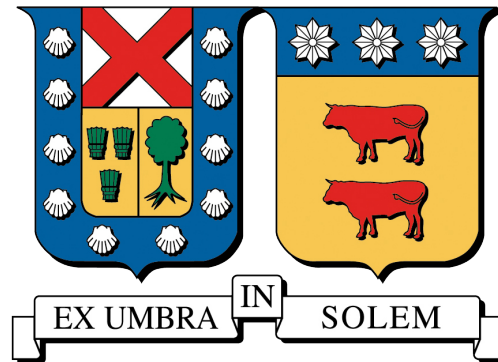


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO, CHILE



ESTUDIAR LA FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE
INCORPORAR UN SENSOR MULTIPARÁMETROS EN EL
PROCESO DE FLOTACIÓN DE UNA PLANTA
CONCENTRADORA.

JOSÉ ANTONIO DEL PINO VÁSQUEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : DIPL. ING. UDO RHEINSCHMIDT
PROFESOR/A CORREFERENTE : MG. RENÉ VALDENEGRO.

DICIEMBRE, 2023

Casa Central

ÍNDICE

1. Resumen Ejecutivo	8
2. Abstract	9
3. Glosario	10
4. Introducción	11
5. La empresa	12
5.1. Antecedentes Generales	12
5.2. Datos operacionales	12
6. Problema de Investigación	13
7. Objetivos	14
7.1. Objetivo General	14
7.2. Objetivos Específicos	14
8. Marco Teórico	15
8.1. Producción del concentrado de cobre	15
8.2. Planta concentradora	15
8.3. Flotación	16
8.4. Celda de flotación	16

9. Estado del arte	18
9.1. Estado actual del control de parámetros operacionales	18
9.1.1. Velocidad Superficial del Gas (Jg)	18
9.1.2. Flujo de Área Superficial de Burbujas (Sb)	18
9.1.3. Gas Hold Up (Eg)	19
9.1.4. Densidad de la Pulpa (RoBulk)	19
9.1.5. Nivel de Interfaz de Espuma (Hf)	20
9.2. Analisis comparativo de opciones de mercado.	20
9.2.1. Jameson Cell	21
9.2.2. JK Tech	21
9.2.3. McGill On/Off	22
9.3. Sensor Multiparámetros GDM-X1	22
10. Metodología	24
10.1. Introducción	24
10.2. Recopilación de datos	24
10.3. Montaje y desarrollo de pruebas industriales.	25
10.4. Resultados de pruebas	25
10.5. Análisis de datos	25
10.5.1. Datos Técnicos	25
10.5.2. Datos económicos	26

10.5.3. Datos ecológicos	26
10.6. Construcción de protocolo	26
10.7. Conclusiones	27
11. Recopilación de datos	28
12. Montaje y Desarrollo de pruebas industriales.	33
13. Resultados de pruebas.	35
13.1. Resultados de medición de velocidad superficial del gas (J_g).	35
13.2. Resultados de Medición de flujo de área superficial de burbujas (S_b).	37
13.3. Resultados de Medición de nivel de gas hold up (E_g).	39
13.4. Resultados de Medición de densidad de pulpa (ρ_b).	41
13.5. Resultados de Medición de nivel de interfase de espuma (H_f).	43
14. Análisis de datos	46
14.1. Análisis técnico	46
14.2. Análisis económico	47
14.3. Análisis ecológico	49
15. Construcción de protocolo	50
16. Conclusiones	52
16.1. Recomendaciones	52

17.Referencias	54
-----------------------	-----------

Bibliografía	54
---------------------	-----------

Índice de tablas

11.1. Tabla de componentes de circuito neumático.	30
11.2. Tabla de componentes de circuito electrónico.	30
11.3. Tabla de componentes independientes.	31
14.1. Cálculo de VAN de 0 a 4 años	47
14.2. Cálculo de VAN de 5 a 10 años	48
14.3. Resultados económicos obtenidos	48
14.4. Rendimiento de la Planta y Desperdicios actual	49
14.5. Rendimiento de la Planta y Desperdicios caso I	49
14.6. Rendimiento de la Planta y Desperdicios caso II	50

Índice de figuras

5.1. Región de Antofagasta.	12
8.1. Producción de cobre en BHP-Escondida.	15
9.1. Doble tubo concéntrico.	23
9.2. Esquema de instalación.	23
11.1. Diagrama de Lazos GDM-X1.	28
11.2. Circuito eléctrico	29
11.3. Circuito neumático	29
12.1. Conexión a corriente del equipo.	33
12.2. Inicio del sistema.	34
12.3. Carga de algoritmo.	34
13.1. Medición de velocidad superficial del gas (Jg) 20 de Julio.	35
13.2. Medición de velocidad superficial del gas (Jg) 21 de Julio.	36
13.3. Medición de velocidad superficial del gas (Jg) 22 de Julio.	36
13.4. Medición de velocidad superficial del gas (Jg) 23 de Julio.	37
13.5. Medición de flujo de área superficial de burbujas (Sb) 20 de Julio.	37
13.6. Medición de flujo de área superficial de burbujas (Sb) 21 de Julio.	38
13.7. Medición de flujo de área superficial de burbujas (Sb) 22 de Julio.	38
13.8. Medición de flujo de área superficial de burbujas (Sb) 23 de Julio.	39
13.9. Medición de nivel de gas hold up (Eg) 20 de Julio.	39

13.10Medición de nivel de gas hold up (Eg) 21 de Julio.	40
13.11Medición de nivel de gas hold up (Eg) 22 de Julio.	40
13.12Medición de nivel de gas hold up (Eg) 23 de Julio.	41
13.13Medición de densidad de pulpa (ρ_b) 20 de Julio.	41
13.14Medición de densidad de pulpa (ρ_b) 21 de Julio.	42
13.15Medición de densidad de pulpa (ρ_b) 22 de Julio.	42
13.16Medición de densidad de pulpa (ρ_b) 23 de Julio.	43
13.17Medición de nivel de interfase de espuma (Hf) 20 de Julio.	43
13.18Medición de nivel de interfase de espuma (Hf) 21 de Julio.	44
13.19Medición de nivel de interfase de espuma (Hf) 22 de Julio.	44
13.20Medición de nivel de interfase de espuma (Hf) 23 de Julio.	45

1. Resumen Ejecutivo

En el análisis técnico, se observó que la medición de Gas Hold Up (Eg) carecía de datos de BHP debido a la falta de entrega de mediciones por parte de la empresa. Sin embargo, se destacó que los valores de error en las mediciones de Jg variaron entre un mínimo del 0.17% y un máximo del 15%. Estas fluctuaciones se atribuyeron al movimiento de burbujas en la distribución del gas. A pesar de las dificultades, el sensor demostró ser capaz de identificar perfiles dentro de la máquina de flotación, lo que resaltó la importancia de evitar suposiciones de una distribución uniforme del gas en toda la celda. Los demás parámetros también mostraron un aumento en el margen de error con el tiempo, con la densidad de pulpa destacándose por su menor dispersión en las mediciones en comparación con BHP.

En cuanto al análisis económico, el proyecto reveló un Valor Actual Neto (VAN) de \$1.342.652, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 11%, un Punto de Recuperación (PR) de 7.45 años y un Retorno de la Inversión (ROI) del 34.26%. Estos resultados indican que el proyecto es altamente rentable y demuestran su viabilidad financiera, además de su capacidad para generar valor a largo plazo.

Desde una perspectiva ecológica, el análisis reveló que al mejorar el rendimiento del proceso de flotación en la planta concentradora, se logra una significativa disminución en la cantidad de desechos generados por unidad de volumen procesado. Comparando dos escenarios: un aumento del 1% y un aumento del 2% en la recuperación de cobre, se observó una reducción proporcional en la producción de desechos. Esto subraya la importancia de la mejora continua de la eficiencia del proceso de flotación en la reducción del impacto ambiental y en la optimización del uso de recursos y materias primas.

En relación al protocolo, la falta de fiabilidad en los datos obtenidos durante las pruebas industriales constituye un desafío para la creación de un protocolo detallado. Es crucial abordar estas limitaciones y las incertidumbres en la recopilación de datos antes de establecer un protocolo que garantice la calidad de las mediciones.

2. Abstract

In the technical analysis, it was observed that the Gas Hold-Up (E_g) measurements lacked BHP data due to the company's failure to provide measurements. However, it was noted that the error values in J_g measurements varied between a minimum of 0.17% and a maximum of 15%. These fluctuations were attributed to the movement of bubbles in the gas distribution. Despite the challenges, the sensor demonstrated its ability to identify profiles within the flotation machine, emphasizing the importance of avoiding assumptions of a uniform gas distribution throughout the cell. The other parameters also showed an increase in the margin of error over time, with pulp density standing out for its lower dispersion in measurements compared to BHP.

Regarding the economic analysis, the project revealed a Net Present Value (NPV) of \$1,342,652, an Internal Rate of Return (IRR) of 11%, a Payback Period (PP) of 7.45 years, and a Return on Investment (ROI) of 34.26%. These results indicate that the project is highly profitable and demonstrate its financial viability, as well as its ability to generate long-term value.

From an ecological perspective, the analysis revealed that by improving the flotation process's performance in the concentrator plant, a significant reduction in waste generated per unit of processed volume is achieved. Comparing two scenarios: a 1% increase and a 2% increase in copper recovery, a proportional reduction in waste production was observed. This underscores the importance of continuous improvement in the efficiency of the flotation process in reducing environmental impact and optimizing the use of resources and raw materials.

In relation to the protocol, the lack of reliability in the data obtained during industrial tests poses a challenge for the creation of a detailed protocol. It is crucial to address these limitations and uncertainties in data collection before establishing a protocol that ensures measurement quality.

3. Glosario

- **Jg**: Velocidad superficial del gas.
- **Sb**: Flujo de área superficial de burbujas.
- **Eg**: Gas Hold Up / Cantidad de gas retenida en forma de burbujas en una suspensión líquida.
- **RoBulk**: Densidad de pulpa.
- **Hf**: Nivel de Interfase de espuma.
- **HDPE**: Polietileno de alta densidad es un polímero termoplástico producido a partir del monómero etileno.
- **CAPEX**: Inversión que una empresa realiza en la compra de un activo fijo o para añadir valor a un activo existente con una vida útil que se extiende más allá del año imponible.
- **OPEX**: Gastos operativos necesarios para el funcionamiento diario de una empresa.
- **VAN**: El Valor Actual Neto es una medida utilizada en la evaluación de proyectos de inversión. Representa la diferencia entre el valor presente de los flujos de efectivo futuros generados por un proyecto y la inversión inicial requerida para llevar a cabo el proyecto.
- **ROI**: El Retorno de la Inversión es una medida que evalúa la rentabilidad de una inversión. Se calcula dividiendo la ganancia neta de una inversión por el costo inicial de la inversión y expresándolo como un porcentaje.
- **TIR**: La Tasa Interna de Retorno es una tasa de rendimiento utilizada para evaluar la rentabilidad de una inversión. Representa la tasa de interés a la cual el valor presente de los flujos de efectivo futuros de un proyecto es igual a la inversión inicial

4. Introducción

En el complejo entorno de la industria minera y metalúrgica, la búsqueda constante de innovaciones que optimicen los procesos productivos es una necesidad imperante. La eficiencia y rentabilidad de una planta concentradora dependen en gran medida de la precisión con que se monitorean y controlan los parámetros de flotación. En este contexto, surge la propuesta de este informe: «Estudiar la Factibilidad Técnica-Económica de Incorporar un Sensor Multiparámetros en el Proceso de Flotación de una Planta Concentradora».

La principal motivación de este estudio radica en la creciente demanda de tecnologías avanzadas que permitan una supervisión en tiempo real y una adaptación ágil en las operaciones de flotación. Para alcanzar este objetivo, es necesario evaluar exhaustivamente la viabilidad técnica, económica y ecológica de la incorporación de un sensor multiparámetros en este proceso clave de la planta concentradora.

Los objetivos específicos de este estudio abarcan diversos aspectos cruciales para el análisis integral de esta propuesta. En primer lugar, se realizará una revisión exhaustiva del estado actual de los sensores multiparámetros, indagando en su funcionalidad, ventajas y limitaciones. Esto permitirá establecer un marco de referencia sólido y fundamentado en la vanguardia tecnológica.

Posteriormente, se llevará a cabo una evaluación rigurosa de la factibilidad técnica, económica y ecológica de la implementación del sensor multiparámetros en el proceso de flotación. Esta evaluación considerará tanto los costos de adquisición e implementación como los posibles beneficios en términos de mejora en la eficiencia operativa y reducción de impacto ambiental.

La etapa de pruebas y análisis del desempeño del sensor en condiciones reales será un punto crucial en este estudio. Se realizarán pruebas en laboratorio y, de ser posible, en la propia planta concentradora en una escala piloto. La recopilación y análisis de datos permitirán evaluar con precisión la efectividad del sensor en la optimización de los parámetros de flotación.

La conclusión del estudio presentará los resultados obtenidos y establecerá un protocolo final que servirá de guía para la posible implementación del sensor multiparámetros. Con base en los datos recopilados y el análisis detallado, se pretende brindar una visión completa y objetiva sobre la conveniencia de esta incorporación.

5. La empresa

5.1. Antecedentes Generales

ISPROTEC SpA es una empresa ubicada en la ciudad de Antofagasta en la región de Antofagasta. El objetivo de ISPROTEC es brindar soluciones técnicas en procesos, en una constante búsqueda en el mercado internacional de lo último en tecnología, con el fin de ser aplicadas a procesos industriales, operacionales, mantención de plantas y equipos.



Figura 5.1: Región de Antofagasta.

5.2. Datos operacionales

En los últimos años, ISPROTEC ha estado inmerso en el desarrollo del sensor GDM-X1. Este sistema de monitoreo en línea está diseñado específicamente para las celdas de flotación. Su principal finalidad es la medición de los parámetros operacionales cruciales en el proceso de flotación. Integrado con un sistema de control experto, el GDM-X1 tiene la capacidad de mejorar sustancialmente la eficiencia de dicho proceso. Los beneficios tangibles de esta innovación incluyen un incremento en la recuperación de cobre y una mejora en la ley de concentrado.

6. Problema de Investigación

En la actualidad nos encontramos frente a un desafío fundamental en el proceso de flotación: la falta de una tecnología capaz de monitorear en línea los parámetros operacionales que realmente controlan y definen este proceso crítico.

En particular, enfrentamos la carencia de una solución que nos permita obtener mediciones en tiempo real de los parámetros más relevantes, como la velocidad superficial del gas (J_g), el flujo de área superficial de burbujas (S_b), el gas hold up (E_g), la densidad de la pulpa (R_oBulk) y el nivel de interfaz de espuma (H_f).

Esta ausencia de tecnología adecuada nos plantea un desafío crucial para el control y la optimización de nuestras operaciones. Estos parámetros son fundamentales para el entendimiento y la mejora de la eficiencia del proceso de flotación. La falta de mediciones precisas y en tiempo real limita nuestra capacidad para tomar decisiones informadas y ajustar nuestras estrategias de operación de manera óptima.

La búsqueda de una solución que aborde esta problemática es de vital importancia para nuestra operación. No solo buscamos mejorar la eficiencia y la calidad de nuestro proceso de flotación, sino también establecer un nuevo estándar en la industria. Necesitamos una tecnología que nos permita monitorear estos parámetros críticos de manera constante y confiable, proporcionando la información necesaria para tomar decisiones estratégicas en tiempo real.

7. Objetivos

7.1. Objetivo General

El objetivo de la presente memoria es estudiar la factibilidad técnica-económica de incorporar un sensor multiparámetros en el proceso de Flotación de una planta Concentradora.

7.2. Objetivos Específicos

- Hacer un estudio del estado del arte de sensores multiparámetros.
- Evaluar la factibilidad económica, técnica y ecológica.
- Realizar pruebas, evaluación y análisis del desempeño de sensores.
- Desarrollar una conclusión y protocolo final.

8. Marco Teórico

8.1. Producción del concentrado de cobre

Para lograr la producción de concentrado de cobre, se siguen varias etapas esenciales que incluyen molienda, flotación, espesamiento y filtración. Entre estas etapas, la flotación es particularmente destacada, ya que implica reacciones fisicoquímicas que permiten separar los minerales sulfurados de cobre y otros componentes como el molibdeno, de las especies denominadas gangas, que carecen de valor comercial. El resultado de este proceso es un concentrado que se obtiene a través de una serie de filtros y posteriormente se somete al proceso de fundición.

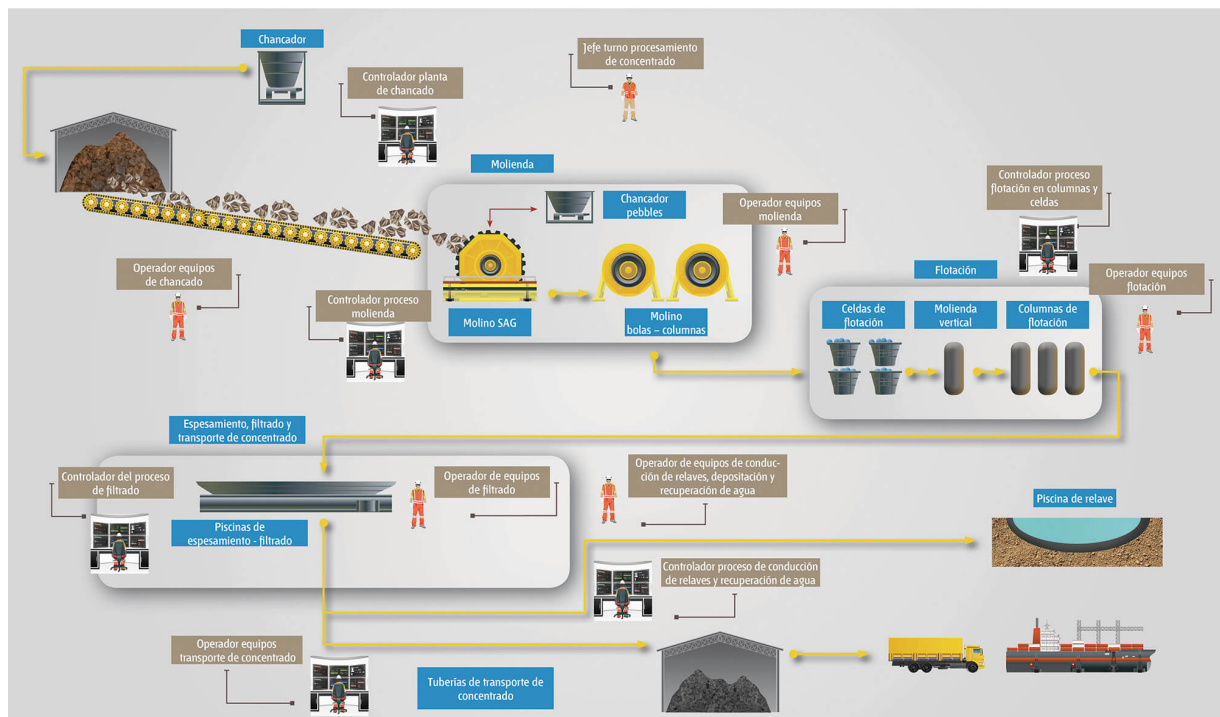


Figura 8.1: Producción de cobre en BHP-Escondida.

8.2. Planta concentradora

Una planta concentradora es una instalación industrial en la minería que procesa minerales extraídos de una mina para separar y aumentar la concentración de los metales valiosos presentes en ellos. Utiliza procesos físicos y químicos como trituración, molienda y flotación para separar

los minerales de valor de los componentes no deseados. El resultado final es un producto llamado concentrado, que contiene una mayor proporción del metal valioso y es luego procesado en etapas posteriores para obtener productos finales de mayor pureza y valor.

8.3. Flotación

Después de la etapa de molienda, el proceso de flotación es ampliamente utilizado para separar partículas valiosas de minerales de la mezcla. En este proceso, las partículas hidrofóbicas son capturadas por burbujas de gas que ascienden. La eficiencia de este proceso depende de varios factores, como químicos y físicos, incluyendo el tipo de máquina y circuito utilizados. La información de estos factores es crucial para la toma de decisiones en la industria. Las burbujas de gas llevan las partículas valiosas hacia la superficie formando una espuma concentrada. La eficiencia de este proceso se basa en la interacción entre partículas y burbujas en la celda. En la actualidad existen diversos arreglos de máquinas de flotación, como circuitos en serie o etapas múltiples.

8.4. Celda de flotación

La función principal de una celda de flotación es separar partículas minerales valiosas de partículas de ganga o no deseadas presentes en una pulpa o suspensión de mineral. Esto se logra a través de un proceso de flotación que explota las diferencias en las propiedades superficiales e hidrofílicas de las partículas minerales y de ganga.

El proceso de flotación generalmente implica los siguientes pasos:

1. **Mezcla de pulpa:** La pulpa se prepara mediante la molienda del mineral y se mezcla con agua y reactivos químicos para crear una suspensión.
2. **Aireación:** Se introduce aire en la pulpa, lo que crea burbujas de aire. Estas burbujas se adhieren a las partículas hidrofóbicas o minerales valiosos en la pulpa.
3. **Flotación:** Las partículas minerales hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire y ascienden a la superficie de la celda, formando una espuma de concentrado. Las partículas de ganga o hidrofílicas permanecen en la pulpa.

4. **Recolección y retiro de espuma:** La espuma que contiene las partículas minerales valiosas se recoge y se retira de la parte superior de la celda de flotación.

5. **Descarga de colas:** Las partículas de ganga que no flotaron se descargan en la parte inferior de la celda.

6. **Lavado y procesamiento:** El concentrado recolectado se somete a un proceso de lavado y posteriormente a etapas posteriores de procesamiento para recuperar el mineral valioso de manera más eficiente.

Las celdas de flotación son ampliamente utilizadas en la industria minera para la concentración de minerales, especialmente metales preciosos como el oro y/o este caso el cobre. También se utilizan en otros procesos de separación y purificación, como en la industria del agua y el tratamiento de aguas residuales.

La capacidad de una celda de flotación para separar minerales efectivamente está influenciada por varios factores, que incluyen el diseño de la celda, el uso de reactivos químicos y las características de las partículas minerales y de ganga. Según la información proporcionada por SGS, se ha observado que la Línea 2 de la planta concentradora de Laguna Seca, donde se llevarán a cabo las pruebas, logra un rendimiento que oscila entre el 89 % y el 90 %.

9. Estado del arte

9.1. Estado actual del control de parámetros operacionales

En el funcionamiento de una planta concentradora, se torna imprescindible la ejecución de mediciones altamente precisas de los parámetros operacionales. Esto se realiza con el propósito de supervisar y optimizar eficazmente el proceso de flotación, lo que a su vez conduce a una significativa mejora en la eficiencia global de la operación. En la actualidad, los parámetros fundamentales que se miden y monitorizan de manera primordial incluyen la velocidad superficial del gas (J_g), el flujo de área superficial de burbujas (S_b), el gas hold up (E_g), la densidad de la pulpa (R_oBulk) y el nivel de la interfaz de espuma (H_f).

9.1.1. Velocidad Superficial del Gas (J_g)

Es la medida de la velocidad a la que el gas asciende a través de la pulpa en la celda. Esta velocidad es un parámetro importante en la operación de una celda de flotación, ya que afecta la generación y el comportamiento de las burbujas de gas, lo que a su vez influye en la eficiencia del proceso de flotación. En este caso la medición de este parámetro oscila entre 0.4 [cm/s] a 0.79 [cm/s].

9.1.2. Flujo de Área Superficial de Burbujas (S_b)

S_b se refiere a la relación entre el área superficial de las burbujas generadas en un proceso de flotación y el volumen de la pulpa (mezcla de partículas y líquido) que está siendo tratada.

El S_b es un parámetro importante para evaluar y controlar la eficiencia de una celda de flotación en la separación de minerales. Una alta relación S_b indica una mayor área superficial de burbujas en relación con el volumen de pulpa, lo que puede mejorar la eficiencia de la flotación. Un S_b más alto significa que hay más burbujas disponibles para adherirse a las partículas minerales y llevarlas a la superficie, lo que facilita la separación.

El cálculo de S_b se basa en la medición del flujo de aire (o gas) que se introduce en la celda de

flotación y el tamaño de las burbujas generadas. Cuanto mayor sea el flujo de aire y más pequeñas sean las burbujas, mayor será el valor de S_b . La optimización de S_b es un aspecto crítico en la optimización de procesos de flotación y en la mejora de la recuperación de minerales valiosos. Este parámetro oscila entre $27 [s^{-1}]$ a $42 [s^{-1}]$ en la línea de flotación en la cual se realizan las pruebas.

9.1.3. Gas Hold Up (E_g)

El gas hold up se refiere a la fracción de volumen de gas presente en la celda de flotación en comparación con el volumen total. Para obtener mediciones precisas de E_g , se emplean técnicas avanzadas, como la tomografía por resistividad eléctrica, que proporciona representaciones tridimensionales de la distribución de gas en la celda.

El gas hold-up es un parámetro importante en la flotación, ya que influye en la formación y estabilidad de las burbujas de aire en la celda. La distribución y el tamaño de las burbujas de aire son críticos para la eficiencia de la separación de minerales valiosos de la ganga en la celda de flotación. Cuanto mayor sea el gas hold-up, más burbujas de aire habrá en la pulpa, lo que generalmente se traduce en una mayor superficie disponible para la interacción entre partículas y burbujas, lo que mejora la cinética de la flotación y la eficiencia de separación. Para este caso el rango de trabajo en las celdas oscila entre 25 % a 35 %.

9.1.4. Densidad de la Pulpa (R_oBulk)

Es la concentración de partículas sólidas en una suspensión de agua en una celda de flotación. En el procesamiento de minerales, esta densidad se controla y se ajusta cuidadosamente para optimizar el rendimiento del proceso de flotación.

El control de la densidad de pulpa es crucial en la flotación, ya que afecta la eficiencia de la separación de minerales. Si la densidad es demasiado baja, puede haber una dispersión excesiva de partículas, lo que dificulta la adhesión de las burbujas a los minerales valiosos. Por otro lado, si la densidad es demasiado alta, puede disminuir la velocidad de flotación y aumentar la posibilidad de arrastre de partículas indeseadas.

Ajustar y mantener la densidad de pulpa en el rango óptimo es esencial para lograr una buena recuperación de minerales valiosos y una alta selectividad en el proceso de flotación. Esto se logra mediante la adición controlada de agua o pulpa concentrada, según sea necesario, para mantener la densidad en el valor deseado.

El rango en que varía la densidad en una planta de esta magnitud es entre $0.6 [g/cm^3]$ a $1.8 [g/cm^3]$

9.1.5. Nivel de Interfaz de Espuma (Hf)

altura de la interfaz entre la pulpa y la espuma en una celda de flotación. En una celda de flotación, las burbujas de aire se adhieren a las partículas de mineral valiosas, formando una espuma en la parte superior de la celda. El nivel de interfaz de espuma se mide desde la superficie de la pulpa hasta la parte superior de esta espuma.

El control preciso del nivel de interfaz de espuma es importante en la flotación, ya que puede afectar la calidad de la separación de minerales. Si el nivel es demasiado alto, es posible que las partículas valiosas se arrastren hacia la espuma y se pierdan, lo que disminuye la recuperación. Si el nivel es demasiado bajo, es posible que no se capturen suficientes partículas valiosas en la espuma.

El monitoreo y control del nivel de interfaz de espuma se realiza generalmente mediante sensores y sistemas automatizados en las celdas de flotación. Ajustar el nivel de interfaz de espuma de manera óptima es esencial para lograr una separación eficiente de los minerales valiosos en el proceso de flotación. El rango de Interfaz de espuma en la línea 2 varía entre $20 [cm]$ a $40 [cm]$.

9.2. Análisis comparativo de opciones de mercado.

Actualmente se pueden identificar cuatro sensores multiparámetros que han sido desarrollados para medir de manera precisa y confiable los parámetros operativos más significativos (Jg, Sb, Eg, RoBulk y Hf) en celdas de flotación. Sin embargo es importante mencionar que el costo de estos sensores aún es desconocido, ya que no han sido puestos a la venta. Por otra parte, estos sensores han ganado reconocimiento en el ámbito académico y en centros de investigación. A continuación,

se presentan estos dispositivos:

- Jameson Cell
- JK Tech
- McGill On/Off

9.2.1. Jameson Cell

En el caso de la Celda Jameson, esta representa una alternativa a las celdas de flotación convencionales, ya que tiene la capacidad de reemplazar todo un circuito tradicional de celdas. La ventaja principal radica en que está equipada con sensores que posibilitan la monitorización de los parámetros operativos de la celda. Sin embargo, es fundamental considerar que la implementación de la Celda Jameson implica una inversión significativa. Por lo tanto, se requiere de un análisis exhaustivo para determinar si es recomendable sustituir completamente el circuito existente en la planta concentradora por esta tecnología.

Una de las características destacadas de la Celda Jameson es que carece de partes móviles, lo que conlleva una mayor disponibilidad operativa y simplifica las tareas de mantenimiento. De hecho, la mayoría de las labores de mantenimiento pueden llevarse a cabo sin necesidad de desconectar la celda del proceso de producción.

9.2.2. JK Tech

Los muestreadores de pulpa de JK Tech permiten tomar muestras fácilmente de celdas de flotación grandes y corrientes de pulpa. Esto es útil para investigaciones en plantas o análisis de circuitos simples. El Muestreador JK Dip se puede alargar hasta 3 metros para tomar muestras incluso en celdas muy grandes. Se pueden usar recipientes de muestra de 1L y 2L. Mientras que, el JK Stream Cutter está disponible en diferentes tamaños y longitudes de mango para facilitar el muestreo seguro de corrientes de pulpa abiertas. El Muestreador JK Lip captura la espuma de la celda de flotación. Esto significa que la tecnología de JK Tech sólo es capaz de medir el parámetro Jg y no de forma continua, ya que sólo funciona por muestreo lo que puede afectar la frecuencia de

mantenimiento del equipo.

9.2.3. McGill On/Off

El sensor construido por la Universidad de McGill ubicada en Montreal, Canadá es capaz de medir sólo la variable de J_g presentando errores menores al 2% en las pruebas realizadas. El resto de los parámetros operacionales no es capaz de medirlos y los obtiene a través de aproximación de valores que ingresan a una serie de ecuaciones, las cuales a través de iteraciones obtienen valores estimados. Sumado a esto, el equipo no es capaz de mantener una lectura continua de datos, ya que sólo es capaz de funcionar un máximo de 30 minutos e incluso podría ser menos, puesto que si ocurre algún problema el sensor no es capaz de autocalibrarse. Esto se traduce en un valor de MTBF bajo.

9.3. Sensor Multiparámetros GDM-X1

El sensor consta de un doble tubo concéntrico de diámetro 90 [mm] y 160 [mm] respectivamente fabricado en base a HDPE para muestrear el gas en las celdas de flotación. Esto permite una medición continua de aire en la entrada del tubo utilizando un flujo de masa en la zona superior del tubo. De esta forma se mide de forma directa y continua la velocidad superficial del gas (J_g), densidad de la pulpa (R_{oBulk}), retención del gas (E_g) y a través del algoritmo se obtienen los parámetros de nivel de interfaz de espuma (H_f) y el flujo de área superficial de burbujas (S_b).

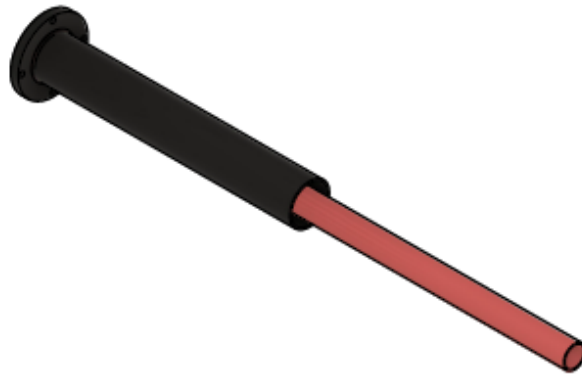


Figura 9.1: Doble tubo concéntrico.

Por otra parte el sensor consta de un gabinete con un sistema neumático que mide las presiones a través de conductos de aire que se conectan al doble tubo concéntrico, junto al circuito húmedo se tiene el sistema de recopilación de datos a través de un circuito electrónico que en conjunto al circuito neumático realizan el proceso de autocalibración y de retrolavado para mantener el sistema de forma constante y con errores mínimos en las mediciones realizadas.

A continuación se muestra el esquema de instalación que representa la instalación en la celda de flotación de GDM-X1.

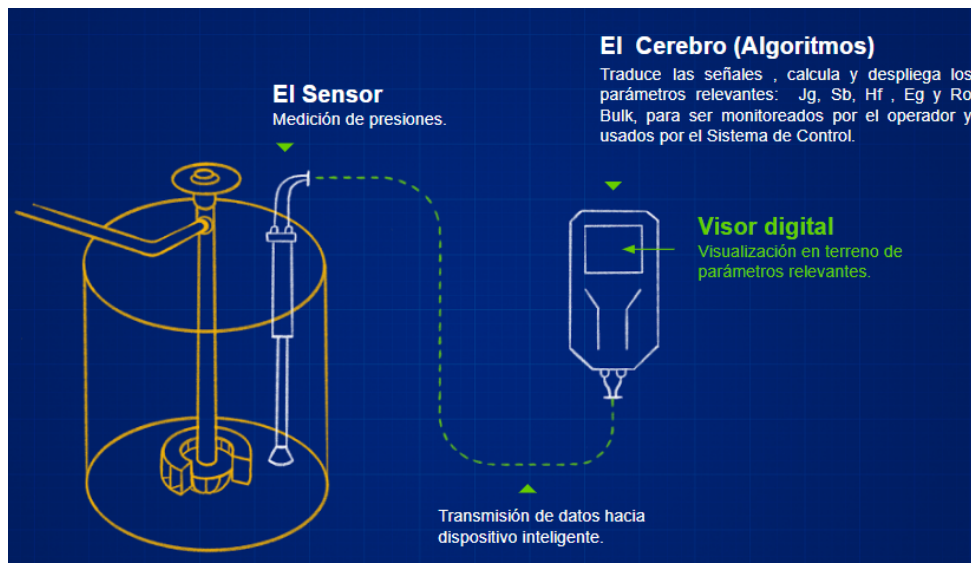


Figura 9.2: Esquema de instalación.

10. Metodología

10.1. Introducción

En el marco de esta investigación, se llevará a cabo un análisis minucioso de los elementos requeridos por la empresa ISPROTEC para la completa construcción de un sensor multiparámetro. Además, se realizará una evaluación detallada de los valores monetarios promedio de dichos componentes, con el objetivo de obtener datos cuantitativos.

Como parte de la conclusión de esta investigación, se llevarán a cabo pruebas de medición del equipo en las instalaciones de BHP-Escondida, en una de sus plantas concentradoras. Estos datos serán posteriormente comparados con las mediciones realizadas en el laboratorio, con el fin de obtener una visión integral del rendimiento del equipo.

10.2. Recopilación de datos

En el proceso de recopilación de datos, se seguirá un enfoque estratégico. Inicialmente, se gestionará la obtención de un listado completo de suministros y componentes necesarios para la fabricación del producto. Este proceso se llevará a cabo en colaboración con el líder de proyectos, quien proporcionará la información esencial.

Una vez que se cuente con la lista detallada de productos, se procederá a la siguiente fase. En esta etapa, se solicitarán cotizaciones a varios proveedores con el fin de obtener una visión completa de los costos asociados. Estos valores se registrarán en una tabla organizada que mostrará los elementos requeridos junto con sus respectivos costos en pesos chilenos. Al mismo tiempo, se llevará a cabo el diseño tanto del circuito electrónico como del neumático. Es importante destacar que, al inicio de la investigación, ISPROTEC ya había estudiado teóricamente los elementos necesarios para la construcción del equipo.

Además, para enriquecer aún más la recopilación de datos, se solicitarán a BHP-Escondida los parámetros medidos una vez que se haya puesto en marcha el equipo. Esta información actuará como referencia para contrastar y analizar las mediciones obtenidas a través del sensor desarrollado. La comparación de estos datos permitirá evaluar con precisión la exactitud y eficacia

del sensor en condiciones reales y validará su rendimiento en el contexto operativo.

10.3. Montaje y desarrollo de pruebas industriales.

En esta sección se presentará como fue el montaje de equipos y el inicio de las pruebas industriales en la faena de BHP-Escondida en la planta concentradora de Laguna Seca.

10.4. Resultados de pruebas

En esta etapa se presentarán los resultados obtenidos de las pruebas industriales a través de diferentes elementos gráficos que permitan desarrollar posteriormente un análisis completo de datos.

10.5. Análisis de datos

En este punto del estudio, se procederá a realizar un análisis exhaustivo de los datos recopilados durante la investigación. Esta fase abarcará tanto los datos técnicos como los económicos, con el propósito de evaluar la viabilidad global del proyecto.

10.5.1. Datos Técnicos

Se analizarán los datos técnicos relacionados con el proceso de flotación y la incorporación del sensor multiparámetros. Esto incluirá mediciones y registros de la velocidad superficial del gas (J_g), el flujo de área superficial de burbujas (S_b), el gas hold up (E_g), la densidad de la pulpa (R_oBulk) y el nivel de interfaz de espuma (H_f). Se emplearán técnicas estadísticas y herramientas de análisis de datos para identificar patrones, tendencias y relaciones entre estos parámetros. Este análisis permitirá evaluar cómo la incorporación del sensor afectará positivamente la operación de la planta concentradora.

10.5.2. Datos económicos

Se llevará a cabo un minucioso análisis de los datos económicos asociados al proyecto. Esto incluirá los costos de adquisición e instalación del sensor, los costos operativos proyectados y las estimaciones de ingresos basadas en mejoras previstas en el proceso de flotación. Se calcularán indicadores financieros clave como el Retorno de la Inversión (ROI), el Valor Actual Neto (VAN) y el período de recuperación. Además, se evaluarán escenarios de sensibilidad y se analizarán los riesgos financieros potenciales.

El resultado de este análisis de datos será fundamental para la toma de decisiones informadas. Determinará si el proyecto es técnicamente viable y si presenta perspectivas económicas favorables. Los hallazgos respaldarán las conclusiones finales y las recomendaciones sobre la implementación del sensor multiparámetros en el proceso de flotación de la planta concentradora.

Finalmente, se interpretarán las mediciones de los parámetros operaciones medidas entre el sensor multiparámetros y el personal que opera la planta concentradora. Posteriormente se evaluarán los resultados obtenidos en ROI, VAN, periodo de recuperación y la sensibilidad del proyecto.

10.5.3. Datos ecológicos

En el análisis ecológico del sensor GDM-X1, se tiene la intención de evaluar su impacto en el ciclo productivo del cobre. Este proceso se llevará a cabo siempre y cuando las pruebas técnicas demuestren que los datos obtenidos son fiables y precisos. Si los resultados son concluyentes, se podrá realizar un análisis exhaustivo que aborde aspectos cruciales como la emisión de contaminantes y la generación de residuos en el proceso productivo del cobre, permitiendo así una comprensión más completa y precisa del impacto ambiental del producto.

10.6. Construcción de protocolo

Si las pruebas industriales demuestran que el equipo funciona correctamente, es crucial documentar y visualizar cómo se debe ensamblar el equipo de manera precisa y efectiva. Esta etapa implica desarrollar diagramas detallados que describan la disposición exacta de los componentes y cómo

se interconectan. Estos diagramas servirán como guías visuales para el equipo de ensamblaje, asegurando que cada parte se coloque correctamente y en el orden adecuado. La claridad en los diagramas es esencial para garantizar que el equipo se ensamble de manera consistente y cumpla con los estándares de calidad establecidos.

10.7. Conclusiones

En esta sección, se destacarán los hallazgos clave y se proporcionará una evaluación general de los resultados. Se señalarán las implicaciones más importantes de los resultados y se discutirá cómo estos contribuyen a la comprensión general del tema o problema en estudio.

11. Recopilación de datos

Luego de investigar sobre los componentes necesarios para el circuito neumático y circuito eléctrico se procede a construir un diagrama de lazos para comprender como están conectados los componentes.

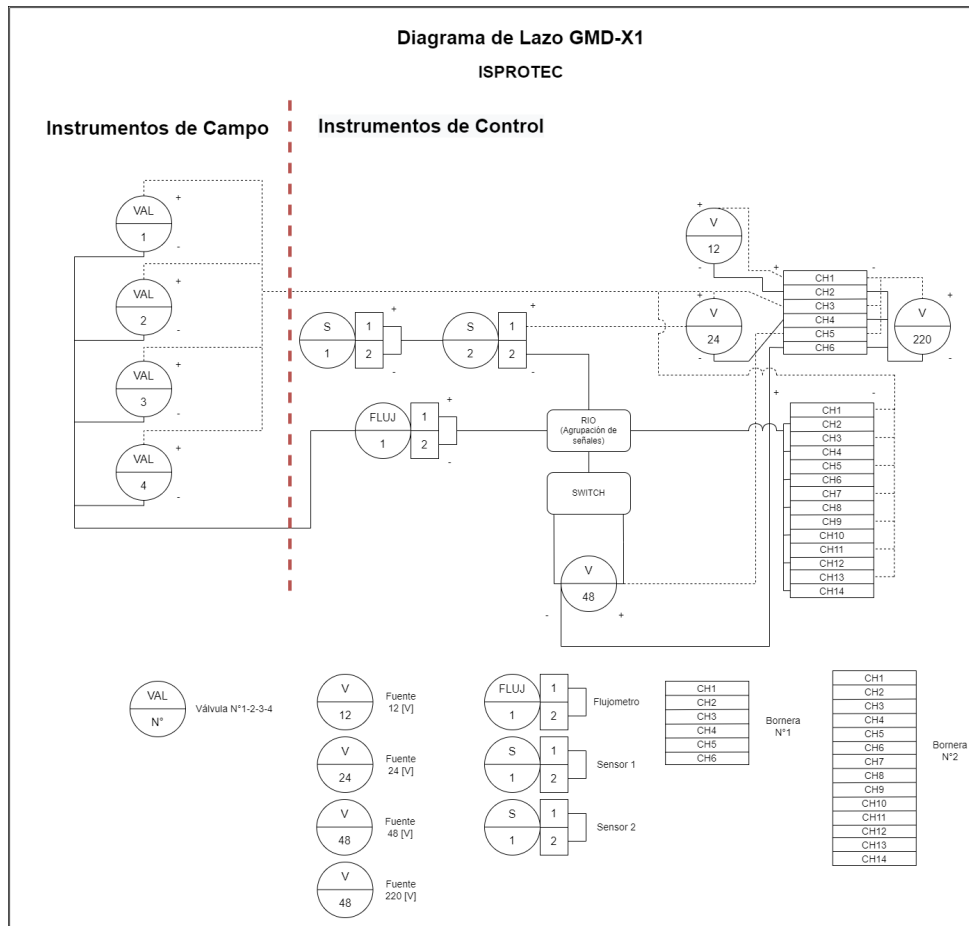


Figura 11.1: Diagrama de Lazos GDM-X1.

A partir del diagrama de lazos se diseña un layout para ambos circuitos de forma de comprender el espacio utilizado por los componentes dentro del gabinete que los va albergar. Se realiza de esta forma, puesto que la empresa cuenta con diferentes gabinetes y/o tableros eléctricos que se pueden utilizar para realizar las pruebas industriales del prototipo.

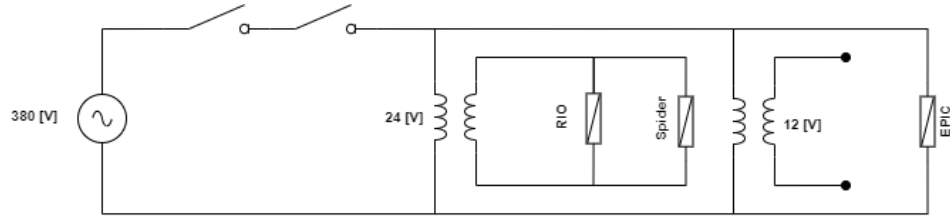


Figura 11.2: Circuito eléctrico

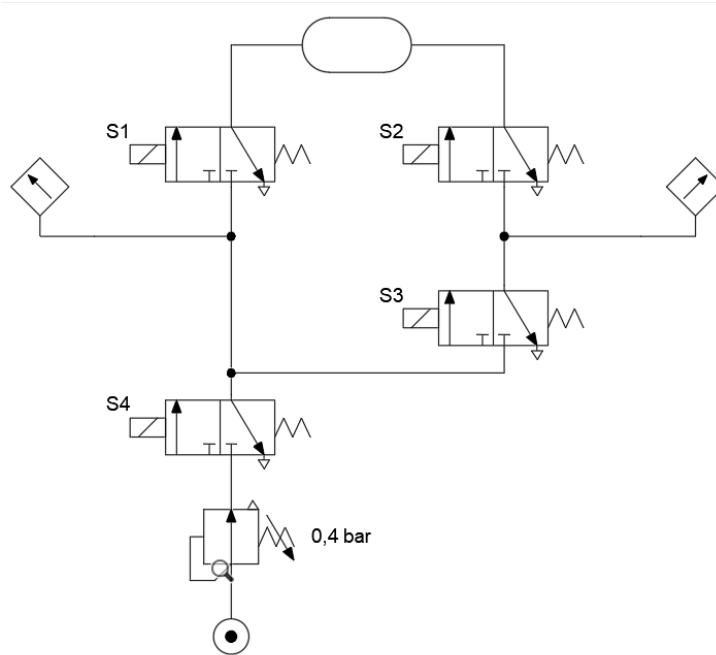


Figura 11.3: Circuito neumático

A continuación se presenta una tabla con los elementos que componen el sensor multiparámetros, cantidad, costo unitario y costo total en el mercado nacional incluyendo IVA.

Elemento	Cantidad	Precio Unitario [CLP]	Precio Total [CLP]
Electroválvula SMC VT307	4	\$ 62.969	\$ 251.876
Transmisor de presión	2	\$ 335.346	\$ 670.692
Regulador de presión AR20	1	\$ 26.406	\$ 26.406
Conec.Codo KQ2L10	2	\$ 3.350	\$ 6.700
Conec. Codo T KQ2L 10 X 1/2"	3	\$ 4.250	\$ 12.750
Tapón Parker 1/4 "	3	\$ 468	\$ 1.404
Conec.Pasa muro tubo 10 [mm]	4	\$ 5.148	\$ 20.592
Conector Recto T 10 X 1/4"	4	\$ 2.285	\$ 9.140
Conec.Codo tubo 3/8"X 1/4"	5	\$ 3.274	\$ 16.370
Adaptador 1/2"NPT x 1/2"NPT Ma-Ma	1	\$ 4.500	\$ 4.500
Conector T Hembra 1/2"NPT	3	\$ 5.490	\$ 16.470
Conector 1/2"Macho NPT x 1/4"	2	\$ 2.720	\$ 5.440
Tubería de aire comprimido 10 mm	12 [m]	\$3.407 (el metro)	\$ 40.884
		Total	\$ 1.083.224

Tabla 11.1: Tabla de componentes de circuito neumático.

Prosiguiendo, se presenta la tabla de los componentes del circuito electrónico.

Elemento	Cantidad	Precio Unitario [CLP]	Precio Total [CLP]
Opto 22 GRV-EPIC-PR1	1	\$ 1.877.256	\$ 1.877.256
Opto 22 GRV-EPIC-CHS0	1	\$ 253.777	\$ 253.777
Opto 22GRV-EPIC-PSAC	1	\$ 391.095	\$ 391.095
Opto 22 GRV-R7-RIO	1	\$ 1.184.583	\$ 1.184.583
Meanwell MDR-40-24	2	\$ 39.110	\$ 78.220
Switch de 8 Bocas	1	\$ 173.820	\$ 173.820
Canaleta	1 [m]	\$ 4.295	\$ 4.295
Cable trifásico	1.5 [m]	\$ 1.500	\$ 2.250
		Total	\$ 3.965.296

Tabla 11.2: Tabla de componentes de circuito electrónico.

Finalmente se presenta la tabla con elementos que conforman el sensor multiparámetros pero no corresponden a algún tipo de circuito.

Elemento	Cantidad	Precio Unitario [CLP]	Precio Total [CLP]
Gabinete 800X600X250	1	\$ 249.870	\$ 249.870
Tubo Sensor (HDPE)	1	\$ 573.426	\$ 573.426
Soporte Gabinete	1	\$ 118.800	\$ 118.800
Soporte Tubo Sensor	1	\$ 237.600	\$ 237.600
Horas Hombre (H.H)	3	\$ 10.000	\$ 30.000
		Total	\$ 1.209.696

Tabla 11.3: Tabla de componentes independientes.

Al sumar el costo de todos los elementos que comprenden el sensor multiparámetros se obtiene la suma de \$ 6.258.216 [CLP] esto equivale a 6776 [USD] por cada GDM-X1. Se considera el gasto en dólares, ya que el plan que ofrece ISPROTEC los propone en USD. Adicionalmente se obtienen los gastos involucrados en I+D del proyecto los cuales se van a presentar en el análisis de datos una vez aplicada la herramienta ROI y VAN.

Es importante destacar que en este análisis se han considerado los gastos asociados a CAPEX (Gastos de Capital) y OPEX (Gastos Operativos) como elementos esenciales para evaluar la viabilidad y el rendimiento del proyecto. Sin embargo, debido a limitaciones en la información proporcionada por la empresa, no se ha tenido acceso al desglose detallado de estos gastos. La empresa brindó datos generales y globales en estas categorías, pero no proporcionó información específica sobre los componentes individuales que conforman estos costos.

A pesar de esta limitación, se ha realizado un análisis exhaustivo basado en los datos disponibles y se han considerado los gastos generales dentro de las categorías de CAPEX y OPEX. Aunque no se dispone del desglose detallado, estos gastos se han incluido en el cálculo de la rentabilidad, el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y otros indicadores financieros clave.

Es importante reconocer que una evaluación más precisa y detallada podría realizarse si se dispusiera de información más específica sobre los gastos asociados a CAPEX y OPEX. No obstante, a pesar de esta limitación, se ha llevado a cabo un análisis riguroso para proporcionar

una evaluación general de la viabilidad del proyecto, teniendo en cuenta los gastos generales en estas categorías. Se recomienda que futuros análisis se beneficien de un desglose más completo de estos costos para una evaluación aún más precisa

■ **CAPEX (Gastos de Capital):**

- Costo de Adquisición: Se considera como el precio de compra de hardware del sensor GDM-X1 para su funcionamiento.
- Instalación: Costos asociados con la instalación del sensor en la planta. En este caso se considera mano de obra de la puesta en marcha, ya que BHP se encarga del transporte a través de SGS
- Capacitación: Costo asociado al equipo que diseñó el algoritmo.
- Costos de Ingeniería y Diseño: Costo de modificaciones en la infraestructura existente para incorporar el sensor, rediseño, etc.

■ **OPEX (Gastos Operativos):**

- Mantenimiento: Los gastos de mantenimiento incluyen la mano de obra, piezas de repuesto y otros costos asociados con el mantenimiento periódico del sensor para garantizar su funcionamiento óptimo o en caso de fallas inesperadas.
- Costos de Personal: Los salarios y beneficios del personal involucrado en la operación y el mantenimiento del sensor se incluyen en esta categoría.
- Costos de Calibración y Verificación: Los costos asociados con la calibración y verificación periódica del sensor entran en esta clasificación.

12. Montaje y Desarrollo de pruebas industriales.

El montaje de los equipos se efectuó en la fila 2 de la planta concentradora de Laguna Seca. Fue necesario instalar 7 equipos GDM-X1, coincidiendo con las 7 celdas de flotación de tipo Metso Outotec Rougher TC300 de 300 m³ en dicha fila. Es esencial resaltar que en esta instalación, cada uno de los 7 gabinetes recopila datos. Estos datos se dirigen al gabinete número 1, equipado con una pantalla inteligente que posibilita la visualización in situ de la información. Además, los datos se transmiten mediante una antena conectada al sistema Starlink. De esta manera, los datos se envían a la página de GDM-X1, permitiendo al cliente visualizarlos desde cualquier dispositivo con acceso a internet o del sistema de control experto de la faena minera. A continuación se muestran imágenes del proceso: Se debe tener en consideración que si bien los equipos son de parte de ISPROTEC, la empresa a cargo del montaje e ingeniería fue SGS, la cuál es una empresa contratista por parte de BHP. Sin embargo, para iniciar las pruebas se tuvo que cargar en cada uno de los equipos el algoritmo encargado de procesar los datos obtenidos en las diferentes mediciones.



Figura 12.1: Conexión a corriente del equipo.



Figura 12.2: Inicio del sistema.



Figura 12.3: Carga de algoritmo.

La instalación del equipo se debe realizar a 1760 mm del borde de celda de flotación y una inmersión mínima de 1200 mm.

13. Resultados de pruebas.

A continuación, se presentan las mediciones continuas registradas en la celda de flotación número 4. Estas mediciones se llevaron a cabo durante un período en el cual la planta experimentó inestabilidades en su sistema eléctrico y neumático que suministra energía a los equipos. Estas condiciones ocasionaron un nivel significativo de ruido en las mediciones registradas en los diversos gráficos históricos, lo que indica la necesidad de repetir las mediciones en los registros correspondientes. Es fundamental tener en cuenta que durante el período autorizado para la recopilación de datos, se observaron mediciones históricas a lo largo de un intervalo de 24 horas durante un lapso de 4 días. Se calcularon promedios móviles de estas mediciones, así como la desviación estándar y el error porcentual de los promedios móviles, comparando los resultados entre ISPROTEC y BHP.

13.1. Resultados de medición de velocidad superficial del gas (J_g).



Figura 13.1: Medición de velocidad superficial del gas (J_g) 20 de Julio.



Figura 13.2: Medición de velocidad superficial del gas (J_g) 21 de Julio.



Figura 13.3: Medición de velocidad superficial del gas (J_g) 22 de Julio.



Figura 13.4: Medición de velocidad superficial del gas (Jg) 23 de Julio.

13.2. Resultados de Medición de flujo de área superficial de burbujas (Sb).

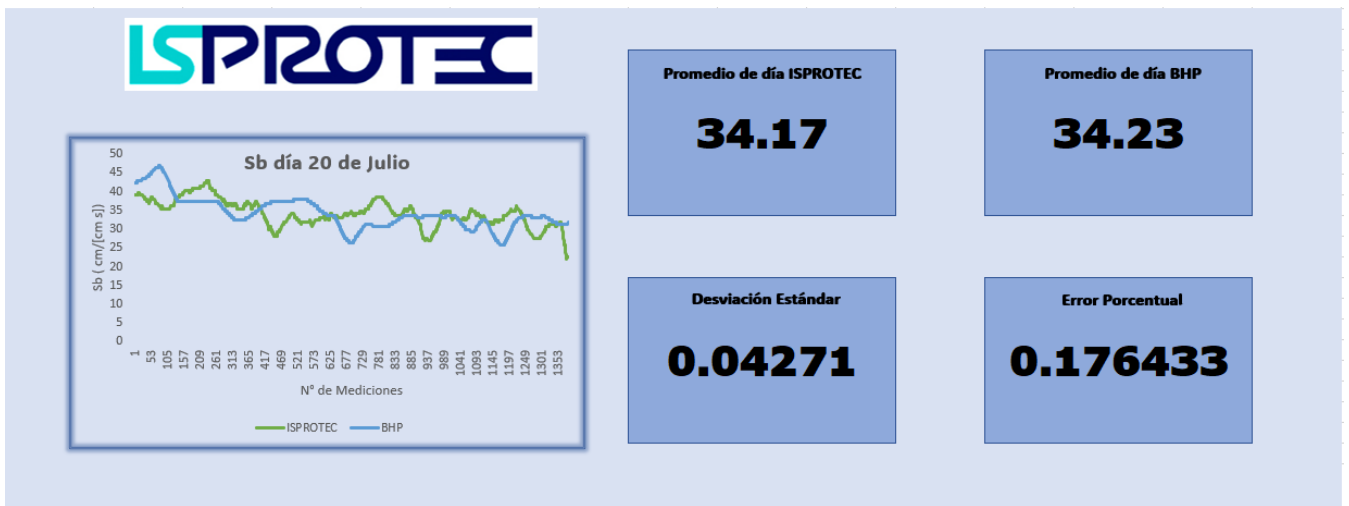


Figura 13.5: Medición de flujo de área superficial de burbujas (Sb) 20 de Julio.



Figura 13.6: Medición de flujo de área superficial de burbujas (Sb) 21 de Julio.

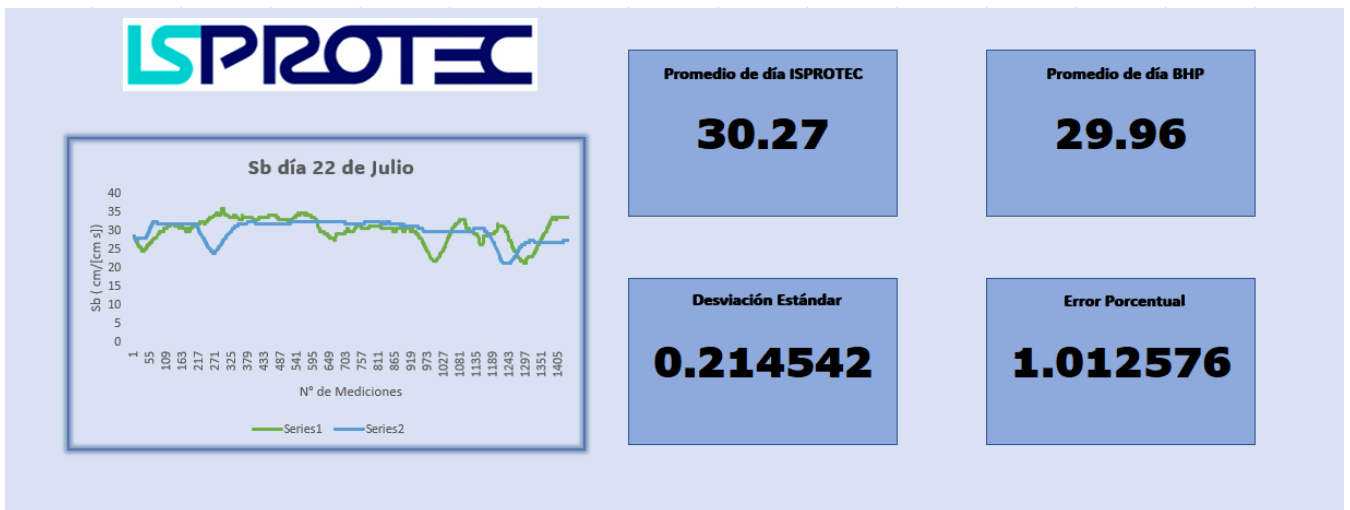


Figura 13.7: Medición de flujo de área superficial de burbujas (Sb) 22 de Julio.

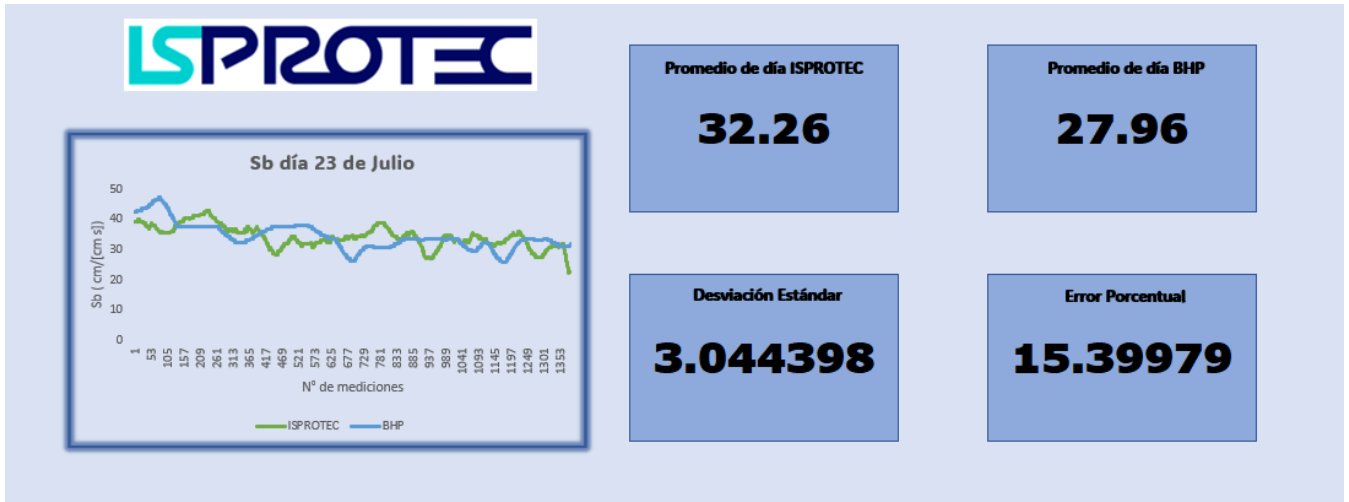


Figura 13.8: Medición de flujo de área superficial de burbujas (Sb) 23 de Julio.

13.3. Resultados de Medición de nivel de gas hold up (Eg).

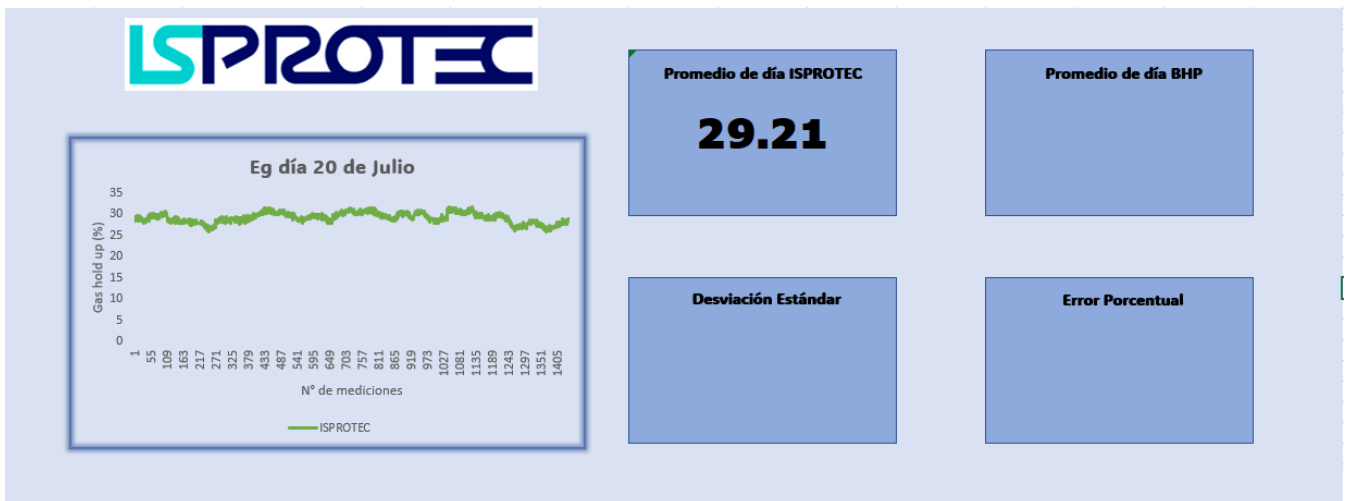


Figura 13.9: Medición de nivel de gas hold up (Eg) 20 de Julio.

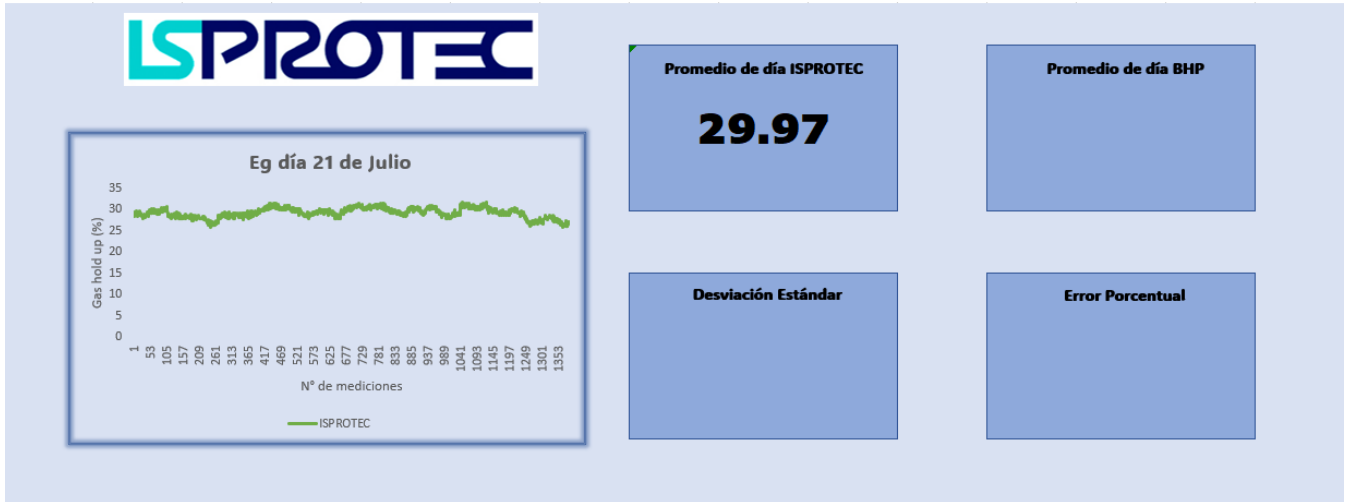


Figura 13.10: Medición de nivel de gas hold up (Eg) 21 de Julio.

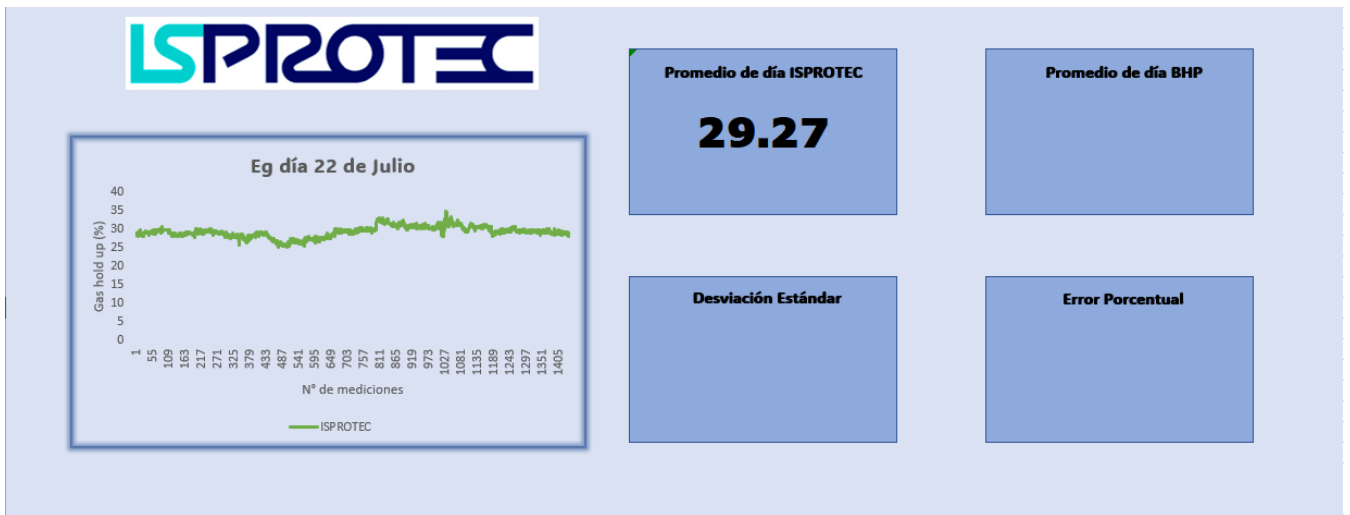


Figura 13.11: Medición de nivel de gas hold up (Eg) 22 de Julio.

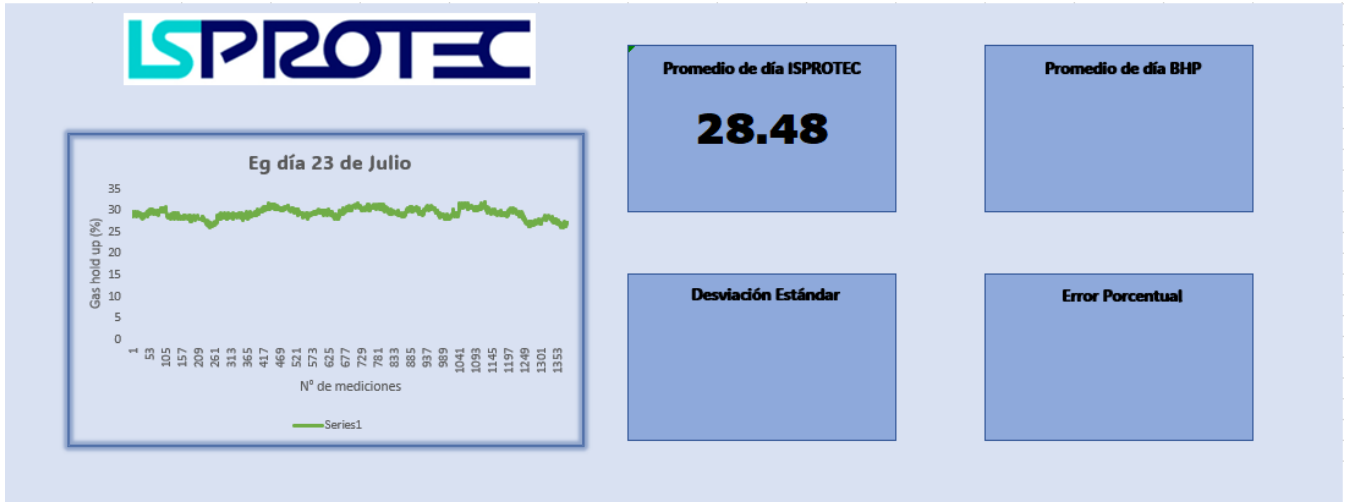


Figura 13.12: Medición de nivel de gas hold up (Eg) 23 de Julio.

13.4. Resultados de Medición de densidad de pulpa (ρ_b).

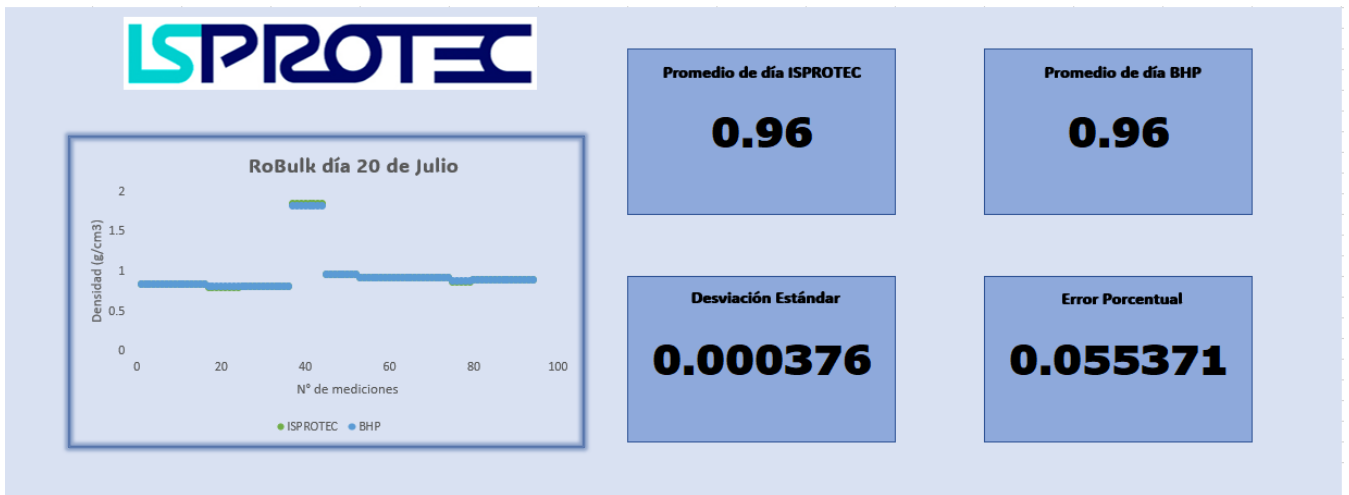


Figura 13.13: Medición de densidad de pulpa (ρ_b) 20 de Julio.



Figura 13.14: Medición de densidad de pulpa (ρ_b) 21 de Julio.



Figura 13.15: Medición de densidad de pulpa (ρ_b) 22 de Julio.



Figura 13.16: Medición de densidad de pulpa (ρ_b) 23 de Julio.

13.5. Resultados de Medición de nivel de interfase de espuma (H_f).

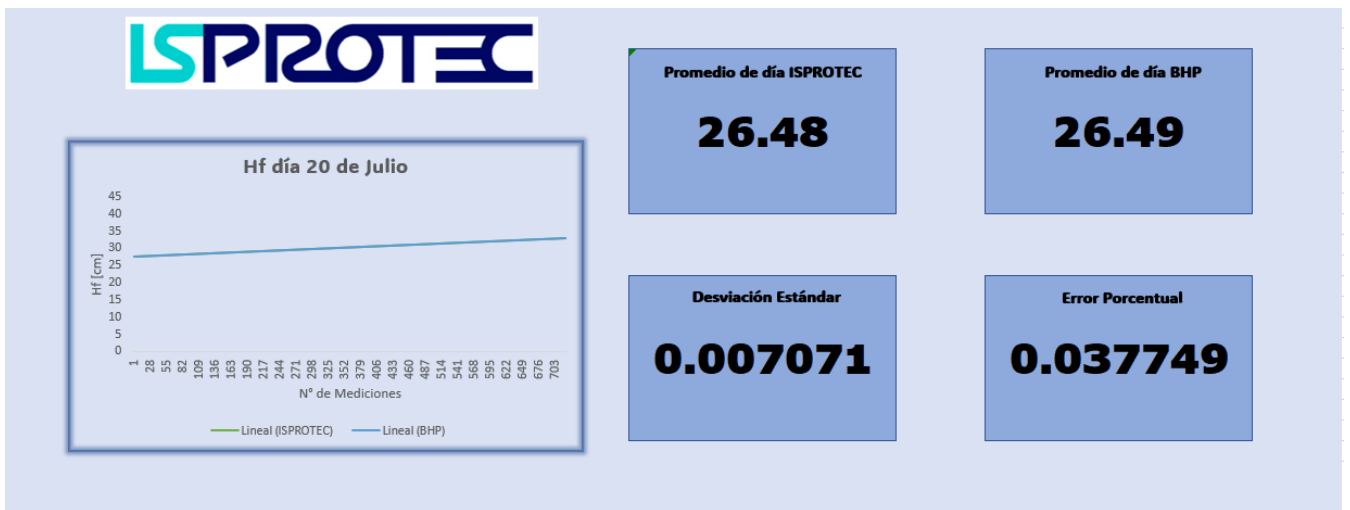


Figura 13.17: Medición de nivel de interfase de espuma (H_f) 20 de Julio.

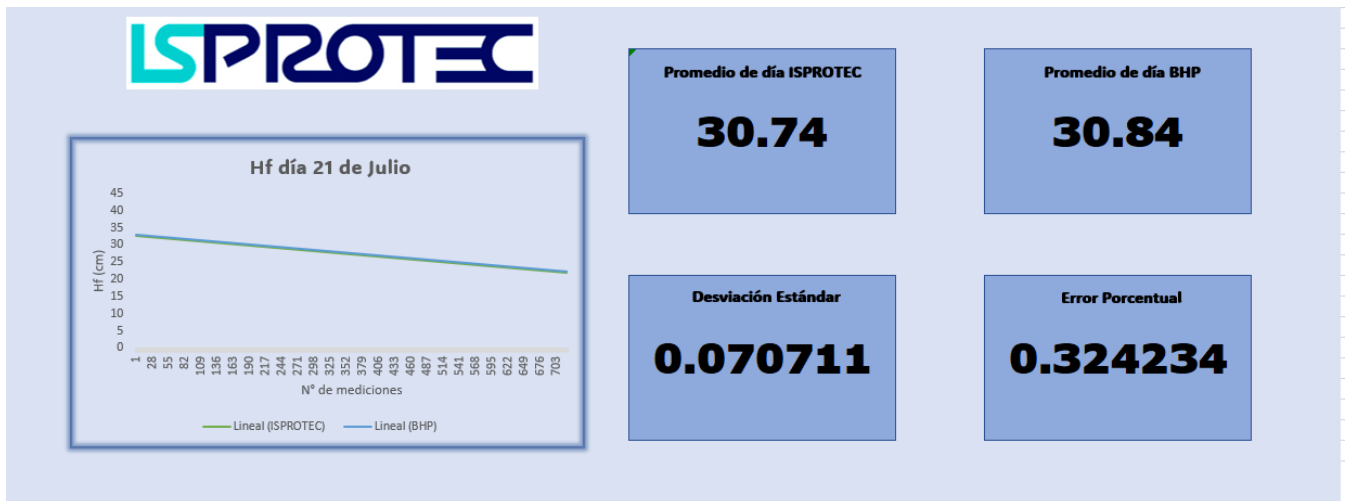


Figura 13.18: Medición de nivel de interfase de espuma (Hf) 21 de Julio.

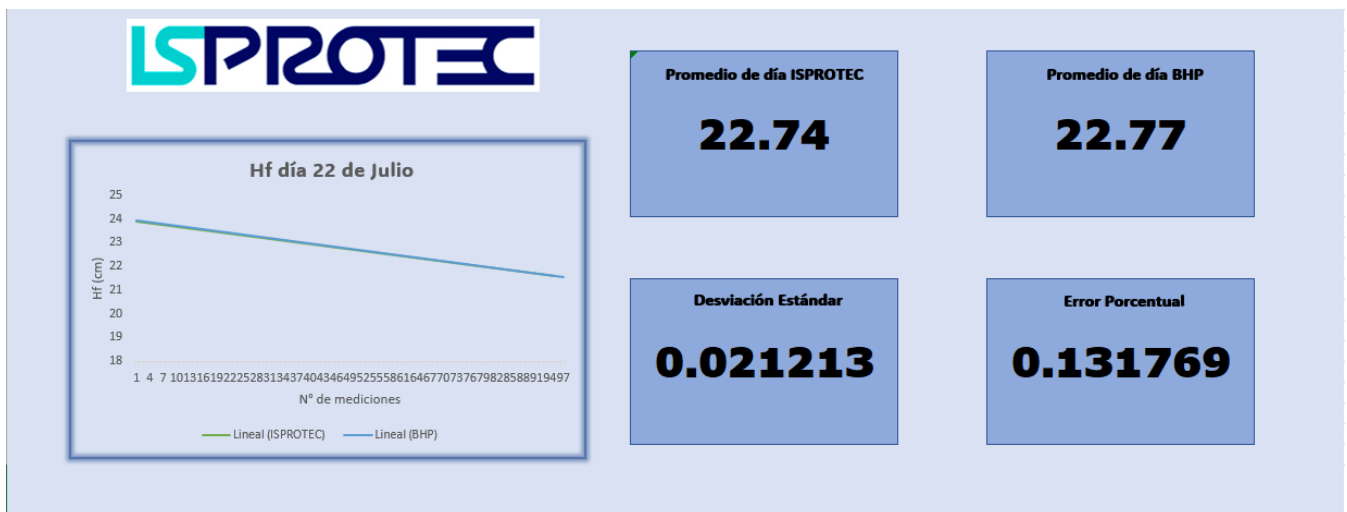


Figura 13.19: Medición de nivel de interfase de espuma (Hf) 22 de Julio.

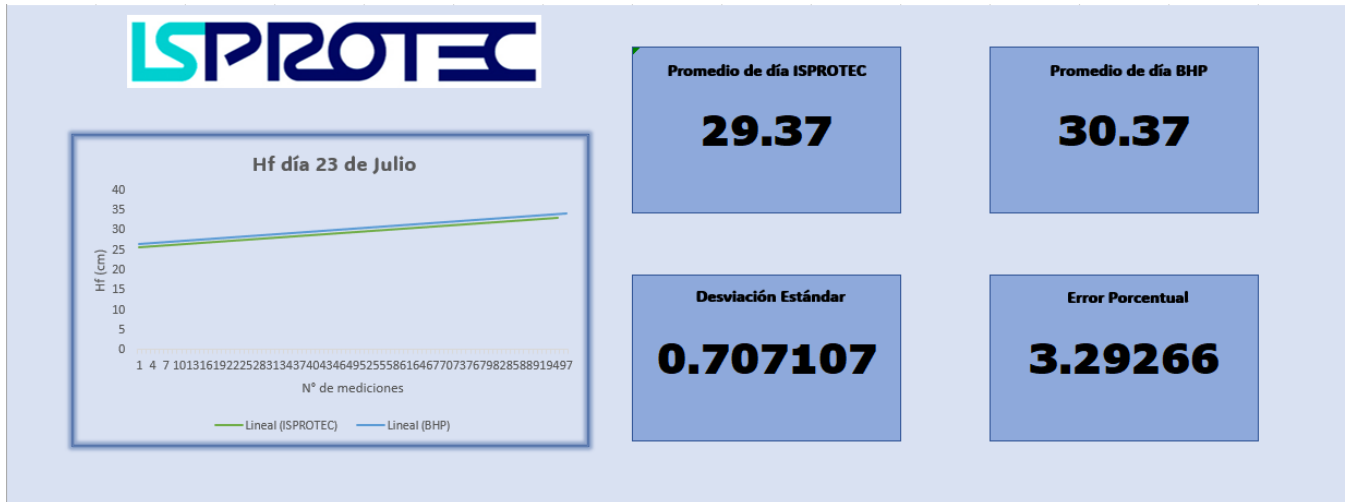


Figura 13.20: Medición de nivel de interfase de espuma (Hf) 23 de Julio.

14. Análisis de datos

14.1. Análisis técnico

Observando los resultados de las pruebas realizadas en primera instancia, se puede notar que la medición de Gas Hold Up(E_g) no cuenta con los datos de BHP dado que la empresa no entregó en ninguna instancia sus mediciones de ese parámetro lo que implica que no se pudieron comparar los resultados obtenidos. Por otro lado, en las figuras 13.1, 13.2, 13.3 y 13.4, se aprecia que el error mínimo obtenido en las mediciones de J_g fue de 0.17%, mientras que el error máximo alcanzó el 15%. Esta variación se atribuye al movimiento de las burbujas, que genera un perfil en la distribución del gas. Adicionalmente al observar las mediciones obtenidas el día 23 de Julio se puede observar como el sensor presentó un estancamiento en las mediciones al presentar valores constantes en ciertos periodos.

Además, el sensor es capaz de identificar los perfiles dentro de la máquina de flotación, lo que lleva a la conclusión de que asumir una distribución de gas uniforme en todas las zonas de la celda, basada en un cálculo global a través de la alimentación, no permite un diagnóstico preciso de la operación. Por lo tanto, se deduce implícitamente que el resto de parámetros medidos por el equipo también pueden presentar errores que podrían afectar la precisión de las mediciones de los parámetros operacionales de la celda de flotación.

Al continuar con el análisis de los demás parámetros, se confirma lo mencionado en el párrafo anterior, ya que todos los parámetros medidos aumentan su margen de error con el paso de los días. Como el flujo de área superficial de burbujas (S_b) es un valor proporcional a J_g se observa que en las mediciones de S_b el error porcentual obtenido en cada una de las gráficas son los mismos errores obtenidos en las gráficas de J_g . Por otra parte, es importante destacar que al medir la densidad de la pulpa, las mediciones presentan una dispersión menor entre los datos, lo que se traduce en un error de medición reducido en comparación con los datos recopilados por BHP.

Continuando con el análisis, al observar las gráficas de H_f (Figuras 13.17, 13.18, 13.19 y 13.20), se puede notar que se obtienen errores aceptables (menores al 5%), ya que el mayor error obtenido fue de 3.29%. Así mismo, se puede verificar que en todos los casos la tendencia de ambas gráficas

es la misma.

14.2. Análisis económico

La tabla presentada a continuación representa el flujo de fondos y saldos actualizados para el proyecto en un periodo de 5 años. Aquí hay una inversión inicial de \$1.000.000 [USD] en el año 0. En el año 1 y 2, se generan flujos de efectivo de \$60.000 [USD] en cada uno, y luego aumentan a \$210.000 [USD] en los años 3 y 4. Este aumento se considera como la implementación de los equipos en todas las celdas de flotación de la planta de concentrado ubicada en Laguna Seca.

El saldo actualizado se deriva de la aplicación de una tasa de interés del 5% al saldo del período anterior. Consecuentemente, el saldo actualizado experimenta una disminución gradual y alcanza los \$172,768 [USD] al finalizar el quinto período. Es importante señalar que se utiliza una tasa de descuento del 5% en este contexto. Esto refleja una preferencia más marcada por el valor del dinero en el presente en comparación con una tasa de descuento del 3%. La elección de esta tasa es adecuada para proyectos o inversiones que se consideran un tanto más arriesgados que aquellos evaluados con una tasa de descuento más baja. En este caso, se trata de una tecnología de vanguardia que, en el mercado actual, carece de competidores.

Tabla 14.1: Cálculo de VAN de 0 a 4 años

Periodo en años	0	1	2	3	4
Flujo de Fondos (\$)	-1,000,000	60,000	60,000	210,000	210,000
Saldo Actualizado al 5% (\$)	-1,000,000	57,143	54,422	181,406	172,768
Saldo Acumulado (\$)	-1,000,000	-942,857	-888,435	-707,029	-534,262

La tabla 14.2 muestra el flujo de fondos y saldos actualizados desde los años 5 al 10. Los flujos de efectivo siguen siendo constantes en \$210.000 [USD] para cada uno de estos períodos. Los saldos actualizados disminuyen a medida que se aplica una tasa de interés del 5%.

El saldo acumulado muestra que, a pesar de los flujos de efectivo positivos, debido a la tasa de interés aplicada, el saldo acumulado es negativo y empeora con el tiempo.

Tabla 14.2: Cálculo de VAN de 5 a 10 años

Periodo en años	5	6	7	8	9	10
Flujo de Fondos (\$)	210,000	210,000	210,000	210,000	210,000	210,000
Saldo Actualizado al 5 % (\$)	164,540	156,705	149,243	142,136	135,368	128,922
Saldo Acumulado (\$)	-369,721	-213,016	-63,773	78,363	213,731	342,653

Tabla 14.3: Resultados económicos obtenidos

Tasa (%)	5 %
VAN (\$)	1,342,652.77
TIR (%)	11 %
PR	7.45
ROI (%)	34.26

El proyecto tiene un valor actual neto (VAN) de \$1.342.652, lo que significa que puede generar un beneficio superior al costo de la inversión, usando una tasa de descuento del 5 %. Además, el proyecto tiene una tasa interna de retorno (TIR) del 11 %, lo que indica que la rentabilidad de la inversión es mayor al 5 % de la tasa. Por último, el proyecto tiene un punto de recuperación (PR) del 7.45 años. Finalmente se obtiene un retorno de la inversión (ROI) del 34.26 %. Este resultado subraya la eficacia y rentabilidad del proyecto, confirmando que la inversión inicial ha sido altamente productiva, reflejando que la viabilidad financiera del proyecto y la capacidad de generar valor a largo plazo. Por otra parte, si se quiere corroborar el beneficio económico que el proyecto aporta al cliente, en el contexto de una planta con capacidad de tratamiento de mineral de 120 ktpd y una ley de alimentación de 0,6 % CuT, la mejora en la recuperación de cobre en un 1,0 % con lleva a una producción adicional de 2.592 toneladas de cátodos de cobre al año. Esto se traduce en ingresos adicionales anuales por valor de 19,7 millones de dólares, considerando un precio de 3,45 USD por libra de cobre.

Es importante destacar que este cálculo no incluye los posibles ingresos por una mayor recuperación de molibdeno ni los beneficios asociados a un menor costo de flete debido al aumento en la ley del concentrado.

14.3. Análisis ecológico

Para evaluar el impacto ecológico del proyecto, se dispone de la Tabla 14.4 que refleja el rendimiento de la planta concentradora de Laguna Seca, basado en la información proporcionada por el equipo encargado de su control.

En el momento de las pruebas, el rendimiento de la planta se sitúa en un 92 %, lo que se traduce en el procesamiento de 120 mil toneladas al día (ktpd). Este rendimiento implica que la planta genera desperdicios equivalentes al 8 % de su capacidad, lo que se refleja en 9.6 ktpd.

Tabla 14.4: Rendimiento de la Planta y Desperdicios actual

Rendimiento Planta [%]	Capacidad actual [ktpd]	Desperdicios [%]	Desperdicios [ktpd]
92 %	120	8 %	9.6

En un escenario menos favorable, considerando un funcionamiento sin inconvenientes de GDM-X1 y una operación precisa por parte del equipo de control de la planta concentradora, se estima un incremento mínimo del rendimiento del 1 %, según la información proporcionada por ISPROTEC. En este caso, la mejora en el rendimiento tendría un impacto significativo al reducir los desperdicios el cual se muestra en la Tabla 14.5 presentada a continuación.

Tabla 14.5: Rendimiento de la Planta y Desperdicios caso I

Rendimiento Planta [%]	Capacidad actual [ktpd]	Desperdicios [%]	Desperdicios [ktpd]
93 %	120	7 %	8.4

En un escenario altamente favorable, suponiendo que GDM-X1 opere sin ninguna falla y que el equipo de control de la planta concentradora siga las directrices de GDM-X1 de manera rigurosa, se proyecta una mejora del 2 % en el rendimiento, de acuerdo con los datos facilitados por ISPROTEC. Esta perspectiva promisoriosa anticipa un impacto muy positivo, lo que llevaría a una drástica reducción de los desperdicios.

Tabla 14.6: Rendimiento de la Planta y Desperdicios caso II

Rendimiento Planta [%]	Capacidad actual [ktpd]	Desperdicios [%]	Desperdicios [ktpd]
94 %	120	6 %	7.2

En resumen, los resultados de nuestros análisis indican que al mejorar el rendimiento del proceso de flotación en nuestra planta concentradora, logramos disminuir significativamente la cantidad de desechos generados por unidad de volumen procesado. Este resultado se hizo evidente al comparar dos casos: uno donde alcanzamos un aumento del 1 % en la recuperación de cobre y otro donde logramos una mejora aún mayor, del 2 %. En ambos escenarios, observamos una reducción proporcional en los desechos generados. Esta disminución en la producción de desechos es una señal alentadora y subraya la importancia de mejorar continuamente la eficiencia de nuestro proceso de flotación. Al reducir nuestro impacto ambiental y minimizar la cantidad de residuos, no solo cumplimos con nuestros compromisos ecológicos, sino que también podemos lograr un ahorro económico significativo al aprovechar al máximo nuestros recursos y materias primas.

15. Construcción de protocolo

Debido a que las pruebas industriales realizadas no proporcionaron resultados concluyentes en cuanto a la fiabilidad de los datos generados por el equipo, se plantea un desafío significativo en la creación de un protocolo preciso y confiable para registrar el funcionamiento detallado del equipo. Este protocolo es esencial para garantizar la calidad y la consistencia de las mediciones a lo largo del tiempo.

Dado que las pruebas iniciales no lograron establecer una base sólida para el funcionamiento del equipo, la creación de un protocolo efectivo se complica. La falta de datos confiables dificulta la identificación de patrones y la documentación de los procedimientos operativos estándar necesarios para mantener la calidad de las mediciones. Esto plantea interrogantes sobre la validez de los resultados y la capacidad del equipo para cumplir con los estándares requeridos.

En otras palabras, la falta de fiabilidad en los datos obtenidos por el equipo durante las pruebas industriales representa un obstáculo importante en la creación de un protocolo detallado. Esto

subraya la importancia de abordar las limitaciones y las incertidumbres en la recopilación de datos antes de poder establecer un protocolo que garantice la calidad de las mediciones.

16. Conclusiones

Basado en los aspectos proporcionados, se puede concluir que el GDM-X1 tiene el potencial de ser una tecnología revolucionaria en la industria minera, pero es fundamental abordar y resolver las cuestiones relativas a la precisión de las mediciones. Estas imprecisiones podrían deberse a errores en el algoritmo o a problemas físicos, como fugas de aire en el circuito neumático, que podrían ser causadas por las vibraciones intensas presentes en entornos mineros.

Desde una perspectiva económica, el proyecto se presenta como altamente rentable, incluso bajo supuestos conservadores. Sin embargo, existe un potencial significativo para aumentar los ingresos, ya que la empresa está en conversaciones con otras compañías mineras para realizar pruebas piloto y, en última instancia, implementar el equipo en sus propias plantas concentradoras.

En términos ecológicos, se ha demostrado que un aumento en el rendimiento de la planta concentradora puede reducir significativamente los residuos generados, ya que la mayor producción de concentrado de cobre conlleva una menor cantidad de mineral procesado, lo que es beneficioso tanto para la eficiencia económica como para el medio ambiente.

Para la creación del protocolo de operación del equipo, es imperativo abordar y solucionar los problemas identificados, ya sea de naturaleza algorítmica o física, con el fin de estandarizar las operaciones y mejorar la calidad del proceso. Este paso es esencial para garantizar la fiabilidad de los datos y la consistencia en las mediciones del equipo GDM-X1.

16.1. Recomendaciones

El desarrollo de este sensor posee aspectos a mejorar, a partir de esto se presentan las siguientes recomendaciones: Aquí se presentan las medidas clave a implementar:

1. Establecer un protocolo estandarizado para inspeccionar regularmente el estado de cada equipo y detectar posibles fugas de aire.
2. Introducir un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) para mitigar los problemas derivados de cortes de energía y garantizar la continuidad en la adquisición de datos.

3. Mantener un monitoreo constante de la correcta alimentación de aire para asegurar que las vías utilizadas para la medición de la presión se encuentren despejadas y funcionando sin obstrucciones.

A través de estas medidas se contribuye a asegurar la integridad de los datos, la continuidad en la recopilación de información y el mantenimiento de las condiciones óptimas de medición. Todo ello es esencial para obtener resultados confiables en el proyecto y para garantizar su éxito en el ámbito técnico y económico.

17. Referencias

Bibliografía

- [1] CCM-ELEVA (2023). *Procesamiento de sulfuros de cobre: Proceso de concentrado*. <https://www.ccm.cl/estandares-sectoriales/rutas/procesamiento-de-sulfuros-de-cobre-proceso-de-concentrado/>
- [2] BHP (2023). *Qué Hacemos*. <https://www.bhp.com/es/what-we-do/products/copper>
- [3] CODELCO EDUCA (2023). *Flotación*. <https://www.bhp.com/es/what-we-do/products/copper>
- [4] FUERSTENAU M, HAN K (2006). *Principios de Procesamiento de Minerales*
- [5] GLENCORE (2023). *Jameson Cell* <https://www.glencoretechnology.com/es/technologies/jameson-cell>
- [6] GLENCORE (2023). *Jameson Concentrator* <https://www.glencoretechnology.com/es/technologies/jameson-cell>
- [7] JK TECH (2023). *Equipment and Testwork Brochure* <https://jktech.com.au/products/testing-equipment>
- [8] DA SILVA, C. (2019). *Desarrollo y validación de sensor para la medición de variables de dispersión de gas en forma continua en celdas de flotación*. Universidad Técnica federico Santa María. Recuperado de: <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/56061>
- [9] A POWER, J-P FRANZIDIS, E V MANLAPIG (2000). *The Characterisation of Hydrodynamic Conditions in Industrial Flotation Cells* Vol.6. Pág.243-253. <https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/seventh-mill-operators-conference/the-characterisation-of-hydrodynamic-conditions-in-industrial-flotation-cells/>
- [10] GOMEZ C.O., CORTÉS-LÓPEZ F., FINCH J.A. (2003). *Industrial testing of a gas holdup sensor for flotation systems* Minerals Engineering Vol.16 Pág.493-501. DOI 10.1016/S0892-6875(03)00083-9.

- [11] GOMEZ C.O.,ACUÑA C. ,FINCH J.A. (2005). *Some gas dispersion characteristics of mechanical flotation machines* Minerals Engineering. Pág.1-9.DOI :10.1016/j.mineng.2005.09.045
- [12] GOMEZ C.O.,MALDONADO M.(2018). *A new approach to measure gas holdup in industrial flotation machines part I: Demonstration of working principle* Minerals Engineering Vol.18 Pág.1-8. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.01.001>
- [13] GOMEZ C.O.,MALDONADO M., CRETIER R.(2020). *A new approach to measure gas holdup in industrial flotation machines. Part II: Effect of fluid properties* Minerals Engineering Vol.148 Pág.1-7. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106177>