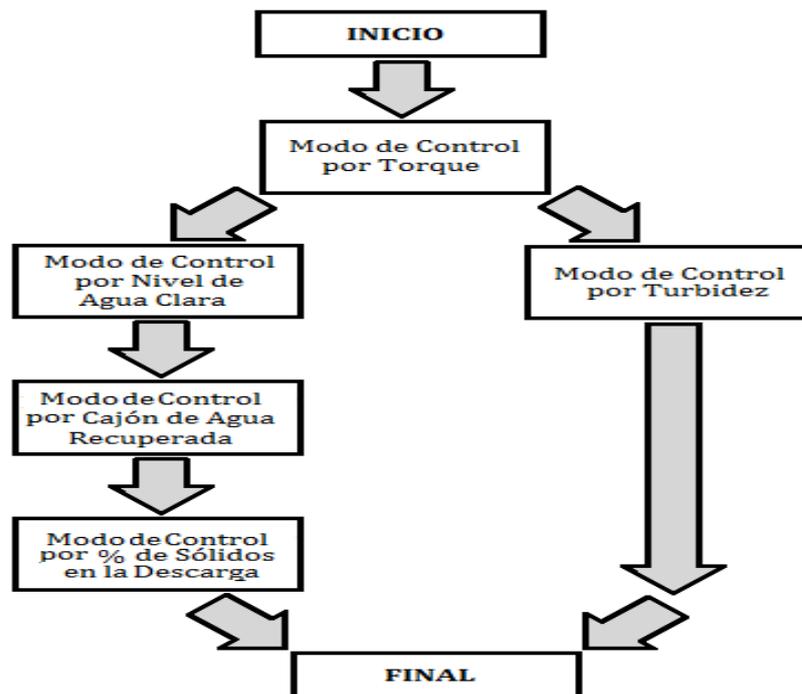
$\varepsilon\tau / [d\varepsilon\tau / dt]$	<i>Negativa</i>	<i>Estable</i>	<i>Positiva</i>
<b>Ok</b>	<b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Leve <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Sin Cambios</i>	<b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Leve <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Sin Cambios</i>	<b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Sin Cambios</i> <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Sin Cambios</i>
<b>Negativo</b>	<b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Grande <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Aumenta Normal</i>	<b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Normal <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Aumenta Leve</i>	<b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Leve <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Sin Cambios</i>
<b>Muy Negativo</b>	<b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Grande <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Aumenta Normal</i>	<b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Grande <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Aumenta Normal</i>	<b>Si Cu/Fe &gt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc Aumenta Normal <b>Si Cu/Fe &lt; <math>\alpha</math>:</b> Flujo de Floc <i>Aumenta Leve</i>

Fuente: Elaboración control proceso MMG.

### 3.3.3.5. Estrategia de control sistema experto espesadores de relaves.

La estrategia de control experto para el circuito de espesamiento de relaves, es una estrategia de control jerarquizada. La jerarquía de control tiene como objetivo la protección del equipo (i.e., protección de rastra del espesador) y el cumplimiento de las metas de proceso (e.g., fracción de sólidos en la descarga, nivel adecuado de agua clara). Esto permite una optimización en el uso del espesador. Existen cuatro modos en la jerarquía de control: i) modo de control por torque de la rastra del espesador; ii) modo de control por nivel de agua clara; iii) modo de control por nivel del cajón de recuperación de agua clara (SUU-0036) y iv) modo de control por sólidos en la descarga del espesador Paralelamente a estos modos de control, se ejecuta el modo por turbidez. La figura mostrada a continuación, ilustra la ejecución de los modos de control en orden jerárquico.

Figura 8. Modos de Control Experto Espesadores de Relaves.



Fuente: Elaboración propia.

#### a. Modo de control por torque de la rastra.

En el primer modo de control (modo de control por torque de la rastra del espesador) el sistema de control experto (SCE), garantizará no exceder un valor máximo de torque pre-definido por el operador (e.g., 25 %), modificando el flujo de descarga del espesador y el flujo de floculante. Este modo de

control se activará al alcanzar el 98% del valor máximo de torque pre-definido por el operador, de manera de realizar un control a tiempo, antes de que el torque llegue al valor máximo pre-definido. Frente a incrementos en el torque de la rastra, se incrementará el flujo de descarga y en ciertas circunstancias se disminuirá el flujo de floculante (Ver Tabla 4: Matriz de reglas difusas para modo de control por torque de la rastra).

Se considerará también la razón cobre/hierro en la alimentación a los espesadores. Si esta razón es baja, es decir alto contenido de hierro en la alimentación ( $Cu/Fe > \alpha$ , donde  $\alpha$  es la razón de cobre/hierro máxima definida), entonces la magnitud en la disminución del flujo de floculante será inferior a la disminución en una condición normal.

También se considerará el nivel de agua clara que haya en ese momento. Si el nivel de agua clara (AC) está bajo ( $AC < \beta$ , donde  $\beta$  es el nivel mínimo de agua clara), entonces la magnitud en el flujo de floculante alimentado cambiará de acuerdo al valor de la razón cobre/hierro. Se debe tener en cuenta que el nivel de agua clara aumenta a mayor flujo de floculante alimentado y a un menor valor de la Cu/Fe.

#### **b. Modo de control por nivel de agua clara.**

En el segundo modo de control (Control por nivel de Agua Clara), el SCE se asegurará de contar con un nivel de agua clara mínimo en el espesador, el cual debe ser pre-definido por el operador (e.g., 3.8 [m]). Las acciones de control basadas en el modo por nivel de agua clara, sólo se llevarán a cabo si el modo de control por torque de la rastra se encuentra inactivo; o dicho de otra manera, si el torque de la rastra se encuentra bajo su valor máximo pre-definido. Al igual que para el modo de control precedente, el modo de control por nivel de agua clara se activará cuando el valor de proceso (PV) haya disminuido hasta ubicarse un 5% sobre el mínimo pre-definido (para el ejemplo 3.99 [m]). En este caso, y con el modo de control activo, se incrementará el flujo de floculante y el flujo de descarga del espesador en algunos casos, para actuar como ayuda extra al flujo de floculante (ver Tabla 5, matriz de reglas difusas para modo de control por nivel de agua clara).

Como en el caso anterior, también se considerará la razón Cobre/hierro en la alimentación a los espesadores. Si esta razón es baja (alto contenido de

hierro en la alimentación) entonces el flujo de floculante será inferior en magnitud en relación a una condición normal de Cu/Fe. Para un nivel de agua clara bajo el mínimo estipulado, la acción a tomar por el SCE, será de aumentar en una magnitud menor la cantidad del flujo de floculante, ya que el alto contenido de hierro acelerará la sedimentación de las partículas.

**c. Modo de control por cajón SUU-0036 (receptor de agua clara).**

El tercer modo de control tiene que ver con el nivel del cajón receptor de agua clara de ambos espesadores. El SCE monitoreará el nivel del cajón y buscará mantenerlo sobre un nivel mínimo que será pre-definido por el operador. De esta forma, si el nivel del cajón tiene un valor menor al mínimo (e.g., 50%), el sistema experto buscará aumentar el nivel del cajón disminuyendo el flujo de descarga del espesador. En este modo de control, esta será la única variable manipulada. Por seguridad, como en todos los modos anteriores, el nivel mínimo se alcanzará cuando la variable de proceso (PV de nivel) alcance el 10% por sobre el valor configurado por el operador (55% en el caso del ejemplo). (Ver Tabla 6, matriz de reglas difusas para modo de control por cajón SUU-0036).

**d. Modo de control por fracción de sólidos en la descarga**

El cuarto modo en la jerarquía de control es el control por sólidos en la descarga. En este caso, el SCE buscará ajustar el porcentaje de sólidos en la descarga del espesador al valor objetivo pre-definido por el operador (e.g., 62%). Al igual que para los modos de control ya descritos, las acciones de control para este modo sólo se llevarán a cabo si los tres modos precedentes se encuentran inactivos.

Bajo este modo, las variables manipuladas serán el flujo de descarga. y el flujo de floculante en algunos casos (Ver Tabla 7, matriz de reglas difusas modo de control por porcentaje de sólidos en la descarga de espesador). De esta manera, si la fracción de sólidos en la descarga es superior al valor objetivo, el SCE incrementará el flujo de descarga en una magnitud proporcional a la diferencia entre el valor objetivo de la densidad de sólidos en la descarga y el valor de proceso (PV) y disminuirá el flujo de floculante. De forma contraria, si la fracción de sólidos es inferior al valor objetivo pre-

definido, el SCE reducirá el flujo de descarga en forma proporcional a la diferencia entre el valor objetivo de la densidad de sólidos en la descarga y el valor de proceso, y además, incrementará el flujo de floculante.

#### **e. Modo de control por turbidez en el agua clara**

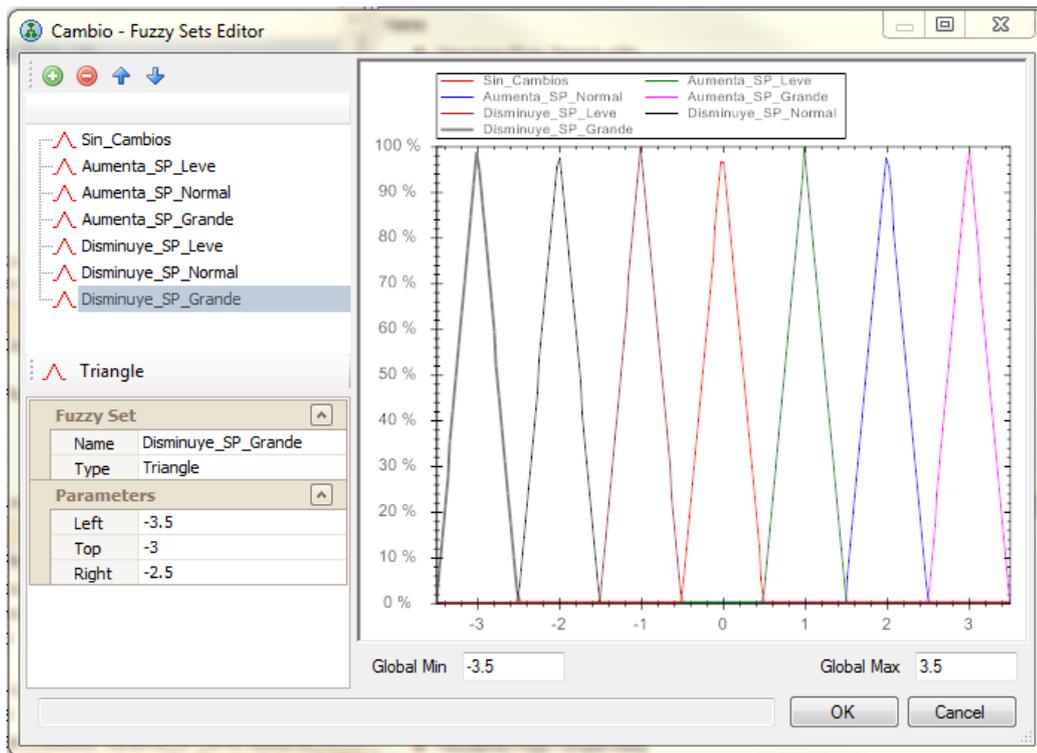
Paralelamente a los modos descritos con anterioridad, este modo evaluará constantemente el grado de turbidez del agua clara (excepto en el modo por Torque). Si la turbidez supera el valor máximo ingresado por el operador, entonces su matriz de reglas difusas evaluará un cambio en el SP de Floculante que entrará en el proceso de dosificación conjuntamente con el cambio evaluado en el modo de control que se encuentre activo (e.g., modo por agua clara, modo por SU- 0036 o modo por porcentaje de solidos). Ver Tabla 8: Matriz de reglas difusas para modo de control por Turbidez.

#### **3.3.3.6. Variables y sus valores.**

La variable manipulada cambio en el flujo de floculantes del espesador (**Floculante. Flujo. Sp. Cambio**) puede tomar los siguientes valores:

- Aumenta\_SP\_Grande: [2.5; 3; 3.5]
- Aumenta\_SP\_Normal: [1.5; 2; 2.5]
- Aumenta\_SP\_Leve: [0.5; 1; 1.5]
- Sin Cambios: [-0.5; 0; 0.5]
- Disminuye\_SP\_Grande: [-3.5; -3; -2.5]
- Disminuye\_SP\_Normal: [-2.5; -2; -1.5]
- Disminuye\_SP\_Leve: [-1.5; 1; 0.5]

Figura 9. Conjuntos difusos para cambio en flujo de floculantes.



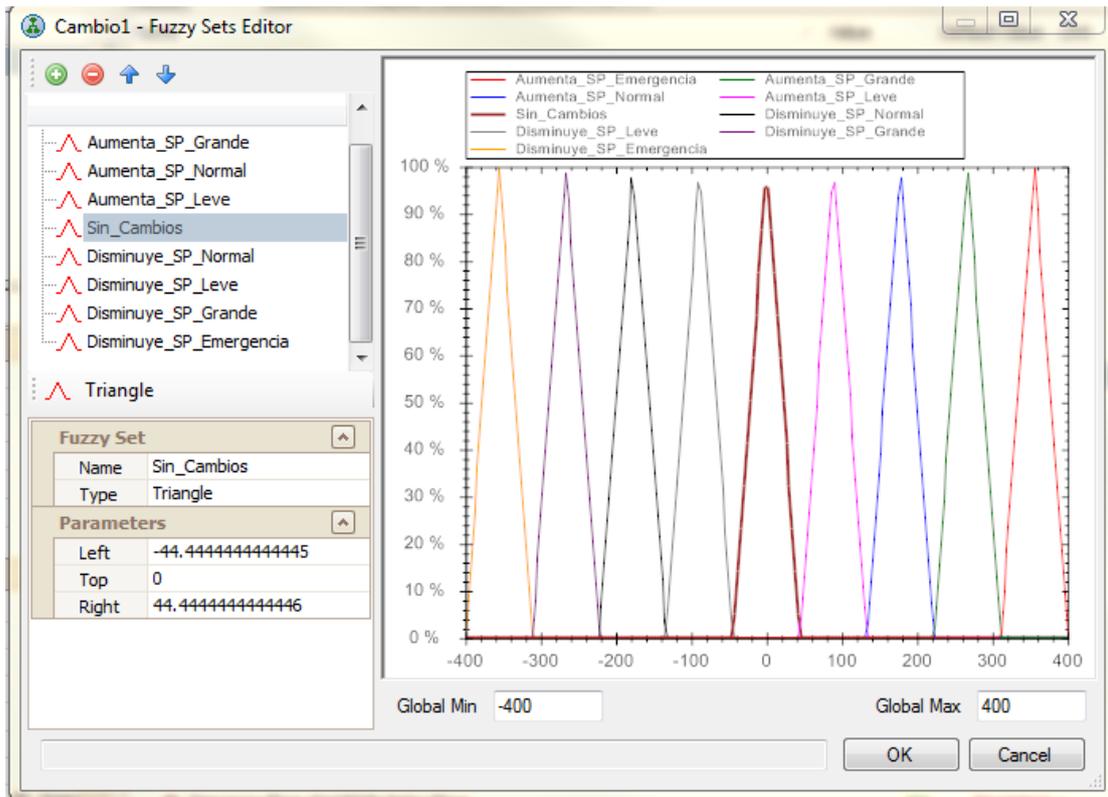
Fuente: Elaboración de control de procesos MMG.

La variable manipulada Flujo de Descarga se divide en dos variables: **Descarga.Flujo.SP.Cambio1** (Cuando el espesador tiene solo una línea de descarga habilitada) y **Descarga.Flujo.SP.Cambio2** (Cuando el espesador trabaja con ambas líneas de descarga habilitadas).

Para **Descarga. Flujo.SP. Cambio1**, se consideran las siguientes variables lingüísticas:

- Aumenta Emergencia:[311; 355;400]
- Aumenta Grande: [222; 266;311]
- Aumenta Normal:[133; 177; 222]
- Aumenta Leve: [44; 88; 133]
- Sin Cambios: [-44; 0; 44]
- Disminuye Emergencia: [-400; -355; -311]
- Disminuye Grande: [311; -266; -222]
- Disminuye Normal:[-222; -177; -133]
- Disminuye Leve: [-133; -88; -44]

Figura 10. Conjuntos difusos para cambio1 en flujo de descarga.

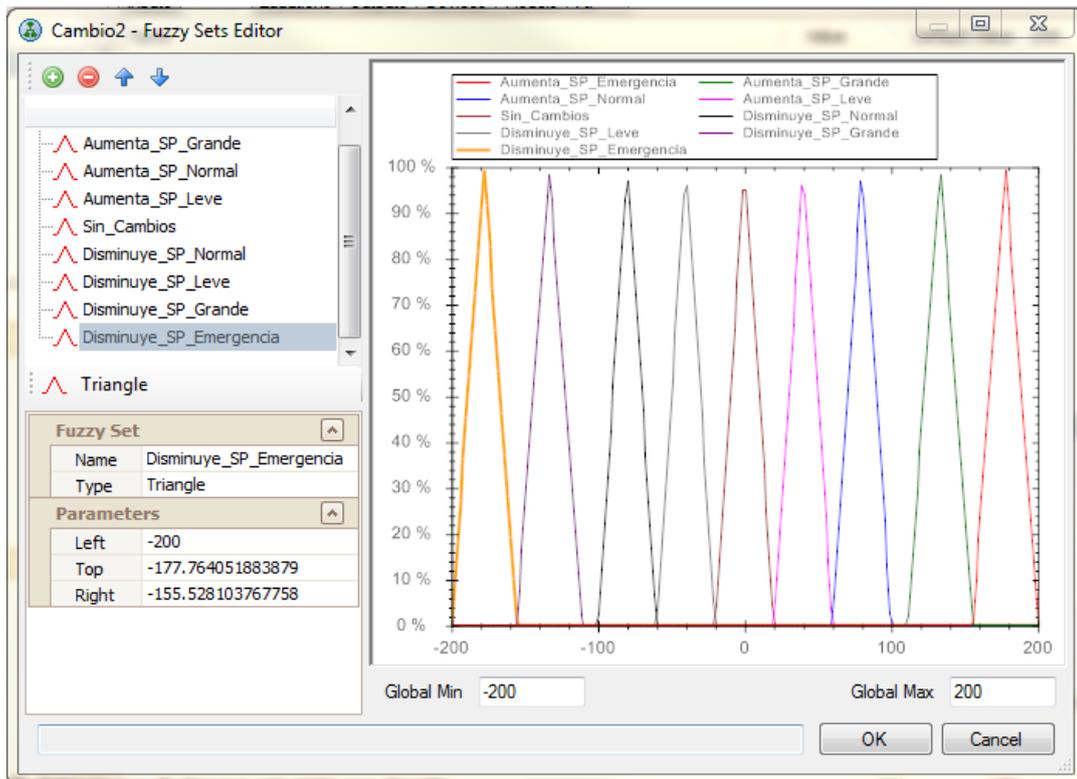


Fuente: Elaboración de control de procesos MMG.

Para **Descarga. Flujo.SP. Cambio2**, se consideran las siguientes variables lingüísticas:

- Aumenta Emergencia:[155; 177;200]
- Aumenta Grande: [111; 133;155]
- Aumenta Normal:[60; 80; 100]
- Aumenta Leve: [20; 40; 60]
- Sin Cambios: [-20; 0; 20]
- Disminuye Emergencia: [-200; -177; -155]
- Disminuye Grande: [155; -133; -111]
- Disminuye Normal:[-100; -80; -60]
- Disminuye Leve: [-60; -40; -20]

Figura 11. Conjuntos difusos para cambio2 en flujo de descarga.



Fuente: Elaboración de control de procesos MMG.

#### a. Nomenclatura utilizada

Para lograr una mejor comprensión de la terminología utilizada en los – controladores lógicos difusos, a continuación, se definen los siguientes conceptos:

- **Variable Actual en el tiempo (PV):** Corresponde a la señal recibida desde instrumento de medición en unidades de ingeniería ([m], [atm],[°C], [%], etc.) en función del tiempo.
- **Setpoint (SP):** Corresponde al valor deseado de una variable controlada.
- **Error en el tiempo (E):** Corresponde a la diferencia entre el valor deseado (SP) y el valor actual en el tiempo (PV).

$$\varepsilon = (SP - PV)$$

- **Razón de cambio del error ( $d\varepsilon/dt$ ):** Corresponde al valor de la tasa de cambio del error respecto del tiempo o la pendiente del error en función del tiempo.

$$\frac{\Delta}{\Delta} \cong \frac{\Delta}{\Delta} = \frac{-\varepsilon_{i-1}}{-t_{i-1}} = \frac{(Sp - Pv) - (Sp - Pv)_{i-1}}{-t_{i-1}}$$

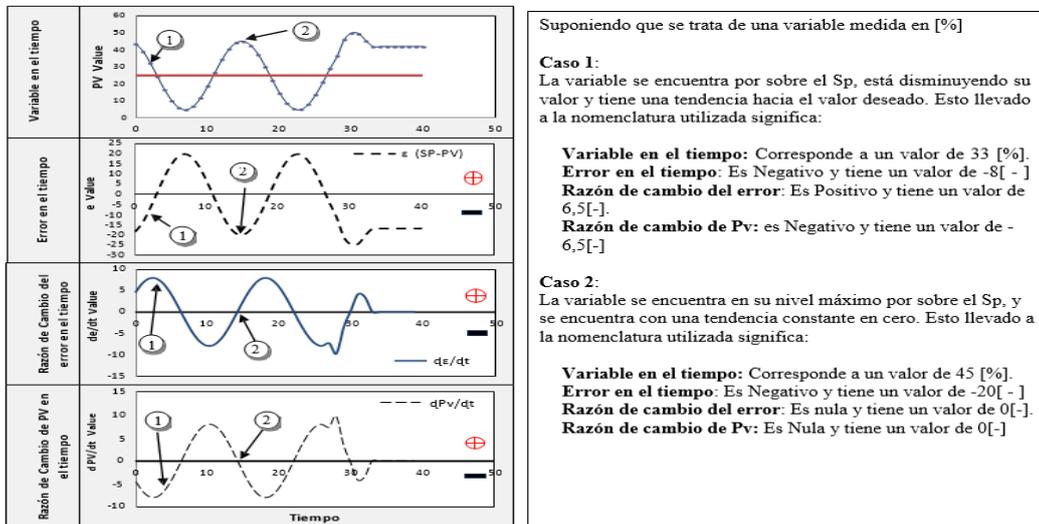
- **Razón de cambio de la PV en el tiempo ( $dPV/dt$ ):** Corresponde al valor de la tasa de cambio de la PV respecto del tiempo o la pendiente del PV en función del tiempo. Cabe mencionar que este parámetro no será utilizado en el control experto y solo es referencial para un mejor entendimiento.

$$\frac{dPV}{dt} \cong \frac{\Delta PV}{\Delta t} = \frac{PV_i - PV_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

- **Variable manipulada:** Corresponde a la variable utilizada como recurso, que es modificada para el logro del valor esperado en la variable controlada.
- **Matrices de reglas difusas:** Corresponde al conjunto de términos lingüísticos de fusificación (Negativo, Positivo, Muy Negativo, Muy Positivo y Nulo) para el error, la razón de cambio del error y la de fusificación de la variable manipulada. Estos son utilizados para referirse a un rango específico de una variable, con los cuales se determinará la acción a realizar en la variable manipulada.

## b. Ejemplo de comportamiento de una variable en el tiempo

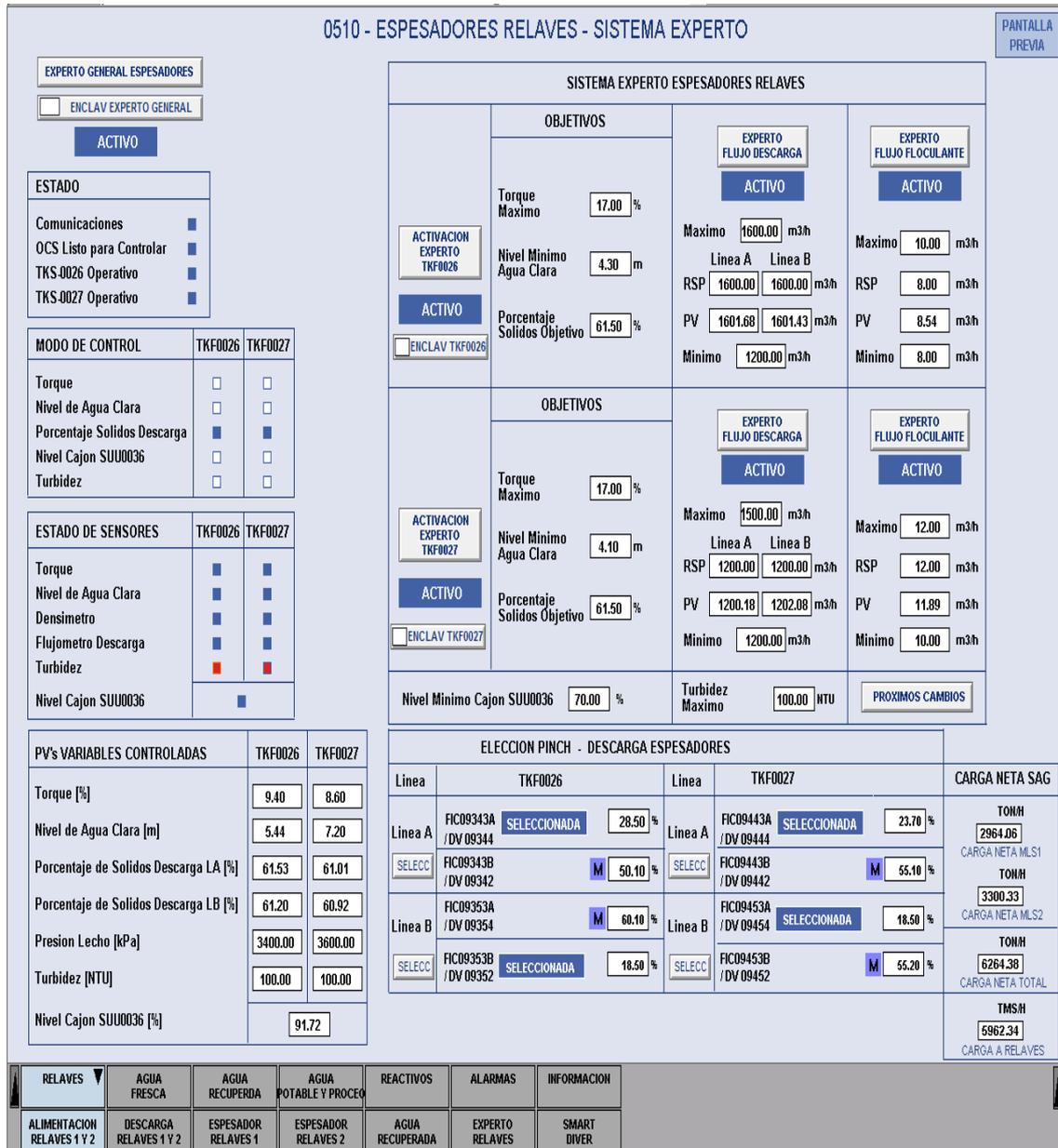
Figura 12. Comportamiento de una variable en el tiempo.



Fuente: Elaboración de control de procesos MMG.

c. Pantalla sistema experto de espesadores de relave de la planta concentradora objeto de estudio

Figura 13. Pantalla del sistema experto de espesamiento de relave de la planta concentradora objeto de estudio.



Fuente: Sala de control de aguas y relave de la planta concentradora objeto de estudio.

### **3.3.3.7. Diagramas lógicos**

#### **a. Control de nivel de lodos en tanque espesador de relaves 0510-TKF-026**

##### **– Propósito**

Controlar el nivel de lodos dentro en el tanque espesador de relaves (0510-TKF-0026), regulando el ingreso de floculante por medio de la bomba dosificadora de floculante (0392- PPD-0034/0035) esta última en modo standby, aglutinando sólidos en suspensión ayudando el proceso de sedimentación lo que provoca la precipitación de las partículas al fondo del tanque espesador (0510-TKF-0026), para que la recuperación de agua sea lo más limpia posible. Y que no se exceda del nivel ya que también la presión en el fondo del tanque espesador, provocando posibles atoramientos en la línea de descarga.

##### **– Estrategia**

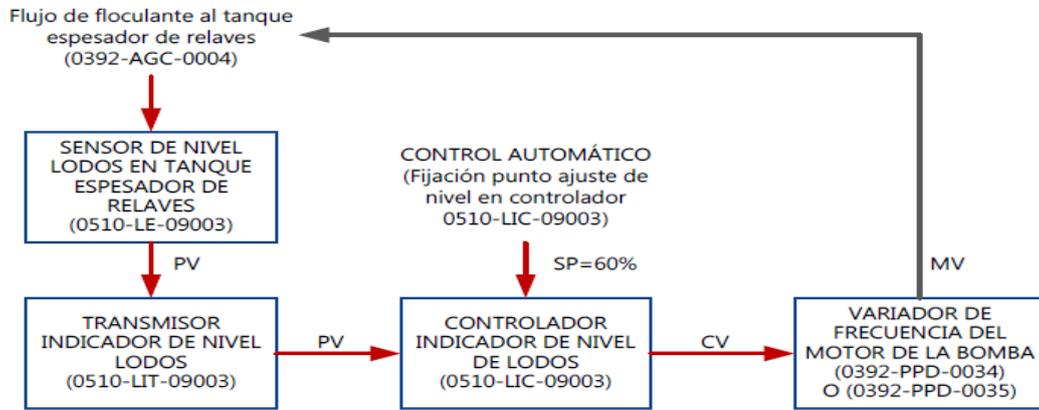
Control Cascada.

##### **– Control automático**

El nivel de lodos del tanque espesador de relaves depende específicamente de la velocidad de sedimentación de las partículas por el ingreso de floculante al tanque espesador de relaves, aumentando el nivel de lodos y por lo tanto también aumenta la presión al fondo del tanque. El tanque espesador de relaves (0510-TKF-0026) cuenta con un sensor y transmisor indicador de nivel (LIT-09003) enviando la señal (PV) al controlador (LIC-09003), donde el controlador compara este valor con punto de ajuste (SP), previamente ajustado en el sistema DCS, dando como resultado la señal de error (E), y según su lógica de control, envía la variable de control (CV) al variador de frecuencia del motor de la bomba en operación (0392-PPD-0034), aumentando o disminuyendo el flujo de floculante.

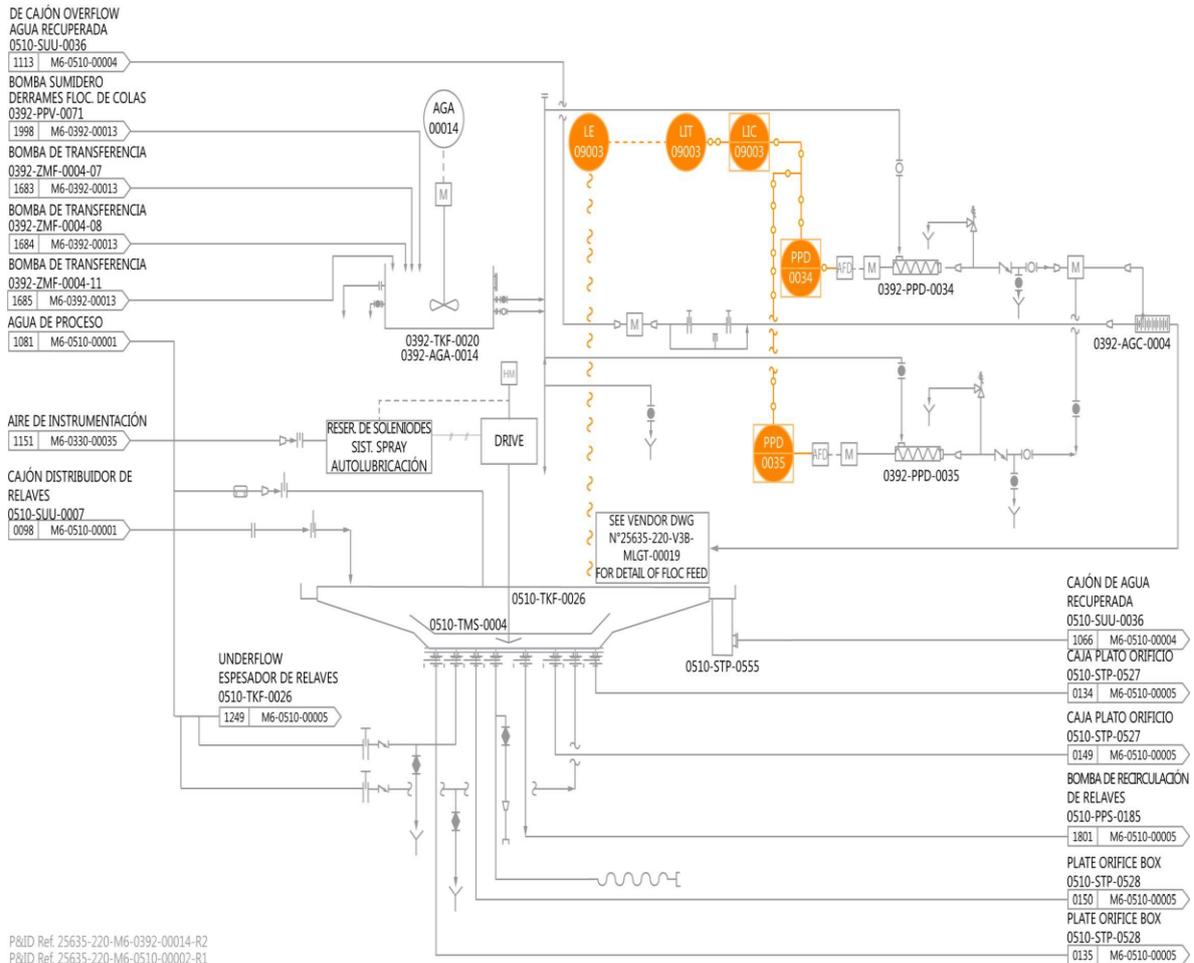
Si el nivel de lodos está por debajo del valor deseado (SP=60%), el controlador hace que aumente la velocidad del motor de la bomba dosificadora de floculante por medio de su variador de frecuencia, de este modo se envía un flujo mayor de floculante al tanque espesador de relaves. Si el nivel de lodos está por encima del valor deseado (SP=60%), el controlador hace que disminuya la velocidad del motor de la bomba dosificadora de floculante por medio de su variador de frecuencia, de este modo se envía un flujo menor de floculante al tanque espesador de relaves.

Figura 14. Diagrama de bloques del lazo de control de nivel de lodos en espesador de relaves 0510-TKF- 026.



Fuente: planta concentradora objeto de estudio.

Figura 15. P&ID de lazo de control de nivel de lodos en tanque espesador de relaves 0510-TKF-0026.



Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

## **b. Control de nivel de lodos en tanque espesador de relaves 0510-TKF-027.**

### **– Propósito**

Controlar el nivel de lodos dentro en el tanque espesador de relaves (0510-TKF-0027), regulando el ingreso de floculante por medio de la bomba dosificadora de floculante (0392- PPD-0036/0035) esta última en modo standby, aglutinando sólidos en suspensión ayudando el proceso de sedimentación lo que provoca la precipitación de las partículas al fondo del tanque espesador (0510-TKF-0027), para que la recuperación de agua sea lo más limpia posible. Y que no se exceda del nivel ya que también la presión en el fondo del tanque espesador, provocando posibles atoramientos en la línea de descarga.

### **– Estrategia**

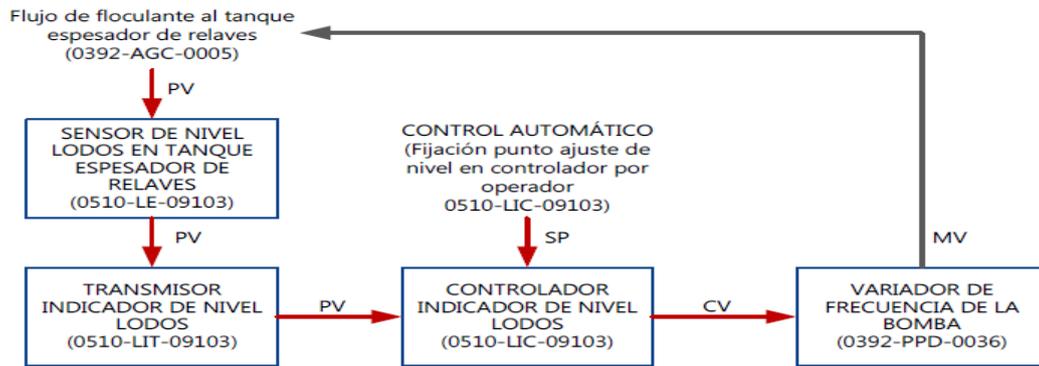
Control Cascada.

### **– Control automático**

El nivel de lodos del tanque espesador de relaves deriva de la velocidad de sedimentación de las partículas por el ingreso de floculante al tanque espesador de relaves, aumentando el nivel de lodos y por lo tanto también aumenta la presión al fondo del tanque. El tanque espesador de relaves (0510-TKF-0027) cuenta con un sensor y transmisor indicador de nivel (LIT-09103) enviando la señal (PV) al controlador (LIC-09103), donde el controlador compara este valor con punto de ajuste (SP), previamente ajustado en el sistema DCS, dando como resultado la señal de error (E), y según su lógica de control, envía la variable de control (CV) al variador de frecuencia del motor de la bomba en operación (0392-PPD-0036), aumentando o disminuyendo el flujo de floculante.

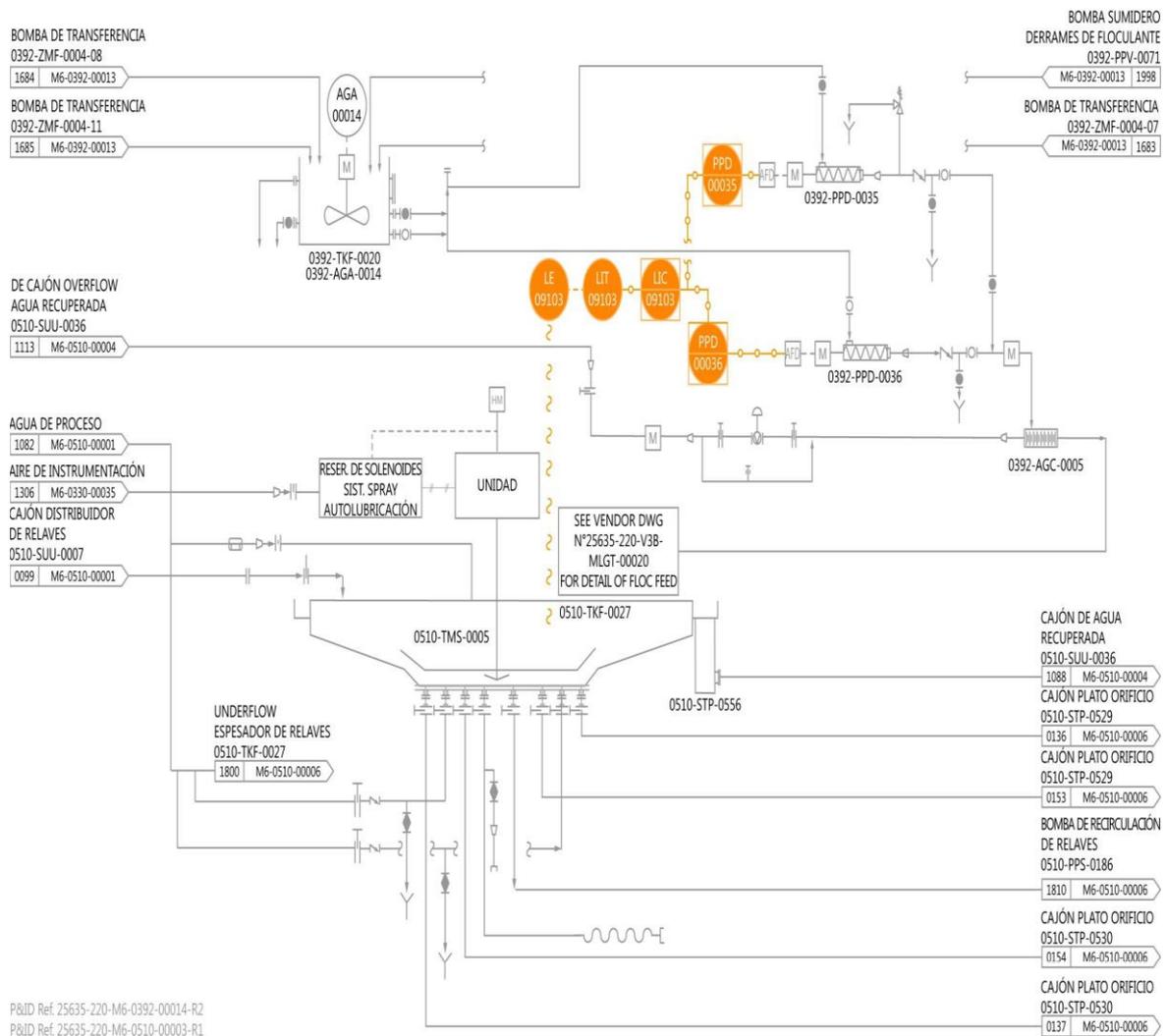
Si el nivel de lodos está por debajo del valor deseado (SP=60%), el controlador hace que aumente la velocidad del motor de la bomba dosificadora de floculante por medio de su variador de frecuencia, de este modo se envía un flujo mayor de floculante al tanque espesador de relaves. Si el nivel de lodos está por encima del valor deseado (SP=60%), el controlador hace que disminuya la velocidad del motor de la bomba dosificadora de floculante por medio de su variador de frecuencia, de este modo se envía un flujo menor de floculante al tanque espesador de relaves.

Figura 16. Diagrama de bloques del lazo de control de nivel de lodos en espesador de relaves 0510-TKF- 027.



Fuente: planta concentradora objeto de estudio.

Figura 17. P&ID de lazo de control de nivel de lodos en tanque espesador de relaves 0510-TKF-0027.



Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

**c. Control de nivel en cajón agua recuperada del espesador de relaves  
0510-SUU-0036 por las bombas 0510-PPC-0129@0132.**

**– Propósito**

Evitar el desbordamiento en cajón agua recuperada del espesador de relaves (0510-SUU- 0036) y la reutilización de agua recuperada hacia los mezcladores en línea (0392-AGC- 0004/0005) y al estanque de agua de proceso (0921-PND-0011/0012). Se controla el nivel del cajón agua recuperada del espesador de relaves, por medio de cuatro bombas (0510- PPC-0129@0132), que succionan el agua recuperada del cajón aumentando o disminuyendo el número de bombas en funcionamiento según el nivel en el cajón (0510-SUU-0036).

**– Estrategia**

Control realimentado.

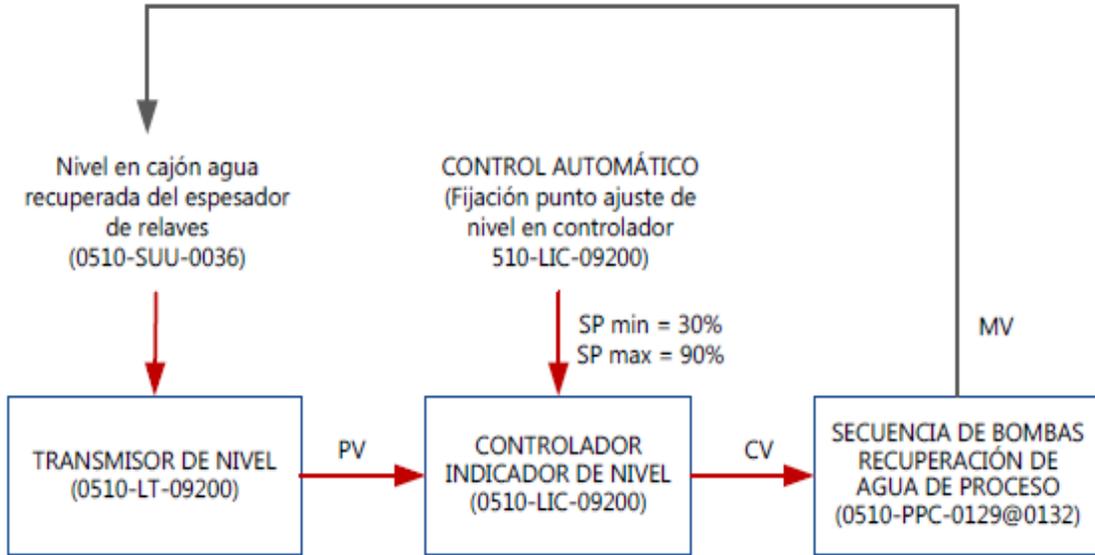
**– Control automático**

En primer lugar, él operador define la secuencia de partida de las bombas, a medida que aumente el nivel más bombas entran en operación para disminuir el nivel, teniendo en consideración el número de partidas por hora como restricción de funcionamiento en las bombas.

El cajón de agua recuperada (0510-SUU-0036), cuenta con un transmisor de nivel (LT-09200) y envía su señal (PV) al controlador (LIC-09200), donde el controlador compara este valor con el punto de ajuste (SP), previamente configurado en el sistema DCS, obteniendo la señal de error (E) y según su lógica de control, envía la variable de control (CV) hacia las bombas que están en secuencia de operación para iniciar su funcionamiento.

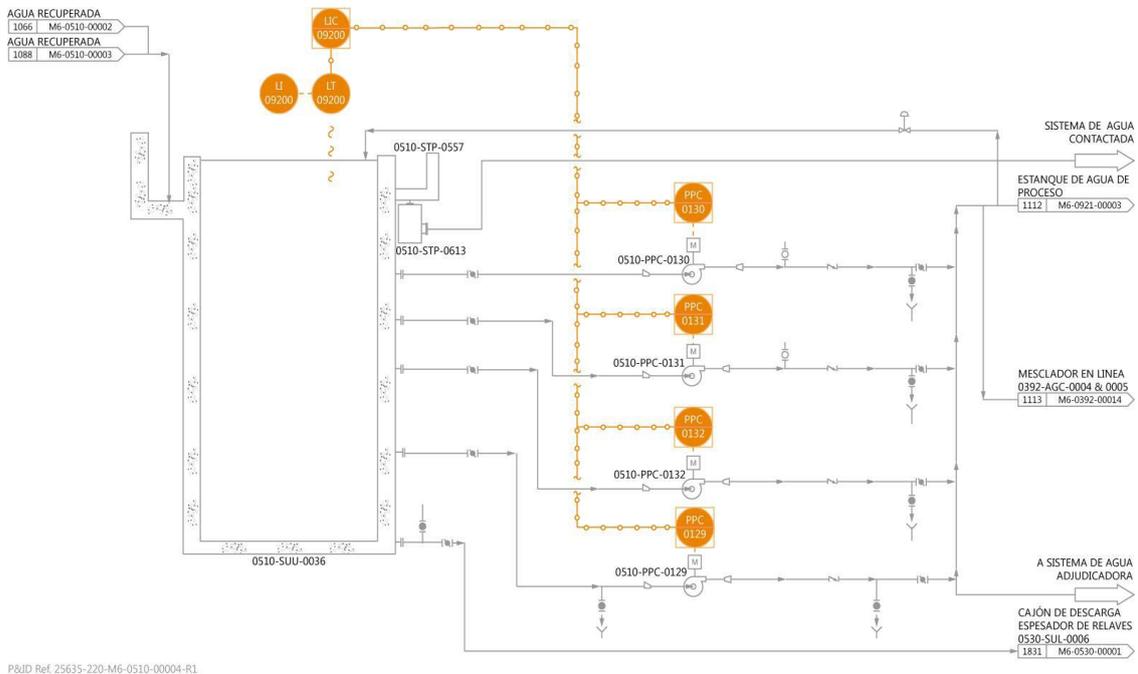
Si el nivel del cajón de agua recuperada (0510-SUU-0036) empieza a tener un nivel alto (SP=90%), más bombas entraran en funcionamiento y envían más flujo hacia el estanque agua de proceso (0921-PND-0011/0012) y para el mezclador de floculante en línea (0392- AGC-0004/0005). Si el nivel del cajón de agua recuperada (0510-SUU-0036) empieza a tener un nivel bajo (SP=30%), menos bombas estarán en funcionamiento, enviando menos flujo hacia el estanque agua de proceso (0921-PND-0011/0012) y para el mezclador de floculante en línea (0392-AGC-0004/0005).

Figura 18. Diagrama de bloques del lazo de control de nivel del cajón de agua recuperada del espesador de relaves por las bombas 0510-PPC-0129@0132.



Fuente: planta concentradora objeto de estudio.

Figura 19. P&ID de lazo de control de nivel del cajón de agua recuperada del espesador de relaves por las bombas 0510-PPC-0129@0132.



P&ID Ref. 25635-220-M6-0510-00004-R1

Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

**d. Control de densidad por la válvula DV-09342 en la descarga underflow del tanque espesador de relaves 0510-TKF-0026.**

**– Propósito**

Controlar la densidad de 62% de sólidos en la línea de descarga por gravedad del espesador de relaves (0510-TKF-0026), para que la línea de descarga no tenga atoramientos y se tenga que realizar paradas no programadas. Si la densidad de lodos está por debajo de 62% de sólidos significa que está aguada, por lo que se tiene un desperdicio de agua que podría ser recuperada.

**– Estrategia**

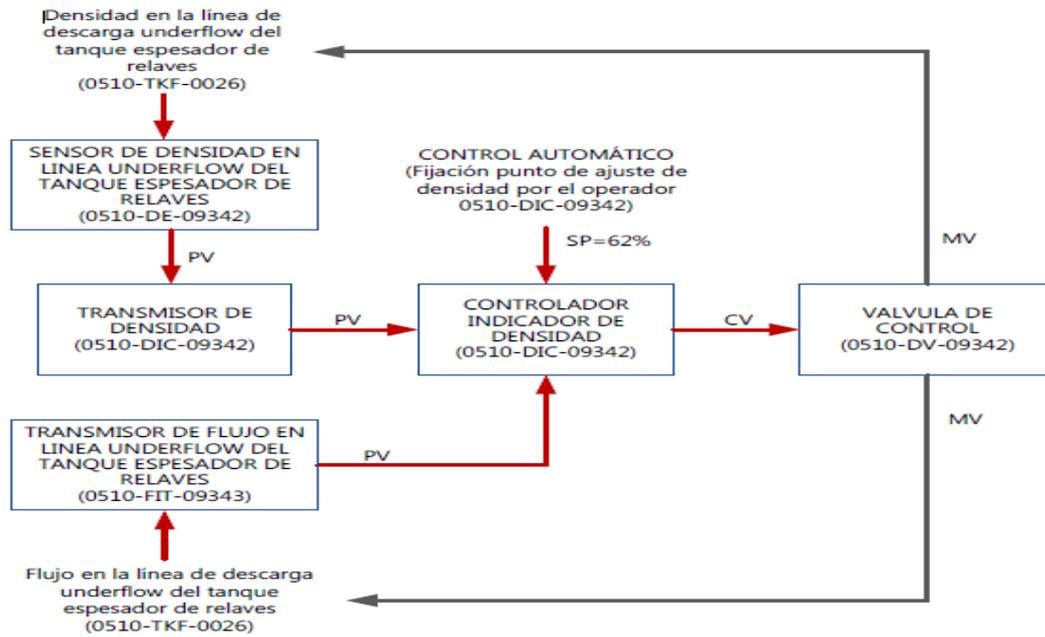
Control realimentado.

**– Control automático**

Se tienen dos líneas de descarga en el espesador de relaves (0510-TKF-0026), para después juntarse en una sola línea en donde se tiene un sensor de densidad (DE-09342) del tipo radiactivo con su respectivo transmisor de densidad (DT-09342), enviando la señal (PV) al controlador indicador de densidad (DIC-093420). El controlador compara esta señal con el punto de ajuste (SP), previamente configurado en el DCS, obteniendo un valor de error (E) y según su lógica de control envía la variable de control (CV) hacia la válvula (DV-09342), variando su grado de apertura. Si la densidad es alta, el controlador empezará a abrir gradualmente la válvula (DV-09342), aumentando el flujo de descarga y disminuyendo la densidad, hasta obtener la densidad deseada.

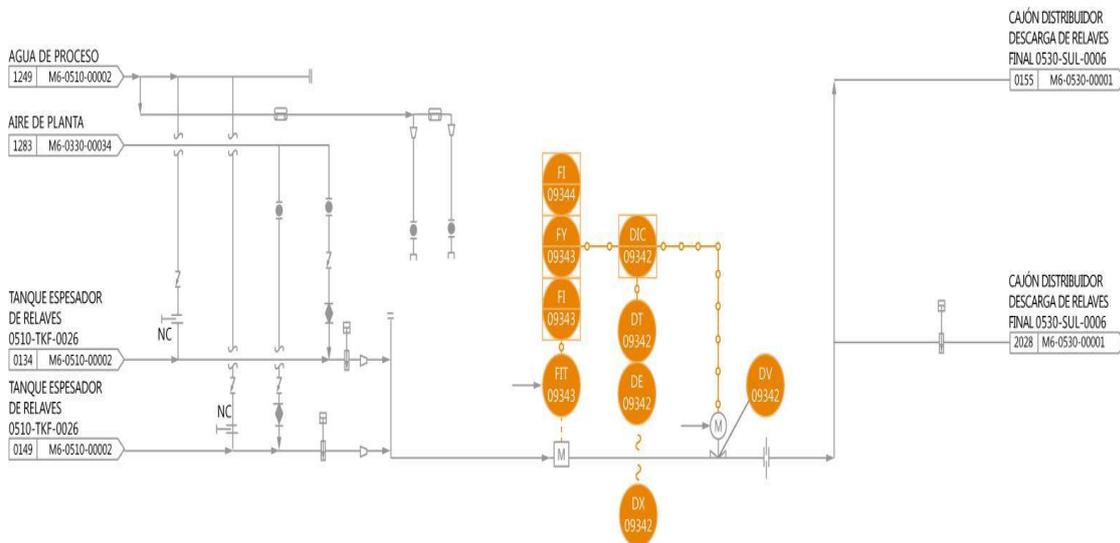
Si la densidad es baja, el controlador empezará a cerrar gradualmente la válvula (DV-09342) disminuyendo el flujo de descarga y aumentando la densidad, hasta obtener la densidad deseada. Nota: También se tiene un transmisor indicador de flujo (FIT-09343), antes del sensor de densidad, el cual junto con el controlador indicador de densidad (DIC-09342) realizan la función (FY-09343) obteniendo el flujo másico que pasa por la línea.

Figura 20. Diagrama de bloques del lazo de control de densidad por válvula DV-09342 en la descarga underflow del tanque espesador de relaves 0510-TKF-0026.



Fuente: planta concentradora objeto de estudio.

Figura 21. P&ID de lazo de control de densidad por válvula DV-09342 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0026.



Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

**e. Control de densidad por la válvula DV-09352 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0026.**

– **Propósito**

Controlar la densidad de 62% de sólidos en la línea de descarga por gravedad del espesador de relaves (0510-TKF-0026), para que la línea de descarga no tenga atoramientos y se tenga que realizar paradas no programadas. Si la densidad de lodos está por debajo de 62% de sólidos significa que está aguada, por lo que se tiene un desperdicio de agua que podría ser recuperada.

– **Estrategia**

Control realimentado.

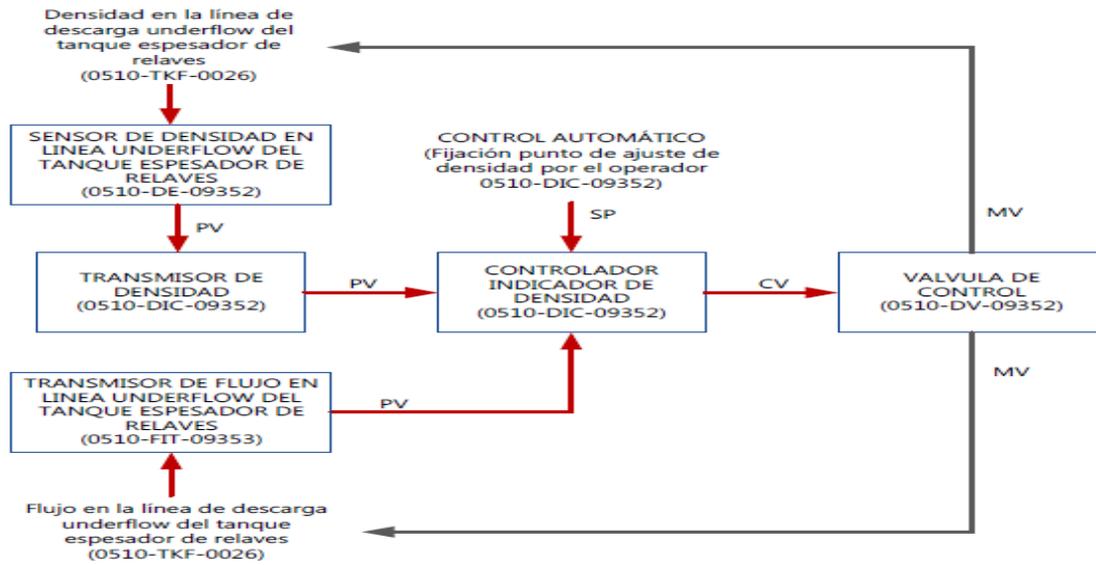
– **Control automático**

Se tienen dos líneas de descarga en el espesador de relaves (0510-TKF-0026), para después juntarse en una sola línea en donde se tiene un sensor de densidad (DE-09352) del tipo radiactivo con su respectivo transmisor de densidad (DT-09352), enviando la señal (PV) al controlador indicador de densidad (DIC-09352) El controlador compara esta señal con el punto de ajuste (SP), previamente configurado en el DCS, obteniendo un valor de error (E) y según su lógica de control envía la variable de control (CV) hacia la válvula (DV-09352), variando su grado de apertura. Si la densidad es alta, el controlador empezará a abrir gradualmente la válvula (DV-09352), aumentando el flujo de descarga y disminuyendo la densidad, hasta obtener la densidad deseada.

Si la densidad es baja, el controlador empezará a cerrar gradualmente la válvula (DV-09352) disminuyendo el flujo de descarga y aumentando la densidad, hasta obtener la densidad deseada.

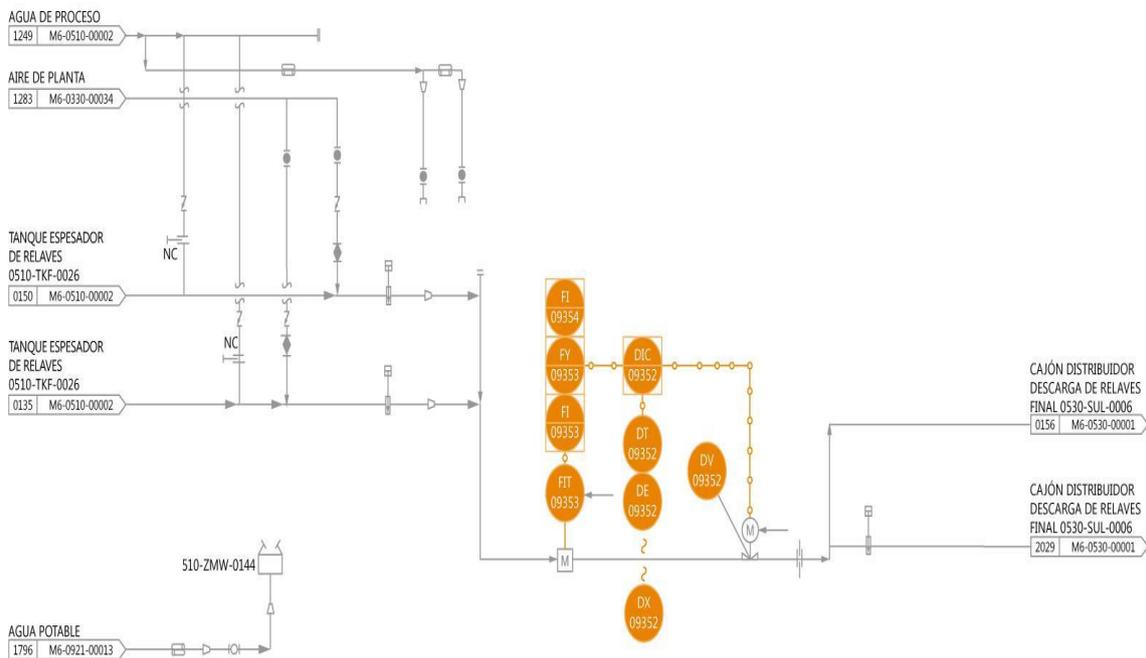
Nota: También se tiene un transmisor indicador de flujo (FIT-09353), antes del sensor de densidad, el cual junto con el controlador indicador de densidad (DIC-09352) realizan la función (FY-09353) obteniendo el flujo másico que pasa por la línea.

Figura 22. Diagrama de bloques del lazo de control de densidad por la válvula DV-09352 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0026.



Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

Figura 23. P&ID de lazo de control de densidad por la válvula DV-09352 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0026.



Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

**f. Control de densidad por válvula DV-09442 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0027**

**– Propósito**

Controlar la densidad de 62% de sólidos en la línea de descarga por gravedad del espesador de relaves (0510-TKF-0027), para que la línea de descarga no tenga atoramientos y se tenga que realizar paradas no programadas. Si la densidad de lodos está por debajo de 62% de sólidos significa que está aguada, por lo que se tiene un desperdicio de agua que podría ser recuperada.

**– Estrategia**

Control realimentado.

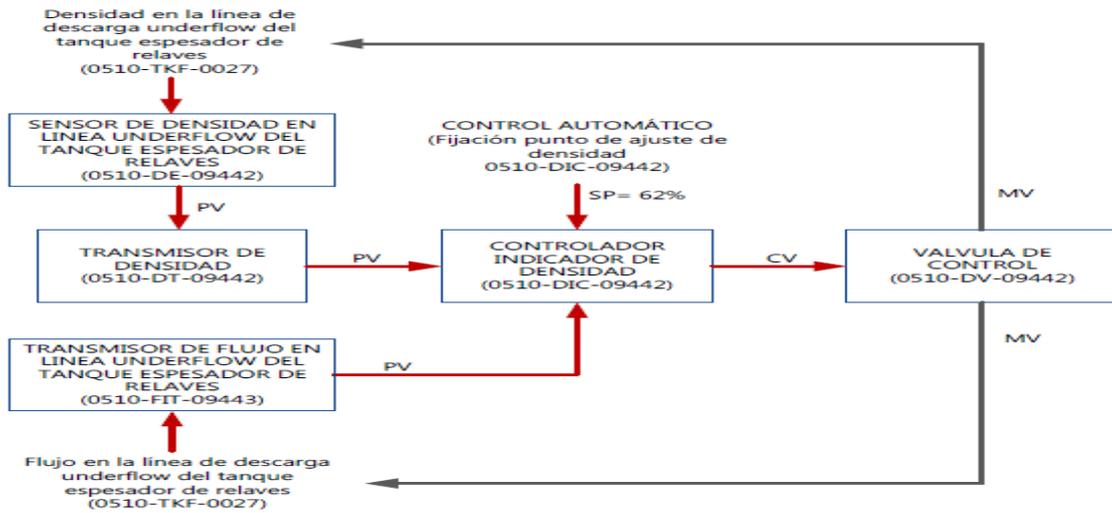
**– Control automático**

Se tienen dos líneas de descarga en el espesador de relaves (0510-TKF-0027), para después juntarse en una sola línea en donde se tiene un sensor de densidad (DE-09442) del tipo radiactivo con su respectivo transmisor de densidad (DT-09442), enviando la señal (PV) al controlador indicador de densidad (DIC-09442). El controlador compara esta señal con el punto de ajuste (SP), previamente configurado en el DCS, obteniendo un valor de error (E) y según su lógica de control envía la variable de control (CV) hacia la válvula (DV-09442), variando su grado de apertura.

Si la densidad es alta, el controlador empezará a abrir gradualmente la válvula (DV-09442), aumentando el flujo de descarga y disminuyendo la densidad, hasta obtener la densidad deseada. Si la densidad es baja, el controlador empezará a cerrar gradualmente la válvula (DV-09442) disminuyendo el flujo de descarga y aumentando la densidad, hasta obtener la densidad deseada.

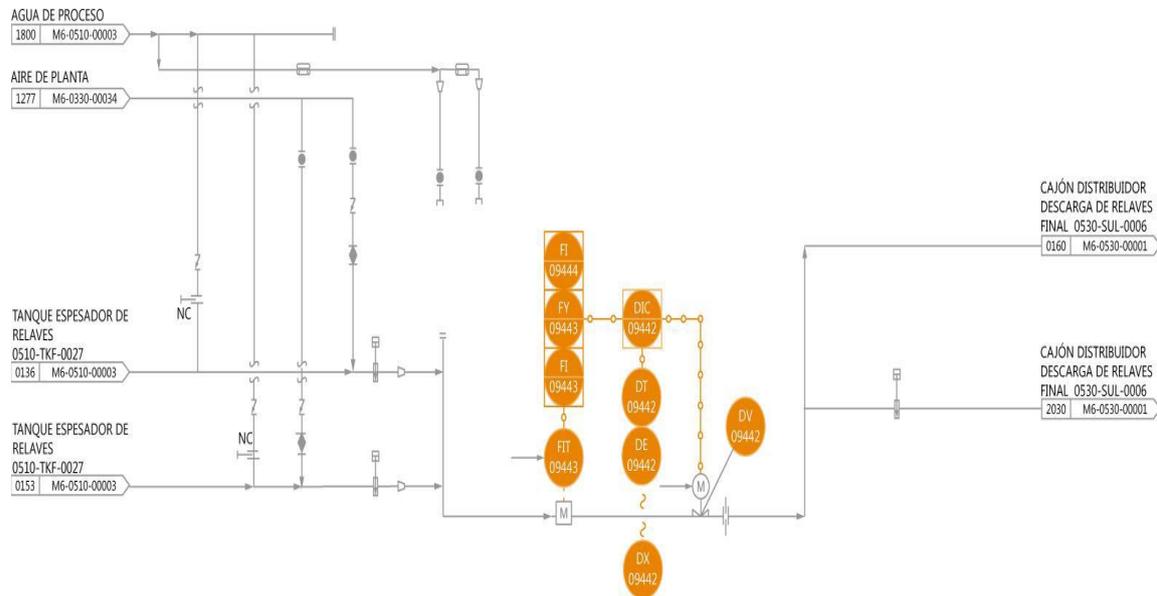
Nota: También se tiene un transmisor indicador de flujo (FIT-09443), antes del sensor de densidad, el cual junto con el controlador indicador de densidad (DIC-09442) realizan la función (FY-09443), se obtiene el flujo másico que pasa por la línea.

Figura 24. Diagrama de bloques del lazo de control de densidad por válvula DV-09442 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0027.



Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

Figura 25. P&ID de lazo de control de densidad por válvula DV-09442 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0027.



Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

**g. Control de densidad por la válvula DV-09452 en la descarga underflow del tanque espesador de relaves 0510-TKF-0027.**

**– Propósito**

Controlar la densidad de 62% de sólidos en la línea de descarga por gravedad del espesador de relaves (0510-TKF-0027), para que la línea de descarga no tenga atoramientos y se tenga que realizar paradas no programadas. Si la densidad de lodos está por debajo de 62% de sólidos significa que está aguada, por lo que se tiene un desperdicio de agua que podría ser recuperada.

**– Estrategia**

Control realimentado.

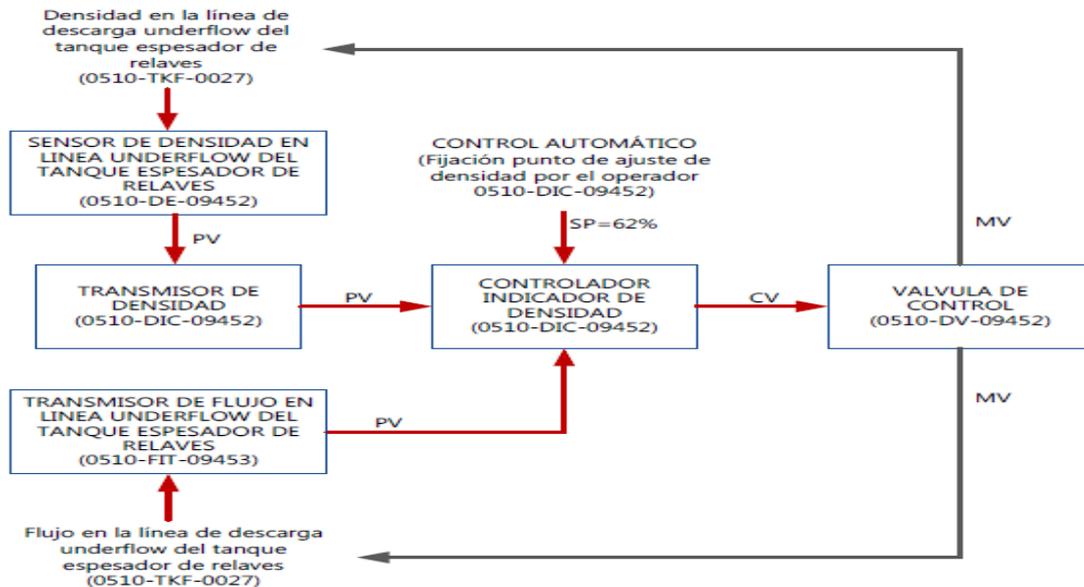
**– Control automático**

Se tienen dos líneas de descarga en el espesador de relaves (0510-TKF-0026), para después juntarse en una sola línea en donde se tiene un sensor de densidad (DE-09452) del tipo radiactivo con su respectivo transmisor de densidad (DT-09452), enviando la señal (PV) al controlador indicador de densidad (DIC-09452). El controlador compara esta señal con el punto de ajuste (SP), previamente configurado en el DCS, obteniendo un valor de error (E) y según su lógica de control envía la variable de control (CV) hacia la válvula (DV-09452), variando su grado de apertura.

Si la densidad es alta, el controlador empezará a abrir gradualmente la válvula (DV-09452), aumentando el flujo de descarga y disminuyendo la densidad, hasta obtener la densidad deseada. Si la densidad es baja, el controlador empezará a cerrar gradualmente la válvula (DV-09452) disminuyendo el flujo de descarga y aumentando la densidad, hasta obtener la densidad deseada.

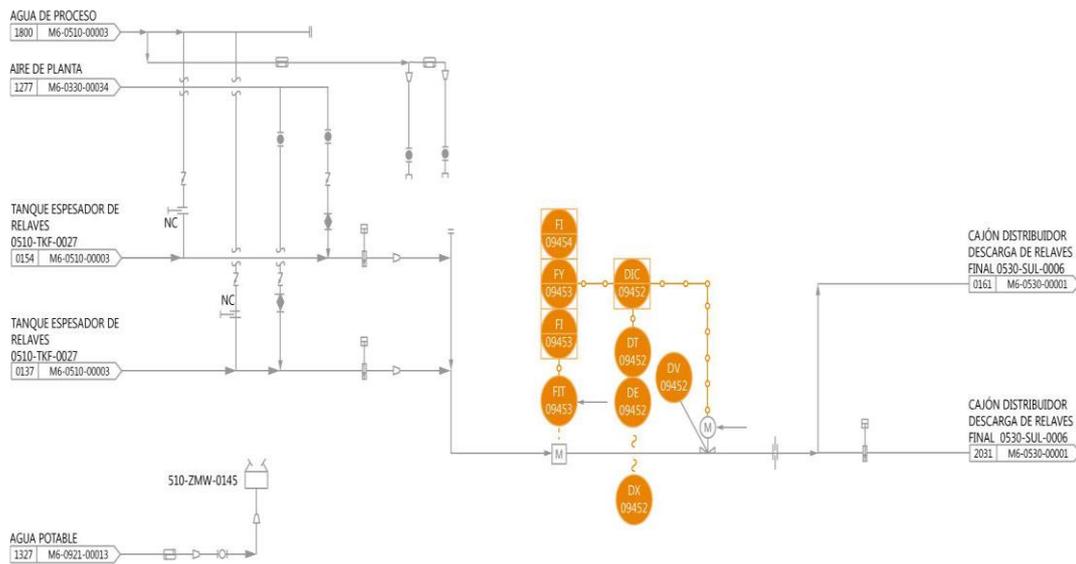
Nota: También se tiene un transmisor indicador de flujo (FIT-09453), antes del sensor de densidad, el cual junto con el controlador indicador de densidad (DIC-09452) realizan la función (FY-09453), se obtiene el flujo másico que pasa por la línea.

Figura 26. Diagrama de bloques del lazo de control de densidad por la válvula DV-09452 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0027.



Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

Figura 27. P&ID de lazo de control de densidad por la válvula DV-09452 en la descarga underflow del tanque espesador 0510-TKF-0027.

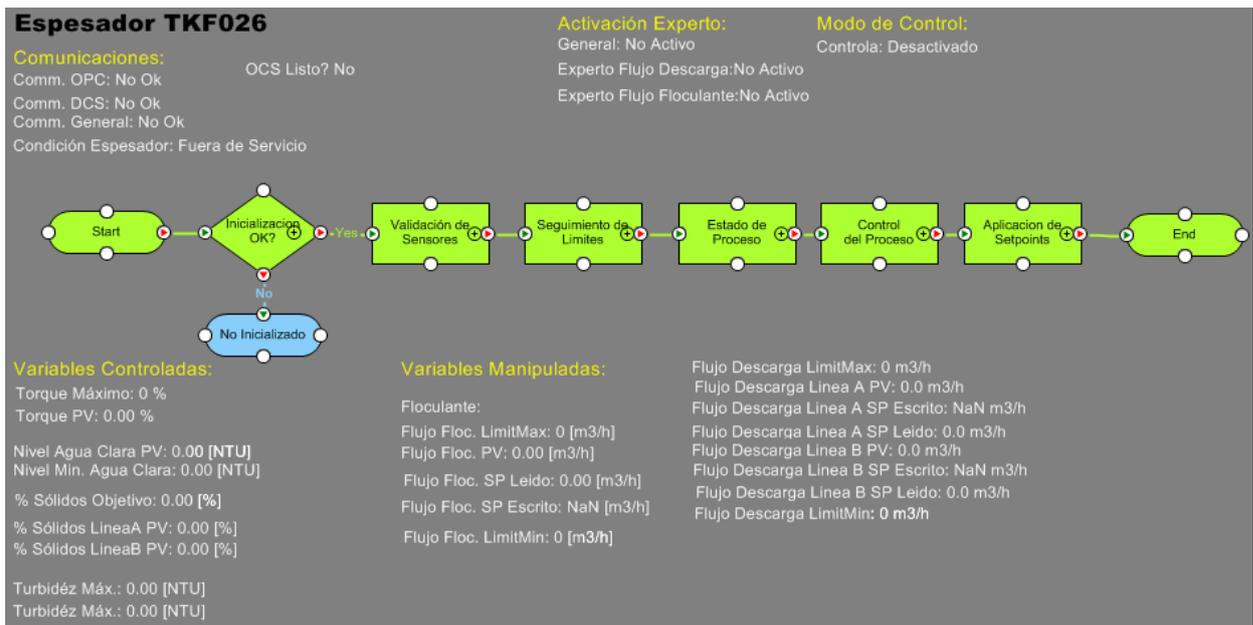


Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

### 3.3.3.8. Módulo de Controlador.

El sistema experto de espesadores de relaves fue desarrollado en la plataforma OCS-4D<sup>©</sup> en dos aplicaciones. El esquema general de la lógica configurada para cada aplicación se muestra en la Figura 28, en la que se aprecia el carácter secuencial de la misma. Esta lógica, permite separar las rutinas para permitir el seguimiento visual de ejecución de los distintos bloques y determinar de manera fácil y rápida (en forma general) algún inconveniente durante su ejecución (*e.g.*, bloque en falla, sin ejecución, etc.). Además, este ordenamiento permite una mejor comprensión y visualización de cómo se ejecuta la lógica, y de las magnitudes que las variables adquieren con el progreso de la misma.

Figura 28. Estructura general de lógica configurada del sistema experto de espesamiento relave.



Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

De acuerdo a la Figura 28, el bloque “Inicialización OK?” es una premisa para las rutinas de “Validación de Sensores” y “Seguimiento de Límites”. Luego, se ejecuta la rutina “Estado del Proceso” y “Control del Proceso”. Finalmente, se ejecuta la rutina/bloque de “Aplicación de Set-Points”.

El módulo de “Variables” contiene una pestaña específica para cada tipo de variable utilizada en el proyecto (*e.g.*, entradas, salidas), ver Figuras 29 y 30.

Figura 29. Variable de entrada del sistema experto de espesamiento de relave.

Inputs									
Locals Equations Outputs Devices Models All									
Name	Value	Unit	Quality	Timestamp	Real Time	Source	Type	Address	
▶ AguaClara.Nivel.Minimo	4.2	m	Good	21:26:28	4.2	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_NIV_TG.OUT	
▶ AguaClara.Nivel.Pv	0.2188	m	Good	16:31:34	0.2188	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:LI09003A.PNT	
▶ AguaClara.SmartDiver.Pv1	102.42	NTU	Good	15:31:04	102.42	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:AI09001.PNT	
▶ AguaClara.SmartDiver.Pv2	7.33	m	Good	15:30:07	7.33	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:AI09002.PNT	
▶ AguaClara.SmartDiver.Pv3	7.51	NTU	Good	15:30:07	7.51	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:AI09003.PNT	
▶ AguaClara.SmartDiver.Pv4	7.51	NTU	Good	15:30:07	7.51	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:AI09004.PNT	
▶ AguaClara.Turbidez.Max_	100	NTU	Good	21:26:28	100	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_TUR_LH.OUT	
▶ AguaClara.Turbidez.Pv	2.6003	ppm	Good	15:30:45	2.6003	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:AI09000.PNT	
▶ Descarga.LineaA.Densidad.Pv	1.651	[gr/cm...	Good	15:30:44	1.651	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:DI09342.PNT	
▶ Descarga.LineaA.Flujo.Pv	1433.5	m3/h	Good	15:31:07	1433	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:FI09343.PNT	
▶ Descarga.LineaA.Flujo.SP.Leido	1450	m3/h	Good	15:28:50	1450	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:FCI09343_SEL.OUT	
▶ Descarga.LineaA.Flujo.SP.Limit...	1450	m3/h	Good	15:23:03	1450	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_FLU_LH.OUT	
▶ Descarga.LineaA.Flujo.SP.Limit...	1300	m3/h	Good	15:22:38	1300	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_FLU_LL.OUT	
▶ Descarga.LineaA.HV9346.Status	0	Adm	Good	01:20:24	False	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:XU09346_LG2.BI03	
▶ Descarga.LineaA.Pinch9342.CO	50.2	%	Good	01:37:02	50.2	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:DV09342_FBK.PNT	
▶ Descarga.LineaA.Pinch9344.CO	29.5	%	Good	15:29:34	29.5	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_FLU_LL.OUT	
▶ Descarga.LineaA.Soldos.Pv	61.632	%	Good	15:31:07	61.62	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:DI09342_SOL.RO01	
▶ Descarga.LineaB.Densidad.Pv	1.6604	[gr/cm...	Good	15:29:31	1.6604	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:DI09352.PNT	
▶ Descarga.LineaB.Flujo.Pv	1448.4	m3/h	Good	15:31:07	1441.4	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:FI09353.PNT	
▶ Descarga.LineaB.Flujo.SP.Leido	1450	m3/h	Good	15:23:45	1450	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:FCI09353_SEL.OUT	
▶ Descarga.LineaB.Flujo.SP.Limit...	1450	m3/h	Good	15:23:03	1450	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_FLU_LH.OUT	
▶ Descarga.LineaB.Flujo.SP.Limit...	1300	m3/h	Good	15:22:38	1300	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_FLU_LL.OUT	
▶ Descarga.LineaB.HV9356.Status	0	Adm	Good	15:23:49	False	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:XU09356_LG2.BI03	
▶ Descarga.LineaB.Pinch9352.CO	100	%	Good	19:19:25	100	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:DV09352_FBK.PNT	
▶ Descarga.LineaB.Pinch9354.CO	29.1	%	Good	15:26:43	29.1	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:DV09354_FBK.PNT	
▶ Descarga.LineaB.Soldos.Pv	62.107	%	Good	15:31:07	62.084	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:DI09352_SOL.RO01	
▶ Descarga.Soldos.Objetivo	61.5	%	Good	22:25:18	61.5	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_DEN_TG.OUT	
▶ Flouclante.Flujo.PV	9.6702	m3/h	Good	15:31:07	9.6263	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0392TKF0027:FI07984.PNT	
▶ Flouclante.Flujo.SP.Leido	9	m3/h	Good	15:30:53	9	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0392TKF0027:FCI07984_SPT	
▶ Flouclante.Flujo.SP.LimitMax	9	m3/h	Good	15:30:36	9	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_FLO_LH.OUT	
▶ Flouclante.Flujo.SP.LimitMin	8	m3/h	Good	22:22:34	8	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_FLO_LL.OUT	
▶ Flotacion.Colas.Cu_Fe.Pv	0.022286	Adim	Good	15:21:09	0.022286	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_CU_FE.OUT	
▶ HV9012A.Status.Open	1	Adm	Good	23:15:38	True	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510SU0007:XU9012A_LG2.BI09	
▶ HV9012B.Status.Open	1	Adm	Good	23:04:50	True	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510SU0007:XU9012B_LG2.BI09	
▶ HV9012C.Status.Open	1	Adm	Good	20:59:44	True	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510SU0007:XU9012C_LG2.BI03	
▶ OCS.Comunicacion.Heartbeat...	0	Adm	Good	15:30:50	1	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSEGEN_HB_OU.OUT	
▶ OCS.DB.LifeTime	844	days 1...	Time	Good	15:31:09		System	TimeSpan DBLifeTime	
▶ OCS.DB.Size	6.6659	GB	Good	15:22:00			System	Real DBSize	
▶ OCS.DB.WriteTime	0.2496	Sec	Good	15:30:49			System	Real DBWriteTime	
▶ OCS.ExecutionTime	0.6552	Sec	Good	15:30:50			System	Real ExecutionTime	
▶ OCS.ExpertOn.Descarga.Flujo	1	Adm	Good	21:04:57	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_DESCA.OUT	
▶ OCS.ExpertOn.Flouclante.Flujo	1	Adm	Good	21:04:57	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_FLOCU.OUT	
▶ OCS.ExpertOn.General	1	Adm	Good	00:04:07	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSEGEN_START.OUT	
▶ OCS.ExpertOn.TKF_026	1	Adm	Good	21:04:57	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_START.OUT	
▶ OCS.LogicExecTime	0.3744	Sec	Good	15:30:50			System	Real LogicExecutionTime	

0/58 : 0 variable, 0 fuzzy set selected

Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

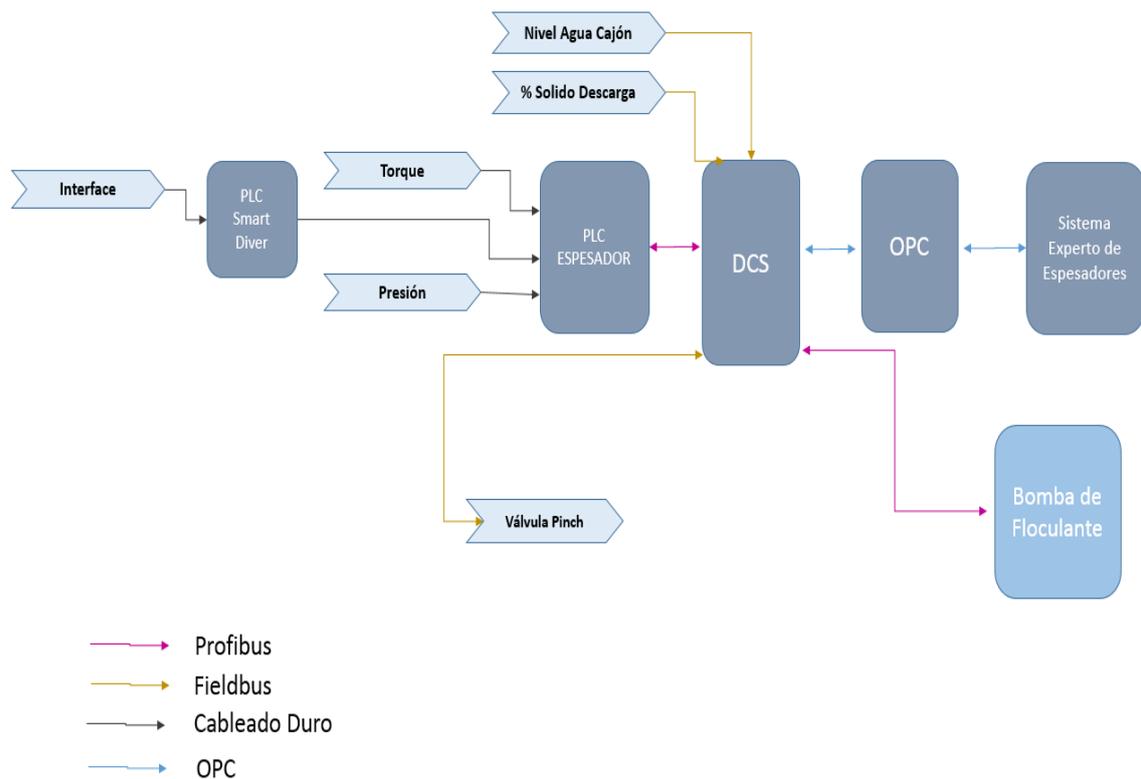
Figura 30. Variable de salida del sistema experto de espesamiento de relave.

Inputs									
Locals Equations Outputs Devices Models All									
Name	Value	Unit	Quality	Timestamp	Real Time	Source	Type	Address	
▶ Alarma.LineaA.Escrito	0	Adm	NotSent	15:30:29	0	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_AL_LA.MEAS	
▶ Alarma.LineaB.Escrito	0	Adm	NotSent	15:30:29	0	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_AL_LB.MEAS	
▶ Descarga.Flujo.LineaA.Relaj.Escrito	2.022	mm	OK	15:30:30	2.022	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_F9343.MEAS	
▶ Descarga.Flujo.LineaA.SP.Escrito	1450	m3/h	OK	15:30:30	1450	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSEP_F9343.MEAS	
▶ Descarga.Flujo.LineaB.Relaj.Escrito	2.1565	mm	OK	15:30:30	2.1565	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_F9353.MEAS	
▶ Descarga.Flujo.LineaB.SP.Escrito	1450	m3/h	OK	15:30:30	1450	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSEP_F9353.MEAS	
▶ Descarga.Flujo.SP.Cambio.LineaA.Escrito	177.76	m3/h	OK	15:30:30	177.76	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSENEW_F9343.MEAS	
▶ Descarga.Flujo.SP.Cambio.LineaB.Escrito	177.76	m3/h	OK	15:30:30	177.76	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSENEW_F9353.MEAS	
▶ Flouclante.Flujo.Relaj.Escrito	23.238	mm	OK	15:30:30	23.238	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_F7984.MEAS	
▶ Flouclante.Flujo.SP.Cambio.Escrito	0.046056	m3/h	OK	15:30:30	0.046056	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSENEW_F7984.MEAS	
▶ Flouclante.Flujo.SP.Escrito	10	m3/h	NotSent	15:27:48	10	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSEP_F7984.MEAS	
▶ OCS.Comunicacion.Heartbeat.PulseEscrito	1	Adm	OK	15:30:29	1	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_HB_IL.MEAS	
▶ OCS.Espesador.Operatividad.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_OPERAT.MEAS	
▶ OCS.ExpertOn.Descarga.Flujo.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_DESC_EN.MEAS	
▶ OCS.ExpertOn.Flouclante.Flujo.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_FLOC_EN.MEAS	
▶ OCS.ExpertOn.General.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSEGEN_EN.MEAS	
▶ OCS.ExpertOn.TKF026.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_EN.MEAS	
▶ OCS.Listo.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCST4_LISTO.MEAS	
▶ OCS.Modo.Control.AguaClara.Escrito	0	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_MAGUA.MEAS	
▶ OCS.Modo.Control.Soldos.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_MDENS.MEAS	
▶ OCS.Modo.Control.SU0036.Escrito	0	Adm	OK	15:30:30	0	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_MSU.MEAS	
▶ OCS.Modo.Control.Torque.Escrito	0	Adm	OK	15:30:30	0	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_MTORQ.MEAS	
▶ OCS.Modo.Control.Turbidez.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_MTUR.MEAS	
▶ Sensor.AguaClara.Nivel.Ok.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_ST_IL.MEAS	
▶ Sensor.AguaClara.Turbidez.Ok.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_ST_TU.MEAS	
▶ Sensor.Descarga.Densidad.Ok.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_ST_DT.MEAS	
▶ Sensor.Descarga.Flujo.Ok.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_ST_FT.MEAS	
▶ Sensor.Flouclante.Flujo.Ok.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_ST_FL.MEAS	
▶ Sensor.SU0036.Nivel.Ok.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Real	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_ST_SU.MEAS	
▶ Sensor.Torque.Ok.Escrito	1	Adm	OK	15:30:30	1	OPC	Integer	\\140.82.5.19\AIM.OPC.1\I2J5007\0510TKF0026:OCSTM4_ST_OT.MEAS	

Fuente: Planta concentradora objeto de estudio.

Como se observa en la Figura 31, la interacción de estas estructuras, genera una compleja red de señales que alimentan e interactúan con el mecanismo, para razonar de acuerdo a la secuencia de reglas lógicas diseñadas. Cada estructura procesa estas señales, mediante la ejecución de *script* o ficheros de programación, que contienen pasó a paso el razonamiento del sistema experto en lenguaje computacional.

Figura 31. Red de señales sistema experto de espesadores de relave



Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.4. Situación de la variable dependiente con la propuesta

Disminución en la variación del proceso, aumento en la capacidad de espesamiento de relave, que como resultado disminuyó los costos de producción.

La tabla 10 muestra una comparativa sobre los parámetros de producción antes (enero – abril) y después de la automatización (mayo – agosto).

Tabla 10. Comparación parámetros de producción antes y después de la automatización.

<b>Parámetros de Operación</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Incremento /</b>
	<b>Enero - Abril</b>	<b>Mayo - Agosto</b>	<b>Mejora</b>
Producción de Relaves (tms)	135470,8	139343	<b>3872,2</b>
Volumen Agua Recuperada Espesadores (M3)	183261,5	191870,975	<b>8609,475</b>
Contenido de Sólidos U/F Espesador 26 (%) Marcy	60,5	62,1	<b>1,6%</b>
Contenido de Sólidos U/F Espesador 27 (%) Marcy	60,7	62	<b>1,3%</b>
Turbidez Overflow Espesador 26 (NTU)	170,2	85,25	<b>84,95</b>
Turbidez Overflow Espesador 27 (NTU)	169,0	86	<b>83</b>
Consumo floculante (kg)	760,0	728,5	<b>31,5</b>

Fuente: Elaboración propia.

Con la implementación del sistema experto de espesamiento de relave final se ha tenido una mejora en los parámetros de la operación de los espesadores de relave final como lo mostrado en la tabla 10. Con estos parámetros de operación se mejora la producción de los espesadores de relave, lo cual nos permite reducir costos de producción al utilizar menor cantidad de reactivos, energía y al incrementar la vida útil de los equipos y presa relave.

### **3.3.5. Análisis costo beneficio de la implementación del sistema experto para el proceso de espesamiento de relave**

#### **3.3.5.1. Costos**

El costo de la propuesta para la automatización del proceso de espesamiento de relave final en la planta concentradora de cobre fue la suma de \$.74.000 dólares. El proyecto incluirá el diseño, software, implementación y puesta en servicio del sistema experto de espesamiento de relava (APC). Según el Cronograma de la implementación de la automatización del proceso de espesamiento de relave final, (ver anexo 03)

### 3.3.5.2. Beneficios

Como beneficios de la implementación del sistema experto para el proceso de espesamiento de relave, se logró una disminución en el requerimiento de energía eléctrica, reducción de labores de mantenimiento correctivo y preventivo, eficiencia en la dosificación de floculante, En el consumo de floculante, esta variante se rige a las condiciones de la granulometría el mineral, el tipo de mineral y otros que son variantes en la operación de los espesadores de relave. Según el resultado en la medición del consumo de floculante la comparación del consumo antes de la automatización y con la automatización, resulto una mejoría pasando de 760 kg./día(\$. 2.857,6) a 728.5 kg./día (\$. 2.739,2) de floculante PHP 20, representando un ahorro de \$. 3.553 mensual.

Luego, la tabla 10 muestra una comparativa sobre el consumo energético antes (enero – abril) y después de la automatización (mayo – agosto).

*Tabla 11.* Comparación de gasto energético antes y después de la automatización.

<b>Parámetros de Operación</b>	<b>Promedio Enero - Abril</b>	<b>Promedio Mayo - Agosto</b>	<b>Diferencia</b>
T/H bombeo PPV072 @ 075(671kw)	2.400,00	2.325,75	<b>74,25</b>
T/H bombas PPC0141 @ 0148(810kw)	4.753,75	4.711,50	<b>42,25</b>
Coste de Energía \$ kW/h	0,068	0,068	<b>0</b>
Total Consumo de Energía kW	5.430.407,00	5.376.893,25	<b>53.513,75</b>
Costo total de Energía	\$369.267,68	\$ 365.628,74	<b>\$ 3.638,9</b>

Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar el bombeo de agua recuperada de los espesadores, se reduce las horas de bombeo del sistema de agua de proceso de presa relave las bombas centrifugas verticales de 2440 a 2325 horas y las bombas centrifugas horizontales 4753 a 4711.5 horas. Este escenario mejora la recuperación de agua de proceso en los espesadores de relave y reduce las horas de bombeo del sistema de agua de proceso de la presa relave. Como resultado se reduce el costo en el consumo de energía 5.430.407,00 kw/mes (\$. 369.267,68) a

5.376.893,25 kw (\$. 365.628,74), representando un ahorro en el costo de consumo de energía de \$. 3.638,9 mensual.

Posteriormente, la tabla 11 muestra una comparativa entre el consumo energético antes (enero – abril) y después de la automatización (mayo – agosto).

*Tabla 12.* Comparación de gasto de mantenimiento antes y después de la automatización.

<b>Costo de Mantenimiento</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Diferencia</b>
	<b>Enero - Abril</b>	<b>Mayo - Agosto</b>	
Mantenimiento Correctivo	\$42.424,38	\$41.977,26	<b>\$265,12</b>
Mantenimiento Programado	\$180.195,91	\$178.507,41	<b>\$1.688,5</b>
Mano de Obra	\$50.454,20	\$48.636,52	<b>\$1.817,68</b>
<b>Costo por Mes</b>	<b>\$273.074,49</b>	<b>\$269.121,18</b>	<b>\$3.953, 31</b>

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al mantenimiento correctivo y preventivo de los equipos de espesadores y bombas al automatizar el proceso de espesamiento de relave tendremos un mejor diagnóstico de las fallas que presente el equipo, la automatización optimizo y mejoro la vida útil de equipos ya que no permitirá trabajar con torques altos en la rastra lo cual daña las unidad hidráulica y sistema de rastra de los espesadores, al tener el reboce de agua de proceso con turbidez bajos las bombas centrifugas de bombeo de agua de proceso a planta, mejoro la vida útil de las bombas, menor desgaste de los en las piezas mecánicas de la bomba, por lo cual menos frecuencia de apoyo por el personal de mantenimiento mecánico en los mantenimiento correctivo y programados. Con estas condiciones de mejora con la automatización tenemos una reducción de costo en Mantenimiento de Equipos de Espesadores y Bombas, específicamente en mantenimiento correctivo, programado y mano de obra del personal directo y contratistas de \$. 273.074,49 a \$. 269.121,18 una reducción de costo de mantenimiento de \$ 3.953,31 mensual.

### 3.3.5.3. Análisis costo – beneficio

Una vez determinados los costos y los beneficios de la implementación del sistema experto se procedió al desarrollo del análisis de costo – beneficio. Para esto se determinaron los índices económicos de valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno, y periodo de devolución (PD) o periodo de recuperación de la inversión (PRI). Para el cálculo del mismo se empleó la hoja de cálculo Excel versión 2010.

Se consideraron las siguientes premisas:

- Tiempo de vida útil del proyecto 10 años
- Valor de tasa de descuento k a considerar será de 10% (0,1).
- Flujo de caja anual es \$.133.742, 52. Monto obtenido a partir de ahorro mensual en floculante \$. 3.553, consumo de energía eléctrica \$. 3.638,9, y mantenimiento \$ 3.953,31

#### a. Periodo de devolución (PD).

Tabla 13. Flujo de caja por año y acumulador

Descripción	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Flujo de caja (\$M)</b>	-74	133. 7	133. 7								
<b>Flujo de caja acumulado (\$M)</b>	-74	59.7	193. 4	327. 2	460. 9	594. 7	728. 4	862. 2	995. 9	112 9.7	126 3.4

Fuente: Elaboración propia.

Luego tenemos que

$$PD = Z * \frac{Fz}{Fa}$$

$$PD = 0 * \frac{|-74|}{133.7} = 0$$

El resultado del cálculo del PD = 0, por lo tanto, la inversión se recobra en el mismo año de inversión del proyecto.

#### b. Valor presente neto (VPN).

Para calcular el valor presente neto se aplicó la fórmula que se muestra a continuación:

$$VPN = -I_0 \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + k)^t}$$

Donde,

$$I_0 = \$74.000$$

$$F_t = \$133.742,52.$$

$$k = 0,1$$

$$n = 10$$

Luego, resolviendo la ecuación con la ayuda de la herramienta de cálculo Excel tenemos que el VPN = \$.679.809.

**c. Tasa retorno de la inversión (TIR).**

Para calcular la tasa retorno de la inversión se aplicará la formula mostrada a continuación, en la cual se despejará la variable TIR:

$$VPN = -I_0 \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = 0$$

Donde,

$$I_0 = \$74.000$$

$$F_t = \$133.742,52.$$

$$n = 10$$

Luego, con la ayuda de la herramienta de cálculo Excel se resolvió la ecuación con obteniendo que el TIR = 1,81.

**d. Evaluación financiera.**

Analizando los valores obtenidos de los indicadores financieros:

- La inversión se recobra durante el mismo año de la inversión, ya que el PD o PRI es igual a 0.
- El resultado del VPN fue igual a \$.679.809 siendo el mismo mayor a 0, es decir,  $VPN > 0$ .
- El resultado del TIR fue igual a 1,81 siendo el mismo mayor a 0, es decir,  $TIR > 0$ .
- Por lo tanto, podemos afirmar que la implantación del proyecto de inversión para la automatización del proceso de espesamiento final de relave por medio de un sistema experto es económicamente factible.

# CAPÍTULO IV

## IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Previo al desarrollo de un proyecto, sea una investigación o un proyecto de inversión es necesario realizar un diagnóstico del objeto de la investigación con el fin de constatar la situación actual. Para este fin, herramientas de recolección de datos como las entrevistas, así como otros instrumentos de análisis como los diagramas causa – efecto o las matrices FODA, utilizadas de forma combinada servirán para brindar un panorama global e integral al investigador o desarrollador.
- Dentro de la ejecución de proyectos de automatización, es fundamental realizar un levantamiento de la instrumentación y equipos de control con los que cuenta el proceso que se pretende automatizar. El responsable o equipo responsable de la ejecución del proyecto debe realizar un levantamiento de información en campo para validar que los equipos sean compatibles y cumplan con los requerimientos de la tecnología implementar. Se deben considerar los voltajes de operación, medio de comunicación (4-20 mA, Profibus, Fieldbus, otros), precisión, rango de operación, y cualquier otra variable o característica que permita determinar si pueden ser o no utilizados para la actualización tecnológica.
- La aplicación de sistemas expertos para el control de procesos, como el espesamiento final de relave, es ideal para el mejoramiento de este tipo de aplicaciones. Su funcionamiento combinado con la aplicación de software que operan bajo lógica difusa, simulan la funcionalidad de un operador con alto grado de exactitud, demostrando su relación con las tecnologías de inteligencia artificial. Para el caso de la planta concentradora objeto de estudio, los resultados en la mejora de la producción fueron significativamente positivos disminuyendo el consumo de floculante en un 4,2%, mejorando del contenido de sólidos entre un 1,3 a 1,6%, mejorando las características físicas del agua con una mejora del orden de 100% (antes 170 ahora 85,25), y con un incremento de recuperación de agua de relave de 8609,475 m<sup>3</sup>, y de producción de sólidos de 3872,2 TMS.
- El sistema experto permitió un funcionamiento más eficiente de los sistemas de bombeo de agua centrífugos y verticales, reduciendo unas 116,5 horas de operación combinadas mensuales, lo que representa un ahorro de energía mensual, ubicado en el orden de 53.513,75 kw.

- La automatización del sistema disminuyó el gasto de mantenimiento. Los datos sugieren que, gracias a la eficiencia lograda con la automatización, donde se disminuyen tanto las horas de operación de los equipos, así como se disminuyen los errores operacionales, se incrementó la tasa de aseguramiento de la vida útil de los equipos al tener más garantías para el mantenimiento de la integridad mecánica de los equipos.
- El funcionamiento del sistema de control experto depende de diferentes condiciones para su correcto funcionamiento. Por un lado, como todo sistema de control depende de los elementos sensores y elementos finales de control. Pero de forma particular, dependen de un set de reglas, las cuales guiarán al sistema en conjunto con la lógica programada, hacia la toma de decisiones requerida por cada proceso particular.
- Determinar la factibilidad de un proyecto de inversión es un paso importante que debe considerar todo proyecto. Este análisis no se debe realizar con la realización una simple operación aritmética que permita visualizar tomar un valor inicial y compararlo o restarlo al valor obtenido. Para estas evaluaciones se deben considerar como mínimo el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno de la inversión (TIR), y el periodo de devolución (PD) o periodo de retorno de la inversión (PRI). Con estos indicadores el investigador o desarrollador será capaz de determinar si un proyecto es factible económicamente o no.
- La precisión de la evaluación económica dependerá en alto grado de la información con la que cuente el investigador. Es decir, cuanto más detallada sea la información considerada dentro de los costos, beneficios, y otros particulares, más detallado y preciso será el análisis.
- La automatización del proceso de espesamiento final de relave de la planta concentradora objeto de estudio es factible técnica y económicamente. La evaluación económica del mismo arrojó como resultado un  $PD = 0$ , un  $VPN = \$679.809$ , y un  $TIR = 1,81$ , que con su consideración conjunta demuestran que el proyecto es altamente rentable.

#### **4.2. Recomendaciones.**

- Considerar el aporte del personal de operadores de espesadores para diseñar la filosofía del sistema experto de espesamiento de relave.
- Realizar el muestreo continuo en campo de turbidez, densidad y % sólido, para corroborar los datos que da lectura el sistema experto de espesamiento.
- El trabajo en campo es determinante para tener un conocimiento claro del sistema experto de espesamiento de relave.
- Ofrecer asesoría del área de control de proceso e instrumentación para el apoyo del planteamiento de las estrategias de control de los parámetros de operación de los espesadores.
- Mantener constante comunicación con el área de molienda, flotación para identificar el tipo y granulometría del mineral.
- Instalar un flujometro en la alimentación de relaves a los espesadores de relave para tener un mejor control en la operación del espesador, ya que teniendo este flujo en línea el sistema experto podría tomar mejor decisión con respecto a la jerarquía de control.
- Realizar al inicio de cada turno la prueba de sedimentación para verificar el comportamiento de decantación de relave y la claridad de agua de proceso, ya que esta prueba nos ayuda a ver velocidad de sedimentación.
- Realizar al inicio de cada turno ensayo de % solido de vía seca y gravedad específica de la pulpa de relave de descarga de espesadores, ya que esta data nos ayuda a optimizar la recuperación de % sólidos en la descarga de los espesadores de relave.
- Realizar semanal el ensayo reologico de yield strees en pulpa de relaves de la descarga de los espesadores con método Vane, para lo cual considerar densidad, solido, torque, dosificación de floculante, tonelaje de relava y presión de cono. Esta información nos permite conocer el relave que se está procesando en los espesadores cuanto de fuerza está generando al equipo.

### 4.3. REFERENCIAS

- Aiteco. (2019). Aiteco. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <https://www.aiteco.com/diagrama-causa-efecto-de-ishikawa/>
- Arenas, M. R. (2015). Estudio experimental: comparación del potencial de infiltración de relaves convencionales versus relaves espesados con metodología TTD. Obtenido de Repositorio Académico de la Universidad de Chile: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137724>
- Balta, R. A., & Vásquez, C. A. (2010). *Diseño del sistema de control automático del proceso de retratamiento dl relave en la unidad minera Orcopampa empresa Buenaventura*. Obtenido de Repositorio digital Universidad privada Antenor Orrego.
- Barrios, D. (22 de 07 de 2014). *Mineras reducen consumo energético hasta en 10% al usar tecnologías eficientes*. Obtenido de <http://gestion.pe/empresas/empresas-mineras-peru-reducen-consumo-energetico-hasta-10-al-usar-tecnologias-eficientes-2103654>
- Betancourt, F., & Concha, F. (2011). *Unveiling the myth of High Capacity Thickeners*. Santiago: UDEC.
- Cabrejos, J. A. (2011). *Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de agua a partir de relaves de gran minería de cobre mediante la tecnología de relaves espesados*. Obtenido de Cybertesis Universidad de Ingeniería.: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/789>
- Cabrejos, J. A. (2011). *Estudio de prefactibilidad para la recepción de agua a partir de relaves de gran minería de cobres mediante la tecnología de relave*. Obtenido de Repositorio Universidad de Ingeniería.
- Cateriano, P. (23 de 05 de 2016). *Minera Cerro Verde inaugura nueva planta concentradora de cobre*. Obtenido de Andina: <http://www.andina.com.pe/Agencia/noticia-minera-cerro-verde-inaugura-nueva-planta-concentradora-cobre-613876.aspx>
- Cipriano, A. (2015). *Las tecnologías de Automatización y su aplicación en minería*. Obtenido de Electroindustria: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2588&xit=las-tecnologias-de-automatizacion-y-su-aplicacion-en-mineria>
- Comportamiento y Psicología del Consumidor. (s.f.). Obtenido de <http://uprocomportamientoconsumidor.blogspot.com/2008/11/estrategias-de-posicionamiento.html>
- Cruzado, E., & Bravo, F. (2010). *IMPACTO DE LOS RELAVES MINEROS EN EL PERÚ*. Lima: Departamento de investigación y documentación parlamentaria.
- Definición. (2019). *Definición*. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <https://definicion.de/costo/>
- Diana carrillo, M. V. (s.f.). *tecnólogo negociación internacional*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/wilberfigo/posicionamiento-del-mercado>

- Fiscor, S. (7 de 01 de 2011). *Consideraciones de Diseño para un Sistema de Eliminación de Relaves*. Obtenido de Equipo minero: <http://www.equipo-minero.com/contenidos/1128-consideraciones-de-diseno-para-un-sistema-de-eliminacion-de-relaves.html#.V4Jh7tLhDIU>
- Flores, S. (17 de 04 de 2013). *Premian a peruana por invento de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de Rpp noticias: <http://rpp.pe/lima/actualidad/premian-a-peruana-por-invento-de-tratamiento-de-aguas-residuales-noticia-586130>
- Galaz, J. (31 de 09 de 2011). *Estado del arte en la disposición de los relaves espesados*. Obtenido de MEDMIN.
- García, F. A. (12 de 2007). *Modelo del Balance Hídrico del Tranque de Relaves Ovejería*. Obtenido de Repositorio Académico de la universidad de Chile: <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/104831>
- Gerencia de operaciones Cabildo. (2006). *Minera las cenizas S.A.*
- Gestiopolis. (2019). *Gestiopolis*. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <https://www.gestiopolis.com/calculo-del-periodo-de-recuperacion-de-la-inversion-o-payback/>
- Gonzales, S. E. (22 de 6 de 2016). *DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ESPESADOR DE RELAVES DE COBRE DE 15 METROS DIÁMETRO*. Obtenido de Acceso Libre a información científica para la innovación-ALICIA: <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/5350>
- ICMM. (2012). *The role of mining in national economies. Mining's contribution to sustainable development series*. London: ICMM.
- ISA. (2005). *The Automation, Systems, and Instrumentation Dictionary*. Chicago: ISA.
- ITCILO. (2019). *ITCILO*. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <http://managing-ils-reporting.itcilo.org/es/herramientas/analisis-de-causa-raiz-el-diagrama-de-espina-de-pescado>
- Kiernan, P. (1 de 8 de 2016). *Las presas de desechos de las mineras crecen en tamaño y en riesgos*. Obtenido de CLAES: <http://extractivismo.com/2016/08/las-presas-de-desechos-de-las-mineras-crecen-en-tamano-y-en-riesgos/>
- Lara, J. L. (18 de 10 de 2013). *Experiencias de Operación de Depósitos de*. Obtenido de Golder Associates.
- lenntech. (s.f). *Tratamiento de lodos - espesamiento*. Obtenido de <http://www.lenntech.es/tratamiento-lodos-espesamiento.htm>
- Lipták, B. (2006). *Process Control and Optimization*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- López, J. M. (4 de 2014). *“Diseño Hidráulico de un Sistema Gravimétrico para Relaves Mineros con un Caudal de 202 m<sup>3</sup>/h y 220 m de Desnivel*. Obtenido de Pontificia universidad Católica del Perú: <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/45899>

- Lovera, D., Coronado, A., Quiñones, J., Puente, L., Herrera, J., Malpartida, C., y otros. (2005). *MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE PROCESOS METALÚRGICOS: FLOTACIÓN, FILTRACIÓN, LIXIVIACIÓN Y ESPESAMIENTO*. Obtenido de Alicia: <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/715>
- MacMillan, G., & Considine, D. (1999). *Process / Industrial Instrument and Control Handbook*. McGraw and Hill: ISA.
- Matrizfoda. (2019). *Matrizfoda*. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <http://www.matrizfoda.com/dafo/>
- Matutti, E. O. (8 de 4 de 2016). *INFORME DE EXPERIENCIA PROFESIONAL: IMPLEMENTACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE COMISIONAMIENTO Y PUESTA EN MARCHA PARA LA PLANTA CONCENTRADORA DE LAS BAMBAS MINING COMPANY S.A.* Obtenido de <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/5286>
- Morales, P. (2014). AUTOMATIZACIÓN: MINERÍA DEL FUTURO. *Rumbo Minero Ed. 82, 1*.
- Moreno, M. (25 de Junio de 2010). *El Blog Salomón*. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <https://www.elblogsalmon.com/conceptos-de-economia/el-punto-de-equilibrio-y-su-importancia-estrategica>
- Olcay, R. H., Sales, G. E., & Hernández, C. A. (2014). Características principales de pastas minerales de relaves de manganeso preparadas en espesador de escala de laboratorio. *Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 17(34), 25-34.
- Pérez, j. (2016). *Definición de automatización*. Obtenido de Definición de: <http://definicion.de/automatizacion/>
- Poblete, A. V. (03 de 2012). *Potencial de Recuperación Energética en relaves de la Gran Minería, Factibilidad Técnico-Económica*. Obtenido de Repositorio Académico Universidad de Chile: <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/104420>
- Progressalean. (2019). *Progressalean*. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <https://www.progressalean.com/diagrama-causa-efecto-diagrama-ishikawa/>
- Restrepo, M. (23 de Octubre de 2017). *Rankia*. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <https://www.rankia.co/blog/mejores-cdts/3718561-que-tir-para-sirve>
- Rivera, D. A. (12 de 2012). *Estudio experimental del potencial de infiltración de relaves espesados TTD depositados directamente sobre suelos naturales*. Obtenido de Repositorio Académico d la Universidad de Chile: <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/112368>
- Riveros, C. (12 de 6 de 2014). *Tecnologías eficientes*. Obtenido de Ingenieros del cobre & minería: <http://www.ingenierosdelcobre.cl/tecnologias-eficientes/>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (5 de 12 de 2012). *¿El fin de los relaves?* Obtenido de Minería al día: <http://www.mch.cl/reportajes/el-fin-de-los-relaves/>

- Sette, R. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. España: Reverte.
- Significados. (2019). *Significados*. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <https://www.significados.com/costo-beneficio/>
- Smith, K., Carroll, S., & Ashford, S. (1995). Intra- and interorganizational cooperation: toward a research agenda. *Academy of Management Review*, 7-23.
- Snell, M. (1997). *Cost-Benefit for Engineers and Planners*. London: Thomas Telford Publications.
- Sociedad Latinoamericana para la Calidad. (2000). *Análisis Costo / Beneficio*. Sociedad Latinoamericana para la Calidad.
- THE TIIIE. (2019). *THE TIIIE*. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <http://tiie.com.mx/valor-presente-neto/>
- Urrestegui, A. (11 de 5 de 2014). *Relaves mineros amenazan al río Rímac en la sierra limeña*. Obtenido de El comercio: <http://elcomercio.pe/peru/lima/relaves-mineros-amenazan-al-rio-rimac-sierra-limena-noticia-1728793>
- Vaquiroy, J. (2019). *Pymes Futuro*. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de <https://www.pymesfuturo.com/vpneto.htm>
- Wakefield, M. (2012). *Guidebook for Cost/Benefit Analysis of Smart Grid*. Palo Alto: Electric Power Research Institute .
- Walker, S. (30 de 3 de 2016). *Estrategias de Manejo de Relaves para Satisfacer las Demandas de Hoy en Día*. Obtenido de Equipo minero: <http://www.equipo-minero.com/contenidos/2016-estrategias-de-manejo-de-relaves-para-satisfacer-las-demandas-de-hoy-en-dia.html#.V6dgstLhDIU>

# ANEXOS

**ANEXO N° 01:**

**Matriz de la consistencia de la investigación.**

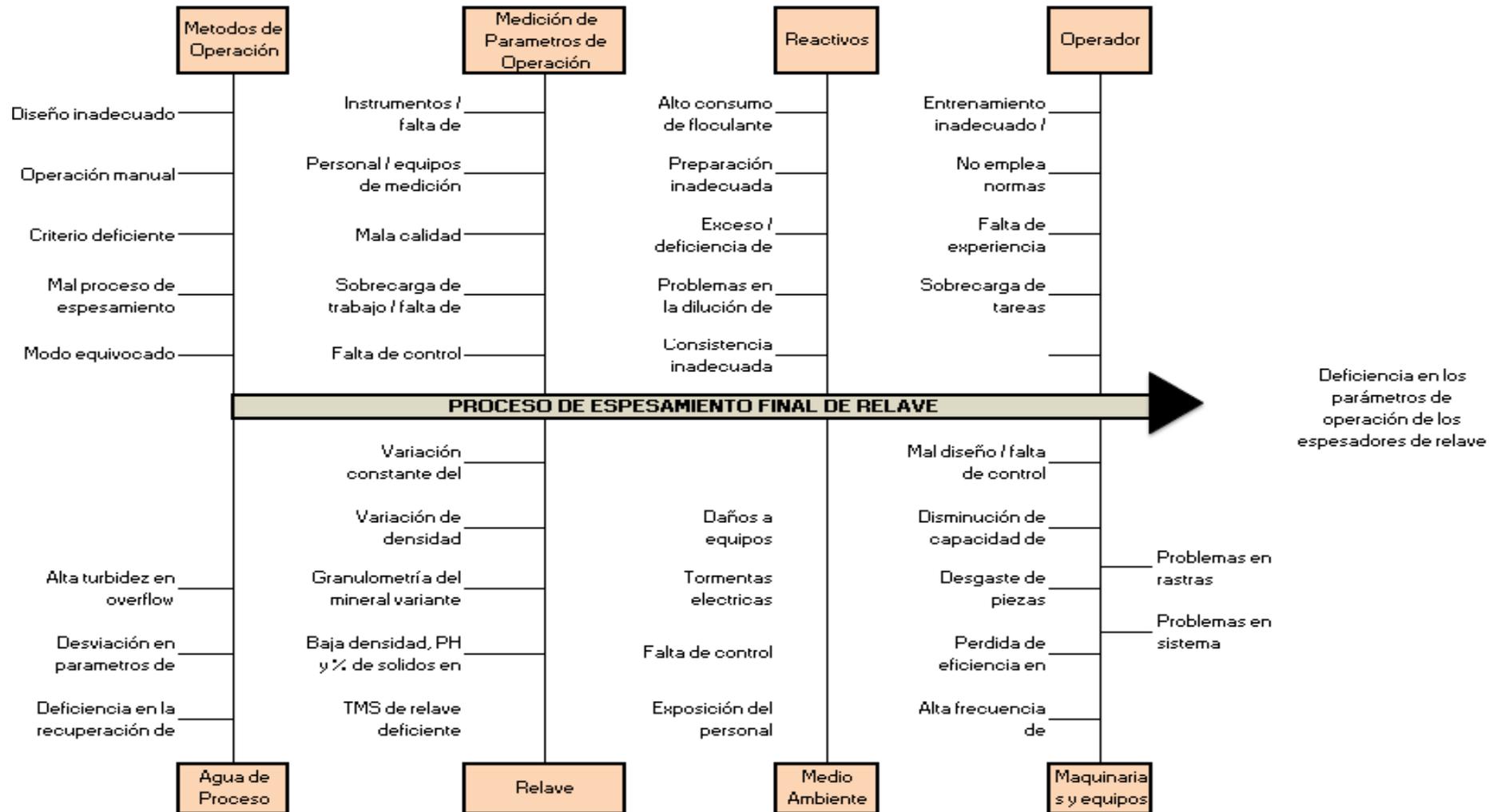
Título: “automatización del proceso de espesamiento de relave final en la planta concentradora de cobre para mejorar la producción para el año 2018”

<b>PROBLEMA</b>	<b>HIPÓTESIS</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>VARIABLES/DIMENSIONES</b>	<b>METODOLOGÍA</b>
<p><u>General:</u> ¿De qué manera la automatización del proceso de espesamiento de relava final mejora la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?</p>	<p><u>General:</u> Si se automatiza el proceso de espesamiento de relave final, entonces mejorará la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018.</p>	<p><u>General:</u> Automatizar del proceso de espesamiento de relave final para mejorar la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018.</p>	<p><u>Variable independiente:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Automatización del proceso de operación de los espesadores de relave final</li> </ul> <p><u>Variable dependiente:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Mejorar la producción en la Planta Concentradora de Cobre</li> </ul>	<p><b>Enfoque:</b> Investigación Mixta. <b>Tipo:</b> Investigación descriptiva, aplicada. <b>Diseño:</b> Descriptivo Pre Experimental.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin: 5px 0;">             GE: O1 → X → O2         </div> <ul style="list-style-type: none"> <li>GE: Grupo experimental.</li> <li>O1: Producción de relaves</li> <li>O2: mediciones después de la Aplicación de los instrumentos</li> <li>X: (automatización del proceso de espesamiento de relaves</li> </ul> <p><b>Población:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Trabajadores del área de operaciones (8) y los</li> </ul>
<p><u>Sub problemas:</u> ¿De qué manera la elaboración de un diagnóstico sobre la situación actual de operación de los espesadores de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?</p>	<p><u>Específicos:</u> Si se realiza un diagnóstico sobre la situación actual de operación de los espesadores de relave final, entonces nos permitirá tomar decisiones correctas para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.</p>	<p><u>Específicos:</u> Diagnosticar y describir el proceso de operación de los espesadores de relave final para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.</p>		

PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES/DIMENSIONES	METODOLOGÍA
<p>¿De qué manera la selección de los elementos (equipos, instrumentos, sensores y componentes) para la automatización del proceso de espesamiento de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?</p>	<p>Si se selección los elementos (equipos, instrumentos, sensores y componentes) para la automatización del proceso de espesamiento de relave final, entonces podremos tomar medidas correctivas para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.</p>	<p>Seleccionar los elementos (equipos, instrumentos, sensores y componentes) para la automatización del proceso de espesamiento de relave final para la mejora de la producción de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.</p>		<p>procesos de espesamiento de relaves.</p> <p><b>Muestra:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 trabajadores</li> <li>• Muestra de turbidez y agua recuperada</li> <li>• Densidad y % de solidos del underflow</li> <li>• Parámetros de operación de unidad hidráulica</li> <li>• Nivel de interface</li> <li>• Consumo de floculante</li> <li>• Producción de relave</li> </ul>
<p>¿De qué manera el diseño e implantación de un sistema de automatizado para el proceso de espesamiento de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?</p>	<p>Si se realiza diseño e implantación de un sistema automatizado para el proceso de espesamiento de relave final, entonces nos permitirá mejorar la producción en el proceso de espesamiento de la planta concentradora de cobre, en el año 2018.</p>	<p>Diseñar e implantar un sistema automatizado para el proceso de espesamiento de relave final para mejorar la producción de la planta concentradora de cobre en el año 2018</p>		
<p>¿De qué manera la realización de la evaluación costo beneficio antes y después de la automatización del proceso de espesamiento de relave final ayudaría en la mejora de la producción en la planta concentradora de cobre, para el año 2018?</p>	<p>Si se realiza la evaluación costo beneficio antes y después de la automatización del proceso de espesamiento de relave final de la planta concentradora de cobre, entonces determinaremos el beneficio en la mejora de la producción.</p>	<p>Evaluar y comparar los resultados del costo beneficio antes y después de la automatización del proceso de espesamiento de relave final en la planta concentradora de cobre para evidenciar la mejora en la producción en el año 2018.</p>		

ANEXO N° 02.

Diagrama de Ishikawa de los espesadores de relave final.





ANEXO N° 04:

Pantalla General del Sistema Experto de espesamiento de relave final

Modos de Control      Activación General Sistema Experto      Activación Sistema Experto por Espesador      Activación Sistema Experto por Lazo

0510 - ESPEPADORES RELAVES - SISTEMA EXPERTO

SISTEMA EXPERTO ESPEPADORES RELAVES

**OBJETIVOS**

Torque Maximo 25.00 %  
 Nivel Minimo Agua Clara 3.50 m  
 Porcentaje Solidos Objetivo 61.00 %

**OBJETIVOS**

Torque Maximo 5.00 %  
 Nivel Minimo Agua Clara 0.00 m  
 Porcentaje Solidos Objetivo 0.00 %

Nivel Minimo Cajon SU0036 40.00 %

**EXPERTO FLUJO DESCARGA**  
 INACTIVO  
 Maximo 2050.00 m3h  
 Linea A 1416.20 Linea B 1454.16 m3h  
 SPT 1416.20 1454.16 m3h  
 PV 1416.20 1454.16 m3h  
 Minimo 1000.00 m3h

**EXPERTO FLUJO FLOCULANTE**  
 INACTIVO  
 Maximo 25.00 m3h  
 SPT 9.00 m3h  
 PV 9.03 m3h  
 Minimo 8.00 m3h

**EXPERTO FLUJO DESCARGA**  
 INACTIVO  
 Maximo 1800.00 m3h  
 Linea A 1078.02 Linea B 1053.13 m3h  
 SPT 1078.02 1053.13 m3h  
 PV 1078.02 1053.13 m3h  
 Minimo 950.00 m3h

**EXPERTO FLUJO FLOCULANTE**  
 INACTIVO  
 Maximo 25.00 m3h  
 SPT 9.00 m3h  
 PV 8.99 m3h  
 Minimo 7.00 m3h

**ELECCION PINCH - DESCARGA ESPEPADORES**

Linea	TKF0026			TKF0027		
	DV	Estado	Se fija en:	DV	Estado	Se fija en:
Linea A	DV 09342	OFF	M 70.00 %	DV 09342	OFF	M 13.00 %
	DV 09344	ON	M 19.40 %	DV 09344	OFF	M 30.20 %
Linea B	DV 09352	OFF	M 69.90 %	DV 09342	OFF	M 1.70 %
	DV 09344	ON	M 19.40 %	DV 09344	OFF	M 17.00 %

**ESTADO**

Comunicaciones    
 OCS Listo para Controlar    
 TKS-0026 Operativo    
 TKS-0027 Operativo

**MODO DE CONTROL**

	TKF0026	TKF0027
Torque	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nivel de Agua Clara	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Porcentaje Solidos Descarga	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nivel Cajon SU0036	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Turbidez	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**ESTADO DE SENSORES**

	TKF0026	TKF0027
Torque	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Nivel de Agua Clara	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Densimetro	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Flujometro Descarga	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Turbidez	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Nivel Cajon SU0036	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**PV's VARIABLES CONTROLADAS**

	TKF0026	TKF0027
Torque [%]	10.90	10.40
Nivel de Agua Clara [m]	4.16	3.94
Porcentaje de Solidos Descarga LA [%]	62.97	60.23
Porcentaje de Solidos Descarga LB [%]	61.97	59.49
Presion Lecho [kPa]	4700.00	5500.00
Turbidez [NTU]	57.59	83.00
Nivel Cajon SU0036 [%]	107.40	

**Objetivos de Control (Var. Controladas)**

**Eleccion de Válvulas Pinch**

**Limites Máximos y Mínimos de Var. Manipuladas (floculante y flujo de descarga)**

**Status Sensores**

**Modos de Control**

**Activación General Sistema Experto**

**Activación Sistema Experto por Espesador**

**Activación Sistema Experto por Lazo**

**PV's variables Controladas**

## ANEXO N° 05:

### Pantalla ajuste de objetivos para control por Espesador

- Ingresar valor máximo de Torque permitido por espesador.
- Ingresar el Nivel mínimo permitido de interfaz de Agua Clara por espesador.
- Ingresar la fracción de sólidos objetivo en la descarga del espesador
- Ingresar el nivel máximo de turbidez.
- Ingresar el nivel mínimo para Cajón receptor de agua recuperada

OBJETIVOS	
Torque Maximo	25.00 %
Nivel Minimo Agua Clara	3.50 m
Porcentaje Solidos Objetivo	61.00 %

OBJETIVOS	
Torque Maximo	5.00 %
Nivel Minimo Agua Clara	0.00 m
Porcentaje Solidos Objetivo	0.00 %

Nivel Minimo Cajon SUU0036	40.00 %
Turbidez Maximo	70.00 NTU

## ANEXO N° 06:

### Pantalla ajuste de límites de variables manipuladas

- Ingresar límites máximos y mínimos de flujo de descarga para cada espesador (El límite máximo/mínimo que se ingresará, corresponde a una línea de descarga).
- Ingresar límites máximos y mínimos de flujo de floculante para cada espesador.
- Estos rangos deben ser establecidos en base a los criterios de operación, y de acuerdo al rango que requiera que se muevan las variables.
- Puede cambiar dichos límites en cualquier momento si requiere “apurar”(forzar mínimo) o “restringir” (forzar máximo) al sistema de control.

EXPERTO  
FLUJO DESCARGA

INACTIVO

Maximo 2050.00 m3/h

	Linea A	Linea B	
SPT	1416.20	1454.16	m3/h
PV	1416.20	1454.16	m3/h

Minimo 1000.00 m3/h

EXPERTO  
FLUJO FLOCULANTE

INACTIVO

Maximo 25.00 m3/h

SPT 9.00 m3/h

PV 9.03 m3/h

Minimo 8.00 m3/h

## ANEXO N° 07:

### LIBRETO PARA ENTREVISTA A OPERADORES, MANTENEDORES Y PERSONAL DE LA EMPRESA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE DE LA EMPRESA MINERA LA BAMBAS.

1. Indicar cargo, funciones, tiempo ejecutando esas funciones
2. ¿Cuenta la Planta Concentradora de Cobre con un sistema de control centralizado para las operaciones? *En caso afirmativo favor proseguir con las interrogantes 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4. En caso contrario seguir a la interrogante 2.*
  - 2.1. ¿Cuál es el sistema de control?
  - 2.2. ¿Qué procesos están automatizados?
  - 2.3. ¿La instrumentación, sensores, transmisores, elementos finales de control trabaja de forma neumática, 24 VDC, 110 VAC, u otro?
  - 2.4. ¿Tiene el sistema capacidad de reserva tanto instalado como en espacio, para la incorporación de nuevas señales y actualización de la lógica de control?
3. ¿Cuenta la Planta Concentradora de Cobre con sistemas de control dedicados a ciertos procesos? *En caso afirmativo favor proseguir con las interrogantes 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4. En caso contrario seguir a la interrogante 3.*
  - 3.1. ¿Cuáles son los sistemas de control?
  - 3.2. ¿Qué procesos están automatizados?
  - 3.3. ¿La instrumentación, sensores, transmisores, elementos finales de control trabaja de forma neumática, 24 VDC, 110 VAC, u otro?
  - 3.4. ¿Tiene el sistema capacidad de reserva tanto instalado como en espacio, para la incorporación de nuevas señales y actualización de la lógica de control?
4. ¿Cuáles son los equipos involucrados en el proceso de espesamiento de relave final?
5. ¿Qué instrumentación poseen los equipos involucrados en el espesamiento de relave final?
6. ¿Cuáles son las variables de operación normales y máximas de los equipos del sistema de espesamiento de relave final (presión, nivel, temperatura, caudal, pH, otro)?
7. ¿Es la instrumentación de los equipos del sistema de relave suficiente para cubrir la información requerida para las operaciones cotidianas y de emergencia?

8. ¿Cómo se realizan las operaciones de control de los equipos del sistema de espesamiento de relave final?

De forma manual

De forma automatiza

De forma parcialmente automatizada


Especificar respuesta:

9. ¿Qué aspecto o actividad del proceso de espesamiento de relave final representa mayor dificultad para las operaciones y como puede la automatización mejorar este aspecto?
10. ¿Cuáles son los puntos críticos de operación del proceso de espesamiento de relave final?
11. ¿El sistema de control para el espesamiento de relave final será dedicado a ese proceso o se integrara a otro sistema existente?
12. ¿Cómo se realiza el proceso de dosificación y manipulación del floculante?
13. ¿Se han presentado accidentes o incidentes producto de la manipulación manual del proceso de espesamiento de relave final?
14. ¿Con que frecuencia es necesario realizar mantenimientos correctivos y/o reemplazo de piezas, equipos, reparación de estructuras civiles, otros, a causa de que el agua de relave este fuera de especificación?
15. ¿Se han paralizado las actividades a causa de una operación manual inadecuada o por producto fuera de especificación?

**ANEXO 08:**

**Hoja de cotejo de datos del sólido**

**Instrumento: Densímetro y Balanza Marcy**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Densidad (%)</b>
Promedio del mes		
Observaciones:		

**ANEXO 09:**

**Hoja de cotejo de datos Recuperación de Agua**

**Instrumento: Flujometro**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>M3/h</b>
Promedio del mes		
Observaciones		

**ANEXO 10:**

**Hoja de cotejo de datos Turbidez del Agua**

**Instrumento: Turbidímetro**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Turbidez del Agua</b>
Promedio del mes		
Observaciones		

**ANEXO 11:**

**Hoja de cotejo de datos producción de relave**

<b>Mes</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Tn/día</b>	<b>Observaciones</b>
Total Tn/mes		

## ANEXO N° 12:

### Autorización para el recojo de información

 UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD <b>US</b>		
	GUÍA	Código	F PC US
	DE PRODUCTOS ACREDITABLES DE LAS ASIGNATURAS DE INVESTIGACIÓN	Visualización	00
		Hoja	50 de 52

#### MODELO DE AUTORIZACIÓN PARA EL RECOJO DE INFORMACIÓN

Apurímac, 02 de Enero del 2018.

Quien suscribe: Ing. Jorge Lau Oloya

Representante Legal: Supervisor Senior de Agua y Relaves

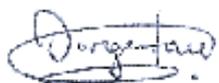
AUTORIZA: Permiso para recojo de información pertinente en función del proyecto de investigación, denominado: **AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE RELAVE FINAL EN LA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN PARA EL AÑO 2018.**

Por el presente, el que suscribe, Ing. Jorge Lau Oloya, Supervisor Senior de Agua y Relaves de la empresa Minera las Bambas SAC.

AUTORIZO al alumno: Roger Palomino Banda, Identificado con DNI Nro 42156687, quien labora en la empresa Minera las Bambas como Operador de Espesadores de Relave.

Estudiante de la Escuela Profesional de Ingeniería Industrial y autor del trabajo de investigación denominado: **AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE RELAVE FINAL EN LA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN PARA EL AÑO 2018**, al uso de dicha información que conforma el expediente técnico así como hojas de memorias, cálculos entre otros como planos para efectos exclusivamente académicos de la elaboración de tesis de **AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE RELAVE FINAL EN LA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN PARA EL AÑO 2018**, líneas arriba de quien solicita se garantice la absoluta confidencialidad de la información solicitada.

Atentamente.

  
 Jorge Lau Oloya  
Supervisor Senior  
Agua y Relaves

## ANEXO N° 13:

### Validación de Instrumentos



#### Universidad Señor de Sipán

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial

#### FICHA DE OPINIÓN DE EXPERTOS

Apellidos y nombres del experto: Pablo Félix QUISPE PINTO

Grado Académico: Ingeniero Mecánico

Cargo e Institución: Supervisor Mantenimiento Mecánico – Minera las Bambas SAC

Nombre del instrumento a validar: Formato y Encuestas

Autor del instrumento: Roger Palomino Banda

Título del Proyecto de Tesis: AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE RELAVE FINAL EN LA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN PARA EL AÑO 2018.

Indicadores	Criterios	Calificación			
		Deficiente De 0 a 5	Regular De 6 a 10	Bueno De 11 a 15	Muy bueno De 16 a 20
Claridad	Los ítems están formulados con lenguaje apropiado y comprensible				X
Organización	Existe una organización lógica en la redacción de los ítems				X
Suficiencia	Los ítems son suficientes para medir los indicadores de las variables				X
Validez	El instrumento es capaz de medir lo que se requiere				X
Viabilidad	Es viable su aplicación				X

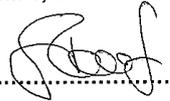
#### Valoración

Puntaje: (De 0 a 20) 17

Calificación: (De Deficiente a Muy bueno) **Muy Bueno**

#### Observaciones

Fecha: Apurímac, 01 de Enero del 2018

Firma: 

No. Colegiatura 82174

**Universidad Señor de Sipán**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial

**FICHA DE OPINIÓN DE EXPERTOS**

Apellidos y nombres del experto: Cabrera Quispe, Máximo Dennis

Grado Académico: Ingeniero Electrónico

Cargo e Institución: Ingeniero de Control de Procesos – Minera las Bambas SAC

Nombre del instrumento a validar: Formato y Encuestas

Autor del instrumento: Roger Palomino Banda

Título del Proyecto de Tesis: AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE RELAVE FINAL EN LA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN PARA EL AÑO 2018.

Indicadores	Criterios	Calificación			
		Deficiente	Regular	Bueno	Muy bueno
		De 0 a 5	De 6 a 10	De 11 a 15	De 16 a 20
Claridad	Los ítems están formulados con lenguaje apropiado y comprensible			X	
Organización	Existe una organización lógica en la redacción de los ítems				X
Suficiencia	Los ítems son suficientes para medir los indicadores de las variables				X
Validez	El instrumento es capaz de medir lo que se requiere			X	
Viabilidad	Es viable su aplicación				X

**Valoración**

Puntaje: (De 0 a 20) 15

Calificación: (De Deficiente a Muy bueno) Bueno

**Observaciones**

Verificar lo siguiente: sintaxis de textos, saltos de páginas, espaciado de textos, formato de ecuaciones, conexiones recursivas, formato de bibliografía

Fecha: Apurímac, 01 de enero del 2018

Firma:  .....

No. Colegiatura 166358

**Universidad Señor de Sipán**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial

**FICHA DE OPINIÓN DE EXPERTOS**

Apellidos y nombres del experto: Max Iván Medina Pariona  
 Grado Académico: Ingeniero Metalúrgico  
 Cargo e Institución: Sala de Control Planta Concentradora – Minera las Bambas S.A.C.  
 Nombre del instrumento a validar: Formato y Encuestas  
 Autor del instrumento: Roger Palomino Banda  
 Título del Proyecto de Tesis: AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE RELAVE FINAL EN LA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN PARA EL AÑO 2018.

Indicadores	Criterios	Calificación			
		Deficiente De 0 a 5	Regular De 6 a 10	Bueno De 11 a 15	Muy bueno De 16 a 20
Claridad	Los ítems están formulados con lenguaje apropiado y comprensible				<b>X</b>
Organización	Existe una organización lógica en la redacción de los ítems				<b>X</b>
Suficiencia	Los ítems son suficientes para medir los indicadores de las variables				<b>X</b>
Validez	El instrumento es capaz de medir lo que se requiere				<b>X</b>
Viabilidad	Es viable su aplicación				<b>X</b>

**Valoración**

Puntaje: (De 0 a 20) **18**

Calificación: (De Deficiente a Muy bueno) **Muy Bueno**

**Observaciones**

.....

Fecha: Apurímac, 01 de Enero del 2018

Firma:  .....

No. Colegiatura 164641