

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIDAD DE POSGRADO



TESIS

**Gestión del Proyecto de Automatización mediante la guía PMBOK y Scrum para
mejorar la Calidad de Muestreo de Concentrado de Cobre en una Compañía
Minera**

**Para obtener el Grado Académico de Maestro en Ingeniería con mención en
Gerencia de Proyectos Electromecánicos**

Elaborada por:
MIGUEL CUSTODIO CORBERA

Asesor:
Dr. Aurelio Marcelo Padilla Ríos

Lima – Perú

2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi padre, Miguel, cuyas enseñanzas en lo social y en lo científico me inspiran a ser cada día un mejor hombre, y a mi madre, Rosa, por transmitirme la fortaleza necesaria para superar los obstáculos. Ambos son pilares esenciales en mi vida, y su amor incondicional ha sido mi mayor fuente de fuerza y motivación.

A mis hermanas: Albania, Nadezda y Cheyene; y a mis sobrinos: Catalina, Juan de Dios y Mateo, por su cariño constante que llena mi vida.

A mis amigos Daol y Egidio, por su invaluable ayuda en este camino.

A Camila, quien me hizo descubrir la dicha más profunda de ser padre. Y a Pierina por su presencia y respaldo en momentos más importantes.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y, en especial, al Dr. Aurelio Marcelo Padilla Ríos, asesor de mi tesis, por su invaluable orientación y paciencia al revisar y corregir los documentos, contribuyendo de manera decisiva a la culminación de este trabajo. Asimismo, agradezco a la ingeniera Cristina por su apoyo que fue fundamental en el desarrollo de este proyecto.

RESUMEN

La presente investigación aborda la pregunta: ¿De qué manera se mejora la calidad de la muestra de mineral para el incremento de la producción de cobre en una compañía minera?, nuestro objetivo es proponer la gestión del proyecto de automatización de muestreo mediante la guía PMBOK y Scrum para mejorar la calidad de producción de cobre en una compañía minera, el tipo de investigación es aplicada de corte cuantitativo de nivel descriptivo correlacional y diseño no experimental. Esta investigación se justifica, de acuerdo con los datos analizados, que el sistema automático de muestreo capta mejor las fluctuaciones reales del proceso y reduce la incertidumbre en las mediciones, mejorando la representatividad de la muestra. La recolección de datos fue realizada en la salida de los 03 filtros prensa, los resultados de la investigación demuestran que se obtiene un beneficio de \$6 millones de dólares mensuales al implementar el sistema. En la discusión de resultados se ha comparado dos métodos de muestreo uno manual y el otro automático con el propósito de evidenciar la factibilidad y los beneficios del sistema automático. Las principales conclusiones son que el sistema piloto de muestreo demostró viabilidad técnica y económica, mejorando la precisión en la ley de cobre y con potencial para mayores beneficios en la Faja Principal. El análisis de datos históricos identificó un flujo óptimo de 25-550 T/h para obtener muestras representativas. La combinación de metodologías tradicionales y Scrum permitió desarrollar una solución eficiente e innovadora alineada con las demandas del sector minero; así mismo se presenta recomendaciones para futuras investigaciones

Palabras Clave: Guía PMBOK, Metodologías de Proyectos Tradicionales y Ágiles, Muestreo, Norma ISO 12743, Automatización.

ABSTRACT

The present research addresses the question: How can the quality of mineral sampling be improved to increase copper production in a mining company? Our objective is to propose the management of a sampling automation project using the PMBOK guide and Scrum framework to improve the quality of copper production in a mining company. The research is applied, with a quantitative approach, descriptive-correlational level, and a non-experimental design.

This research is justified based on analyzed data, showing that the automated sampling system better captures real fluctuations in the process and reduces measurement uncertainty, thus improving sample representativeness. Data collection was conducted at the output of three filter presses, and the research results demonstrate a monthly benefit of \$5.14 million upon implementing the system.

In the discussion of results, two sampling methods—manual and automatic—were compared to highlight the feasibility and benefits of the automated system. The main conclusions are that the pilot sampling system demonstrated technical and economic viability, improving the accuracy of copper grade measurements and showing potential for greater benefits in the main conveyor. Historical data analysis identified an optimal flow of 25-550 T/h to obtain representative samples. The combination of traditional methodologies and Scrum enabled the development of an efficient and innovative solution aligned with the demands of the mining sector. Additionally, recommendations for future research are presented

Keywords: PMBOK Guide, Traditional and Agile Project Methodologies, Sampling, ISO 12743 Standard, Automation.

INDICE

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
CAPÍTULO I: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes Investigativos.....	4
1.2. Descripción de la Realidad Problemática	10
1.3. Formulación del Problema.....	12
1.3.1. Problema General.....	12
1.3.2. Problemas Específicos.....	12
1.4. Justificación e importancia.....	13
1.5. Objetivos	14
1.5.1. Objetivo General	14
1.5.2. Objetivos Específicos.....	14
1.6. Hipótesis	15
1.6.1. Hipótesis General	15
1.6.2. Hipótesis Específicas	15
1.7. Variables e Indicadores	15
1.7.1. Variables	15
1.7.2. Operacionalización de variables.....	16
1.8. Unidad de Análisis	17
1.9. Tipo, enfoque, nivel y diseño de la investigación	17
1.10. Periodo de Análisis	18
1.11. Fuente de la Información e instrumentos utilizados	18
1.12. Técnicas de recolección y procesamiento de datos.....	18
1.13. Procesamiento de datos.....	18
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 Teoría del Muestreo.....	19
2.2 Sistemas de Muestreo.....	38
2.3 ¿Qué es un Proyecto?	42

2.4	¿Qué es la dirección de proyectos?	42
2.5	Metodologías de Proyectos	44
2.6	Sistema de Control	51
2.7	Controlador Lógico Programable (PLC).....	51
2.8	SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition o Control con Supervisión y Adquisición de Datos).....	52
2.9	Sensores	53
2.10	Actuadores	53
CAPITULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN		55
3.1	Enfoque Tradicional para la Infraestructura	57
3.1.1	Acta de Constitución	57
3.1.2	Enunciado del Alcance del Proyecto	61
3.1.3	Matriz de Trazabilidad de Requisitos.....	63
3.1.4	EDT	64
3.1.5	Cronograma.....	65
3.1.6	Presupuesto.....	66
3.1.7	Gestión de la Calidad.....	68
3.1.8	Gestión de Riesgos.....	69
3.2	Enfoque Ágil - Scrum.....	71
3.2.1	Product Backlogs	74
3.2.2	Spring Planning Meeting	79
3.2.3	Dayli Scrum.....	82
3.2.4	Retrospectiva Sprint.....	83
3.2.5	Sprint Review.....	84
3.3	Diseño del Proyecto	84
3.3.1	Infraestructura Civil	86
3.3.2	Infraestructura Mecánica.....	96
3.3.2.1	Estructura de Soporte	97
3.3.2.2	Sistema de Acceso.....	99

3.3.2.3	Diseño para Equipos de Muestreo	100
3.3.2.4	Seguridad y Mantenimiento.....	100
3.3.2.5	Equipos.....	101
3.3.3	Infraestructura Eléctrica	110
3.3.3.1	Alimentación Principal.....	110
3.3.3.2	Tablero de Potencia y Control	112
3.3.4	Cálculo de la Muestra	117
3.3.4.1	Masa del Lote	118
3.3.4.2	Masa del Sublote	118
3.3.4.3	Abertura del Cortador.....	119
3.3.4.4	Varianza Total (S_T^2)	120
3.3.4.5	Varianza Analítica (S_A^2)	121
3.3.4.6	Determinación de la varianza entre incrementos primarios ($S_{b_1}^2$).....	122
3.3.4.7	Determinación de la varianza de procesamiento de muestra (S_p^2).....	122
3.3.4.8	Cálculo de la cantidad de incrementos primarios (n_1).....	123
3.3.4.9	Análisis de datos históricos del Flujo de Concentrado.....	125
3.3.4.10	Balance de masa para el Sistema Automático de Muestreo	133
3.3.5	Automatización del Sistema	140
3.3.5.1	Diseño de la Arquitectura	141
3.3.5.2	Selección de Equipos.....	142
3.3.5.3	Mapeo de Entradas/Salidas Digitales-Analógicas	145
3.3.5.4	Filosofía de Control	147
3.3.5.5	Integración al Sistema Scada.....	150
CAPITULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		153
4.1	Análisis de los resultados	153
4.1.1	Metodología	155
4.1.2	Resultados Técnicos.....	156
4.1.3	Conclusiones Técnicas	160

4.1.4	Resultados Económicos.....	160
4.2	Contrastación de las hipótesis.....	162
4.2.1	Contrastación de la Hipótesis General.....	162
4.2.2	Contrastación de las hipótesis específicas.....	163
4.3	Contrastación de los resultados.....	166
	CONCLUSIONES.....	168
	RECOMENDACIONES.....	170

Índice de Figuras

Figura 1	Diagrama de la descarga de los 03 filtros prensa a la faja principal.....	11
Figura 2	Operador tomando muestra de cobre a la salida de un filtro prensa.....	11
Figura 3	Ejemplo de un plan de muestreo intercalado por duplicado.....	28
Figura 4	Ejemplo de un esquema de muestreo donde se constituye una muestra común del lote para determinar la humedad y su posterior análisis químico	31
Figura 5	Ejemplo de un esquema de muestreo donde el lote se divide en sublotes para determinar la humedad y se combinan posteriormente las submuestras secas de humedad en una sola muestra de lote para el análisis químico.....	32
Figura 6	Ejemplo de muestreador tipo cortante	34
Figura 7	Ejemplo de muestreador mecánico transversal a la faja.....	35
Figura 8	Muestreo de Pulpa	39
Figura 9	Muestreo de Mineral.....	40
Figura 10	Muestreo de Concentrado	41
Figura 11	Muestreo de Soluciones	41
Figura 12	Procesos Metodología en Cascada	46
Figura 13	Principios y valores manifiesto ágil	48
Figura 14	Controlador Lógico Programable	52
Figura 15	Sistema de Supervisión SCADA.....	52
Figura 16	Sensores de distintos tipos.....	53
Figura 17	Motor eléctrico.....	54
Figura 18	Estructura de Desglose del Trabajo	65
Figura 19	Cronograma del Proyecto.....	66
Figura 20	Proceso Scrum.....	74
Figura 21	Ubicación del Sistema, vista aérea y frontal de la Faja Transportadora..	85
Figura 22	Propiedad del concreto armado.....	86
Figura 23	Propiedades del acero de refuerzo.....	87

Figura 24	Diseño de la Platea de Cimentación.....	88
Figura 25	Distribución de la platea de cimentación	88
Figura 26	Geometría de la platea próximo a construir	89
Figura 27	Cuadro de Cargas	90
Figura 28	Definición del método de análisis	91
Figura 29	Cálculo del peralte en las columnas 5,2 y 1.....	92
Figura 30	Cálculo del factor de amplificación de carga "F"	93
Figura 31	Cálculo de las cargas actuantes – Franja 1	94
Figura 32	Rejillas de barras para piso	98
Figura 33	Diseño de la Estructura del Sistema de Muestreo	101
Figura 34	Muestreador Primario	101
Figura 35	Chute de Descarga	103
Figura 36	Faja de Alimentación Primaria	104
Figura 37	Muestreador Secundario	105
Figura 38	Embolsadora Automática.....	106
Figura 39	Disposición de los Equipos del Sistema de Muestreo.....	108
Figura 40	Vista lateral del Sistema de Muestreo	109
Figura 41	Vista posterior del Sistema de Muestreo	109
Figura 42	Alimentación principal del Sistema de Muestreo.....	111
Figura 43	Blackplane y componentes internos del tablero de control y potencia ..	114
Figura 44	Vista frontal del tablero de control y potencia	115
Figura 45	Lado derecho e izquierdo del tablero de control y potencia	116
Figura 46	Etapas del proceso.....	118
Figura 47	Flujo Másico promedio diario – Faja Principal alimentación de Cu	128
Figura 48	Flujo Máximo diario – Faja Principal alimentación de Cu.....	129
Figura 49	Flujo Másico Mínimo diario – Faja Principal alimentación de Cu	130
Figura 50	Porcentajes de flujos remanentes y de producción mensual en el año 2022 y 2023	132
Figura 51	Arquitectura del Sistema de Muestreo.....	142

Figura 52	Diagrama de flujo para la toma de muestras del sistema	150
Figura 53	Integración al sistema Scada.....	151
Figura 54	Puntos de muestreo	154
Figura 55	Muestreador Automático Thermo Fisher SamSat	154
Figura 56	Muestreo manual.....	154
Figura 57	Ejemplo de la data obtenida del proceso de muestreo	155
Figura 58	Comparación de leyes.....	157
Figura 59	Variaciones transitorias capturadas	158
Figura 60	Diferencia relativa de ambos métodos de muestreo	159

Índice de tablas

Tabla 1	Variables e indicadores de la investigación.....	16
Tabla 2	“Valores típicos de las desviaciones estándar totales y analíticas necesarias para determinar el contenido de metal y de humedad”	30
Tabla 3	Ejemplos de desviaciones estándar entre incrementos primarios	30
Tabla 4	Comparativo de metodologías	45
Tabla 5	Acta de Constitución.....	58
Tabla 6	Enunciado del Alcance del Proyecto.....	62
Tabla 7	Matriz de Trazabilidad de Requisitos	63
Tabla 8	Presupuesto CAPEX	67
Tabla 9	Presupuesto OPEX.....	67
Tabla 10	Matriz de Riesgos del Proyecto	70
Tabla 11	Probabilidad Categórica	70
Tabla 12	Clasificación de Probabilidad y Consecuencia.....	71
Tabla 13	Lista de backlogs.....	79
Tabla 14	Spring 01	80
Tabla 15	Spring 02	80
Tabla 16	Spring 03	81
Tabla 17	Spring 04	81
Tabla 18	Spring 05	81
Tabla 19	Daily Scrum por cada sprint.....	82
Tabla 20	Pasos clave para la retrospectiva sprint.....	83
Tabla 21	Sprint review.....	84
Tabla 22	Carga permanente y viva.....	87
Tabla 23	Medir de estructuras.....	95
Tabla 24	Cargas de equipos de potencia	112
Tabla 25	Cargas de equipos de control	113
Tabla 26	Datos del Lote	118

Tabla 27	Datos del Sublote	119
Tabla 28	Medidas de abertura del cortador	120
Tabla 29	Varianza total.....	121
Tabla 30	Varianza Analítica	121
Tabla 31	Varianza entre incrementos primarios.....	122
Tabla 32	Varianza de procesamiento de muestra.....	123
Tabla 33	Parte de la data recopilada del flujo de concentrado en el periodo 2022-2023	126
Tabla 34	Porcentaje de rangos de flujo de trabajo.....	132
Tabla 35	Porcentaje de incidencia de flujos operativos	133
Tabla 36	Parámetros de entrada para el Balance de masa	134
Tabla 37	Parámetros calculados de la etapa primaria del sistema	135
Tabla 38	Parámetros calculados de la Faja de Alimentación Primaria.....	136
Tabla 39	Parámetros calculados en el Muestreador Secundario	137
Tabla 40	Masa recolectada por cada sublote	138
Tabla 41	Masa teórica y real de cada incremento	139
Tabla 42	Mapeo de Señales.....	146
Tabla 43	Estadísticas descriptivas	156

CAPÍTULO I

Introducción

La industria minera, en su búsqueda constante por mejorar la precisión y calidad en la producción de concentrados minerales, ha experimentado una transformación significativa gracias a la adopción de tecnologías avanzadas. En los últimos años, la automatización se ha convertido en una herramienta clave para optimizar procesos de producción, especialmente en áreas donde la seguridad y la precisión son cruciales. Por ejemplo, la implementación de un sistema automatizado de muestreo garantiza que los resultados sean representativos y confiables, permitiendo así una evaluación precisa de la calidad del material procesado. Según la ISO 12743:2006, esta precisión es esencial para cumplir con los estándares internacionales de calidad, que exigen procedimientos estrictos para la toma de muestras y determinación del contenido de humedad y metales en el concentrado de cobre (ISO, 2006).

El muestreo manual, utilizado tradicionalmente, presenta limitaciones que pueden afectar tanto la seguridad de los trabajadores como la precisión de los resultados. La variabilidad y el riesgo operativo asociados al factor humano pueden generar inconsistencias en las muestras, lo que impacta directamente en la evaluación financiera del material. Como se menciona en la *AMIRA P754* (Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2007), el uso de sistemas automatizados reduce los márgenes de error y proporciona datos en tiempo real, minimizando así los riesgos y mejorando la calidad del producto final. Además, esta transformación es parte de un cambio más amplio hacia la **Industria 4.0**, una tendencia mundial en la que tecnologías digitales y sistemas integrados están revolucionando la minería moderna (*Mining Journal*, 2020)

Para garantizar que la implementación del sistema automatizado de muestreo cumpla con los altos estándares de planificación y control, esta tesis adopta un enfoque de **gestión de proyectos híbrido**, combinando la **Guía PMBOK** del Project Management Institute (PMI) y **Scrum**. Según el PMI, el uso de buenas prácticas de gestión de proyectos asegura una planificación sólida y un control riguroso en cada fase del desarrollo, lo cual es particularmente útil para las fases de infraestructura civil, mecánica y eléctrica (PMI, 2021). La guía PMBOK ayuda a organizar de manera estructurada el alcance, los recursos y el cronograma del proyecto, cubriendo los aspectos más lineales y predecibles del mismo.

Por otro lado, la implementación de **Scrum** permitirá abordar la fase de automatización con flexibilidad, permitiendo adaptaciones continuas y retroalimentación en tiempo real en cada etapa del desarrollo tecnológico. Este enfoque ágil facilita la entrega de componentes funcionales en ciclos cortos o sprints, lo cual es ideal para la programación y el ajuste de sistemas de control, como los PLCs y el SCADA (Schwaber & Sutherland, 2020). La integración de ambas metodologías contribuye a una ejecución balanceada y adaptable, lo que permite no solo cumplir con los requisitos técnicos y normativos, sino también optimizar los tiempos y recursos en cada etapa del proyecto.

En este contexto, la implementación de un sistema automatizado de muestreo de concentrado de cobre también responde a la normativa peruana *NTP-ISO 12743*, la cual exige que el muestreo sea lo más representativo posible para asegurar que los lotes cumplan con los estándares de calidad (INACAL, Perú). Este proyecto, además de alinear las operaciones con estas normas, permite a la compañía adoptar la transformación digital, mejorar la eficiencia

operativa y reducir riesgos laborales al minimizar la intervención humana directa en el proceso de muestreo (Velásquez & Rodríguez, 2019).

En el Capítulo I se presentan los antecedentes investigativos y se describe la realidad problemática que motiva el estudio. Asimismo, se formulan el problema de investigación, la justificación, los objetivos, las hipótesis, la operacionalización de variables y la metodología utilizada para abordar el proyecto.

El Capítulo II está dedicado al marco teórico y al marco conceptual, proporcionando los fundamentos y conceptos clave que sustentan la investigación.

En el Capítulo III se desarrolla la solución propuesta, alineada con los objetivos planteados, detallando los pasos seguidos para su implementación.

El Capítulo IV abarca el análisis de los resultados obtenidos, la contrastación de las hipótesis formuladas y la discusión de los hallazgos en el contexto del marco teórico.

Por último, se exponen las conclusiones obtenidas del estudio junto con sugerencias destinadas a investigaciones futuras o posibles aplicaciones en el ámbito práctico.

1.1 Antecedentes Investigativos

Coelho, P. A. et al (2019)¹ llevaron a cabo una investigación acerca del análisis automático de imágenes hiperespectrales en el infrarrojo cercano de concentrados de cobre. Destaca la importancia de conocer la composición mineralógica de estos materiales para controlar y monitorear los procesos de la industria extractiva. Tradicionalmente, esta información se obtenía manualmente, lo que limitaba el monitoreo en tiempo real. El estudio propone una solución innovadora utilizando imágenes hiperespectrales para analizar muestras de minerales como calcopirita, pirita, calcocita, covellita y escoria, en formato de pellets. Se emplea un clasificador de K-Nearest Neighbor para identificar los principales componentes de los concentrados y determinar su distribución espacial. Se describe un sistema automático que gestiona todas las etapas, desde la adquisición hasta el procesamiento de las imágenes. El equipo experimental incluye una cámara hiperespectral, un banco óptico y etapas de traslación de alta precisión. Se detalla el proceso de adquisición de espectros de las muestras en pellets, en un rango espectral de 900 a 1700 nm con 256 muestras espectrales efectivas. Evaluar la composición mineral a través de imágenes hiperespectrales es una técnica prometedora. Este enfoque tiene el potencial de clasificar y seleccionar minerales de manera más eficiente durante el procesamiento de recursos minerales. El estudio actual supone un avance importante en la aplicación de esta tecnología al análisis de concentrados de cobre, proporcionando un método automatizado y rentable para obtener información valiosa sobre la composición mineralógica. Las conclusiones y

¹ Coelho, P. A. et al (2019). Automatic near-infrared hyperspectral image analysis of copper concentrates. IFAC PapersOnLine 52-14 (2019) 94–98

metodologías expuestas en este trabajo pueden resultar de gran utilidad para futuras investigaciones en el campo de la minería y el tratamiento de minerales.

Fouz Varela, D. M. et al (2020)² llevaron a cabo una investigación que analiza la aplicación de metodologías de gestión de proyectos en el contexto de proyectos colaborativos de I+D+i, con un enfoque específico en el proyecto PORTOS. Este proyecto, financiado a través de la convocatoria INTERREG Atlantic Area, tiene como objetivo principal la implementación de Energías Renovables Marinas en puertos del Espacio Atlántico Europeo para abordar desafíos energéticos y medioambientales. La Universidad de Santiago de Compostela desempeña un papel crucial en el partenariado de PORTOS, contribuyendo a su desarrollo y éxito. Se destaca la importancia de establecer un Plan para la Dirección del Proyecto que garantice la finalización exitosa de PORTOS, siguiendo las directrices del estándar PMBOK (Project Management Body of Knowledge). El estudio enfatiza la necesidad de una base metodológica sólida para evaluar el desempeño del proyecto y validar la aplicación de enfoques de Dirección de Proyectos en proyectos de investigación aplicada y convocatorias competitivas colaborativas. Además, se aborda la gestión de riesgos en el proyecto PORTOS, incluyendo un análisis cualitativo de amenazas y oportunidades, así como la priorización y aplicación de medidas para mitigar o potenciar los riesgos identificados.

² Fouz Varela, D.M et al (2020). Aplicación de las metodologías de Dirección de Proyectos a proyectos de I+D+i colaborativo. Comunicaciones presentadas al XXIV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, ISBN 978-84-09-21128-9.

Cadenillas Luna, H. U. et al (2020)³ desarrollaron un estudio con el objetivo de identificar el rango permitido de variación en el sistema de medición de los niveles de cobre y oro presentes en el concentrado, evaluando las diferencias que se producen entre el almacén de acopio en el puerto y el punto de despacho en la mina. Para lograr este propósito, se llevaron a cabo diversos análisis sobre las variables involucradas en el proceso, incluyendo las etapas de muestreo, acondicionamiento de la muestra, análisis de laboratorio y métodos estadísticos aplicados, con la intención de establecer si estas diferencias influyen de manera significativa en los resultados económicos de la empresa. Asimismo, se realizó un estudio del entorno económico del sector minero tanto en el ámbito nacional como internacional, lo que permitió contextualizar la relevancia de las variaciones entre los valores de cobre y oro en los puntos mencionados. En efecto, si no se determina con claridad qué variables influyen o cuáles son los límites aceptables de variación, no se podrá cuantificar con precisión el verdadero impacto económico sobre la compañía. Para contrastar las hipótesis planteadas, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) y se llevó a cabo una evaluación del sistema de medición (MSA) utilizando la técnica Gage R&R. Como resultado, se concluyó que los sistemas de medición en ambos lugares deben optimizarse mediante la estandarización de procedimientos, formación técnica del personal, incorporación de equipos similares debidamente calibrados y la ejecución de balances semanales entre ambos puntos. Estas acciones

3 Cadenillas Luna, H. U. et al (2020). Variabilidad en el Sistema de Medición de los Contenidos de Cobre y Oro en el Concentrado, entre el almacén de acopio y el punto de despacho y su posible impacto económico - Caso de estudio compañía minera en el norte del Perú. [Tesis de maestría, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].

permitirán reducir la dispersión en los resultados de análisis de cobre y oro obtenidos en la mina y en el área de almacenamiento en puerto.

Hadida, S. et al (2020)⁴ en su investigación, se llevó a cabo una comparación entre enfoques ágiles y tradicionales en un entorno marcado por la ambigüedad y el proceso de transformación digital. Para ello, se analizaron dos proyectos ejecutados entre los años 2018 y 2019 en la filial argentina de una empresa multinacional del sector farmacéutico. El primero de ellos, titulado “De la oportunidad a la implementación”, fue gestionado bajo un enfoque secuencial basado en la metodología tradicional DMAIC. El segundo, un Programa de Gestión de Datos, se desarrolló siguiendo los principios de la filosofía ágil, utilizando específicamente el marco de trabajo Scrum. A partir del análisis de estos casos, se identificaron diferencias clave entre ambas metodologías, destacándose que las herramientas ágiles presentan ventajas significativas en escenarios caracterizados por la incertidumbre y la complejidad. En particular, se concluyó que los métodos ágiles permiten una mayor eficiencia, al requerir menos tiempo, menor inversión económica y un uso más eficiente de los recursos respecto a los enfoques tradicionales. Además, el estudio incluyó una revisión de las habilidades y competencias necesarias en los equipos de trabajo para desenvolverse eficazmente dentro de marcos ágiles, así como en el contexto más amplio de transformación digital. Entre estas habilidades destacan la capacidad de adaptación, el desaprendizaje, el aprendizaje continuo, la integridad, y la habilidad de aprender del error y el fracaso.

4 Hadida, S. et al (2020). La agilidad en las organizaciones: trabajo comparativo entre metodologías ágiles y de cascada en un contexto de ambigüedad y transformación digital. CEMA Working Papers: Serie Documentos de Trabajo. 756, Universidad del CEMA.

Torres Guerra, J. A. et al (2021)⁵ llevaron a cabo un estudio que aborda la transformación de la industria minera peruana en el marco de la cuarta revolución industrial. La Geometalurgia emerge como una disciplina esencial que integra modelos predictivos en la cadena de valor minera, mejorando la toma de decisiones y la optimización de procesos. La revolución industrial 4.0 se define por el surgimiento de tecnologías como la robótica, el machine learning, la inteligencia artificial y las redes de alto rendimiento, que están revolucionando las operaciones mineras. La Geometalurgia se posiciona como un elemento clave para predecir el comportamiento de los minerales durante su procesamiento, lo que es fundamental para evaluar la rentabilidad y sostenibilidad de los proyectos mineros. El artículo describe el proceso de creación del modelo geometalúrgico y destaca la importancia del análisis de datos en la nube para un acceso eficiente en tiempo real. Además, se discute el uso de tecnologías como drones, sistemas de despacho minero y camiones autónomos para mejorar la eficiencia y seguridad en las minas. Los autores presentan casos de estudio de empresas mineras peruanas que han implementado con éxito la Geometalurgia digital, como Goldfields La Cima, Las Bambas y el Complejo Pasco. En estos casos, se utilizan softwares especializados para simular y optimizar procesos metalúrgicos, lo que ha permitido identificar riesgos y mejorar la planificación y operación de las minas.

Alzamora Verastegui, S. E. (2021)⁶ investiga sobre la Determinación de la Incertidumbre y Validación del Muestreador Robotizado de Despacho de

5 Torres Guerra, J. A. et al (2021). Geometalurgia y el futuro de la minería digital en el Perú. Rev. Inst. investig. Fac. minas metal. cienc. geogr. vol 24 n° 47, 2021: 163 - 180

6 Alzamora Verastegui, S. E. (2021). Determinación de la incertidumbre y validación del muestreador robotizado de despacho de concentrados de cobre, caso Planta Minera. [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Concentrados de Cobre, Caso Planta Minera, el estudio se centra en identificar los parámetros que presentan menor incertidumbre y validación para un muestreador robotizado utilizado en el despacho de concentrados de cobre. Este estudio es fundamental para proporcionar resultados confiables y exactos, lo cual es crucial en diversas actividades comerciales, de producción e investigación. La obtención de resultados con baja incertidumbre permite llegar a conclusiones importantes y tomar decisiones que pueden impactar la economía, las legislaciones, las políticas, los permisos de exportación/importación, la obtención de licencias y la determinación de penalidades, entre otros campos de aplicación. El objetivo principal es asegurar la confiabilidad y la exactitud en el proceso de medición, lo que se logra determinando y demostrando la variabilidad de los resultados obtenidos tanto en el proceso de medición como en el de muestreo. Estimar la incertidumbre de la medición es clave para conocer esta variabilidad.

Flores-Cerna, F. et al (2022)⁷ llevaron a cabo las brechas organizacionales que enfrentan las PyMEs TI al introducir metodologías ágiles en la gestión de proyectos. Se realizó un estudio cualitativo en la empresa Ecofor Servicios Tecnológicos Limitada, involucrando a gerentes, ingenieros de proyecto y analistas programadores. Se identificaron como principales desafíos la cultura organizacional en conflicto con la agilidad, la falta de compromiso de la gerencia y la resistencia al cambio. La metodología empleada consistió en entrevistas semiestructuradas y encuestas dirigidas a profesionales de áreas TI. Los resultados revelaron que el 90% de los entrevistados consideraba crucial

⁷ Flores-Cerna, F. et al (2022). Metodologías ágiles: un análisis de los desafíos organizacionales para su implementación. Revista Científica, 43(1), 38-49.

adoptar metodologías ágiles debido a la inflexibilidad de la metodología actual. Se destacó la importancia de un acuerdo transversal respaldado por la alta gerencia para alinear el trabajo con una metodología ágil que permita la adaptación a entornos cambiantes. Se concluyó que la implementación de metodologías ágiles en PyMEs TI es factible, siempre y cuando se aborden las brechas identificadas y se cuente con el respaldo de la alta gerencia y la asesoría de profesionales expertos. Este estudio proporciona una base sólida para comprender los desafíos y beneficios de la adopción de metodologías ágiles en el contexto de las pequeñas y medianas empresas de tecnología de la información.

1.2. Descripción de la Realidad Problemática

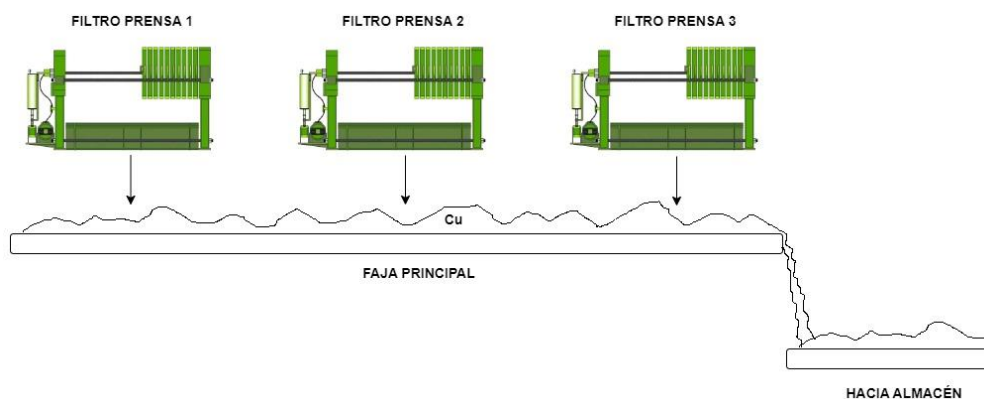
El muestreo en la Compañía Minera es una etapa crítica que permite obtener una porción representativa del material procesado, con el objetivo de determinar su composición, en especial la ley de cobre. Este proceso se realiza mediante incrementos sucesivos tomados a lo largo del tiempo o del flujo del mineral, los cuales se combinan para formar una muestra compuesta.

Para realizar una correcta contabilidad del metal de cobre que se produce en una de las Unidades Mineras más representativas del Perú, se realizan muestreos de mineral en diversos puntos de la operación.

Este proyecto se enfoca en el muestreo efectuado en la descarga de concentrado de cobre de los 03 filtros prensa hacia una faja transportadora, punto clave que representa el producto final de todo el proceso de la planta concentradora.

Figura 1

Diagrama de la descarga de los 03 filtros prensa a la faja principal



Actualmente la toma de muestra en este punto se realiza de forma manual, lo que implica que las muestras no sean representativas, es decir no refleja adecuadamente las características del depósito de mineral en su totalidad, como consecuencia se genera incertidumbre en los cálculos derivados de esta medición, además de ello existe alto riesgo a la seguridad de los operadores que laboran realizando esta tarea ya que se encuentran expuestos a accidentes por equipos en movimientos.

Figura 2

Operador tomando muestra de cobre a la salida de un filtro prensa



El proceso manual de muestreo no cumple con las buenas prácticas internacionales recomendadas por el código AMIRA P754, una organización independiente que representa a afiliados del sector de recursos mineros. Además, no sigue las recomendaciones de la Norma Técnica Peruana NTP-ISO 12743. Esta falta de representatividad en las muestras puede generar alta desviación en los resultados de humedad y ley de cobre obtenidos en el laboratorio, lo que afecta la estimación financiera de la producción y la toma de decisiones.

La incertidumbre en la estimación financiera por metal debido al muestreo no representativo impacta significativamente en la subestimación de reservas, sobrecostos de extracción, reducción de ingresos y reputación y confianza de los inversionistas ya que no hay forma de conocer la desviación actual del valor calculado sobre el valor real, debido a que no se cuenta con ningún método alternativo y u otra medición de mayor exactitud.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema General

¿De qué manera se mejora la calidad de muestreo de Concentrado de Cobre en una Compañía Minera?

1.3.2. Problemas Específicos

- a. ¿Cómo identificar los parámetros operativos para el sistema automático de muestreo?
- b. ¿Qué diferencias existen entre los valores teóricos y reales de la masa final recolectada por incremento considerando la variación del flujo?
- c. ¿Cómo se implementa un enfoque híbrido de metodologías tradicionales y ágiles en el desarrollo del proyecto?

1.4. Justificación e importancia

La presente investigación permite mejorar la calidad de muestreo del concentrado de cobre mediante un sistema automático de muestreo ya que actualmente se tienen una incertidumbre en la estimación financiera por metal debido al muestreo no representativo en la producción.

Como ya se ha explicado anteriormente, la toma de muestra manual no garantiza la representatividad de la muestra del proceso, generando que cualquier resultado obtenido de esta muestra tenga exactitud incierta.

Al reemplazar el proceso de la toma de muestras manual, que se realizan a la descarga de los 03 filtros prensa de cobre, por un sistema automático de muestreo permite recolectar datos de manera más rápida y precisa, minimizando los errores humanos lo que genera una mayor eficiencia en la recolección de las muestras, conduciendo a la compañía minera a optimizar sus procesos y facilitando la toma de decisiones informadas y precisas en la gestión de la producción minera.

Con la implementación de este nuevo sistema se reducen significativamente la exposición de los operadores a riesgos y peligros asociados a la toma de las muestras y equipos en movimiento.

En un entorno minero variante y competitivo, es crucial para las empresas adaptarse rápidamente a las demandas del mercado; con el sistema automático de muestreo se tendrán una mayor flexibilidad y agilidad en la operación minera, lo que permite a la compañía responder de manera efectiva a los cambios en las condiciones del mercado.

El cambio de un sistema manual por un sistema automático, brinda una oportunidad para realizar un análisis comparativo entre las metodologías

tradicionales y ágiles en la implementación de este cambio tecnológico, identificando fortalezas y limitación de cada metodología; también permite conocer los desafíos relacionados con la planificación, ejecución y control de la implementación del nuevo sistema de muestreo, considerando la necesidad de incorporar practicas ágiles para adaptarse a los cambios y requisitos del proceso, manteniendo al mismo tiempo ciertos aspectos estructurales de la metodología tradicional con el objetivo de garantizar una gestión adecuada del proyecto.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Proponer la Gestión del Proyecto de Automatización mediante la guía PMBOK y Scrum para mejorar la Calidad de Muestreo de Concentrado de Cobre en una Compañía Minera.

1.5.2. Objetivos Específicos

- a. Analizar la variabilidad de los flujos de concentrado de cobre en la Faja Principal para identificar los parámetros operativos en el sistema automático de muestreo.
- b. Evaluar las diferencias entre los valores teóricos y reales en la masa final recolectada por incremento considerando la variación del flujo másico para garantizar la precisión y confiabilidad.
- c. Implementar un enfoque hibrido de metodologías tradicionales y ágiles en el desarrollo del proyecto para abordar las necesidades cambiantes del proyecto.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

La Propuesta de Gestión del Proyecto de Automatización mediante la guía PMBOK y Scrum mejora la Calidad de Muestreo de Concentrado de Cobre en una Compañía Minera.

1.6.2. Hipótesis Específicas

- a. La variabilidad de los flujos de concentrado de cobre en la Faja Principal permite identificar los parámetros operativos críticos que influyen en el sistema automático de muestreo.
- b. Las diferencias entre los valores teóricos y reales en la masa final recolectada por incremento permiten identificar desviaciones operativas en el sistema de muestreo, lo que contribuye a mejorar su precisión y confiabilidad
- c. La implementación de un enfoque híbrido de metodologías tradicionales y ágiles permite abordar las necesidades cambiantes del proyecto

1.7. Variables e Indicadores

1.7.1. Variables

Variable Independiente (VI): Gestión del Proyecto de Automatización mediante la guía PMBOK y Scrum.

Variable Dependiente (VD): Mejora de la Calidad de Muestreo de Concentro de Cobre

1.7.2.Operacionalización de variables

Tabla 1

Variables e indicadores de la investigación

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES				
VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADOR
VARIABLE INDEPENDIENTE(VI): Gestión del Proyecto de Automatización mediante la guía PMBOK y Scrum	Aplicación conjunta de las buenas prácticas del PMBOK y del marco Scrum para planificar, ejecutar y controlar el proyecto de automatización del sistema de muestreo, integrando enfoques predictivos y ágiles para mejorar el rendimiento del proyecto.	Evaluada a través de la implementación diferenciada de procesos del PMBOK y Scrum, considerando su impacto en la eficiencia del proyecto y en la calidad del sistema automatizado.	Planificación del Proyecto	% de tareas planificadas versus ejecutadas
			Tiempo	% de cumplimiento de cronograma y sprints
			Costos	% de Ahorro
			Riesgo	% de Interrupciones no planificadas durante la ejecución del proyecto
			Coordinación metodológica	Grado de aplicación diferenciada entre PMBOK y Scrum
VARIABLE DEPENDIENTE(VD): Mejora de la Calidad de Muestreo de Concentro de Cobre	Nivel en que el proceso de muestreo permite obtener muestras representativas, precisas y confiables del concentrado de cobre, optimizando así la toma de decisiones operativas y el control de calidad.	Se evalúa mediante el análisis de las leyes de cobre obtenidas, su variabilidad, el grado de representatividad de las muestras y la consistencia con las	Ley de Cobre	% de aumento o estabilidad en la ley de cobre respecto a método manual
			Calidad de la toma de muestras	% de mejora en representatividad de las muestras conforme a la norma ISO 12743

	normas técnicas (como la ISO 12743).	Frecuencia de muestreo	Nº de incrementos por sublote
--	--------------------------------------	------------------------	-------------------------------

1.8. Unidad de Análisis

La unidad de análisis es la sección de toma de muestras de la Compañía Minera, la cual desempeña un papel fundamental en el proceso de producción de cobre y en la implementación del sistema automatizado de muestreo. Como unidad central de la cadena de valor de la minería, la compañía realiza sus operaciones en un entorno complejo y dinámico, ejecutando diversas actividades relacionadas a la extracción, procesamiento y exportación del cobre

1.9. Tipo, enfoque, nivel y diseño de la investigación

La presente investigación tiene como objetivo específico aumentar la producción de cobre mediante el proceso de automatización del muestreo por lo cual es una investigación aplicada y de enfoque Cuantitativo porque resuelve problemas proponiendo innovaciones tecnológicas y de gestión, además se manejan cantidades numéricas.

El nivel de investigación será de tipo Descriptivo-Correlacional, porque se detallan todos los componentes del sistema de una manera específica y además existe una relación entre variables.

El diseño de investigación es no experimental y transversal dado que no hay manipulación de variables, se recolectan los datos al inicio y al final de la investigación.

1.10. Periodo de Análisis

El periodo de análisis para la presente investigación corresponde al segundo semestre del 2024 y primer semestre del 2025.

1.11. Fuente de la Información e instrumentos utilizados

- Son fuentes primarias la medida de la balanza instalada en la faja transportadora para medir el flujo de cobre a la descarga de los tres filtros prensa.
- Son fuentes secundarias la provenientes de Tesis, Artículos, Revistas científicas y Normas Técnicas

1.12. Técnicas de recolección y procesamiento de datos

Fuentes de Información: Tesis, Artículos, Revistas científicas y Normas Técnicas.

Instrumentos: Balanza, para medir el flujo de cobre que pasa por la faja transportadora a la descarga de los tres filtros prensa.

1.13. Procesamiento de datos

Se realizará una recopilación de los datos de producción del cobre, información sobre el proceso actual de muestreo, y especificaciones del sistema de automatización propuesto. Posteriormente, se llevará a cabo un análisis estadístico de las variables utilizando herramientas de análisis de datos disponibles, con el propósito de responder al problema de investigación, los objetivos y la hipótesis de estudio.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta el marco teórico como estructura que fundamenta la explicación científica de la problemática seleccionada.

2.1 Teoría del Muestreo

Según la Norma ISO 12743(2017), un método de muestreo adecuado debe garantizar que cada posible incremento del flujo o del estrato de concentrado tenga igual probabilidad de ser incluido en la muestra. Si este principio no se cumple, se corre el riesgo de introducir un sesgo en los resultados. Asimismo, no es posible obtener muestras representativas si se emplea un esquema de muestreo que no cumple con este criterio fundamental.

El muestreo debe llevarse a cabo preferiblemente de forma sistemática, ya sea en función de Masa o en función del tiempo, pero sólo cuando se pueda demostrar que no habría ningún error sistemático (o sesgo) que podría ser introducido debido a una variación periódica ya sea en calidad o cantidad que pueda coincidir o aproximarse a cualquier múltiplo de intervalo del muestreo propuesto. En estos casos, se recomienda realizar el muestreo aleatorio estratificado fijado en intervalos de masa o de tiempo.

Las técnicas de muestreo, así como el tratamiento de las muestras, dependen principalmente del esquema de muestreo seleccionado y de las acciones adoptadas para reducir al mínimo los errores sistemáticos. El propósito principal es disminuir la varianza total hasta un nivel aceptable, a la vez que se eliminan sesgos significativos, como por ejemplo, evitando la alteración de las muestras que se utilizan para determinar la distribución del tamaño de partícula.

En el caso de las muestras destinadas a análisis de humedad, estas deben ser procesadas lo más pronto posible, y las fracciones de prueba deben ser pesadas de inmediato. Si no es viable hacerlo de forma inmediata, las muestras deben almacenarse en envases herméticos e impermeables, procurando dejar el menor volumen de aire posible, con el fin de evitar modificaciones en el contenido de humedad. Sin embargo, la preparación de las muestras no debe retrasarse.

a) Varianza Total

Según la Norma ISO 12743(2017), “el objetivo general de un esquema de muestreo es proporcionar una o varias porciones de ensayo suficientemente representativas de un lote para determinar las características de calidad del lote. La varianza total del resultado final, denotado por S_T^2 , consiste en la varianza del muestreo (incluyendo el procesamiento de la muestra) más la varianza del análisis (análisis químico, determinación de la humedad, determinación de la distribución del tamaño de la partícula, etc.) de la siguiente manera”:

$$S_T^2 = S_S^2 + S_A^2 \quad (1)$$

Donde:

s_S^2 es la varianza de muestreo (incluyendo el procesamiento de la muestra);

S_A^2 es la varianza analítica

Según la Norma ISO 12743(2017), En la Ecuación 1, “la varianza muestreo incluye las varianzas debido a todas las etapas de muestreo (y procesamiento de muestras), excepto la selección de la porción de ensayo. La varianza debida a la selección de la porción de ensayo se incluye en la varianza analítica S_A^2 , que se determina de acuerdo con la norma ISO 12744, ya que es difícil determinar por separado la varianza analítica verdadera”.

A menudo se realizan repeticiones de análisis de las características de calidad y esto reduce la varianza total. En este caso, si se realizan “r” análisis repetidos

$$S_T^2 = S_S^2 + \frac{S_A^2}{r} \quad (2)$$

El cálculo o medición de la varianza total puede realizarse de varias maneras, dependiendo del objetivo del ejercicio. En muchos aspectos, los diferentes enfoques son complementarios.

Según la Norma ISO 12743(2017), “el primer método, desarrollado por Gy[3, 4], consiste en dividir la varianza de muestreo en sus componentes para cada etapa de muestreo”. La varianza total se obtiene mediante:

$$s_T^2 = S_{s_1}^2 + \dots + S_{s_i}^2 + \dots + S_{s_{u-1}}^2 + \frac{S_A^2}{r} \quad (3)$$

Donde

$S_{s_1}^2$ es la varianza del muestreo para la etapa 1, p.ej. la varianza del muestreo primario;

$S_{s_i}^2$ es la varianza del muestreo para la etapa i ;

$S_{s_{u-1}}^2$ es la varianza del muestreo para la etapa $u-1$, la penúltima etapa;

u es el número de etapas del muestreo, la etapa u corresponde a la selección de la porción de ensayo.

La Norma ISO 12743 (2017) denomina a este procedimiento como el “método por etapas de muestreo (ver punto b), el cual proporciona información detallada acerca de los distintos componentes de la varianza, resultando especialmente valioso para la planificación y evaluación de esquemas de muestreo. No obstante, para aprovechar plenamente sus ventajas, es

indispensable registrar datos correspondientes a cada una de las etapas del proceso de muestreo.

El segundo método, denominado método "simplificado" (ver punto c), consiste en dividir la varianza total en varianza del muestreo primario, varianza del procesamiento de la muestra y la varianza analítica de la siguiente manera:

$$s_T^2 = S_{s_1}^2 + S_P^2 + \frac{S_A^2}{r} \quad (4)$$

Donde

$S_{s_1}^2$ es la varianza del muestreo primario;

S_P^2 es la varianza debido a todas las etapas de muestreo subsiguientes, es decir, el procesamiento de la muestra, excepto la selección de la porción de ensayo;

S_A^2 es la varianza analítica, incluyendo la selección de la porción de ensayo (en la etapa u de la ecuación 3).

Según la Norma ISO 12743(2017), “la varianza del muestreo primario es idéntica a la varianza del muestreo para la etapa 1 en la ecuación 3, mientras que S_P^2 es igual a la varianza de muestreo total para las etapas de muestreo restantes, excepto para la selección de la porción de ensayo que se incluye en la varianza analítica. Las magnitudes relativas de los componentes de la varianza en la ecuación 4 indica dónde es requerido un esfuerzo adicional para reducir la varianza total. Sin embargo, no es posible separar las varianzas para cada etapa de procesamiento de las muestras. Este método es adecuado para calcular la varianza total para nuevos esquemas de muestreo basados en los mismos procedimientos de procesamiento de muestras, donde el número de incrementos primarios, procesamiento de muestras y análisis varía.”

“Por último, la varianza total s_T^2 puede ser estimada experimentalmente recolectando muestras duplicadas intercaladas (véase punto d). Esto se denomina método de "muestras intercaladas" y brinda información valiosa sobre la varianza total realmente lograda para un determinado esquema de muestreo sin esfuerzo adicional, siempre que haya instalaciones disponibles para recoger muestras duplicadas (Merks [5]). No proporciona información sobre los componentes de la varianza, pero la varianza total puede compararse con la varianza analítica para determinar si el esquema de muestreo utilizado fue optimizado o no. Por lo tanto, es de uso limitado para el diseño de esquemas de muestreo, pero puede utilizarse para controlar si un esquema de muestreo está en control”.

b) Método de muestreo para calcular el muestreo y la varianza total

Según la Norma ISO 12743(2017), la varianza muestral para la etapa i se obtiene mediante

$$s_{s_i}^2 = \frac{s_{b_i}^2}{n_i} \quad (5)$$

Donde

$s_{b_i}^2$ es la varianza entre incrementos para la etapa i .

n_i es el número de incrementos para la etapa i .

La varianza entre los incrementos para la etapa i , $s_{b_i}^2$ puede calcularse usando la siguiente ecuación:

$$s_{b_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n_i - 1} - S_{PA}^2 \quad (6)$$

Donde

x_j es el resultado de la prueba para el incremento j;

$\bar{X}$ es el resultado medio de la prueba para todos los incrementos;

S_{PA}^2 es la varianza del procesamiento y análisis posterior de la muestra.

Según la Norma ISO 12743(2017), “la varianza del procesamiento y análisis de la muestra posterior de cada incremento, S_{PA}^2 , se ha considerado en la ecuación 6 para obtener un cálculo sin sesgos de $S_{b_i}^2$.”

Recordando que la varianza para la selección de la porción de ensayo se incluye en la varianza analítica S_A^2 , la varianza muestral total viene dada por:

$$S_S^2 = \sum_{i=1}^{u-1} \frac{s_{b_i}^2}{n_i} \quad (7)$$

Combinando las Ecuaciones 2 y 7, tenemos la varianza total s_T^2 :

$$S_S^2 = \sum_{i=1}^{u-1} \frac{s_{b_i}^2}{n_i} + \frac{S_A^2}{r} \quad (8)$$

Para un esquema muestral de tres etapas (incluyendo la selección de la porción de ensayo), la ecuación 8 se reduce a:

$$S_T^2 = \frac{s_{b_1}^2}{n_1} + \frac{s_{b_2}^2}{n_2} + \frac{S_A^2}{r} \quad (9)$$

c) Método de muestreo para calcular el muestreo y la varianza total

Según la Norma ISO 12743(2017), “si bien no es posible dividir, es decir, separar las varianzas de las etapas individuales de procesamiento de muestras, el método simplificado es adecuado para calcular la varianza total para nuevos esquemas de muestreo con base en los mismos procedimientos de procesamiento de muestras, donde los números de incrementos primarios, los procesamientos de muestras y los análisis son variados.”

Usando la ecuación 5, la varianza muestral primaria $s_{s_i}^2$ se obtiene mediante:

$$s_{s_1}^2 = \frac{s_{b_1}^2}{n_1} \quad (10)$$

Donde

n_1 es el número de incrementos primarios

$s_{b_1}^2$ es la varianza entre los incrementos primarios determinados usando la ecuación 4

La varianza muestral primaria puede reducirse aumentando el número de Incrementos primarios n_1

Según la Norma ISO 12743(2017), “la varianza de procesamiento de muestra S_P^2 y la varianza analítica S_A^2 se determinan experimentalmente mediante el procesamiento de muestras duplicadas y mediante la determinación de las características de la calidad de acuerdo con la norma ISO 12744. La varianza analítica S_A^2 también puede obtenerse realizando análisis duplicados en muestras de ensayo.”

“A menudo se realizan múltiples procesamiento y análisis de muestras para reducir la varianza total. En este caso, la combinación de las ecuaciones 4 y 10 da lo siguiente.”

“Donde una muestra única se constituye para el lote y se realizan los análisis repetidos r en la muestra de ensayo:

$$s_T^2 = S_{S_1}^2 + S_P^2 + \frac{S_A^2}{r} \quad (11)$$

“Donde el lote se divide en sublotos k , se constituye una submuestra para cada sublote y se realizan análisis repetidos r en cada muestra de ensayo resultante”:

$$s_T^2 = \frac{s_{b_1}^2}{n_1} + \frac{s_P^2}{k} + \frac{S_A^2}{rk} \quad (12)$$

“Donde se realiza el procesamiento y análisis de la muestra en cada incremento tomado del lote y se realizan los análisis repetidos r ”:

$$S_T^2 = \frac{s_{b_1}^2 + s_P^2 + \frac{S_A^2}{r}}{n_1} \quad (13)$$

d) Método de muestreo intercalado de varianza total

Según la Norma ISO 12743(2017), “la varianza total S_T^2 obtenida para una operación de muestreo dada, se puede calcular experimentalmente recolectando muestras duplicadas intercaladas como se muestra en la Figura 1. Si el número de incrementos primarios para el muestreo de rutina es n_1 , entonces $2n_1$ son los incrementos primarios que se toman de cada lote y los incrementos impares y pares se combinan por separado para dar las muestras A y B para el lote. A

continuación, las muestras A y B se envían por separado al procesamiento y análisis de la muestra. Este procedimiento se repite hasta que se haya completado el muestreo. La varianza total para un solo lote es dada por:"

$$S_T^2 = \frac{\pi}{4} \left[\frac{\sum_{i=1}^N |x_{A_i} - x_{B_i}|}{N} \right]^2 \quad (14)$$

Donde

$|x_{A_i} - x_{B_i}|$ son los análisis para cada par de muestras A_i y B_i ;

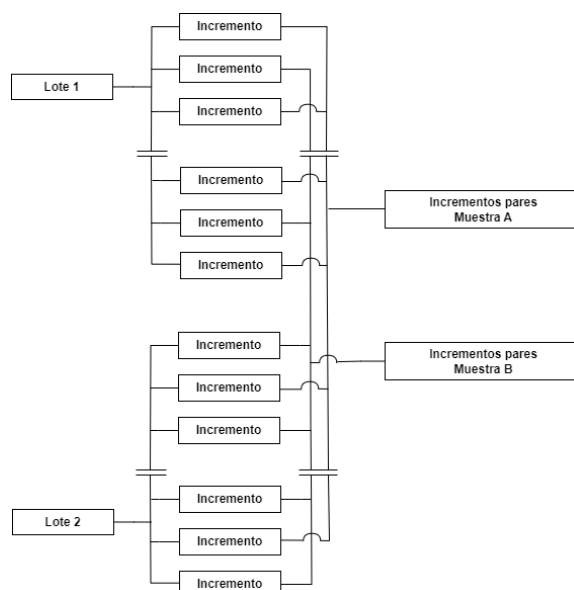
N es el número de lotes (en el rango de 10 a 20);

$\frac{\pi}{4}$ es un factor estadístico que relaciona el rango con la varianza para un par de mediciones

Según la Norma ISO 12743(2017), "alternativamente, si se está controlando la precisión como parte del muestreo de rutina, se pueden tomar n incrementos primarios de cada lote y se pueden constituir dos muestras intercaladas, cada una de las cuales comprende $\frac{n}{2}$ incrementos primarios. No obstante, se sobrestima la varianza general así obtenida y el componente de varianza muestral debe dividirse por 2 para obtener la varianza total para muestras de lote que comprenden n incrementos primarios".

Figura 3

Ejemplo de un plan de muestreo intercalado por duplicado.



Fuente: Norma Técnica Peruana NTP-ISO 12743 - 2017

e) Etapas del Muestreo

Según la Norma ISO 12743(2017),” el procedimiento para establecer un esquema de muestreo es el siguiente:

Identificar las características de calidad a medir y especificar la masa del lote o sublote y la varianza total deseada S_T^2 . La Tabla 1 muestra los valores típicos de s_T . Determinar el tamaño máximo nominal de partícula del concentrado. Especificar la abertura del cortador o las dimensiones del instrumento de muestreo manual, de acuerdo con el tamaño máximo nominal de partícula del concentrado. Determinar la varianza analítica S_A^2 . Determinar la varianza entre los incrementos primarios $s_{b_1}^2$ y la varianza de procesamiento de la muestra s_p^2 si se utiliza un método simplificado (véase punto c) o la varianza entre los incrementos $s_{b_1}^2$ para cada etapa propuesta si se utiliza el método de

muestreo por etapas (véase punto d). La Tabla 02 da valores típicos de $s_{b_1}^2$ para la primera etapa de muestreo. Si se utiliza el método simplificado, utilizar la ecuación 8, 9 o 10 para seleccionar el número de incrementos primarios, los procesamientos de muestras y análisis repetidos, para que la varianza total S_T^2 no supere el valor deseado especificado en el paso 1. Alternativamente, si se utiliza el método de muestreo por etapas, utilizar la ecuación 8 para seleccionar el número de incrementos n_1 requerido en cada etapa de muestreo y el número de análisis repetidos de modo que la varianza total S_T^2 no supere el valor seleccionado en el paso 1. Determinar el intervalo de muestreo en cada etapa, en toneladas para el muestreo sistemático en base a masa y el muestreo aleatorio estratificado dentro de los intervalos de masa fija o en minutos para el muestreo sistemático en base a tiempo y el muestreo aleatorio estratificado dentro de los intervalos de tiempo fijo. Tomar incrementos en los intervalos determinados en el paso 7 para cada etapa durante todo el período de manipulación del lote. Combinar los incrementos primarios en muestras de lote o submuestras para análisis o analizar cada incremento primario por separado. Los ejemplos de esquemas de muestreo adecuados se indican en la Figura 02 y 03 pero no son adecuados para preparar muestras de análisis químicos usados para analizar los elementos volátiles, como el mercurio.

El lote se divide a menudo en sublotes de los cuales submuestras son preparadas y analizadas por separado para reducir la varianza total, como se describe en el punto c. También se pueden preparar las submuestras para proporcionar información sobre la calidad del lote o para reducir posibles cambios en el contenido de humedad de las muestras.”

Tabla 2

“Valores típicos de las desviaciones estándar totales y analíticas necesarias para determinar el contenido de metal y de humedad”

Característica	Parámetro	Rango de Contenido/desviación estándar		
Cu	Rango	< 30%(m/m)	30-50%(m/m)	
	s_T	0,05 %	0,1 %	
	s_A	0,03 %	0,03 %	
Pb, Zn	Rango	< 30%(m/m)	30-50%(m/m)	>50 %(m/m)
	s_T	0,1 %	0,2 %	0,3 %
	s_A	0,07 %	0,07 %	0,15%
Ni	Rango	< 10%(m/m)	10-30%(m/m)	
	s_T	0,1 %	0,2 %	
	s_A	0,05 %	0,1 %	
Ag	Rango	< 500 g/t	500-1000 g/t	>1000 g/t
	s_T	10 g/t	2% de concentrado	2% de concentrado
	s_A	7 g/t	15 g/t	20 g/t
Au	Rango	< 5 g/t	5-15 g/t	>15 g/t
	s_T	0,5 g/t	0,5 g/t	2% de concentrado
	s_A	0,15 g/t	0,2 g/t	0,4 g/t
Humedad	Rango	< 20% (m/m)		
	s_T	0,3 %		
	s_A	0,07 %		

Nota: s_T puede reducirse de ser necesario mediante análisis repetidos.

Fuente: Norma Técnica Peruana NTP-ISO 12743 - 2017

Tabla 3

Ejemplos de desviaciones estándar entre incrementos primarios

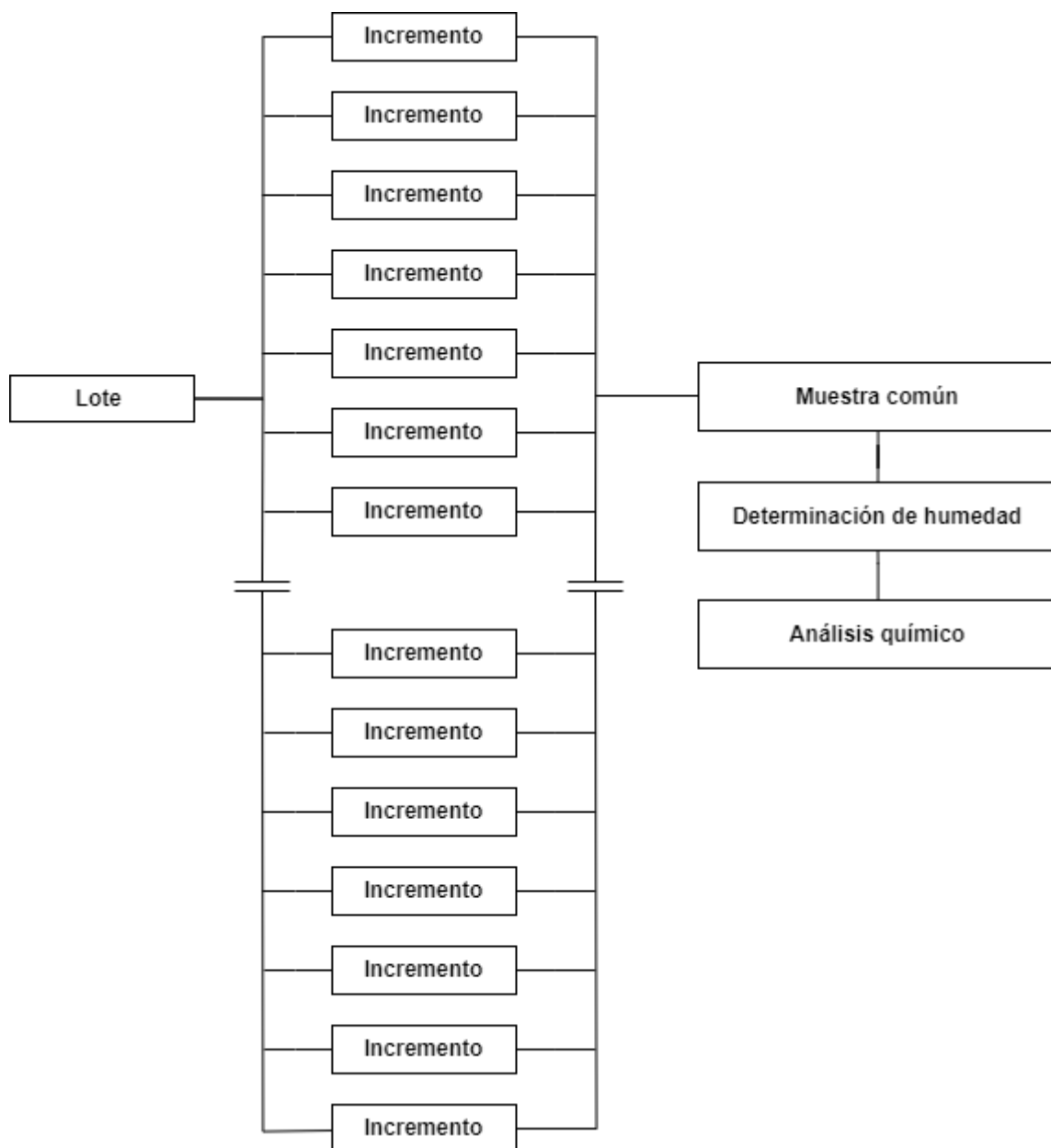
Componente	Desviación estándar entre incrementos primarios (s_{b_i})
Cu en concentrado de cobre	0,1-0,5 % Cu
Pb y Zn en concentrado de plomo y cinc	0,1-2,0 % Pb/Zn
Ni en concentrados de níquel	0,1-0,5 % Ni
Ag en concentrados de cobre, plomo y cinc	1-5 g/t Ag
Au en concentrados de cobre, plomo y cinc	0,5-2,0 g/t Au
Humedad en concentrados de cobre, plomo y cinc	0,2-0,7 %

Nota: La desviación estándar entre incrementos primarios para fracción de masa de plata es aplicable solo a Ag <500 g/t

Fuente: Norma Técnica Peruana NTP-ISO 12743 - 2017

Figura 4

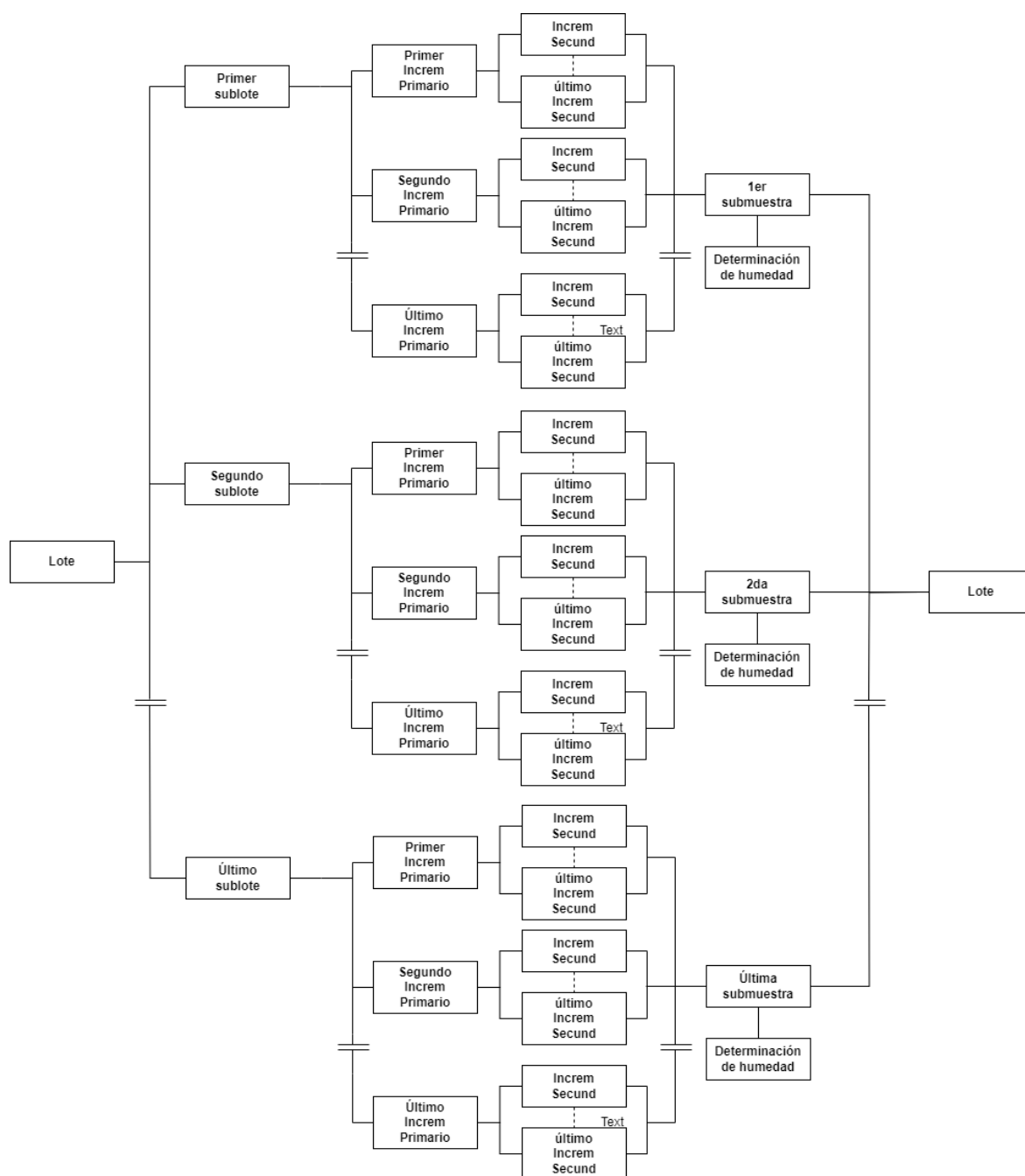
Ejemplo de un esquema de muestreo donde se constituye una muestra común del lote para determinar la humedad y su posterior análisis químico



Fuente: Norma Técnica Peruana NTP-ISO 12743

Figura 5

Ejemplo de un esquema de muestreo donde el lote se divide en sublotes para determinar la humedad y se combinan posteriormente las submuestras secas de humedad en una sola muestra de lote para el análisis químico



Fuente: Norma Técnica Peruana NTP-ISO 12743

f) Masa de los incrementos

Según la Norma ISO 12743(2017), “para evitar el sesgo, es fundamental extraer los incrementos de tal manera que todos los incrementos posibles del flujo del concentrado tengan la misma probabilidad de ser seleccionados y de formar parte de la muestra final para el análisis, independientemente del tamaño, masa o densidad de las partículas individuales en el flujo. Esto determina La masa de incremento necesaria para obtener una muestra sin sesgo.

Sin embargo, también hay una masa de incremento mínimo práctico que siempre debe excederse para minimizar el efecto de manipuleo sobre las características del incremento a medida que pasa por el sistema de muestreo. Esto es particularmente importante para el contenido de humedad, donde la pérdida (o ganancia) de humedad debe minimizarse. Se debe especificar la masa mínima necesaria para cada tipo de concentrado y para cada dispositivo de muestreo.”

g) Masa del Incremento para muestreador de corriente en caída

Según la Norma ISO 12743(2017),” para evitar el sesgo, la masa de incremento en cualquier etapa de muestreo tomado por un muestreador de tipo mecánico o manual a partir del flujo del concentrado al final de la descarga de una faja en movimiento se determina por la abertura mínima del cortador, la velocidad máxima del cortador y el caudal del flujo del concentrado de la siguiente manera:”

$$m_I = \frac{GA}{3,6V_c} \quad (15)$$

Donde

m_I la masa del incremento, en kilogramos;

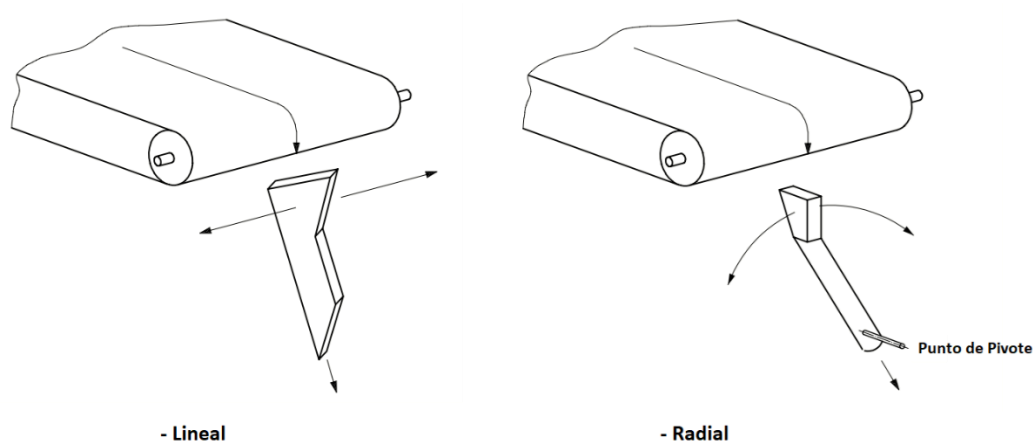
G la relación del flujo de la corriente de concentrado, en toneladas por hora;

A la apertura del muestreador, en metros;

V_c la velocidad del muestreador, en metros por segundo.

Figura 6

Ejemplo de muestreador tipo cortante



Fuente: Norma Técnica Peruana NTP-ISO 12743

h) Masa del Incremento para muestreador de corte transversal de la faja

Según la Norma ISO 12743(2017), “la masa de incremento tomada con un cortador transversal a la faja de un flujo en movimiento para evitar el sesgo se determina por la abertura mínima del cortador, la velocidad del flujo del concentrado (es decir, la velocidad de la faja) y el caudal del flujo del concentrado de la siguiente manera:”

$$m_I = \frac{GA}{3,6 V_b} \quad (16)$$

Donde:

m_I la masa del incremento, en kilogramos;

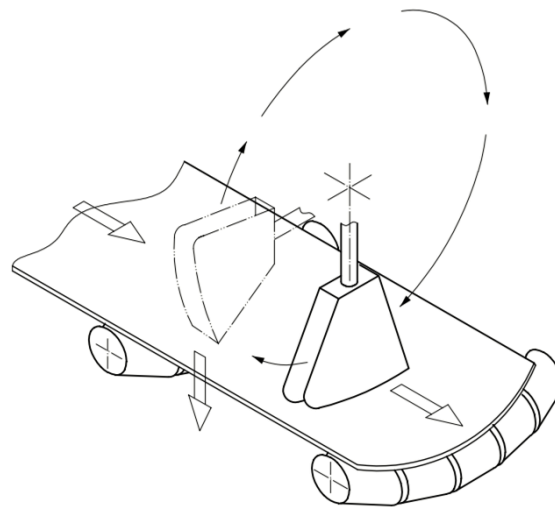
G la relación del flujo de la corriente de concentrado, en toneladas por hora;

A la apertura del muestreador, en metros;

V_b la velocidad de la corriente de concentrado, en metros por segundo.

Figura 7

Ejemplo de muestreador mecánico transversal a la faja



Fuente: Norma Técnica Peruana NTP-ISO 12743

i) Masa de Incremento para el muestreo manual a partir de lotes estacionarios

Incrementos primarios: Según la Norma ISO 12743(2017), “la masa mínima de incremento primario tomada con un instrumento de muestreo manual de un lote estacionario será de 0,25 kg. Sin embargo, si el tamaño máximo nominal excede 16 mm debido a la presencia de aglomerados, la masa aumentará de acuerdo con la siguiente ecuación basada en un instrumento de muestreo de dimensiones mínimas $3d \times 3d \times 3d$:”

$$m_{I\text{ mín}} = 27 * \rho * d^3 * 10^{-6}$$

Siendo:

$m_{l\ min}$ es la masa mínima del incremento, en kilogramos;

ρ es la densidad a granel del concentrado, en toneladas por metro cubico;

d el tamaño nominal superior de los aglomerados, en milímetros.

j) Métodos de Muestreo de Concentrado en Corriente

Según la Norma ISO 12743(2017), “el muestreo mecánico y manual de las corrientes de concentrado se puede realizar en base a la masa o al tiempo. Esto debe decidirse antes de diseñar un sistema de muestreo y antes de que comience el muestreo.

Intervalos de muestreo en base a masa: el muestreo en base a masa involucra las etapas de distribución del número requerido de incrementos primarios sobre una base de tonelaje uniforme a través del lote a muestrear y la toma de incrementos, de masa casi uniforme, de cada intervalo de tonelaje:”

$$A_m \leq \frac{m_l}{n_1}$$

Donde

A_m es el intervalo de masa entre incrementos primarios, en toneladas;

m_l es la masa del lote en toneladas;

n_1 es el número de incrementos primarios determinado de acuerdo a

(incrementos primarios)

Según la Norma ISO 12743(2017), “el intervalo de masa entre incrementos primarios debe redondearse a la tonelada más próxima por defecto, para asegurar que el número de incrementos primarios tomados sea mayor que el número mínimo de incrementos requeridos.

Intervalos de muestreo en base a tiempo: El intervalo entre incrementos primarios para el muestreo basado en tiempo debe determinarse a partir de la siguiente ecuación”:

$$A_t = \frac{3600 * m_l}{G_{m\acute{a}x} * n_1}$$

Donde:

A_t es el intervalo de tiempo entre incrementos primarios, en segundos;

m_l es la masa del lote, en toneladas;

$G_{m\acute{a}x}$ es la relación de flujo máxima, en toneladas por hora;

n_1 es el número de incrementos primarios determinado de acuerdo a (incrementos primarios)

Según la Norma ISO 12743(2017), “el intervalo de tiempo entre incrementos primarios para el muestreo en base a tiempo debe redondearse al segundo entero más cercano, para asegurar que el número de incrementos primarios tomados sea mayor que el número mínimo requerido.”

k) Envasado y Etiquetado de las Muestras

Según la Norma ISO 12743(2017), “se deben tomar todas las precauciones necesarias al momento del envasado y etiquetado de las muestras para asegurar la trazabilidad de ellas.

Las muestras destinadas al análisis se deben envasar en recipientes o contenedores con cierre hermético a fin de asegurar la inviolabilidad de la muestra, especialmente si los ensayos se llevan a cabo en lugares alejados del sistema de muestreo.

Los recipientes deben ser impermeables y permitir la escritura de la información relevante sobre su superficie. La información mínima debe ser la siguiente: Referencia a la norma NTP-ISO 12743, Nombre o razón social del productor, Número de la muestra y lote y/o sublote que la muestra presenta, Masa húmeda del lote, sublote o muestra, Lugar, fecha y hora del muestreo, Nombre y firma de la persona que extrae la muestra, Lo que indican las disposiciones legales en vigencia, Cualquier observación de interés.”

2.2 Sistemas de Muestreo

Según Tecpromin(s.f.), “un Sistema o Estación de Muestreo tiene por finalidad tomar una muestra representativa de un determinado material que se requiere analizar. El sistema debe cumplir con las normas nacionales e internacionales y requisitos operacionales. Un correcto sistema debe ser diseñado en todos sus componentes de acuerdo con las condiciones de planta. Existen 04 tipos de sistemas de muestreo:”

a) Sistema de Muestreo de Pulpa: Según Tecpromin(s.f.), “se instalan en las descargas de cañerías o canaletas con el objetivo de tomar la totalidad del flujo de una corriente. Su configuración puede ser de varias etapas de muestreo dependiendo del caudal y la variabilidad del material. Sus principales puntos de instalación en una planta son Alimentación, Concentrado Final y Relaves. La capacidad de diseño y suministro puede llegar hasta los 22.000 m³/hr.”

Figura 8

Muestreo de Pulpa



Fuente: Tecpromin.cl

b) Sistema de Muestreo de Mineral: Según Tecpromin(s.f.) “se instalan en la descarga de correas transportadoras o en el punto de transferencia de estas. Su configuración depende del tonelaje y características del material. Considera muestras para análisis químicos y granulométricos. Sus principales puntos de instalación son alimentación a planta y poder de compra entre otros. La capacidad de diseño y suministro puede llegar hasta los 10.000 TPH, y un tamaño de partícula hasta 4”.”

Figura 9

Muestreo de Mineral



Fuente: Tecpromin.cl

c) Sistema de Muestreo de Concentrado: Según Tecpromin(s.f.), “se instalan en la descarga de correas transportadoras o en el punto de transferencia de estas. Su configuración depende del tonelaje y características del material. Considera muestras para análisis químicos y humedad. Sus principales puntos de instalación es la descarga de filtros, despacho y recepción de materiales, como puertos de embarque. La capacidad de diseño y suministro puede llegar hasta los 5.000 TPH, y una humedad de hasta el 12%.”

Figura 10

Muestreo de Concentrado



Fuente: Tecpromin.cl

d) Sistema de Muestreo de Soluciones: Según Tecpromin(s.f.), “se instalan en la línea (cañería) directa de una solución. Su configuración depende del caudal y requerimientos del cliente. Sus principales puntos de instalación son en líneas de PLS y soluciones homogéneas. La capacidad de diseño y suministro puede llegar hasta Ø10” y con bajo PPM.”

Figura 11

Muestreo de Soluciones



Nota: Tecpromin.cl

2.3 ¿Qué es un Proyecto?

De acuerdo con la Guía del PMBOK (5ta edición,2013): “Un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único. La naturaleza temporal de los proyectos implica que un proyecto tiene un principio y un final definidos. El final se alcanza cuando se logran los objetivos del proyecto, cuando se termina el proyecto porque sus objetivos no se cumplirán o no pueden ser cumplidos, o cuando ya no existe la necesidad que dio origen al proyecto.

Asimismo, se puede poner fin a un proyecto si el cliente (cliente, patrocinador o líder) desea terminar el proyecto. Que sea temporal no significa necesariamente que la duración del proyecto haya de ser corta. Se refiere a los compromisos del proyecto y a su longevidad. Un proyecto puede generar: Un producto, que puede ser un componente de otro elemento, una mejora de un elemento o un elemento final en sí mismo; un servicio o la capacidad de realizar un servicio (p.ej., una función de negocio que brinda apoyo a la producción o distribución); una mejora de las líneas de productos o servicios existentes (p.ej., Un proyecto Seis Sigma cuyo objetivo es reducir defectos); o un resultado, tal como una conclusión o un documento (p.ej., un proyecto de investigación que desarrolla conocimientos que se pueden emplear para determinar si existe una tendencia o si un nuevo proceso beneficiará a la sociedad).”

2.4 ¿Qué es la dirección de proyectos?

De acuerdo con la Guía del PMBOK (6ta edición,2017): “La dirección de proyectos es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo. Se logra mediante la aplicación e integración adecuadas de los 47 procesos de

la dirección de proyectos, agrupados de manera lógica, categorizados en cinco Grupos de Procesos. Estos cinco Grupos de Procesos son: Inicio, Planificación, Ejecución, Monitoreo y Control, y Cierre. Dirigir un proyecto por lo general incluye, entre otros aspectos: Identificar requisitos; Abordar las diversas necesidades, inquietudes y expectativas de los interesados en la planificación y la ejecución del proyecto; Establecer, mantener y realizar comunicaciones activas, eficaces y de naturaleza colaborativa entre los interesados; Gestionar a los interesados para cumplir los requisitos del proyecto y generar los entregables del mismo; Equilibrar las restricciones contrapuestas del proyecto que incluyen, entre otras: El alcance, La calidad, El cronograma, El presupuesto, Los recursos y Los riesgos.

Las características específicas del proyecto y las circunstancias pueden influir sobre las restricciones en las que el equipo de dirección del proyecto necesita concentrarse.

La relación entre estos factores es tal que, si alguno de ellos cambia, es probable que al menos otro de ellos se vea afectado. Por ejemplo, si el cronograma es acortado, a menudo el presupuesto necesita ser incrementado a fin de añadir recursos adicionales para completar la misma cantidad de trabajo en menos tiempo. Si no fuera posible aumentar el presupuesto, se podría reducir el alcance o los objetivos de calidad para entregar el resultado final del proyecto en menos tiempo y por el mismo presupuesto. Los interesados en el proyecto pueden tener opiniones diferentes sobre cuáles son los factores más importantes, creando un desafío aún mayor. La modificación de los requisitos o de los objetivos del proyecto también puede generar riesgos adicionales. El equipo del proyecto necesita ser capaz de evaluar la situación, equilibrar las

demandas y mantener una comunicación proactiva con los interesados a fin de entregar un proyecto exitoso.

Dado el potencial de cambios, el desarrollo del plan para la dirección del proyecto es una actividad iterativa y su elaboración es progresiva a lo largo del ciclo de vida del proyecto. La elaboración progresiva implica mejorar y detallar el plan de manera continua, a medida que se cuenta con información más detallada y específica, y con estimaciones más precisas. La elaboración progresiva permite al equipo de dirección del proyecto definir el trabajo y gestionarlo con un mayor nivel de detalle a medida que el proyecto va avanzando.”

2.5 Metodologías de Proyectos

Según Aguirre Barrera & Aguirre Barrera (2020), “una metodología como de técnicas, métodos y procedimientos que se deben seguir durante el desarrollo de un proyecto para la producción de los productos o servicios que supone. También puede entenderse como competencias estratégicas ya que les permite a las organizaciones vincular los resultados del proyecto con los objetivos del negocio lo que lleva a la empresa a mejorar y afianzar la participación o posición en el mercado.

Existen muchos tipos de metodologías de proyectos, cada una con su propio conjunto de reglas, principios, procesos y prácticas, sin embargo, la metodología a utilizar depende de cada proyecto, del Project Manager, las características del equipo, de los recursos y el tiempo.

El adecuado uso de las metodologías puede contribuir positivamente al proyecto como, por ejemplo, facilitar las tareas de planificación y tareas de control y seguimiento, mejorar la relación costo/beneficio, optimizar el uso de

recursos, facilitar la evaluación de resultados y cumplimiento de los objetivos, mejorar la comunicación, optimizar las fases del proyecto, mejorar la calidad del producto final, entre otros.”

De acuerdo con Montes Guerra, Gimena Ramos, & Diez Silva (2013), “una metodología en entornos de proyectos es el conjunto de directrices o principios, adaptados como una relación de cosas por hacer, o un enfoque con plantillas, formularios, e incluso listas de verificación, que son utilizados durante todo el ciclo de vida. Así mismo, se establece que este tipo de metodologías son estructuras que permiten conseguir los objetivos en los proyectos, habitualmente dispuestas como un conjunto de procesos, recursos y actividades claramente definidos.”

De acuerdo con Grushka-Cockayne (2015),” entre las metodologías más usadas se encuentran las de Cascada y la Ágil, por lo que en la siguiente tabla se muestra un comparativos de los principales enfoques comunes identificados.”

Tabla 4

Comparativo de metodologías

Metodología en Cascada	Metodología Ágil
1. Analisis de la ruta crítica	1. Retrospectiva del Sprint
2. Presentación de la imagen completa.	2. Reuniones diarias.
3. Centrarse en las etapas del proyecto.	3. Sistema de trabajo desde el día uno.
4. Proceso secuencial (por ejemplo, progresando una etapa a la vez, sin supervisión).	4. Cogestión, cooperación entre clientes y proveedores.
5. Énfasis en la documentación.	5. Equipos multidisciplinarios.
6. Especificación de requisitos detallada.	6. Equipos autoorganizados.
7. Control del progreso mediante la gestión del valor.	7. Control de progreso.
8. Organización jerárquica estructurada.	8. Respuesta rápida y flexible al cambio.
9. Comunicación formal.	9. Comunicación informal.
10. Planificación de alto nivel.	

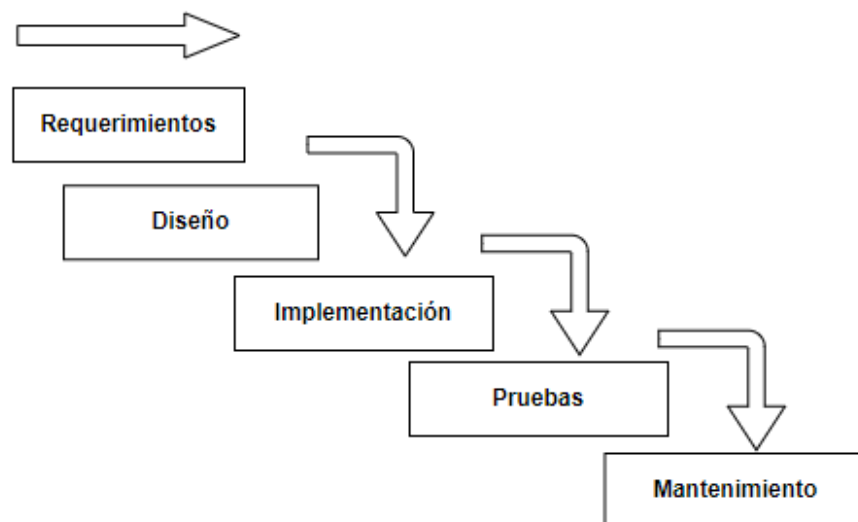
Fuente: Grushka-Cockayne, 2015

a) **Metodología en Cascada:** De acuerdo con Patino (2020) “conocida como Waterfall o Predictiva, es una metodología del marco tradicional que fue implementada por primera vez en 1970 por Winston W. Royce y, rápidamente, se empezó a adaptar a una gran variedad de industrias debido a su secuencia lógica y facilidad de implementación.”

Según Alencastro (2020), “las metodologías tradicionales son orientadas por planeación e inician el desarrollo de un proyecto con el levantamiento de requerimientos con el fin de asegurar resultados de alta calidad, conciben un solo proyecto, de grandes dimensiones y estructura definida; se sigue un proceso secuencial en una sola dirección y sin marcha atrás por lo que el proceso es rígido y no cambia.”

Figura 12

Procesos Metodología en Cascada



Fuente: Navia, 2019

Según Aguirre Barrera y Aguirre Barrera (2020) a continuación, “se explica las fases relacionadas en el gráfico anterior: Requerimientos: Definición del proyecto o fase y aprobación de inicio; Diseño: Desarrollo de los planes de gestión; Implementación: Realización de las tareas planificadas en el punto anterior con el objetivo de completar los entregables; Pruebas: Supervisión las tareas ejecutadas y comparación con la planificación. En este punto se deben aplicar medidas de corrección en caso de desviaciones; Mantenimiento: Finalización de la fase o proyecto la cual se da por tres situaciones: cuando se consigue la aprobación y conjunto de entregables, cuando no es posible ejecutar alguna o todas las tareas planificadas; o cuando el proyecto pierde viabilidad.”

A continuación, se realiza un breve recorrido por algunas de las metodologías tradicionales más utilizadas y conocidas:

Guía PMBOK: De acuerdo con la Guía del PMBOK (5ta edición, 2013), “es un estándar que describe la naturaleza de los procesos de la dirección de proyectos en términos de la integración entre los mismos, sus interacciones y los propósitos a los cuales sirven. El PMBOK como la norma más reconocida para la gerencia de proyectos en los USA ha sido aceptada dentro del conjunto de normas de la American National Standard con la designación ANSI/PMI 99-001-2004. El PMBOK posee 10 áreas de conocimientos las cuales son: Gestión de la Integración, Gestión del Alcance, Gestión de Tiempo, Gestión de Costos, Gestión de Calidad, Gestión de los Recursos Humanos, Gestión de las Comunicaciones, Gestión de los Riesgo, Gestión de las Adquisiciones, Gestión de los Interesados”

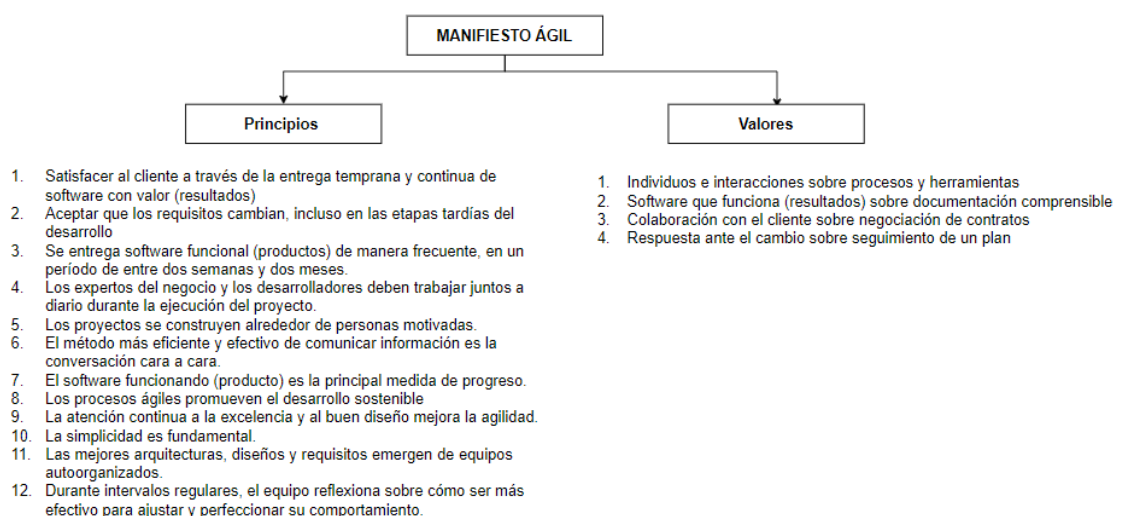
PRINCE2: Según Guillén Garzaro (s.f.), “por sus siglas en inglés que significa Projects In Controlled Environment es decir proyectos en un ambiente controlado, es una metodología estructurada y flexible para hacer un manejo efectivo de la administración y gerencia de proyectos de cualquier tamaño en cualquier área haciendo un uso efectivo de todas las variables interrelacionadas.”

b) Metodología Ágil: Según Alencastro(2020), “es el conjunto de buenos valores y buenas prácticas para el desarrollo de proyectos. Todos los métodos ágiles están fundamentados en el manifiesto ágil, que es el resultado del trabajo de un grupo de expertos, siendo estos los mismos creadores de las metodologías ágiles.

Según Hadida y Troilo (2020), ser ágil significa responder al cambio con éxito en un entorno incierto y turbulento, ser capaz de adaptarse a circunstancias impredecibles. Ser ágil no es ser veloz, sino lo contrario: saber ir más lento. Con las metodologías ágiles, se busca entregar productos o servicios de forma temprana y precisa a través de la cooperación integral.”

Figura 13

Principios y valores manifiesto ágil



Fuente: Hadida (2019)

De acuerdo con Hadida(2019), “los cuatro valores definidos en el Manifiesto Ágil alientan el cambio de mentalidad, una nueva cultura organizativa. Estos se materializan a través del cumplimiento de doce (12) principios ya detallados, cuyo propósito consiste en definir el marco de trabajo de cualquier equipo que decida adoptar una filosofía ágil.”

Según Aguirre Barrera & Aguirre Barrera (2020), “las metodologías ágiles son de las más utilizadas en el sector de tecnología y proyectos de organización empresarial ya que tiene la posibilidad de tener un producto en el entregable en cada fase permite ajustar a lo largo del proyecto los objetivos y asegurar que el producto o servicio final cumplirá con las necesidades y requerimientos del cliente.”

Dentro de las metodologías Ágiles se encuentran las siguientes ramas:

Scrum: Según Rodriguez, Barbosa, & Chaparro (2019), “es una metodología basada en control de procesos a través del empirismo, donde se debe asegurar que el conocimiento siempre parte de la experiencia y en la toma de decisiones tomando como base aquello que se conoce de forma previa.”

Según Aguirre Barrera & Aguirre Barrera (2020), “es quizás una de las ramas más utilizadas para la aplicación de la metodología ágil, es un marco de trabajo por el cual las personas pueden abordar problemas complejos y adaptarlos para entregar productos del máximo valor posible de forma productiva y creativa. Scrum emplea un enfoque iterativo e incremental que permite optimizar la predictibilidad y controlar el riesgo, se basa en la teoría de control de procesos empírica la cual afirma que el conocimiento proviene de la experiencia y la toma de decisiones basadas en el conocimiento.

La implementación de la teoría de Scrum se basa en los pilares: Transparencia, son los aspectos significativos del proceso los cuales deben ser visibles para aquellos que son responsables del resultado; Inspección, los usuarios del Scrum son los encargados de inspeccionar constantemente los artefactos del Scrum y el progreso hacia el objetivo lo que permite identificar variaciones; y Adaptación, consiste en ajustar el proceso cuando en el pilar anterior se detectan uno o más aspectos desviados de los límites aceptables y que el producto resultante será aceptable.”

Kanban: De acuerdo con Calvo (2018), “es una metodología ágil y flexible usada para la gestión de proyectos, esta metodología visualiza los flujos de trabajo de forma visual lo cual permite identificar y comprender el proceso y aprovechar las posibles oportunidades de mejor.”

XP-Extrem Manufacturing: La metodología ágil para el desarrollo de software se fundamenta en la adaptabilidad y la aceptación de los cambios en los requisitos como una parte inherente del proceso. Su enfoque principal radica en fortalecer las relaciones interpersonales, considerándolas esenciales para lograr el éxito en los proyectos de desarrollo.

Lean: Según Rodríguez, Barbosa, & Chaparro (2019), “es una disciplina que tiene como finalidad proveer la mayor cantidad de información posible y así facilitar la toma de decisiones a favor de la satisfacción del cliente. Esta disciplina toma como base dos conceptos importantes: Mejoramiento continuo, Crear grupos de trabajo que aprenden constantemente y que mejoran los procesos componen una parte importante del grado de éxito que tendría implementar este tipo de disciplina, y Respeto por los demás: Lean les permite a los integrantes

del equipo de trabajo tener las mismas condiciones en todas las fases del proyecto, lo cual ubica la voz del cliente como el centro de la estrategia del producto.”

2.6 Sistema de Control

Bolton (2001) define: “como una caja negra que tiene una entra y salida. Se considera una caja negra debido a que en realidad no es importante qué tiene dentro, si no la relación entre la salida y la entrada. Este sistema es de control si la salida se controla de modo que pueda adoptar un valor o cambio en particular de alguna manera definida. Así, para controlar la temperatura en un recinto a un valor específico, se diseña un sistema de control de calefacción central, mientras que una máquina herramienta se puede controlar para seguir una trayectoria dada”.

2.7 Controlador Lógico Programable (PLC)

Bolton (2001) define: “es un microprocesador para uso en control general que emplea memoria programable para almacenar instrucciones e implementar funciones lógicas, de secuencia, de temporización, de conteo y aritméticas. El PLC se programa de modo que el programa de control puede ingresar mediante un lenguaje sencillo, en general de la forma de programas en escalera. Para modificar el programa de control, el operador solo necesita alterar el programa de escalera.”

Figura 14

Controlador Lógico Programable



Fuente: Rockwell Automation

2.8 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition o Control con Supervisión y Adquisición de Datos)

Rodríguez (2013) define: “a cualquier software que permita el acceso a datos remotos de un proceso y permita, utilizando las herramientas de comunicación necesarias en cada caso, el control del mismo. Atendiendo a la definición vemos que no se trata de un sistema de control, sino de una utilidad software de monitorización o supervisión, que realiza la tarea de interfase entre los niveles de control (PLC) y los de gestión a un nivel superior”.

Figura 15

Sistema de Supervisión SCADA



Fuente: Vester Training

2.9 Sensores

Según Fraden (2016), “un sensor es un dispositivo que permite medir magnitudes físicas, químicas o biológicas, como temperatura, presión, luz, o concentración de gases, y transformarlas en señales eléctricas que puedan ser procesadas o interpretadas. Los sensores desempeñan un papel fundamental en sistemas de automatización, monitoreo y control, ya que permiten la interacción entre los entornos físicos y los sistemas electrónicos. Su diseño y funcionamiento dependen de principios físicos específicos, lo que les otorga precisión y adaptabilidad para diversas aplicaciones.”

Figura 16

Sensores de distintos tipos



Fuente: Coreinjm

2.10 Actuadores

Según Bolton (2015), “un actuador es un dispositivo que transforma energía en movimiento o en una acción mecánica específica. Generalmente, recibe señales eléctricas o comandos de un sistema de control y las convierte en fuerza, movimiento lineal o rotacional, permitiendo la interacción física con el entorno. Los actuadores son esenciales en sistemas de automatización, ya que realizan tareas como abrir válvulas, mover mecanismos o ajustar posiciones en respuesta a cambios detectados por sensores

Figura 17

Motor eléctrico



Fuente: hvhindustrial.com

CAPITULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación de esta tesis se centra en la automatización del sistema de muestreo mediante la integración de dos metodologías de gestión de proyectos: PMBOK (Project Management Body of Knowledge) y Scrum. El propósito es combinar las fortalezas del PMBOK en proyectos tradicionales (infraestructura: civil, eléctrica y mecánica) y la flexibilidad de Scrum en el desarrollo del sistema de automatización propiamente dicho, con el propósito de mejorar la calidad de producción de cobre.

El enfoque tradicional basado en principios predictivos es ideal para proyectos de infraestructura civil, mecánica y eléctrica, donde los requisitos y el alcance están claramente definidos desde el inicio. Estos proyectos suelen regirse por normativas rigurosas y especificaciones técnicas estables, con bajo grado de incertidumbre, lo que requiere una planificación detallada para controlar el alcance, cronograma, costos y recursos. En estas disciplinas, las fases deben seguir un proceso secuencial, asegurando que cada etapa se complete antes de avanzar a la siguiente, minimizando interferencias. Este enfoque permite una gestión precisa de riesgos, con previsión de materiales y actividades, reduciendo el impacto de cambios inesperados. Dado que los cambios pueden ser costosos o difíciles de implementar, la estabilidad y certidumbre del enfoque predictivo asegura que las fases estructurales se realicen dentro de los parámetros establecidos, garantizando la eficiencia del proyecto.

Por otro lado, la automatización de procesos, especialmente en un entorno de producción minera donde la tecnología está en constante evolución, requiere un enfoque más flexible y adaptativo. Aquí es donde el uso de Scrum o

un enfoque ágil cobra sentido. La automatización incluye la integración de sistemas de control y programación de equipos que, a menudo, se enfrentan a incertidumbre en los requisitos, los cuales pueden cambiar o adaptarse a medida que avanza el proyecto. Al adoptar Scrum, se fomenta la entrega incremental y frecuente de valor, permitiendo realizar ajustes continuos según el feedback de los usuarios y las pruebas de campo. Este enfoque iterativo es adecuado para la automatización porque permite abordar la complejidad y las posibles variaciones en las necesidades operativas. Dado que las funcionalidades de un sistema automatizado pueden desarrollarse por módulos y ser implementadas progresivamente, el equipo de automatización puede adaptar el sistema según se vayan obteniendo nuevos datos o requisitos. Además, el enfoque ágil facilita la colaboración entre los equipos de desarrollo y los usuarios finales, lo que es crucial para asegurar que el sistema final cumpla con las expectativas operativas y técnicas.

La elección de un enfoque híbrido es clave para gestionar eficazmente las diversas y complejas características de este proyecto. Combinar un enfoque predictivo para las áreas de infraestructura civil, mecánica y eléctrica con un enfoque ágil (Scrum) para la automatización responde a la naturaleza distintiva de cada componente. Mientras que las áreas físicas requieren estabilidad y un alto grado de certidumbre para evitar riesgos como sobrecostos o problemas estructurales, la automatización necesita un enfoque adaptativo que permita refinar el sistema según el feedback y las nuevas necesidades que surjan durante el desarrollo.

Este enfoque híbrido aprovecha lo mejor de ambos mundos: la planificación rigurosa y control detallado de los hitos clave en las áreas de

infraestructura, y la flexibilidad del enfoque ágil en la automatización, que facilita una entrega incremental de valor y adaptación continua. Esto permite que los equipos trabajen de manera eficiente y coordinada, minimizando riesgos de solapamiento entre las fases de construcción e implementación. Además, modularizar los entregables del proyecto facilita la colaboración de los distintos equipos especializados, garantizando que los avances en la infraestructura física no se vean comprometidos por la naturaleza más incierta y dinámica de la automatización.

El enfoque híbrido proporciona el equilibrio necesario: un control sólido en las áreas donde la estabilidad es primordial, y la capacidad de adaptación rápida en la automatización, donde la innovación y la mejora continua son cruciales. Esto asegura que el proyecto avance de manera coordinada y eficiente, optimizando el uso de recursos y maximizando el éxito tanto en la infraestructura como en los sistemas automatizados, cumpliendo con los parámetros establecidos y permitiendo responder a imprevistos sin comprometer el avance global del proyecto.

3.1 Enfoque Tradicional para la Infraestructura

3.1.1 Acta de Constitución

De acuerdo con el PMBOK (6ta Edición), el Acta de Constitución es el primer paso en la fase de inicio de cualquier proyecto. Este documento formaliza la existencia del proyecto y le otorga autoridad al director del proyecto para asignar recursos a las actividades.

Tabla 5

Acta de Constitución

Versión	Hecha por	Revisada por	Aprobada por	Fecha
1	Miguel Custodio Corbera	Unidad Minera	Unidad Minera	24/10/24
NOMBRE DEL PROYECTO		SIGLAS DEL PROYECTO		
SISTEMA AUTOMÁTICO DE MUESTRO DE CONCENTRADO DE COBRE		SAMC		
JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO: MOTIVOS, RAZONES, O ARGUMENTOS QUE JUSTIFICAN LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO				
- Automatizar el proceso de muestreo permitirá cumplir con la Norma Internacional AMIRA P754 y la Norma Técnica Peruana NTP-ISO 12743. Esto garantizará que nuestras muestras sean precisas y estén alineadas con los estándares que esperan tanto los clientes como los entes reguladores. - Al reducir la incertidumbre o la no representatividad de la toma de muestras, se asegura resultados más precisos en las mediciones de humedad y ley de metales. - Automatizar el muestreo elimina la exposición de los trabajadores a riesgos mortales, ya que no tendrán exposición directa con equipos en movimiento y materiales. - Garantizando la representatividad de la muestra, permitirá hacer una evaluación más precisa y acorde al mercado que impacten positivamente en los resultados financieros. - Optimizar el uso de recursos, tanto humanos como materiales, ya que se reduce el tiempo y los costos asociados con el muestreo manual. - Al mejorar la seguridad de los trabajadores y reducir el uso de recursos refuerza el compromiso de la empresa con la Responsabilidad Social Corporativa (RSC). - Los datos generados por la automatización del muestreo serán más consistentes y precisos, lo que permitirá una toma de decisiones basada en datos en tiempo real. - Con el proyecto se pretende dar un paso hacia el futuro, dentro del marco de la Industria 4.0 ya que al adoptar nuevas tecnologías la Unidad Minera se posiciona como una empresa innovadora.				
OBJETIVOS DEL PROYECTO: METAS HACIA LAS CUALES SE DEBE DIRIGIR EL TRABAJO DEL PROYECTO EN TÉRMINOS DE LA TRIPLE RESTRICCIÓN.				
CONCEPTO	OBJETIVOS	CRITERIO DE ÉXITO		
1. ALCANCE	Garantizar la precisión y confiabilidad en la recolección y preparación de las muestras de cobre de acuerdo con la norma ISO 12743.	Cumplimiento con las especificaciones de la norma ISO 12743 en todo el proceso de recolección y preparación de las muestras.		
		Reducción de la variabilidad o la incertidumbre en los resultados de las pruebas de calidad del cobre.		
	El desarrollo del proyecto se realizará bajo los estudios, diseños, especificaciones técnicas aprobadas previamente.	Cumplimiento de los estudios, diseños y especificaciones técnicas.		
	Desarrollo Ágil del Proyecto	La satisfacción del cliente		

2. TIEMPO	Entregar el proyecto en el tiempo según el cronograma establecido (11 meses)	Cumplimiento de los hitos del cronograma sin retrasos.
		Finalización de todas las fases del proyecto dentro del plazo acordado
		Capacidad para gestionar y resolver imprevistos sin afectar el cronograma.
		Entrega de los principales entregables en las fechas establecidas.
		Monitoreo constante del avance del proyecto, asegurando que cada tarea se complete según lo planificado
		Optimización del uso de recursos para cumplir con los plazos establecidos.
		Cierre del proyecto dentro de la fecha límite sin necesidad de extender el tiempo asignado.
3. COSTO	Asegurar que el proyecto se complete dentro del presupuesto asignado, optimizando los recursos financieros disponibles	Finalización del proyecto sin sobrepasar el presupuesto previsto
		Gestión eficiente de los recursos financieros, asegurando que cada gasto esté justificado y alineado con el plan financiero
		Monitoreo constante del uso de los fondos para evitar desviaciones importantes en los costos.
REQUISITOS DE ALTO NIVEL		
- El proyecto debe basarse estrictamente en la normativa ISO 12743, asegurando que todas las fases se alineen con estos estándares de calidad. - El proyecto debe entregarse dentro del plazo acordado, siguiendo el cronograma establecido sin retrasos significativos. - El costo total del proyecto debe mantenerse dentro del presupuesto aprobado, evitando sobrecostos y asegurando una buena administración de los recursos financieros. - Al finalizar el proyecto, se debe entregar toda la documentación técnica requerida, incluyendo manuales, planos as built y certificaciones. - Implementar medidas para minimizar los riesgos para el personal, asegurando que las operaciones se realicen de forma segura y cumpliendo con las normativas de seguridad.		
DESCRIPCIÓN DE ALTO NIVEL DEL PROYECTO, LOS LÍMITES Y LOS ENTREGABLES CLAVE		
- El proyecto se enfoca en reemplazar el proceso manual de muestreo de concentrado de cobre por un sistema automatizado, mejorando la precisión, confiabilidad y seguridad, cumpliendo con la normativa ISO 12743. - Se centrará únicamente en el diseño e instalación del sistema de muestreo automatizado, excluyendo cualquier automatización o mantenimiento de otros procesos de la planta que no estén directamente relacionados con el muestreo.		

- Se construirá la infraestructura necesaria, como plataformas, canalizaciones eléctricas y componentes mecánicos, asegurando que el sistema automatizado funcione correctamente.
- Se entregarán manuales, planos y capacitaciones al personal para que operen el sistema de manera segura y eficiente, además de garantizar el mantenimiento adecuado
- El sistema automatizado será certificado según las normativas ISO, asegurando que todos los estándares internacionales de calidad sean cumplidos.

PRINCIPALES AMENAZAS DEL PROYECTO (RIESGOS NEGATIVOS).

- Paralización de la ejecución del proyecto por conflictos sociales en la zona.
- Si los proveedores no cumplen con los plazos de entrega, podría afectar el cronograma general del proyecto.
- Existe el riesgo de que los costos aumenten debido a imprevistos o gastos no planificados, lo que podría comprometer los recursos financieros asignados
- Problemas técnicos durante la instalación de los equipos eléctricos, mecánicos o de automatización podrían retrasar el proyecto o requerir correcciones costosas.
- La implementación de nuevas tecnologías podría generar resistencia por parte de los operadores, lo que afectaría la adopción del sistema automatizado.
- El sistema de automatización podría no integrarse adecuadamente con los sistemas existentes de la planta, generando interrupciones operativas.
- Un diseño inadecuado o errores en los estudios preliminares podrían requerir modificaciones posteriores que retrasen el proyecto.
- Si los contratistas encargados de las obras civiles o mecánicas no cumplen con los plazos o estándares de calidad, se vería afectado el desarrollo del proyecto.
- Interrupciones en el suministro eléctrico durante la fase de instalación o pruebas podrían detener el avance de las actividades críticas del proyecto.
- A pesar de la automatización, siempre existe el riesgo de accidentes durante las fases de instalación y prueba, lo que podría afectar tanto a los trabajadores como al cronograma
- Posibles condiciones adversas en el clima, el entorno o la geografía del lugar podrían generar retrasos en el proyecto, afectando el acceso o la ejecución segura de las obras en ciertas áreas

CRONOGRAMA DE HITOS DEL PROYECTO

HITO O EVENTO SIGNIFICATIVO	FECHA PROGRAMADA
Licitación	Mes 1 – Mes 3
Fabricación de equipos	Mes 4 – Mes 8
Despacho de equipos	Mes 9 – Mes 10
Instalación del sistema	Mes 11 – Mes 14
Pruebas de Funcionamiento y Puesta en Marcha	Mes 14

RECURSOS FINANCIEROS PRE APROBADOS

CONCEPTO	MONTO
CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO	\$1,218,187(USD)

LISTA DE INTERESADOS (STAKEHOLDERS)		
• Superintendente del Área de Calidad • Jefe del Área de Proyectos • Superintendente de Mantenimiento Eléctrico - Electrónico • Superintendente de Mantenimiento Mecánico • Jefe del Área de Procesamiento Planta • Jefe del Área de Ventas • Jefe del Área de Logística		
DESIGNACIÓN DEL PROJECT MANAGER DEL PROYECTO.		
NOMBRE	Miguel Custodio Corbera	NIVELES DE AUTORIDAD
RESPONSABILIDADES	Liderar el grupo del proyecto para lograr los objetivos del mismo.	Autorizar la contratación de los insumos, mano de obra y equipos en la ejecución del proyecto.
	Coordinar a todas las partes interesadas del proyecto.	Asignar funciones y tareas al equipo de trabajo acorde a su perfil (Ambientales, trámites legales, entre otros).
	Optimizar los recursos asignados al proyecto.	Autorizar la contratación del recurso humano.
	Integrar todos los procesos del proyecto encaminados al éxito del mismo.	Resolver oportunamente las inconsistencias técnicas que se presenten en el desarrollo del proyecto.
	Controlar el cronograma, la ejecución y los recursos del proyecto.	
SPONSOR QUE AUTORIZA EL PROYECTO		
NOMBRE	EMPRESA	CARGO
Superintendente del Área de Calidad	Unidad Minera	Superintendente

Fuente: Propia

3.1.2 Enunciado del Alcance del Proyecto

El alcance incluye la adquisición de equipos, la ejecución de obras civiles y el montaje de sistemas mecánicos, estructurales y eléctricos. Además, se realizará una marcha blanca para evaluar y optimizar el funcionamiento del sistema antes de su operación completa. Al aplicar las prácticas del PMBOK (PMI, 2021), este enfoque asegura que cada fase se alinee con los objetivos del proyecto y minimice riesgos, cumpliendo con los tiempos y presupuesto previstos.

Tabla 6

Enunciado del Alcance del Proyecto

ENUNCIADO DEL ALCANCE DEL PROYECTO			
Fecha de elaboración del perfil del proyecto: 20-10-2024	Elaborado por: MIGUEL CUSTODIO CORBERA	Aprobado por: UNIDAD MINERA	Versión:1
INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO			
Nombre del proyecto: SISTEMA AUTOMÁTICO DE MUESTREO DE CONCENTRADO DE COBRE			
Descripción del Alcance del Producto: El alcance de este proyecto abarca la implementación y puesta en servicio del Sistema Automático de Muestreo, esto incluye la adquisición de los equipos, ejecución de las obras civiles, el montaje e instalación del sistema mecánico y estructural, así como la instalación del sistema eléctrico. Finalmente, se llevará un proceso de marcha blanca donde se evaluará el sistema para asegurar su correcto funcionamiento.			
Objetivos del Proyecto			
El objetivo principal del Proyecto del Sistema Automático de Muestreo es garantizar la precisión y confiabilidad en la recolección y preparación de las muestras de cobre de acuerdo con la norma ISO 12743. - Asegurar que los equipos seleccionados cumplan con los requisitos de la normativa ISO 12743. - Desarrollar la ingeniería para la construcción del Sistema de muestreo: planos de disposición general, diagrama de flujo, planos de diseño de la disposición de equipos, memoria de cálculo estructural, planos de diseño de estructura de soporte para el sistema, memoria de cálculo del balance de muestra, listado de Materiales y unilineal de fuerza.			
Objetivos del Producto			
Entregables principales: Planos generales y de detalles acordes a los requerimientos del proyecto Ejecución de obras civiles Instalación de equipos mecánicos del sistema Instalación del sistema eléctrico fundamental para el sistema. Automatización e instrumentación del sistema Puesta en marcha y pruebas de aceptación del sistema. Informe de cierre de proyecto		Criterios de aceptación de proyecto: - Conformidad con normativas y estándares aplicables como la norma ISO 12743, Código Nacional de Electricidad del Perú, entre otras. - Cumplimiento del alcance definido y entregables acordados - Integración exitosa entre las áreas civil, mecánica y eléctrica. - Aprobación de las pruebas FAT (Factory Acceptance Test) y SAT (Site Acceptance Test). - Aceptación formal por parte del patrocinador - Cierra administrativo del proyecto y aprobación del informe final.	
1. Entregables de la gestión del proyecto		1.1 Plan de Gestión de Proyecto Planificación del alcance Planificación de la gestión del tiempo del proyecto Planificación de la gestión de los costos del proyecto Planificación de la gestión de riesgos Planificación de la gestión de la calidad	
2. Diseño Civil		2.1 Diagrama de la loza de concreto 2.2 Planos de acuerdo al diseño del proyecto.	
3. Diseño Mecánico		3.1 Planos de diseño de las estructuras para el sistema de muestreo 3.2 Planos del montaje del equipamiento mecánico y neumático	
4. Diseño Eléctrico		4.1 Planos de distribución eléctrica 4.2 Planos de fuerza y control del sistema	

	4.3 Cálculo de la demanda de potencia. 4.3 Canalizaciones
5. Automatización e Instrumentación	5.1 Instalación y configuración de redes industriales 5.2 Programación del controlador principal. 5.3 Programación del HMI 5.4 Instalación y configuración de equipos de instrumentación 5.5 Marcha blanca
Exclusiones:	
Modificación de la Faja Transportadora Principal	
Anexos:	
Anexo 1: ACTA DE CONSTITUCIÓN	
Anexo 2: EDT	

3.1.3 Matriz de Trazabilidad de Requisitos

La matriz de trazabilidad de requisitos es clave para mantener el control de cada especificación en el proyecto del Sistema Automático de Muestreo. Esta herramienta, como sugiere el PMBOK (PMI, 2021), conecta los requisitos con los entregables y asegura que nada importante quede fuera. En este proyecto, la matriz ayuda a verificar que cada componente —ya sea en las obras civiles, el montaje mecánico o el sistema eléctrico— cumpla con los objetivos y estándares establecidos. Esto facilita el seguimiento y permite abordar cualquier desvío de manera temprana, asegurando que el proyecto avance de manera organizada y cumpla con las expectativas de calidad.

Tabla 7

Matriz de Trazabilidad de Requisitos

CONTROL DE VERSIONES					
Versión	Hecha por	Revisada por	Aprobada por	Fecha	Motivo
1.0.0	MCC	Unidad Minera	Unidad Minera	24/10/24	Primera versión
Nombre del Proyecto			Siglas del Proyecto		
Sistema Automático de Muestreo de Concentrado de Cobre			SAMC		
Estado actual			Grado de complejidad		
Estado	Abreviatura		Complejidad	Abreviatura	
Activo	AC		Alto	A	
Cancelado	CA		Medio	M	
Retrasado	RE		Bajo	B	
Cumplido	CU		-	-	

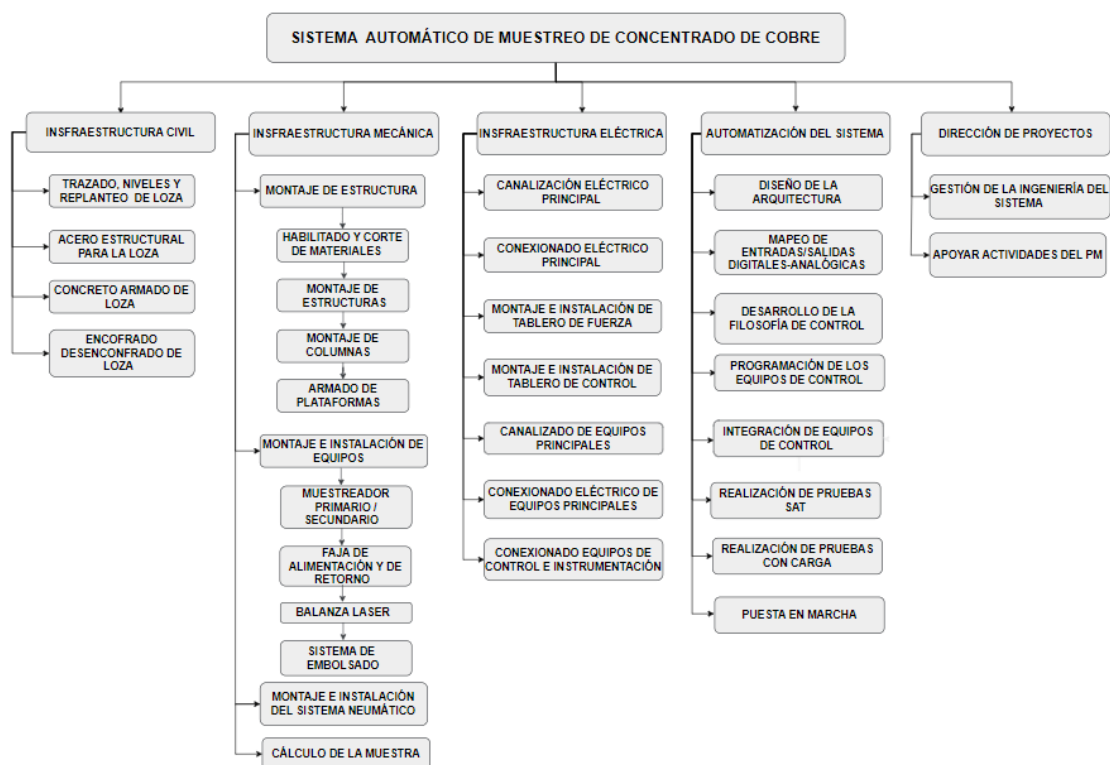
Atributos de requisitos							Trazabilidad hacia:			
Código	Descripción	Sustento de su inclusión	Prioridad	Estado actual	Grado de complejidad	Criterio de aceptación	Objetivos del negocio	Objetivos del Proyecto	Alcance del Proyecto / Entregable del EDT	Requerimiento de alto nivel
REQ-CIV01	Construcción de losa de concreto para la instalación del sistema	Requisito del diseño del sistema	Alta	AC	M	Certificación de estabilidad estructural y pruebas de carga	Garantizar la precisión y confiabilidad en la preparación de las muestras	Cumplir con el alcance del proyecto	Obras civiles completas	Cumplir con lo requerido por el cliente
REQ-MEC01	Montaje de estructuras metálicas de protección y de soporte para equipos de muestreo	Requisitos estructurales y operativos	Alta	AC	M	Aprobación de alineación y estabilidad mecánica	Garantizar la precisión y confiabilidad en la preparación de las muestras	Garantizar la estabilidad operativa del sistema de muestreo	Instalación de estructuras completada	Cumplir con lo requerido por el cliente
REQ-MEC02	Instalación de equipos de muestreo para procesamiento del material	Requisito funcional del sistema de muestreo	Alta	AC	A	Pruebas funcionales de operación y balance de materiales	Garantizar la precisión y confiabilidad en la preparación de las muestras	Mejorar la eficiencia del proceso de muestreo	Equipos de muestreo instalados	Cumplir con lo requerido por el cliente
REQ-ELE01	Canalizado y conexión de alimentación principal para el sistema	Garantizar el suministro eléctrico para el sistema	Muy Alta	AC	A	Certificación de la conexión eléctrica principal y pruebas de carga	Garantizar la precisión y confiabilidad en la preparación de las muestras	Proveer energía estable y segura para el sistema de muestreo	Instalación de alimentación principal completada	Cumplir con lo requerido por el cliente
REQ-ELE02	Instalación de tableros eléctricos de distribución de baja tensión	Necesidad de suministro eléctrico seguro y continuo	Alta	AC	M	Certificados de pruebas de continuidad y resistencia	Garantizar la precisión y confiabilidad en la preparación de las muestras	Cumplir con la normativa eléctrica	Instalación eléctrica completada	Cumplir con lo requerido por el cliente
REQ-ELE03	Canalizado y conexión de alimentación	Conexión y monitoreo de equipos	Alta	AC	A	Pruebas de funcionamiento	Garantizar la precisión y confiabilidad en la preparación de las muestras	Garantizar la integración del sistema	Sistema eléctrico completo	Cumplir con lo requerido por el cliente
	eléctrica de los equipos principales del sistema					o de los equipos	preparación de las muestras			
REQ-AUT01	Instalación y conexión de equipos de instrumentación	Requisitos de medición y control del proceso	Muy Alta	AC	A	Pruebas de calibración y validación de los instrumentos	Garantizar la precisión y confiabilidad en la preparación de las muestras	Asegurar mediciones precisas en el sistema de muestreo	Equipos de instrumentación conectados e integrados	Cumplir con lo requerido por el cliente
REQ-AUT02	Programación del Controlador lógico programable y HMI	Automatización del proceso de muestreo	Muy Alta	AC	A	Aprobación de las pruebas FAT y SAT	Garantizar la precisión y confiabilidad en la preparación de las muestras	Optimizar el control y la automatización	Sistema automatizado completado	Cumplir con lo requerido por el cliente
REQ-AUT03	Integración de redes de comunicación	Necesidad de conectividad entre equipos de control	Muy Alta	AC	A	Pruebas de conectividad y verificación de transmisión de datos en tiempo real	Garantizar la precisión y confiabilidad en la preparación de las muestras	Garantizar la integración de todos los sistemas automatizados	Redes de comunicación integradas y funcionales	Cumplir con lo requerido por el cliente

3.1.4 EDT

Es una herramienta clave en el proyecto de implementación del Sistema Automático de Muestreo, pues permite organizar y visualizar todas las actividades necesarias para completar el proyecto en cinco grandes áreas: infraestructura civil, mecánica, eléctrica, automatización del sistema de muestreo y la dirección del proyecto. Según el PMBOK (Project Management Institute, 2021), la EDT divide el trabajo en componentes más manejables, lo cual facilita la planificación, asignación de recursos y seguimiento de cada fase.

Figura 18

Estructura de Desglose del Trabajo



3.1.5 Cronograma

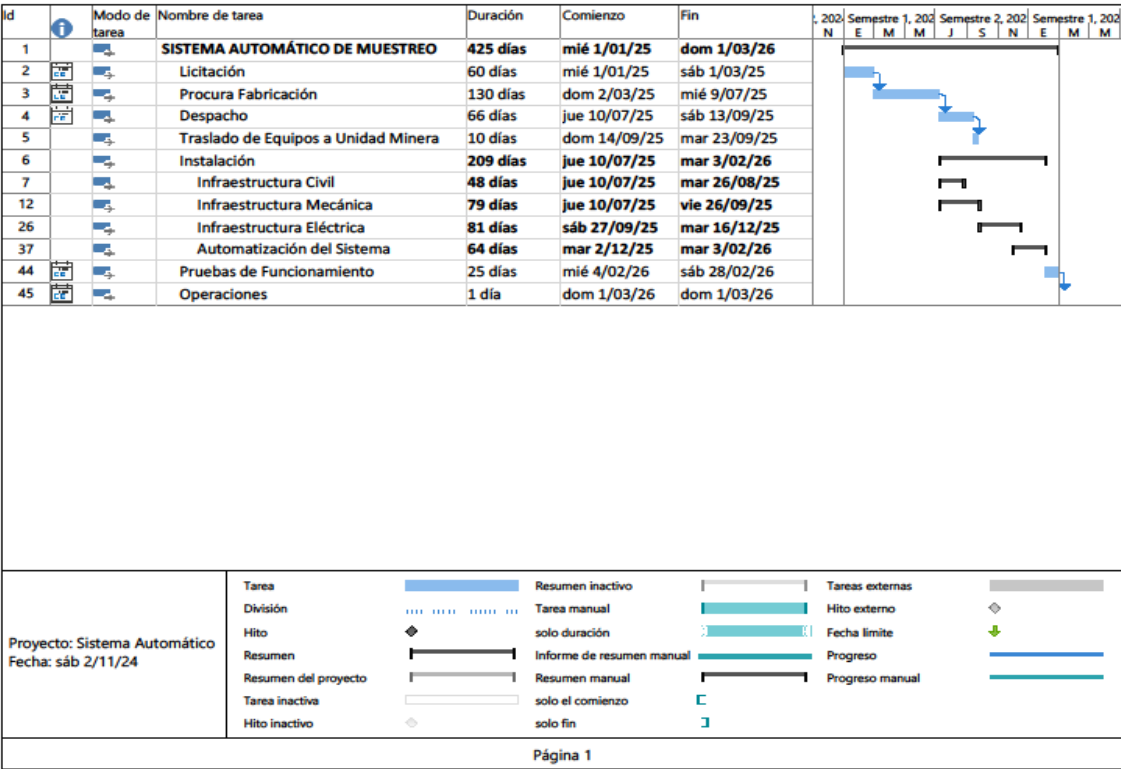
El cronograma del proyecto es una herramienta fundamental para gestionar los tiempos y asegurar que cada fase se complete en el plazo previsto. Según el PMBOK (Project Management Institute, 2021), un cronograma detallado y bien organizado permite controlar las actividades, coordinar recursos y minimizar riesgos a lo largo del proyecto. En este caso, el proyecto de implementación del Sistema Automático de Muestreo tendrá una duración aproximada de 425 días (o 14 meses), con fecha de inicio prevista para el 1 de enero de 2025.

Dado el alcance y el costo del proyecto, se ha asignado un período de licitación de 60 días para seleccionar a los proveedores y contratistas más adecuados. Asimismo, considerando que los equipos de muestreo serán fabricados en el extranjero, se ha planificado un tiempo de procura y fabricación de 130 días antes de su traslado a la unidad minera. Posteriormente, se procederá con la construcción e instalación del sistema, asegurando que cada actividad se ejecute conforme al plan y dentro de los tiempos estipulados.

A continuación, se muestra el resumen del cronograma, en los anexos se aprecia con mayor de detalle cada una de las actividades que se realizarán.

Figura 19

Cronograma del Proyecto



3.1.6 Presupuesto

El presupuesto es clave para mantener el proyecto dentro de los costos previstos y asegurar la asignación adecuada de recursos en cada etapa. Para el

proyecto de implementación del Sistema Automático de Muestreo, se estima un CAPEX de \$1,218,187.00 y un OPEX de \$9,367.00, ambos sin incluir IGV. Estos valores cubren la adquisición de equipos, obras civiles, instalación de sistemas, asistencia técnica y los gastos administrativos. La planificación del presupuesto permite distribuir estos costos estratégicamente a lo largo del proyecto, garantizando un buen manejo del flujo de caja y una respuesta ágil ante imprevistos, siguiendo las mejores prácticas recomendadas por el PMBOK.

Tabla 8

Presupuesto CAPEX

ITEM	PRECIO (USD)
Equipamiento	301,562.00
Embolsadora Automática	97,194.00
Estructura Industrial	194,502.00
Asistencia Técnica	35,128.00
Impuesto Municipal y Seguro - Nacionalización	18,852.00
Gastos de almacén y traslados (Callao)	40,000.00
Obras Civiles, Montaje e Instalación	530,949.00
TOTAL	1,218,187.00

Tabla 9

Presupuesto OPEX

ITEM	PRECIO (USD)
Supervisión Mantenimiento Mecánico	7,354.00
Supervisión Mantenimiento Eléctrico	2,013.00
TOTAL	9,367.00

3.1.7 Gestión de la Calidad

La gestión de la calidad es una pieza fundamental en el proyecto de implementación del Sistema Automático de Muestreo, ya que busca asegurar que cada fase cumpla con los más altos estándares de seguridad, eficiencia y confiabilidad. De acuerdo con el PMBOK (Project Management Institute, 2021), la gestión de la calidad implica no solo el cumplimiento de los requisitos del proyecto, sino la mejora continua de los procesos para maximizar el valor entregado. Este enfoque abarca la planificación de la calidad, la gestión de los procesos y el control de los entregables para garantizar que se cumplan las expectativas del proyecto.

En este proyecto, la calidad será monitoreada y gestionada siguiendo normativas específicas en cada área. Para la parte de muestreo, se aplicará la ISO 12743, que garantiza que la recolección y preparación de muestras cumplan con criterios de representatividad y precisión internacionalmente reconocidos. Esta norma es clave para que los resultados reflejen con exactitud las propiedades del material procesado y permitan una evaluación fiable de la calidad del concentrado de cobre.

En el ámbito eléctrico, el proyecto se regirá por el Código Nacional de Electricidad Peruano para garantizar instalaciones seguras y conformes a la normativa nacional, y se complementará con estándares internacionales como la IEC 60364 para asegurar una correcta distribución y protección de la energía. Esto se alinea con las prácticas recomendadas por el PMBOK, que sugiere que los proyectos deben cumplir con todas las regulaciones y normativas aplicables para evitar riesgos y garantizar la integridad del trabajo.

Para los componentes mecánicos, se utilizarán estándares como la ISO 14120 y la ISO 12100, que abordan el diseño seguro de equipos y maquinaria. Estas normativas ayudan a reducir los riesgos operativos y aseguran que cada componente mecánico se integre de forma segura y efectiva. En cuanto a la infraestructura civil, la gestión de la calidad seguirá los principios de la ISO 9001 y la normativa del Reglamento Nacional de Edificaciones (Norma E-060 de Estructuras de Concreto) asegurando que las estructuras sean duraderas y cumplan con los requisitos de calidad.

3.1.8 Gestión de Riesgos

La gestión de riesgo es una parte esencial de la planificación y ejecución del proyecto de implementación del Sistema Automático de Muestreo, ya que ayuda a identificar, evaluar y mitigar los posibles problemas que podrían afectar el éxito del proyecto. Según el PMBOK (Project Management Institute, 2021), la gestión de riesgos implica procesos como la identificación de riesgos, el análisis cualitativo, la planificación de respuestas y el monitoreo continuo para minimizar el impacto de los riesgos en los objetivos del proyecto.

En este proyecto, se ha desarrollado una matriz de riesgos que detalla los peligros más relevantes y sus respectivas estrategias de mitigación. Entre los principales riesgos se encuentran la disponibilidad de infraestructura en la sala de control, fallas en el sistema a implementar, condiciones climáticas adversas como tormentas eléctricas, y riesgos asociados a trabajos en altura y traslados de personal, etc. Cada riesgo ha sido evaluado en términos de su probabilidad y su impacto, permitiendo clasificarlos en niveles de riesgo (medio, alto y muy alto) y definir las acciones de mitigación correspondientes.

La tabla de riesgos muestra que, tras implementar las medidas de mitigación, el riesgo residual de la mayoría de los peligros se reduce a un nivel bajo o medio, garantizando así que el proyecto avance de manera segura y controlada.

Tabla 10

Matriz de Riesgos del Proyecto

Matriz de Riesgos del Proyecto							
Ítem	PELIGRO	RIESGO		Matriz	Mitigación	Riesgo Residual	Matriz Residual
		Consecuencia	Probabilidad				
1	Disponibilidad de infraestructura en la Sala de Control de Procesos de la Unidad Minera	Contar con la disponibilidad de servidores para la instalación de los aplicativos (4)	1 vez/año (E)	Medio	* Reunión de coordinación con el área de proyectos y operaciones para definir los tiempos de parada de la faja y del área de despacho. * Reuniones semanales con el área de proyectos y operaciones para el seguimiento de del plan de paradas en de la faja y el área de despacho.	El impacto sería menor (28)	Bajo
2	Fallas en el Sistema a Implementar	No contar con soporte en sitio (4)	1 vez/año (E)	Medio	* Asignación de un periodo de marcha blanca para evidenciar el correcto funcionamiento del sistema.	El impacto sería menor (28)	Bajo
3	Tormenta eléctrica	Producto de la exposición para realizar los trabajos en campo, ante una tormenta podría generar una descarga eléctrica, la cual puede producir quemaduras, alteraciones hematológicas y/o muerte. (4)	1 vez/año (E)	Alto	* Paralización de labores ante presencia de tormentas. * Uso de EPP Básico * Contar con la documentación de seguridad aprobada	El impacto sería menor (28)	Bajo
4	Trabajos en altura	Producto de los trabajos en altura, se pueden producir caídas a desnivel del personal cuyas consecuencias serían golpes, fracturas y/o la muerte (4)	1 vez/año (E)	Alto	* Capacitación en el estándar de Trabajos en Altura * Certificación en de Trabajos en Altura Nivel 2. * Demarcación del área de trabajo * Uso de arnés con línea de vida de doble gancho con amortiguador de impacto + Línea de posicionamiento + freno de cable para línea y vertical de anclaje. * Uso de escaleras embonables certificadas * Uso de EPP Básico * Contar con la documentación de seguridad aprobada	El impacto sería menor (28)	Bajo
5	Traslado de Personal	Producto del traslado de personal hacia la obra, se pueden producir accidente que pueden provocar fracturas, cortes, contusiones y/o la muerte (4)	1 vez/año (E)	Alto	* Licencia de conducir A2B * Certificación para Conducción en Mina * Capacitación en protocolo de conducción	El impacto sería menor (28)	Bajo
6	Instalaciones Eléctricas / Electrónicas	Producto de los trabajos de instalación de equipamiento, se pueden producir cortes, fisuras, fracturas, quemaduras por electrocución y/o muerte por electrocución (4)	1 vez/año (E)	Alto	* Capacitación para realizar trabajos en Mina * Contar con la documentación de seguridad aprobada * Uso de EPP Básico * Contar con la documentación de seguridad aprobada	El impacto sería menor (28)	Bajo
7	Tiempo de entrega de equipamientos	Tiempo de importación de los equipos presenten demoras de internacionalización y/o entrega para su instalación (4)	1 vez/año (E)	May Alto	* Ampliar el tiempo Adquisición de Equipos y Materiales	El impacto sería menor (28)	Medio
8	Conflictos sociales mineros	Conflictos con las comunidades cercanas a los puntos de implementación o retricciones de acceso producto de bloqueos a la Unidad Minera (4)	1 vez/año (E)	May Alto	* Enviar comunicación por correo electrónico a la Gerencia de Relaciones Comunitarias, el mismo que deberá contener el plan y cronograma mensual de las actividades a realizar, con 7 a 30 días de anticipación dependiendo del trabajo a realizar. * Se sugiere que el área interna remita su plan anual de actividades a fin de incluirlo en el Plan Operativo Anual de Relaciones Comunitarias.	El impacto sería menor (28)	Medio
9	Bloqueos	Bloqueo de vías por parte de las comunidades cercanas a la Unidad Minera (4)	1 vez/año (E)	May Alto	* Enviar comunicación por correo electrónico a la Gerencia de Relaciones Comunitarias, el mismo que deberá contener el plan y cronograma mensual de las actividades a realizar, con 7 a 30 días de anticipación dependiendo del trabajo a realizar. * Se sugiere que el área interna remita su plan anual de actividades a fin de incluirlo en el Plan Operativo Anual de Relaciones Comunitarias.	El impacto sería menor (28)	Medio

Tabla 11

Probabilidad Categórica

Probabilidad	Negocio	Proyecto	Probabilidad Categórica
	Según la experiencia de la Unidad Minera, la industria, las condiciones esperadas y el evento de riesgo.	Basado en la experiencia de la Unidad Minera, la industria y las condiciones esperadas, con estudios o proyectos similares, el evento de riesgo.	
Casi Cierto	Podría incurrir más de una vez al año	Se podría esperar que ocurra más de una vez durante el estudio o la entrega del proyecto	F
Probable	Podría incurrir en un período de 1-2 años	Podría incurrir fácil y generalmente se ha producido en estudios o proyectos similares	E
Posible	Podría incurrirse en u período de 5 años	Se ha incurrido en una minoría de estudios o proyectos similares	D
Poco Probables	Podría incurrirse en u período de 5 a 20 años	Se sabe que sucede, pero rara vez	C
Raro	Podría incurrirse en u período de 20 a 50 años	No se ha producido en estudios o proyectos similares, pero podría	B
Muy raro	Podría incurrirse en u período > 50 años	Concebible, pero sólo en circunstancias extremas	A

Tabla 12***Clasificación de Probabilidad y Consecuencia***

Clasificación de Probabilidad	F	Medio	Medio	Alto	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
	E	Bajo	Medio	Alto	Alto	Muy Alto	Muy Alto
	D	Bajo	Medio	Medio	Alto	Alto	Muy Alto
	C	Bajo	Bajo	Medio	Medio	Alto	Alto
	B	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio	Alto
	A	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
		1	2	3	4	5	6
Clasificación de consecuencias							

3.2 Enfoque Ágil - Scrum

Para la automatización del sistema de muestreo, se ha elegido la metodología Scrum. A diferencia de otros enfoques más rígidos, Scrum permite trabajar de manera ágil y adaptable, ideal para enfrentar la complejidad e incertidumbre de este tipo de implementación. Como señalan Schwaber y Sutherland en The Scrum Guide (2020), Scrum es especialmente útil en proyectos donde los requisitos pueden cambiar y evolucionar, y donde se necesita una estructura que permita responder rápidamente a los desafíos y a las necesidades del cliente.

A continuación, se presentan algunos de los principios clave de Scrum que guiarán el desarrollo del proyecto:

Formación de un equipo pequeño y multidisciplinario: Para este proyecto se formará un equipo reducido de entre 6 y 9 personas, cada una con habilidades complementarias en áreas clave como la programación de controladores, la configuración de SCADA y la seguridad del sistema. Este tamaño permite una colaboración ágil y una toma de decisiones rápida, un aspecto crucial en entornos de alta complejidad. Según Mike Cohn en Succeeding with Agile (2010), equipos pequeños y autónomos son esenciales

para que Scrum funcione de manera efectiva, ya que facilitan la comunicación y la cohesión en el trabajo diario.

Comunicación face to face: Para mantener una comunicación efectiva, las reuniones serán cara a cara, lo que facilita la claridad y permite abordar cualquier problema de inmediato. La interacción diaria y directa ayuda a alinear al equipo y asegura que todos comprendan los objetivos de cada sprint. En *Scrum: The Art of Doing Twice the Work in Half the Time* (2014), Jeff Sutherland enfatiza que la comunicación frecuente y en persona reduce los malentendidos y crea un ambiente de trabajo más colaborativo

Entregas cíclicas cada dos semanas: El proyecto se dividirá en sprints de dos semanas, al final de los cuales se presentará un avance funcional del sistema. Este enfoque de entregas cortas permite verificar y ajustar el trabajo constantemente, asegurando que el desarrollo se mantenga alineado con las expectativas del cliente y los objetivos técnicos. Como menciona Cohn, la entrega de incrementos de valor en períodos cortos ayuda a mantener el enfoque en los resultados y a adaptarse rápidamente a cualquier cambio necesario (*Agile Estimating and Planning*, 2005).

Roles clave en el equipo Scrum:

Product Owner: Este rol representa al cliente y es responsable de priorizar los requisitos, garantizando que cada iteración aporte el máximo valor al proyecto. Según el *Scrum Guide* de Schwaber y Sutherland (2020), el Product Owner es quien define qué debe construir el equipo en cada sprint, lo que permite maximizar el valor entregado.

Scrum Master: El Scrum Master actúa como facilitador, ayudando al equipo a entender y aplicar los principios de Scrum y asegurándose de que se eliminen los obstáculos que puedan ralentizar el trabajo. En palabras de Cohn (Succeeding with Agile, 2010), el Scrum Master es el "guardián" del proceso Scrum, apoyando al equipo para que siga las prácticas ágiles de manera correcta.

Equipo de desarrollo multidisciplinario: El equipo incluye especialistas en áreas clave de automatización, que trabajarán juntos para construir y probar el sistema de muestreo. La diversidad de habilidades asegura que cada componente se aborde adecuadamente, integrando los conocimientos necesarios para desarrollar una solución completa y robusta. Como destacan Schwaber y Sutherland, un equipo Scrum debe ser multifuncional para responder a los desafíos técnicos de manera integral y colaborativa.

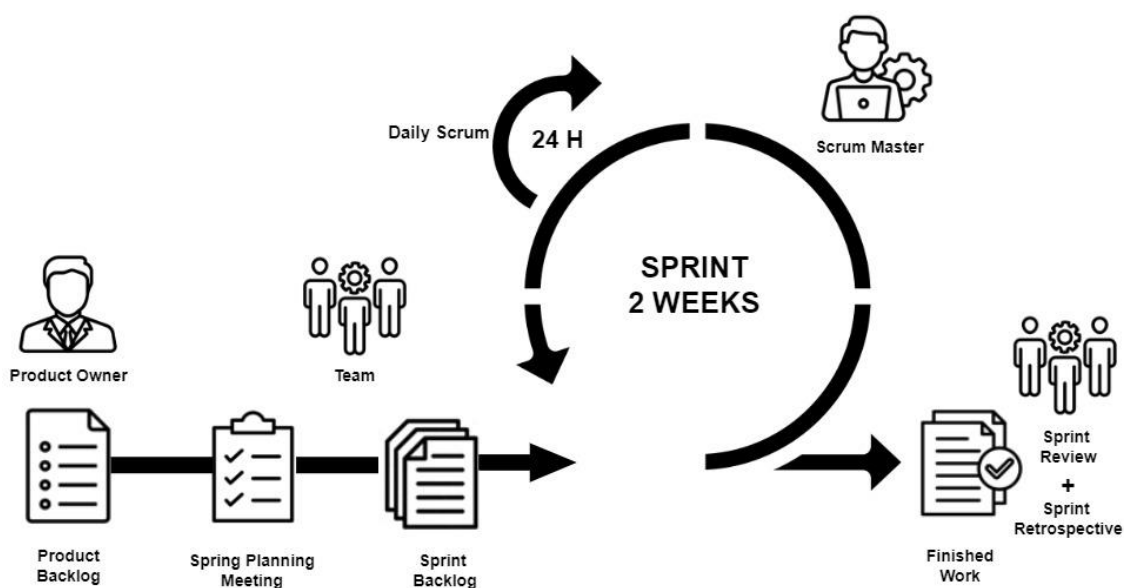
Priorización de tareas para maximizar el valor: En cada sprint, se priorizarán las funcionalidades de mayor valor para que el cliente pueda ver resultados significativos desde las primeras etapas del proyecto. Según Cohn en Agile Estimating and Planning (2005), la priorización asegura que el equipo enfoque sus esfuerzos en lo que realmente aporta valor, manteniendo la dirección y evitando distracciones.

Revisión final de cada sprint: Al término de cada sprint, el equipo realizará una revisión del avance para obtener retroalimentación y validar el trabajo con el Product Owner. Esta sesión permite ajustar y mejorar el trabajo en tiempo real, garantizando que el sistema de muestreo cumpla con los requisitos del cliente y las especificaciones técnicas. Como explica Sutherland en Scrum:

The Art of Doing Twice the Work in Half the Time, la revisión de cada iteración es clave para mantener el proyecto en el camino correcto y asegurar la satisfacción del cliente.

Figura 20

Proceso Scrum



3.2.1 Product Backlogs

Para lograr la automatización del proceso en esta tesis, se ha identificado una serie de pasos clave que nos ayudarán a avanzar de manera organizada y efectiva. Estos pasos, llamados products backlog, que serán tomados de la etapa de “Automatización del Sistema” de la EDT creada, representan las tareas esenciales para llevar el proyecto desde el diseño inicial hasta las pruebas finales en condiciones reales. Cada uno de estos elementos está diseñado para construir una base sólida, integrar los sistemas de control y asegurar que el proceso automatizado funcione de manera estable y segura. A continuación,

presento en detalle cada uno de estos elementos, que serán el núcleo de nuestro trabajo hacia una solución completa de automatización.

Diseño de la Arquitectura: Definir la arquitectura general del sistema de automatización, incluyendo todos los componentes y sus interconexiones. Este diseño servirá como el "mapa" de cómo deben implementarse los diferentes elementos de control.

Tareas:

- Crear diagramas de arquitectura del sistema, especificando hardware, software y redes de comunicación.
- Seleccionar los dispositivos de control y comunicación necesarios (PLCs, sensores, actuadores, servidores, etc.).
- Definir la infraestructura de red y la topología del sistema.
- Especificar los protocolos de comunicación y asegurar la compatibilidad entre equipos.

Mapeo de Entradas/Salidas Digitales-Analógicas: Identificar todas las entradas y salidas (I/O) necesarias para el sistema, tanto digitales como analógicas, y mapearlas a sus respectivos dispositivos de control.

Tareas:

- Listar y clasificar todas las entradas (sensores, botones de control) y salidas (motores, pilotos) necesarias.
- Establecer las características de cada señal (digital o analógica).
- Asignar cada señal a las direcciones de I/O del PLC.

- Documentar el mapeo de I/O en un esquema, que servirá como referencia para la programación y pruebas.

Desarrollo de la Filosofía de Control: Crear la lógica que guiará el funcionamiento del sistema de automatización, definiendo cómo deben responder los equipos y las secuencias de operación.

Tareas:

- Definir los estados de operación y transiciones del sistema (inicio, paro, emergencia).
- Establecer las condiciones y secuencias de activación para cada componente.
- Crear diagramas de flujo o pseudocódigo para representar la lógica de control.
- Desarrollar un plan de seguridad y alarmas para manejar fallas y situaciones de emergencia.

Programación de Equipos de Control: Programar los controladores lógicos programables (PLC), variadores de velocidad (VFD) y configurar las interfaces de visualización (HMI y SCADA) para que ejecuten la lógica de control definida.

Tareas:

- Desarrollar el programa de control para el PLC, utilizando el lenguaje de programación adecuado (ladder, bloques, etc.).

- Configuración y programación de los variadores de velocidad
- Configurar las pantallas del HMI para que muestren el estado del sistema, alarmas y opciones de control.
- Configurar el sistema SCADA para monitoreo y control a nivel superior.
- Realizar pruebas de simulación para verificar la lógica de control antes de la integración final.

Integración de los Equipos de Control: Asegurar que los diferentes componentes (PLC, HMI, SCADA) estén interconectados correctamente y puedan comunicarse entre sí para un funcionamiento integral.

Tareas:

- Configurar la comunicación entre el PLC y el HMI, y entre el PLC y el SCADA.
- Verificar la transferencia de datos y el intercambio de señales en tiempo real.
- Asegurar que los sistemas de alarma y registro de datos funcionen adecuadamente en el SCADA.
- Documentar la integración de equipos y realizar pruebas para asegurar la conectividad de todos los dispositivos.

Realización de Pruebas SAT (Site Acceptance Test): Llevar a cabo pruebas de aceptación en el sitio para verificar que el sistema cumpla con los requisitos operativos en un entorno real.

Tareas:

- Preparar una lista de verificación para cada componente del sistema.
- Ejecutar pruebas de operación y funcionalidad en el sitio.

- Verificar que el sistema cumpla con los criterios de rendimiento y seguridad.
- Documentar los resultados de las pruebas y realizar ajustes en caso de desviaciones.

Realización de Pruebas con Carga: Probar el sistema bajo condiciones de operación reales para asegurarse de que maneje eficientemente las cargas y escenarios de trabajo previstos.

Tareas:

- Pruebas con condiciones de carga máxima en el sistema
- Medir el rendimiento del sistema bajo diferentes niveles de carga.
- Verificar que el sistema mantenga la estabilidad y seguridad durante operaciones prolongadas.
- Realizar ajustes finales y documentar los resultados para el reporte de cierre del proyecto.

A continuación, se muestra el listado de los backlogs de la automatización del sistema

Tabla 13***Lista de backlogs***

Item	Backlogs
1	Crear diagramas de arquitectura del sistema, especificando hardware, software y redes de comunicación.
2	Seleccionar los dispositivos de control y comunicación necesarios (PLCs, sensores, actuadores, servidores, etc.).
3	Definir la infraestructura de red y la topología del sistema.
4	Especificar los protocolos de comunicación y asegurar la compatibilidad entre equipos
5	Listar y clasificar todas las entradas (sensores, botones de control) y salidas (motores, válvulas, luces) necesarias.
6	Establecer las características de cada señal (digital o analógica).
7	Asignar cada señal a las direcciones de I/O del PLC.
8	Documentar el mapeo de I/O en un esquema, que servirá como referencia para la programación y pruebas.
9	Definir los estados de operación y transiciones del sistema (inicio, paro, emergencia).
10	Establecer las condiciones y secuencias de activación para cada componente.
11	Crear diagramas de flujo o pseudocódigo para representar la lógica de control.
12	Desarrollar un plan de seguridad y alarmas para manejar fallas y situaciones de emergencia.
13	Desarrollar el programa de control para el PLC, utilizando el lenguaje de programación adecuado (ladder, bloques, etc.).
14	Configurar las pantallas del HMI para que muestren el estado del sistema, alarmas y opciones de control.
15	Configurar el sistema SCADA para monitoreo y control a nivel superior
16	Realizar pruebas de simulación para verificar la lógica de control antes de la integración final
17	Configurar la comunicación entre el PLC y el HMI, y entre el PLC y el SCADA.
18	Verificar la transferencia de datos y el intercambio de señales en tiempo real.
19	Asegurar que los sistemas de alarma y registro de datos funcionen adecuadamente en el SCADA.
20	Documentar la integración de equipos y realizar pruebas para asegurar la conectividad de todos los dispositivos.
21	Preparar una lista de verificación para cada componente del sistema.
22	Ejecutar pruebas de operación y funcionalidad en el sitio.
23	Verificar que el sistema cumpla con los criterios de rendimiento y seguridad.
24	Documentar los resultados de las pruebas y realizar ajustes en caso de desviaciones.
25	Pruebas con condiciones de carga máxima en el sistema
26	Medir el rendimiento del sistema bajo diferentes niveles de carga.
27	Verificar que el sistema mantenga la estabilidad y seguridad durante operaciones prolongadas.
28	Realizar ajustes finales y documentar los resultados para el reporte de cierre del proyecto.

3.2.2 Spring Planning Meeting

En la Sprint Planning Meeting, el Product Owner y el Scrum Master se reúnen con el equipo de desarrollo para identificar las actividades prioritarias a realizar en el sprint, siempre teniendo en cuenta la perspectiva del cliente. En este proceso, el Product Owner tiene la última palabra, ya que actúa como representante del cliente y asegura que las tareas seleccionadas aporten el mayor valor posible al proyecto. Tras la reunión de planificación se definieron los siguientes spring junto con sus actividades prioritarias, cada spring tendrá una duración de 02 semanas como se indicó.

Sprint 01: Diseño de la Arquitectura y Mapeo de I/O

Objetivo: Establecer la estructura básica y definir los elementos de entrada y salida del sistema

Tabla 14

Spring 01

Item	Actividades
1	Crear diagramas de arquitectura del sistema, especificando hardware, software y redes de comunicación.
2	Seleccionar los dispositivos de control y comunicación necesarios (PLCs, sensores, actuadores, servidores, etc.)
3	Definir la infraestructura de red y la topología del sistema.
4	Especificar los protocolos de comunicación y asegurar la compatibilidad entre equipos.
5	Listar y clasificar todas las entradas (sensores, botones de control) y salidas (motores, válvulas, luces) necesarias.
6	Establecer las características de cada señal (digital o analógica).

Sprint 02: Configuración y Documentación de I/O

Objetivo: Completar el mapeo de señales y documentar cada elemento para que sirva de referencia en la fase de programación.

Tabla 15

Spring 02

Item	Actividades
1	Asignar cada señal a las direcciones de I/O del PLC.
2	Documentar el mapeo de I/O en un esquema, que servirá como referencia para la programación y pruebas
3	Definir los estados de operación y transiciones del sistema (inicio, paro, emergencia).
4	Establecer las condiciones y secuencias de activación para cada componente.
5	Crear diagramas de flujo o pseudocódigo para representar la lógica de control
6	Desarrollar un plan de seguridad y alarmas para manejar fallas y situaciones de emergencia.

Sprint 03: Programación de Sistemas de Control

Objetivo: Programar los componentes de control y realizar simulaciones para validar la lógica del sistema antes de la integración final.

Tabla 16*Spring 03*

Item	Actividades
1	Desarrollar el programa de control para el PLC, utilizando el lenguaje de programación adecuado (ladder, bloques, etc.).
2	Configurar las pantallas del HMI para que muestren el estado del sistema, alarmas y opciones de control.
3	Configurar el sistema SCADA para monitoreo y control a nivel superior.
4	Realizar pruebas de simulación para verificar la lógica de control antes de la integración final.
5	Configurar la comunicación entre el PLC y el HMI, y entre el PLC y el SCADA.
6	Verificar la transferencia de datos y el intercambio de señales en tiempo real

Sprint 04: Integración y Pruebas de Sistema

Objetivo: Asegurar la integración y conectividad de todos los dispositivos, y verificar la funcionalidad en el sitio.

Tabla 17*Spring 04*

Item	Actividades
1	Asegurar que los sistemas de alarma y registro de datos funcionen adecuadamente en el SCADA.
2	Documentar la integración de equipos y realizar pruebas para asegurar la conectividad de todos los dispositivos
3	Preparar una lista de verificación para cada componente del sistema.
4	Ejecutar pruebas de operación y funcionalidad en el sitio.
5	Verificar que el sistema cumpla con los criterios de rendimiento y seguridad.
6	Documentar los resultados de las pruebas y realizar ajustes en caso de desviaciones.

Sprint 05: Pruebas de Carga y Ajustes Finales

Objetivo: Evaluar el rendimiento bajo condiciones de carga máxima y realizar ajustes finales para el cierre del proyecto.

Tabla 18*Spring 05*

Item	Actividades
1	Pruebas con condiciones de carga máxima en el sistema.
2	Medir el rendimiento del sistema bajo diferentes niveles de carga.
3	Verificar que el sistema mantenga la estabilidad y seguridad durante operaciones prolongadas
4	Realizar ajustes finales y documentar los resultados para el reporte de cierre del proyecto.

3.2.3 Dayli Scrum

Las reuniones diarias de Daily Scrum permiten al equipo de trabajo revisar los avances y ajustar las tareas de cada sprint. Estas reuniones breves y enfocadas tienen lugar todos los días y facilitan la comunicación, la identificación de obstáculos y la colaboración entre los miembros del equipo.

A continuación, se presenta una tabla detallada de los Daily Scrum Meetings para cada sprint, donde se especifican las actividades prioritarias de cada día, organizadas para cumplir con los objetivos de cada etapa de la automatización.

Tabla 19

Daily Scrum por cada sprint

Sprint	Día	Actividades
Sprint 1: Diseño de Arquitectura y Mapeo de I/O	Día 1-3	Revisar el progreso en la creación de diagramas de arquitectura. Verificar selección de dispositivos de control y comunicación. Identificar cualquier obstáculo en la definición de infraestructura de red.
	Día 4-6	Comprobar si todos los dispositivos están seleccionados y documentados. Avanzar en la definición de protocolos de comunicación. Revisar la clasificación de entradas y salidas (I/O).
	Día 7-10	Finalizar y documentar características de cada señal. Confirmar que la compatibilidad entre equipos está asegurada. Resolución de bloqueos antes de avanzar al siguiente sprint.
Sprint 2: Configuración y Documentación de I/O	Día 1-3	Revisar el avance en el mapeo de I/O en el PLC. Confirmar el progreso en la documentación del mapeo de señales.
	Día 4-6	Validar el diseño de estados de operación y transiciones del sistema. Verificar que todos los diagramas de flujo o pseudocódigo estén en desarrollo.
	Día 7-10	Confirmar que el plan de seguridad y alarmas esté definido. Discutir y resolver cualquier bloqueo en la documentación.
Sprint 3: Programación del Sistema de Control	Día 1-3	Evaluar el progreso en el desarrollo del programa de control para el PLC. Confirmar la configuración inicial de las pantallas HMI.
	Día 4-6	Revisar el avance en la configuración de SCADA para monitoreo superior. Verificar la implementación de pruebas de simulación.
	Día 7-10	Realizar ajustes en la configuración de comunicación entre el PLC y HMI/SCADA. Confirmar que las transferencias de datos en tiempo real son correctas.
Sprint 4: Integración y Pruebas de Sistema	Día 1-3	Verificar que los sistemas de alarma y registro de datos estén activos en SCADA. Comprobar el progreso en la documentación de la integración de equipos.
	Día 4-6	Confirmar que la lista de verificación para cada componente está completa. Revisar las pruebas de operación y funcionalidad en el sitio.
	Día 7-10	Evaluar el cumplimiento de los criterios de rendimiento y seguridad. Discutir y documentar cualquier ajuste necesario.
Sprint 5: Pruebas de Carga y Ajustes Finales	Día 1-3	Confirmar que las pruebas de carga máxima están en curso y se registran datos. Revisar la estabilidad del sistema durante pruebas prolongadas.
	Día 4-6	Analizar el rendimiento bajo diferentes niveles de carga y hacer ajustes si es necesario. Documentar los resultados de las pruebas finales.
	Día 7-10	Finalizar los ajustes en el sistema y preparar el reporte de cierre del proyecto. Revisar el reporte final y discutir cualquier aspecto pendiente.

3.2.4 Retrospectiva Sprint

La Retrospectiva Sprint es una reunión que se lleva a cabo al finalizar cada sprint y tiene como objetivo reflexionar sobre el trabajo realizado, identificar logros y dificultades, y proponer mejoras para los siguientes sprints. En el contexto de esta tesis, enfocada en la automatización del proceso de muestreo, la Retrospectiva Sprint permite ajustar continuamente el desarrollo, optimizando tanto la eficiencia como la calidad del sistema de automatización.

A continuación, se describen los pasos clave para realizar una Retrospectiva Sprint en este proyecto:

Tabla 20

Pasos clave para la retrospectiva sprint

Etapas	Descripción
Preparación de la Retrospectiva Sprint	Tiempo y Participantes: Al final de cada sprint, organizar una reunión con los miembros que participan en el desarrollo del sistema de automatización, incluyendo a cualquier Objetivo de la Reunión: Evaluar el progreso en la automatización del sistema de muestreo, identificar áreas de mejora, y asegurar que el siguiente sprint esté mejor alineado con los
Contextualización y Revisión de Objetivos del Sprint	Repaso de Metas del Sprint: repasar las metas establecidas al inicio del sprint, como la configuración del sistema SCADA o el mapeo de I/O. Objetivo de la Retrospectiva: Reflexionar sobre los avances y obstáculos, asegurando que el sistema cumpla con los estándares requeridos en la tesis.
Análisis de Logros y Buenas Prácticas (¿Qué salió bien?)	Aspectos Exitosos: Destacar tareas completadas sin problemas y prácticas que facilitaron el trabajo, como el mapeo de I/O. Identificación de Prácticas Efectivas: Registrar prácticas o herramientas que facilitaron el trabajo, como simulaciones de control en SCADA.
Identificación de Obstáculos y Desafíos (¿Qué se puede mejorar?)	Dificultades Técnicas: Identificar problemas específicos, como la configuración del HMI o comunicación entre PLC y SCADA. Limitaciones de Recursos o Herramientas: Si algunos dispositivos o herramientas no funcionaron como se esperaba, identificar estos problemas para anticipar soluciones.
Propuesta de Mejoras para los Próximos Sprints	Acciones para Resolver Problemas: Si hubo problemas de estabilidad o con el mapeo de I/O, considera realizar más pruebas o ajustar la topología de red. Mejoras en Documentación y Seguimiento: Si la documentación se volvió complicada, establece un formato claro o un sistema de almacenamiento compartido.
Priorización de Mejoras y Asignación de Responsabilidades	Selección de Mejoras Clave: Eligir una o dos mejoras clave, como la configuración de alarmas en SCADA. Asignación de Tareas Específicas: Asignar responsabilidades de seguimiento para asegurar que se implementen las mejoras propuestas.
Cierre de la Retrospectiva y Compromiso con el Seguimiento	Resumen de Conclusiones y Compromisos: Cerrar con un resumen de las observaciones y compromisos asumidos por el equipo. Registro para Mejora Continua: Almacenar las conclusiones en un documento accesible para revisarlas en futuros sprints.

3.2.5 Sprint Review

El Sprint Review es una reunión que se realiza al final de cada sprint con el objetivo de presentar los avances alcanzados, evaluar los resultados y obtener retroalimentación de los stakeholders. En el contexto de esta tesis, cada Sprint Review permite validar los logros de cada fase del proyecto de automatización, identificar ajustes necesarios y priorizar las próximas actividades para asegurar que el desarrollo se alinee con las expectativas y necesidades del sistema.

La siguiente tabla resume los objetivos, resultados, comentarios de los stakeholders y próximas prioridades de cada Sprint Review

Tabla 21

Sprint review

Sprint	Objetivo del Sprint	Resultados Presentados	Feedback de Stakeholders
Diseño de Arquitectura y Mapeo de I/O	Crear una base sólida para el sistema mediante el diseño de arquitectura y mapeo de entradas/salidas.	Mostrar los diagramas de arquitectura, dispositivos seleccionados, y topología de red definida.	Retroalimentación sobre compatibilidad de dispositivos y organización de la red.
Configuración de I/O y Definición de Lógica de Control	Completar el mapeo de señales y establecer la lógica de control.	Mapeo de señales documentado, estados de operación definidos, y plan de seguridad elaborado.	Evaluación de la lógica de control y posibles ajustes en la seguridad.
Programación y Configuración de Interfaces	Programar el sistema de control y configurar las interfaces HMI y SCADA.	Programa del PLC, pantallas de HMI y configuración de SCADA, con pruebas de simulación realizadas.	Validación de la interfaz de usuario y facilidad de monitoreo y control.
Integración y Pruebas de Sistema	Integrar todos los dispositivos y realizar pruebas de funcionalidad en el sitio.	Integración del sistema, pruebas de operación, y verificación de alarmas en SCADA.	Confirmación de cumplimiento con estándares de rendimiento y seguridad.
Pruebas de Carga y Ajustes Finales	Evaluar el rendimiento bajo condiciones de carga y realizar ajustes finales.	Pruebas de carga realizadas, documentación final del sistema y reporte de cierre del proyecto.	Confirmación de estabilidad y cumplimiento con requerimientos para operación prolongada.

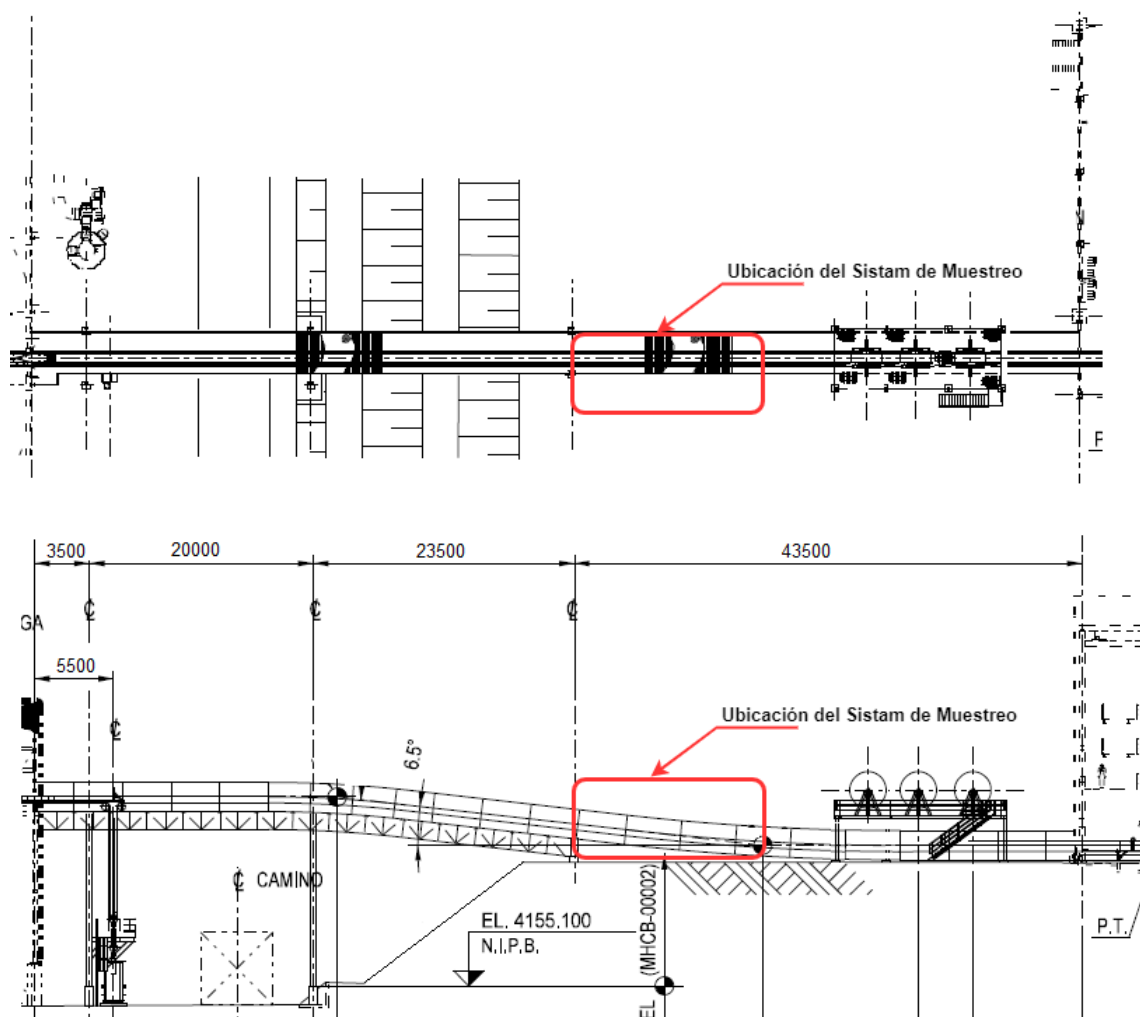
3.3 Diseño del Proyecto

El Sistema Automático de Muestreo será instalado en una ubicación estratégica en la Faja Transportadora, lo más cerca posible al punto de muestreo, para asegurar que las muestras obtenidas reflejen con precisión la composición del material

transportado. Esta ubicación permitirá minimizar el tiempo y la manipulación entre el muestreo y el procesamiento, reduciendo posibles alteraciones en las características del material y asegurando la representatividad de las muestras. Además, esta disposición contribuirá a mejorar la eficiencia del proceso, optimizando el flujo de trabajo y reduciendo riesgos para los operadores.

Figura 21

Ubicación del Sistema, vista aérea y frontal de la Faja Transportadora



3.3.1 Infraestructura Civil

De acuerdo con criterios de cimentación establecidos por los distintos proveedores del Sistema Automático de Muestreo, se ha planificado la construcción de una loza o platea de cimentación destinada a soportar la colocación de maquinaria de peso de 10 toneladas. El análisis y diseño fue realizado teniendo en cuenta las características funcionales que satisfacen los requerimientos mínimos de resistencia de los materiales y la normativa del Reglamento Nacional de Edificaciones (Norma E-060 de Estructuras de Concreto)

Para la realización de los cálculos y el análisis estructural se utilizó el software ETABS, herramienta de referencia en la industria de la ingeniería estructural para el modelado, análisis y diseño de edificaciones.

Figura 22

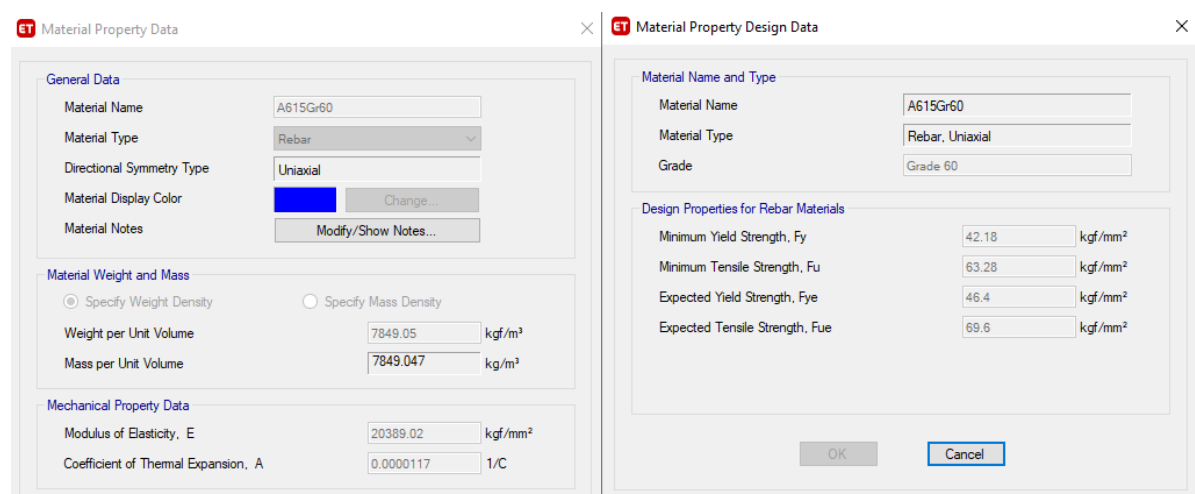
Propiedad del concreto armado

The image displays two overlapping windows from the ETABS software. The left window, titled 'Material Property Data', shows the general and mechanical properties for a material named 'FC 310'. It is categorized as 'Concrete' with 'Isotropic' symmetry. The weight density is specified as 2402.77 kg/m³. The mechanical properties include a Modulus of Elasticity (E) of 2641.02252924885 kgf/mm², a Poisson's Ratio (U) of 0.2, a Coefficient of Thermal Expansion (A) of 0.0000099 1/C, and a Shear Modulus (G) of 1100.43 kgf/mm². The right window, titled 'Material Property Design Data', shows the design properties for the same material. It specifies a 'Specified Concrete Compressive Strength, f'c' of 31 kgf/mm² and a 'Grade' of 'Fc 4000 psi'. Both windows have 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

Fuente: Software ETABS

Figura 23

Propiedades del acero de refuerzo



Fuente: Software ETABS

Los datos presentados a continuación corresponden a las cargas consideradas en el diseño estructural de la cimentación. Estos valores se utilizaron como base para el análisis y dimensionamiento de la losa de cimentación, garantizando la estabilidad y seguridad estructural.

Tabla 22

Carga permanente y viva

Carga Permanente	VALOR
Peso Propio de la Maquinaria	10 ton
Peso específico del Concreto	2400 kg/m2
Peso específico del Acero	7849 kg/m2
Carga Viva	
Área de trabajo	500 kg/m2

La siguiente imagen muestra la distribución y diseño estructural de la platea de cimentación, representando la ubicación de los puntos de apoyo o cargas (numerados del 1 al 9) dentro de la cuadrícula definida por los ejes A-L y H-L. La platea de cimentación tiene un ancho de 6.8 metros y un largo de 12.8 metros. Este esquema es esencial para entender la disposición de cargas y la

geometría de la platea, asegurando un análisis preciso del comportamiento estructural y la correcta asignación de esfuerzos en el diseño.

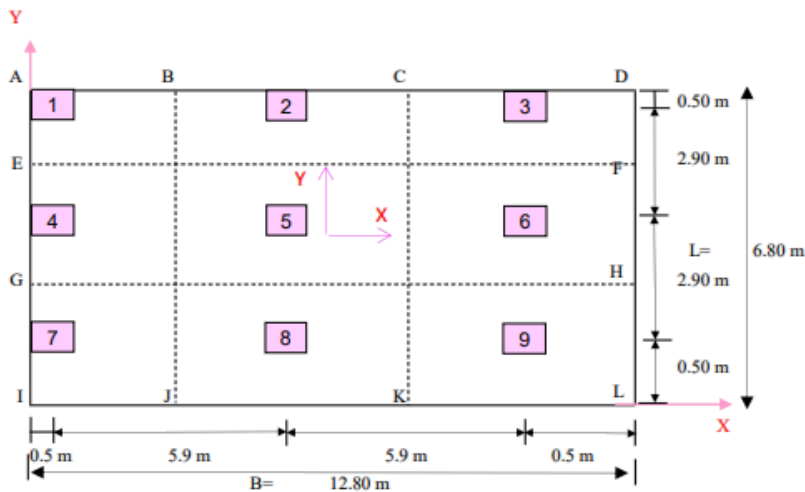
Figura 24

Diseño de la Platea de Cimentación

7. DISEÑO PLATEA DE CIMENTACIÓN (MÉTODO RÍGIDO)					
DATOS					
Concreto	$f_c=$	310 kg/cm ²	$\gamma_s=$	1700	kg/m ³
Acero	$f_y=$	4200 kg/cm ²	$\gamma_c^a=$	2400	kg/m ³
Sobrecarga	$S/C=$	0 kg/m ²	$K_s=$	1	kg/cm ³
Nivel de desplante	$Df=$	20 cm	$E=$	264102.2529	kg/cm ²
Capacidad admisble	$q_a=$	2.0 kg/cm ²			

Figura 25

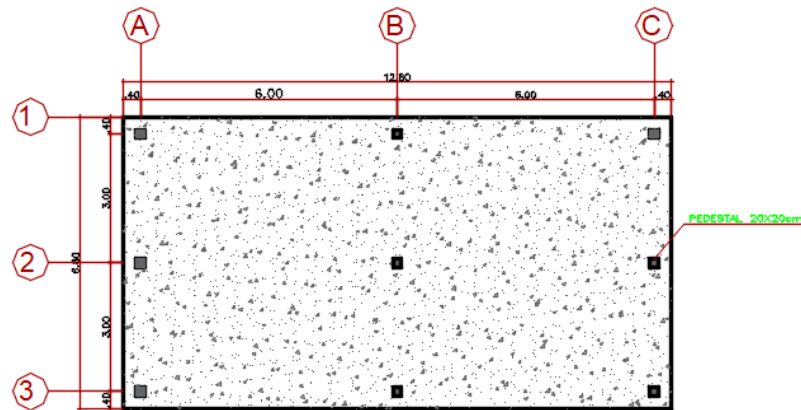
Distribución de la platea de cimentación



La figura 26 ilustra el diseño detallado de una platea de cimentación, destacando la distribución y dimensiones de sus elementos estructurales. Se puede observar la ubicación precisa de los pedestales de 20 x 20 cm, estratégicamente posicionados para soportar las cargas, así como las distancias entre los ejes A, B y C y los niveles 1, 2 y 3, que dividen la estructura en secciones claramente definidas

Figura 26

Geometría de la platea próximo a construir

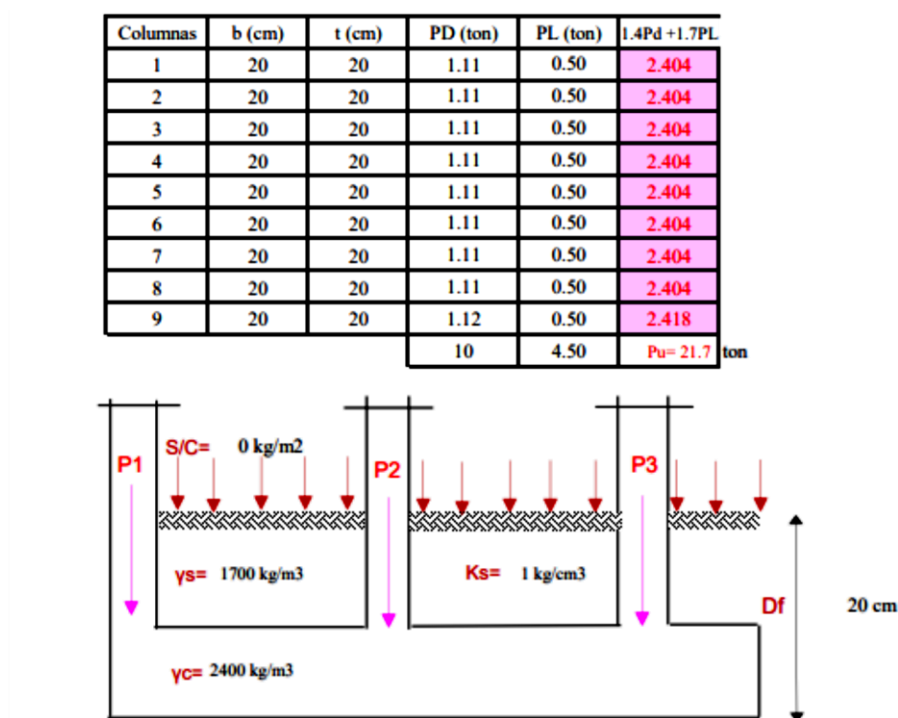


La figura 27 muestra el cuadro de cargas y la distribución de las mismas en la platea de cimentación, que está relacionada con los planos y detalles estructurales anteriormente mencionados. En el cuadro de cargas, se especifican las dimensiones de las columnas (b y t), las cargas permanentes (PD), las cargas vivas (PL) y el cálculo de la carga última ($1.4PD + 1.7PL$), con un total de 21.7 toneladas. La sección inferior de la imagen ilustra un esquema que representa la aplicación de las cargas sobre la platea, destacando los puntos de carga (P1, P2, P3) y las propiedades del suelo, como el peso específico del suelo, la capacidad de reacción del suelo y el peso específico del concreto.

Además, se muestra el nivel de desplante (Df) a 20 cm, proporcionando una visualización integral de la distribución de cargas y las condiciones estructurales.

Figura 27

Cuadro de Cargas



En la imagen se verifica el proceso de definición del método de análisis estructural para la platea de cimentación, confirmando el uso del método flexible al cumplir la condición establecida. Se detallan los cálculos relevantes para el diseño, incluyendo el área total de la losa ($A=87.04 \text{ m}^2$) y la presión neta aplicada sobre la cimentación ($q_n = 1.952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)

Además, se muestran los cálculos de las presiones en los puntos perimetrales de la estructura, considerando las fuerzas resultantes, las excentricidades, y los momentos generados, lo que permite evaluar la distribución uniforme de cargas.

Figura 28

Definición del método de análisis

DEFINIR MÉTODO A USAR

Lcx=5.90 m

Lcy=2.90 m

Lc=5.90 m

T=20.0 cm

λ=0.006139

1.75 / λ=2.85 m

λ = (3 * Ks / (E * T³))^{1/4}

Verificación se debe cumplir la siguiente condición

1.75/λ > Lc

MÉTODO FLEXIBLE

1. Cálculo del Area de la losa

Longitud total en la dirección X

Lx=12.80 m

A = Lx * Ly

Longitud total en la dirección Y

Ly=6.80 m

A=87.04 m2

2. Cálculo de la presión neta

qn = qa - γs1 x h1 - γs2 x h2 - γl x hl - γc^u x hc^u - s/c

qn=1.952 kg/cm2

3. Cálculo de las presiones por debajo de los puntos perimetrales

Resultantes

x' = (ΣPi * X' i) / ΣPi

X'=6.40 m

Y'=3.40 m

x' = (ΣPi * Y' i) / ΣPi

Excentricidades

ex = X' - Lx/2

ex=0.41 cm

ey=-0.20 cm

ey = Y' - Ly/2

Peso total mayorada de la edificación

Pu=21.7 ton

Pu=21.65 ton

Inercia

Ix = (B * L³)/12

Ix=335.4 m4

Iy = (L * B³)/12

Iy=1188.4 m4

Momentos

Mx = Pu * ey

Mx=0.0 ton-m

My=0.09 ton-m

Mx = Pu * ex

q = Pu / A ± My X / Iy ± Mx Y / Ix

0.249 0.0001 X 0.00 Y

PUNTOS	Pu/A	X (m)	(My X)/Iy	Y (m)	(Mx Y)/Ix	q (Kg/cm2)	Verificación
A	0.25	-6.4	-0.0004744	6.4	-0.000826	0.020	qn > q OK
B	0.25	-2.95	-0.0002187	6.4	-0.000826	0.024	qn > q OK
C	0.25	2.95	0.00021868	6.4	-0.000826	0.024	qn > q OK
D	0.25	6.4	0.00047442	6.4	-0.000826	0.024	qn > q OK
E	0.25	-6.4	-0.0004744	1.45	-0.000187	0.024	qn > q OK
F	0.25	6.4	0.00047442	1.45	-0.000187	0.024	qn > q OK
G	0.25	-6.4	-0.0004744	-1.45	0.0001872	0.024	qn > q OK
H	0.25	6.4	0.00047442	-1.45	0.0001872	0.024	qn > q OK
I	0.25	-6.4	-0.0004744	-6.4	0.0008263	0.024	qn > q OK
J	0.25	-2.95	-0.0002187	-6.4	0.0008263	0.024	qn > q OK
K	0.25	2.95	0.00021868	-6.4	0.0008263	0.024	qn > q OK
L	0.25	6.4	0.00047442	-6.4	0.0008263	0.025	qn > q OK

A continuación, se muestra el cálculo del peralte efectivo de la losa, tomando en cuenta el corte por punzonamiento en puntos críticos, como las columnas 5,2 y 1. Este análisis es esencial para garantizar que la cimentación resista adecuadamente las cargas aplicadas, evitando fallos por punzonamiento en áreas con mayores esfuerzos y superficies reducidas. Se detalla el procedimiento para determinar la carga última aplicada(V_u) y la resistencia de corte del concreto (ϕV_c) utilizando las dimensiones y propiedades del material previamente definidas en las imágenes anteriores.

Figura 29

Cálculo del peralte en las columnas 5,2 y 1

En las columnas de mayor carga y de menor desarrollo de superficie de punzonamiento

COLUMNA 5

$$Vu = Pu - q_{nu} * m * n$$

$$Vu = 2404.00 - 1.952 * (20 + d) * (20 + d) \dots\dots(1)$$

$$\phi Vc = \phi 1.1 \sqrt{f'c} * b_o * d$$

$$\phi Vc = 17.431 * 2 * (20 + d + 20 + d) * d \dots\dots(2)$$

$$2404.0 - 780.8 - 78.08 d - 1.952 d^2 = 1394.5 d + 69.722995 d^2$$

$$-71.67 d^2 - 1472.5 d + 1623.20 = 0$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

d1=	-21.593
d2=	1.049
d=	1 cm

COLUMNA 2

$$Vu = Pu - q_{nu} * m * n$$

$$Vu = 2404.00 - 1.952 * (20 + d) * (20 + d/2) \dots\dots(1)$$

$$\phi Vc = \phi 1.1 \sqrt{f'c} * b_o * d$$

$$\phi Vc = 17.431 * 2 * (20 + d + 20 + d/2) * d \dots\dots(2)$$

$$2404.0 - 780.8 - 58.56 d - 0.976 d^2 = 1394.5 d + 52.292246 d^2$$

$$-53.27 d^2 - 1453.0 d + 1623.20 = 0$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

d1=	-28.352
d2=	1.075
d=	1 cm

COLUMNA 1

$$Vu = Pu - q_{nu} * m * n$$

$$Vu = 2404.00 - 1.952 * (20 + d/2) * (20 + d/2) \dots\dots(1)$$

$$\phi Vc = \phi 1.1 \sqrt{f'c} * b_o * d$$

$$\phi Vc = 17.431 * 2 * (20 + d/2 + 20 + d/2) * d \dots\dots(2)$$

$$2404.0 - 780.8 - 39.04 d - 0.4880 d^2 = 1394.5 d + 34.861497 d^2$$

$$-35.35 d^2 - 1433.5 d + 1623.20 = 0$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

d1=	-41.655
d2=	1.102
d=	1 cm

Tomamos el mayor valor de "d"

d=	10.0 cm
t=d+10	20.0 cm

$\lambda =$	0.006139
$1.75 / \lambda =$	2.85 m
$1.75 / \lambda > L_c$	OK

Verificación de la condición de diseño

$\lambda = \left(\frac{3 * K_s}{E * T^3} \right)^{1/4}$

El siguiente cálculo corresponde al factor de amplificación de carga "F" en distintas franjas de la platea de cimentación. Se analiza cada franja desde la A hasta la L, indicando valores como el promedio de presión (q_{prom}) las dimensiones de las franjas (b y L) y las cargas aplicadas en cada punto (P1 a P9). Los resultados muestran cómo el factor de carga se compara con el producto de la carga puntual (CP) y la sumatoria de la presión (ΣP), reflejando si

el valor es 1 (condición estable) o mayor, lo que indica la necesidad de ajustes para garantizar la estabilidad. Esta evaluación es fundamental para confirmar que la platea distribuya adecuadamente las cargas y soporte las condiciones de carga específicas sin comprometer su desempeño estructural.

Figura 30

Cálculo del factor de amplificación de carga "F"

5. Cálculo del factor de amplificación de carga "F" para cada franja								
FRANJAS	q	q prom	b (cm)	L (cm)	P	ΣP	CP	F
A	0.02	0.0233	195	1280	P1	7212	6518.00	1
B	0.024				P2			
C	0.024				P3			
D	0.024							
E	0.024							
F	0.024							
E	0.024	0.024	290	1280	P4	7212	8060.40	1.1176373
F	0.024				P5			
H	0.024				P6			
G	0.024							
G	0.024	0.0242	195	1280	P7	7226	6629.00	1
H	0.024				P8			
I	0.024				P9			
J	0.024							
K	0.024							
L	0.025							
A	0.02	0.0233333	345	680	P1	7212	6343.00	1
B	0.024				P4			
J	0.024				P7			
I	0.024							
G	0.024							
E	0.024							
B	0.024	0.024	590	680	P2	7212	8420.40	1.1675541
C	0.024				P5			
J	0.024				P8			
K	0.024							
C	0.024	0.0241667	345	680	P3	7226	6447.75	1
D	0.024				P6			
F	0.024				P9			
H	0.024							
K	0.024							
L	0.025							

El diseño de la losa para distintas franjas de la cimentación, incluyendo franjas 1, 2, 3, 4, 5 y 6, detalla el cálculo de las cargas actuantes distribuidas y las fuerzas puntuales aplicadas. Cada franja considera tanto el lado izquierdo como derecho, especificando valores de presión, dimensiones y los puntos de carga con su respectivo factor de amplificación. La carga distribuida se representa a lo largo de la franja, con cargas puntuales que refuerzan la carga total aplicada. Los diagramas de cortante y momento muestran cómo se distribuyen las fuerzas a lo largo de la losa, lo cual es crucial para entender el

comportamiento estructural bajo carga. Los valores máximos y mínimos de cortante y momento indican los puntos críticos en cada franja, ayudando a identificar las áreas que requieren mayor atención en el refuerzo y diseño para mantener la integridad de la estructura.

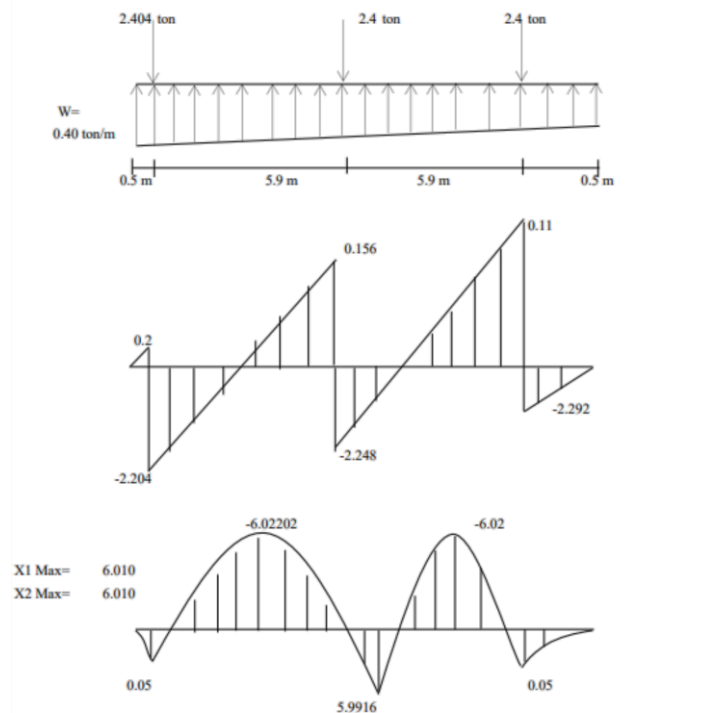
Figura 31

Cálculo de las cargas actuantes – Franja 1

FRANJA 1

Cálculo de las cargas actuantes

Lado IZQ	q (kg/cm ²)	Lado DER.	q (kg/cm ²)	b (cm)	P	P (kg)	F	P*F
A	0.02	D	0.024	195	1	2404	1.00	2404
E	0.024	F	0.024		2	2404	1.00	2404
					3	2404	1.00	2404
q _l	4.29	q ₂ =	4.68					
q=w	4.00 kg/cm							



En los anexos se detalla el proceso de cálculo para las franjas 2, 3, 4, 5 y 6, abarcando aspectos clave como la distribución de cargas, los esfuerzos cortantes, los momentos flectores y los factores de amplificación de carga.

El resumen del metrado de estructuras proporciona un panorama claro de las actividades necesarias para la construcción de la platea de cimentación. Incluye el movimiento de tierras (excavación y nivelación), rellenos (acarreos de material y eliminación de excedentes) y obras de concreto simple y armado. Se especifican las cantidades de materiales como concreto de alta resistencia ($f'c = 310 \text{ kg/cm}^2$) y varillas para la armadura, lo que permite una planificación precisa y asegura el uso eficiente de los recursos y el cumplimiento de los estándares de calidad.

Tabla 23

Metrado de estructuras

RESUMEN DEL METRADO DE ESTRUCTURAS			
Obra	PLATEA DE CIMENTACION		
Ubicación	Unidad Minera		
Fecha	Noviembre - 2024		
ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	METRADO
02.00.00	ESTRUCTURAS		
02.01.00	MOVIMIENTO DE TIERRAS		
02.01.01	EXCAVACION		
02.01.01.01	Excavación masiva	m3	26.72
02.01.01.04	Nivelación y compactación de fondo de cimentación	m2	87.04
02.01.02	RELLENOS		
02.01.02.03	Acarreo interno material procedente de las excavaciones simples	m3	26.72
02.01.02.04	Eliminación de material excedente	m3	26.72
02.02.00	OBRAS DE CONCRETO SIMPLE		
02.02.02	Solado e=10 cm	m2	87.04
02.03.00	OBRAS DE CONCRETO ARMADO		

02.03.01	PLATEA		
02.03.01.01	Concreto pre mezclado $f'c=310$ kg/cm ²	m ³	18.43
02.03.01.02	Armadura de concreto varillas 3/8"	kg	501.76
02.03.01.03	Armadura de concreto varillas 1/2"	kg	1162.98
02.03.01.03	Curado de concreto	m ²	87.04

En base al proceso detallado de análisis y cálculo realizado para el diseño de la platea de cimentación, se pueden extraer varias conclusiones importantes que reflejan tanto la efectividad del diseño como las consideraciones a tener en cuenta durante su implementación y verificación.

- El diseño de la platea de cimentación obtenido es satisfactorio de acuerdo con el Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma Técnica E-60 Concreto.
- Se tiene que verificar en campo que los materiales a utilizar cumplan con las especificaciones mínimas del cálculo.
- Cualquier modificación de algún elemento debe ser consultado con el proyectista.
- Las cuantías de acero del diseño son las ideales para que la estructura sea resistente y dúctil ante las cargas seleccionadas.
- La geometría de la estructura es la adecuada para el empleo de esta estructura.
- Al no haber estudio de suelos se tomó una carga admisible de suelo totalmente referencial de 2.00 kg/cm².

3.3.2 Infraestructura Mecánica

Para el montaje del sistema se necesita una estructura de acero de dos niveles diseñada para alojar y soportar equipos pesados, operarios y las

condiciones ambientales propias de una planta minera. Fabricada en acero estructural A36, esta estructura se caracteriza por su resistencia y durabilidad, cumpliendo con estándares de ingeniería estructural para asegurar la estabilidad y seguridad de los equipos y personal en operación.

3.3.2.1 Estructura de Soporte

Niveles y Altura Total

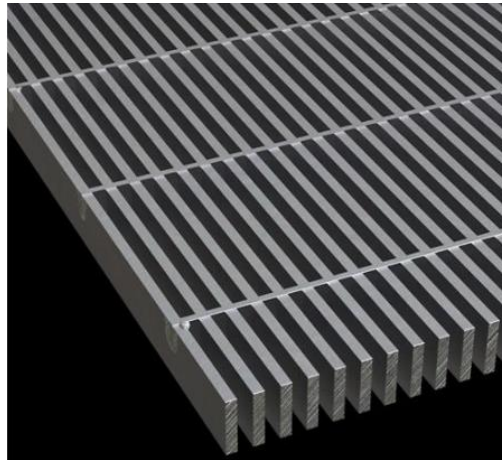
La estructura cuenta con dos niveles de operación, permitiendo el alojamiento del muestreador secundario y facilitando el acceso del personal de operación y mantenimiento. Cada nivel está diseñado con alturas adecuadas para contener los equipos necesarios sin limitaciones de espacio y asegurar un ambiente de trabajo seguro.

Parrillas de Piso (ARS-6)

Cada nivel de la estructura utiliza parrillas ARS-6, fabricadas en acero y diseñadas para soportar cargas pesadas mientras proporcionan una superficie antideslizante y de fácil drenaje. Estas parrillas permiten la circulación de aire y la caída de cualquier residuo o líquido al nivel inferior, facilitando la limpieza y el mantenimiento de la estructura.

Figura 32

Rejillas de barras para piso



Fuente: McNICHOLS

Componentes de Refuerzo (Cartelas y Placas de Amarre)

La estructura incluye cartelas en los puntos críticos de carga y placas de amarre que conectan las vigas y columnas principales, asegurando una distribución uniforme de las cargas y mejorando la rigidez estructural. Estas cartelas están diseñadas para minimizar la flexión y el desplazamiento bajo cargas dinámicas, como las vibraciones producidas por los equipos de muestreo.

Puertas de Acceso

La estructura cuenta con dos puertas de acceso ubicadas estratégicamente para optimizar el flujo de personal y el movimiento de equipos. Estas puertas están construidas con acero reforzado y están equipadas con cerraduras de seguridad industrial para restringir el acceso a áreas de riesgo.

Barandas de Protección

Alrededor de cada nivel, se han instalado barandas de acero para proteger al personal de caídas y permitir un ambiente de trabajo seguro en alturas. Estas barandas cumplen con los estándares de seguridad industrial, soportando

fuerzas de impacto y proporcionando un agarre confiable en todo el perímetro de la estructura.

3.3.2.2 Sistema de Acceso

Escalera de Acceso entre Niveles

La escalera interna conecta ambos niveles de la estructura y está fabricada en acero A36, con peldaños diseñados para evitar resbalones, especialmente en condiciones de humedad o cuando el personal usa equipo de protección. La inclinación y el ancho de la escalera cumplen con las normativas de seguridad, proporcionando un acceso cómodo y seguro entre los niveles.

Pasamanos y Protección Antideslizante

La escalera incluye pasamanos y superficies antideslizantes, lo cual es esencial en ambientes industriales para evitar accidentes. Los pasamanos están situados a una altura ergonómica, facilitando el agarre durante el ascenso y descenso.

Revestimiento

Paneles PV-6 de Revestimiento: La estructura está revestida con paneles PV-6 de acero galvanizado de 0,5 mm de espesor, los cuales protegen el interior de la estructura de condiciones ambientales adversas, como polvo y humedad. Estos paneles están reforzados para resistir el desgaste y la corrosión, manteniendo la integridad estructural con el paso del tiempo.

Sectores Translúcidos para Iluminación Natural

El revestimiento cuenta con sectores translúcidos que permiten la entrada de luz natural, reduciendo la necesidad de iluminación artificial durante el día.

Estos paneles translúcidos están hechos de un material resistente a los impactos, manteniendo la seguridad sin comprometer la visibilidad.

3.3.2.3 Diseño para Equipos de Muestreo

Soportes para Equipos Secundarios y Envasadora

La estructura está diseñada específicamente para soportar el peso y las vibraciones de los equipos secundarios de muestreo y la envasadora. Las vigas de soporte están colocadas de manera estratégica para distribuir de manera uniforme las cargas generadas por estos equipos en operación.

Amortiguación de Vibraciones

Dado que algunos equipos de muestreo generan vibraciones significativas, la estructura incorpora elementos de amortiguación en los puntos de soporte de los equipos principales, minimizando el impacto de las vibraciones en la estructura y protegiendo tanto a los equipos como al personal.

3.3.2.4 Seguridad y Mantenimiento

Puntos de Anclaje para Trabajo en Altura

Se han instalado puntos de anclaje en áreas clave de la estructura para permitir el uso seguro de arneses y equipos de protección personal (EPP) en trabajos de altura. Estos puntos de anclaje están certificados para soportar la carga de rescate en caso de emergencias.

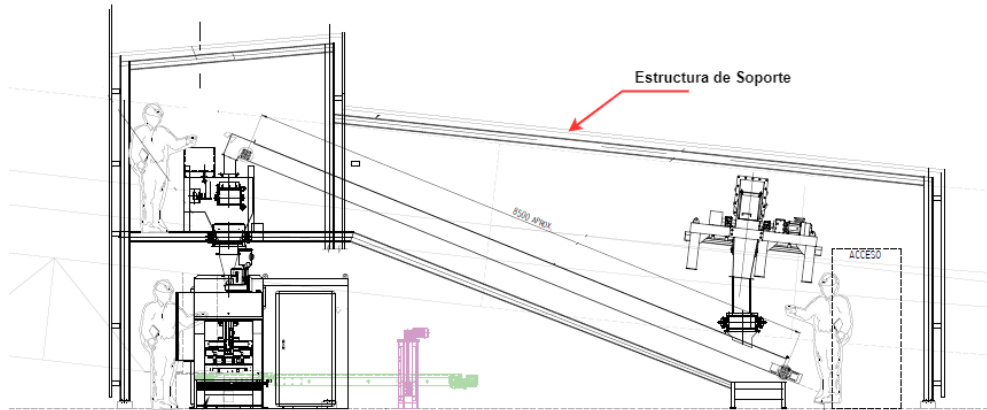
Acceso Rápido para Mantenimiento

La distribución de las puertas de acceso y las plataformas facilita la movilidad del personal de mantenimiento y permite el acceso rápido a los equipos y sistemas internos de la estructura. Esto es clave para realizar

intervenciones de mantenimiento y asegurar un funcionamiento continuo y seguro del sistema de muestreo.

Figura 33

Diseño de la Estructura del Sistema de Muestreo



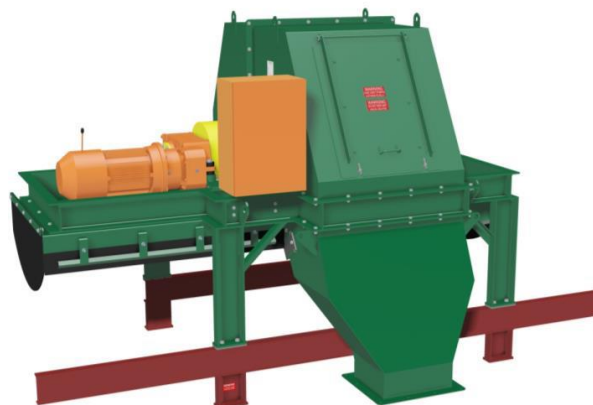
3.3.2.5 Equipos

Muestreador Primario o Cross Belt

Se monta sobre la estructura de la faja principal que será muestreada. Su cuchara de corte tiene un movimiento radial y opera de forma perpendicular al flujo, extrayendo el concentrado de cobre hacia un chute ubicado al costado de la Faja Principal.

Figura 34

Muestreador Primario



Características:

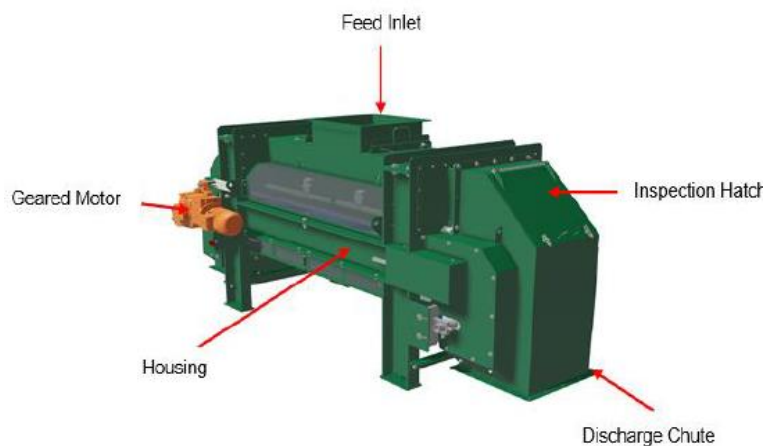
- Configurado para el flujo variable en la Faja Principal, adecuado para la descarga de tres filtros prensas.
- Construido en acero carbono ASTM A36, con montaje directo en el chasis de la faja de 763 mm de ancho.
- Cuchara de muestreo fabricada en acero inoxidable 316 con revestimiento de UHMW, operando a 1.3 veces la velocidad de la faja para asegurar precisión.
- Incluye compuertas de inspección y un sistema de frenado para detener la cuchara en reposo de forma segura.
- Instrumentación y control: Equipado con sensores de posición y monitoreo a través de HMI y DCS para supervisión en tiempo real.
- Visualización interna: Incorpora una cámara interna para observación de la operación desde el tablero local.
- Fabricado bajo la ISO 12743:2021, asegurando estándares en el muestreo y precisión en entornos de alta exigencia.

Chute de Descarga

La muestra tomada en el muestreador primario es descargada mediante un chute el cual direcciona el flujo de cobre hacia la faja de alimentación primaria.

Figura 35

Chute de Descarga



Características:

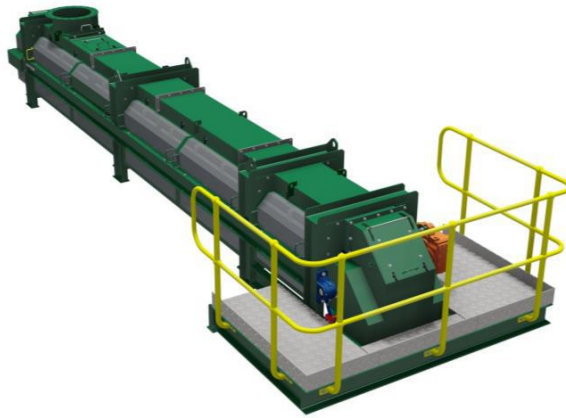
- Fabricado en acero estructural ASTM A36 con un revestimiento interior de UHMW (polietileno de ultra alto peso molecular) para minimizar el desgaste y facilitar el flujo del material
- Equipado con puertas de acceso para inspección, diseñadas para permitir un monitoreo y mantenimiento seguros sin comprometer la operación.
- Incorpora un motovibrador para optimizar el deslizamiento del material dentro del chute. El motovibrador está acoplado con una junta aislante, diseñada para evitar que las vibraciones afecten el motor del muestreador primario y el chasis de la Faja Principal
- La fabricación y operación del chute están alineadas con la ISO 12743:2021, que regula los procedimientos de muestreo para garantizar la precisión en la determinación de metales y humedad en los materiales.

Faja de Alimentación Primaria

El material descargado del chute es transportado mediante la faja de alimentación primaria, la cual descarga la muestra en el muestreador secundario.

Figura 36

Faja de Alimentación Primaria



Características:

- Sistema de ajuste automático que regula la carga de material en función del tonelaje de la faja para optimizar el flujo de alimentación.
- Estructura autoportante fabricada en acero ASTM A36 de alta resistencia, diseñado para soportar condiciones operativas exigentes.
- Banda EP160 de 14" de ancho, plana y hermética, que conserva la integridad y humedad del material durante el transporte.
- Velocidad ajustable mediante variador de frecuencia (VFD) para un control preciso del flujo de material.
- Componentes de soporte y seguridad que incluyen polines de carga, impacto y retorno, poleas con revestimiento de goma, y sistema de paradas de emergencia.
- Puertas de inspección y sistema de ajuste de tensión accesible para facilitar el mantenimiento y asegurar una operación eficiente de la faja.

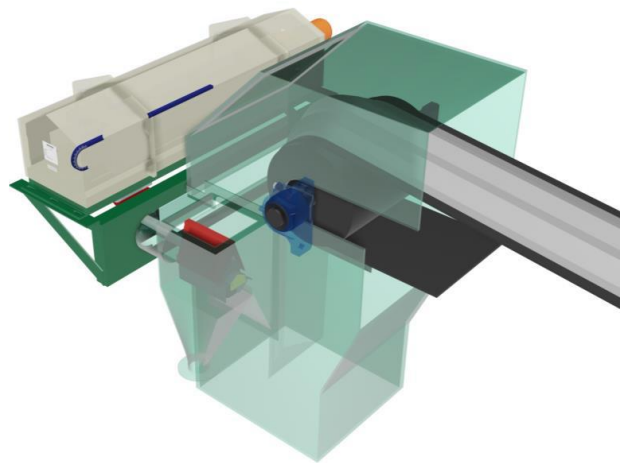
Muestreador Secundario

La muestra que se descarga desde la faja de alimentación primaria es recogida durante la caída libre del material mediante el muestreador secundario.

Este equipo cuenta con un motor eléctrico y un mecanismo de cadena que desplaza la cuchara de muestreo entre las posiciones de recolección de muestra y de rechazo.

Figura 37

Muestreador Secundario



Características:

- Cuchara secundaria: Fabricada en acero inoxidable 316. Posee labios del mismo material con abertura acorde al balance de muestra solicitado por el cliente.
- Patines de abertura: Fabricado en acero A-36. Permite la abertura de la cuchara en los extremos de descarga de muestra.
- Chute secundario: Fabricado en acero A-36 y revestido en UHMW para el correcto deslizamiento del concentrado. Posee puertas de inspección para mantenimiento. Se disipa acorde a los ángulos ideales para un correcto escurrimiento. Considera 2 motovibradores ubicado en cada uno de sus ductos de descarga, los cuales operan sincrónicamente con la operación de la descarga de muestra.

- Estructura soporte chute secundario: Fabricado en acero A-36, corresponde a una estructura que soporta el sistema motriz y el chute secundario.
- Carro soporte: Fabricado en acero A-36, corresponde a una placa con 4 ruedas montadas sobre rodamientos de bolas, El carro se conecta a través de un pasador, por el cual realiza el movimiento de traslación sobre uno o dos rieles.
- Riel de apoyo: Fabricado en acero A-36, corresponde a un riel dentro del chute secundario que soporta las ruedas de apoyo de la cuchara.

Sistema de Embolsado: el muestreador secundario deposita la muestra en el equipo de envasado automático de bolsas, la embolsadora cumple la función de acumular los incrementos en una bolsa plástica; una vez recolectado los incrementos, la bolsa es automáticamente sellada y etiquetada por el sistema para quedar acumulada sobre una estación de polines hasta su retiro.

Figura 38

Embolsadora Automática



Características:

- Tamaño de bolsas a envasar (rango): L 100 – 720 x 160 – 385 mm
- El equipo a partir de un film forma, sella, llena y corta el envase
- La bolsa que fabrica la envasadora es tipo almohada
- Estructura robusta fabricada en acero inoxidable
- Sistema de arrastre mediante bandas laterales accionadas por un servomotor
- Fácil operación y mantención del equipo
- Fococelda para calce del film impreso
- Requiere aire comprimido para su funcionamiento
- Motores 380V, protección IP 55.
- Incluye un transportador recepción bolsas terminadas
- Incluye tubo formador para un ancho específico de bolsa
- Protección acrílica en cinta de salida.
- Protección acrílica en acceso a porta bobina.
- Mesa de polines para acumulación de muestras.

Faja de Rechazos: Corresponde a una faja de 14” de ancho, utilizada para transportar los rechazos de retorno a la faja principal. En casos en que el flujo de la Faja Principal sea inferior a 50 tph, la faja de rechazos, invierte su sentido para descargar directo al sistema de envasado mientras el muestreador secundario queda en modo stand-by.

Características:

- Fabricado en acero A-36, de sección plana.
- Chasis o estructura autoportante.

- Posee puertas de inspección superior y lateral para revisar integridad de componentes interiores y para realizar mantenciones.
- Posee polea motriz y polea tensora
- Motor de características de 440 VAC / 3F / 60Hz
- Sensor de velocidad de cero
- Gualderas laterales regulables
- Banda EP160
- Raspador
- Tapa superior

Finalmente, todos los equipos serán instalados de acuerdo con las especificaciones y ubicaciones indicadas. Cada componente, desde el muestreador primario hasta la faja de alimentación y el muestreador secundario, se integrará en la estructura industrial siguiendo las disposiciones de las imágenes de diseño. Esta disposición asegura que cada equipo funcione en conjunto de manera óptima, cumpliendo con los estándares de seguridad y eficiencia requeridos para el sistema de muestreo.

Figura 39

Disposición de los Equipos del Sistema de Muestreo

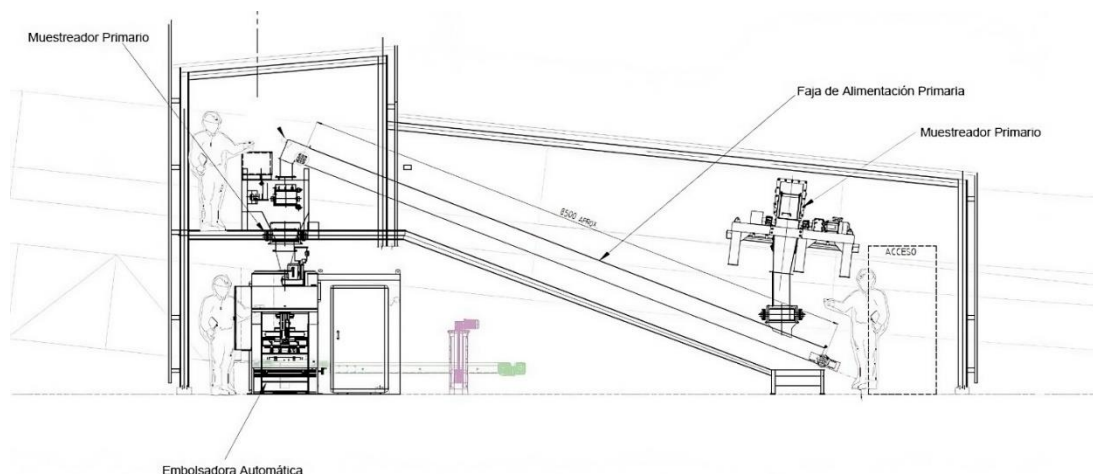


Figura 40

Vista lateral del Sistema de Muestreo

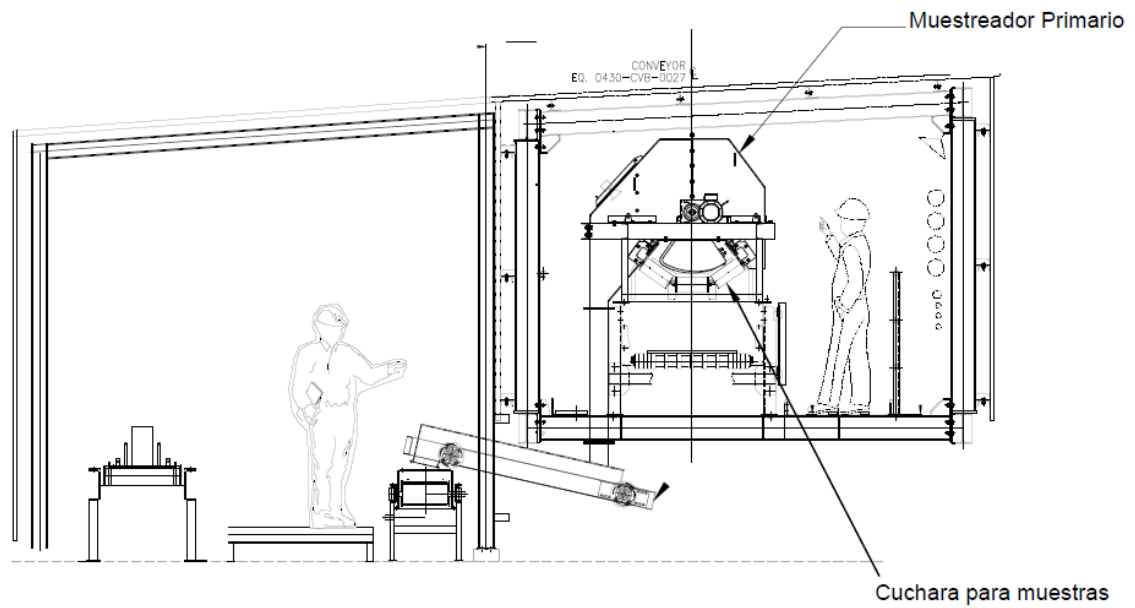
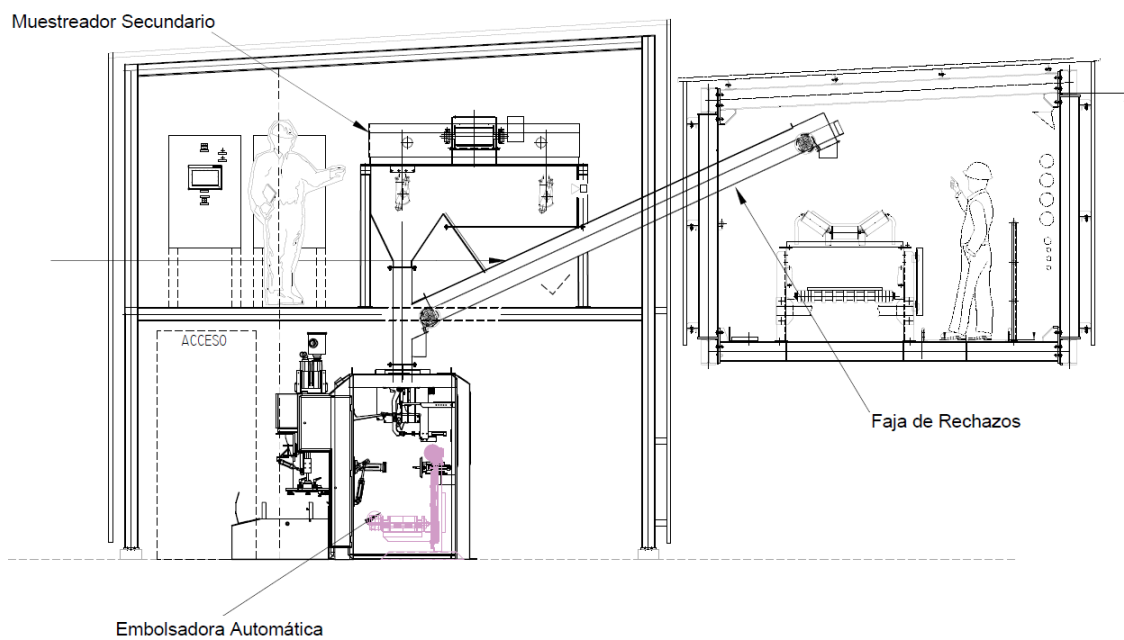


Figura 41

Vista posterior del Sistema de Muestreo



3.3.3 Infraestructura Eléctrica

El sistema eléctrico del Sistema Automático de Muestreo de Concentrado será diseñado con un enfoque en la seguridad, eficiencia y facilidad de mantenimiento. Su configuración permite un acceso óptimo para la inspección y el mantenimiento periódico, cumpliendo con las normas de seguridad eléctrica para minimizar riesgos para los operadores y el personal de mantenimiento. El sistema de potencia operará a un voltaje de 440 VAC, proporcionando una fuente de energía adecuada para los equipos principales. Además, el circuito de control requerirá una tensión de 110 VAC, obtenida a través de un transformador de 440/110 VAC y respaldada por un sistema de energía ininterrumpida (UPS) para asegurar estabilidad y continuidad en el suministro de control.

3.3.3.1 Alimentación Principal

La alimentación principal del Sistema Automático de Muestreo de Concentrado será tomada desde la Sala Eléctrica SE-103 y se extenderá hasta el tablero de potencia del sistema, cubriendo una distancia aproximada de 500 metros. Para garantizar un suministro eléctrico adecuado y seguro, la alimentación se realizará a través de un breaker principal con las siguientes especificaciones:

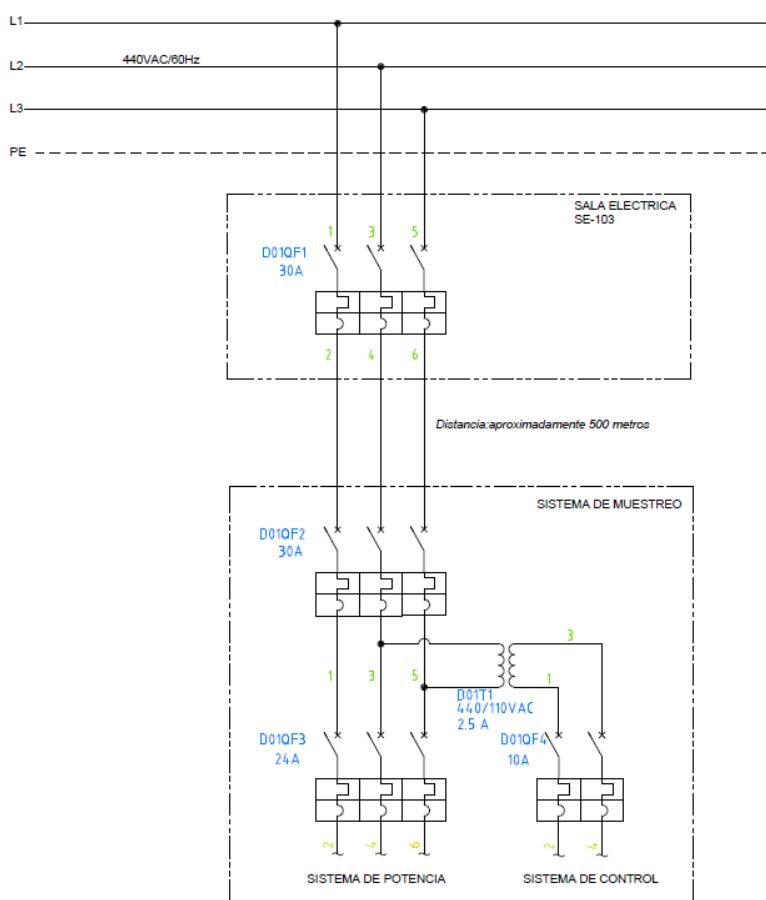
Corriente nominal: 30A

Voltaje de operación: 440 VAC

Potencia: 20 kW

Figura 42

Alimentación principal del Sistema de Muestreo



Este breaker principal asegurará una fuente de energía confiable para los componentes de potencia del sistema, cumpliendo con los requisitos de voltaje y capacidad necesarios para el funcionamiento de los equipos en condiciones normales de operación.

Para el circuito de control, el sistema contará con una tensión de 110 VAC suministrada a través de un transformador interno conectado al tablero de potencia. Este circuito de control operará a un amperaje de 6A, adecuado para mantener la estabilidad de los elementos de control y asegurar su operatividad sin afectar la potencia principal. Esta configuración permite una distribución de energía independiente y controlada entre los sistemas de potencia y control, facilitando el mantenimiento y el monitoreo del sistema eléctrico en general.

3.3.3.2 Tablero de Potencia y Control

Para el funcionamiento adecuado del Sistema Automático de Muestreo de Concentrado, los equipos de potencia requieren una demanda energética total de 18.1 HP (equivalente a 13.5 kW). Este consumo energético se ha calculado considerando las características operativas y los requerimientos de cada equipo que forma parte del sistema de muestreo. La distribución de esta potencia entre los distintos equipos asegura una operación equilibrada y eficiente, permitiendo que cada componente funcione dentro de sus especificaciones de diseño.

A continuación, se presenta una tabla detallada con la distribución de consumo de potencia para cada equipo.

Tabla 24

Cargas de equipos de potencia

EQUIPO	CARGA[HP]
Cross Belt	3.1
Chute de Descarga	1
Faja de Alimentación Primaria	5
Muestreador Secundario	1.5
Sistema de Embolsado	2
Faja de Rechazos	5
Sistema Extractor de Polvo	0.5

La etapa de control del sistema está diseñada para gestionar los equipos que supervisan y controlan el funcionamiento del Sistema Automático de Muestreo de Concentrado. La carga total de 10 A es suficiente para alimentar los dispositivos de control esenciales, como sensores de posición, actuadores y los sistemas de comunicación integrados. La distribución de esta carga se realiza de manera eficiente entre los equipos, asegurando que cada componente disponga de la energía necesaria para operar de forma precisa y confiable.

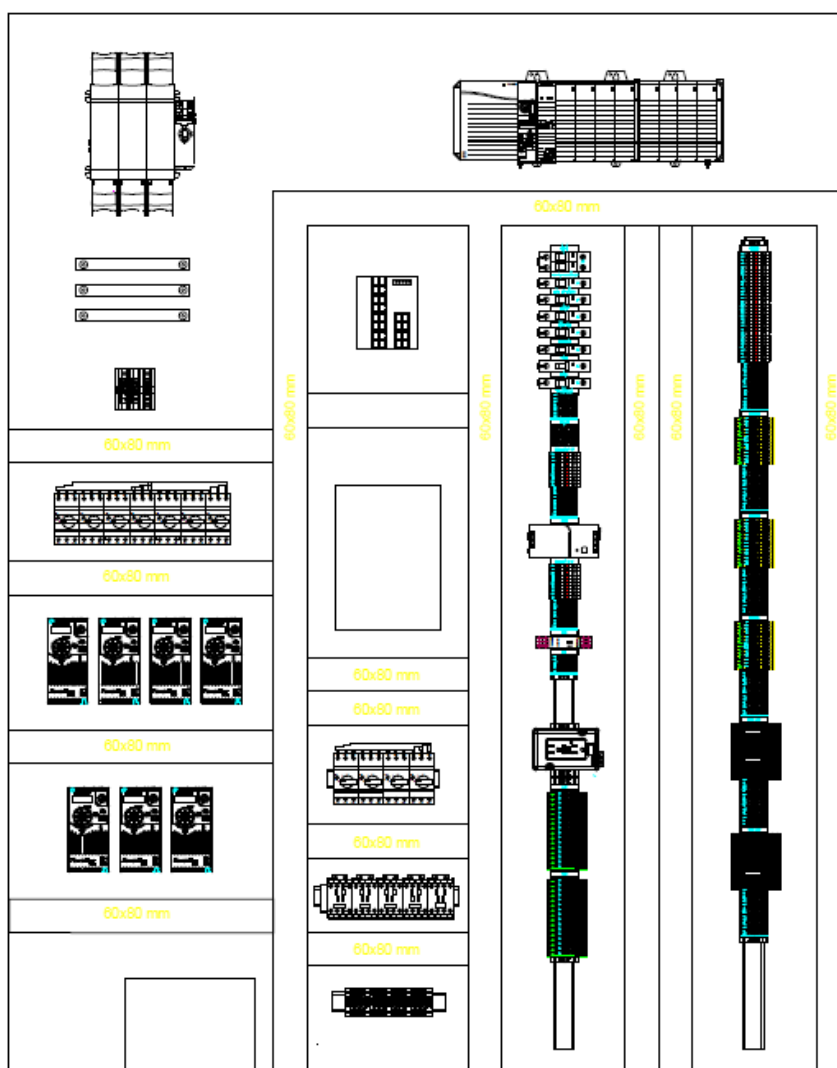
Tabla 25*Cargas de equipos de control*

EQUIPO	CARGA[A]
PLC	0.5
Panel View (2)	1
Switch	0.5
Fuente +24VDC	1.5
Instrumentos	2
Actuadores	2.5
Indicadores	1
Reserva	1

El tablero de control y potencia es un elemento clave en el diseño del Sistema Automático de Muestreo de Concentrado, configurado para garantizar la distribución eficiente y segura de la energía a los diferentes componentes del sistema. Según el diseño presentado, el tablero cuenta con una disposición modular que incluye breakers, sistemas de protección, relés, terminales de conexión, y módulos de control programables. Cada sección del tablero está organizada para facilitar el acceso, el mantenimiento, y la operación segura.

Figura 43

Blackplane y componentes internos del tablero de control y potencia



La sección derecha incorpora un panel HMI (Interfaz Hombre-Máquina) para el monitoreo y control en tiempo real, así como breakers adicionales para los circuitos de control, que operan a 110 VAC. Este diseño modular permite una clara segregación entre los sistemas de potencia y control, asegurando un funcionamiento eficiente y facilitando el acceso para operaciones de mantenimiento o inspección. Además, su disposición garantiza el cumplimiento de las normativas eléctricas aplicables, optimizando la seguridad y confiabilidad del sistema en su conjunto.

Figura 44

Vista frontal del tablero de control y potencia

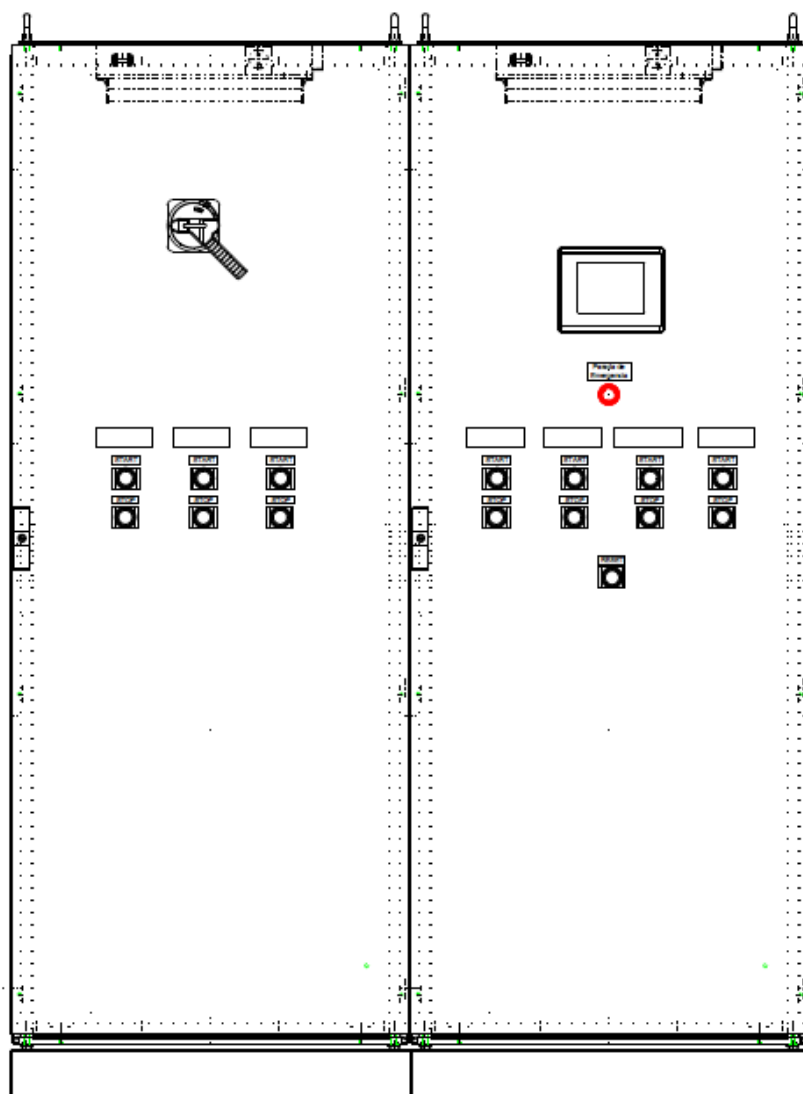
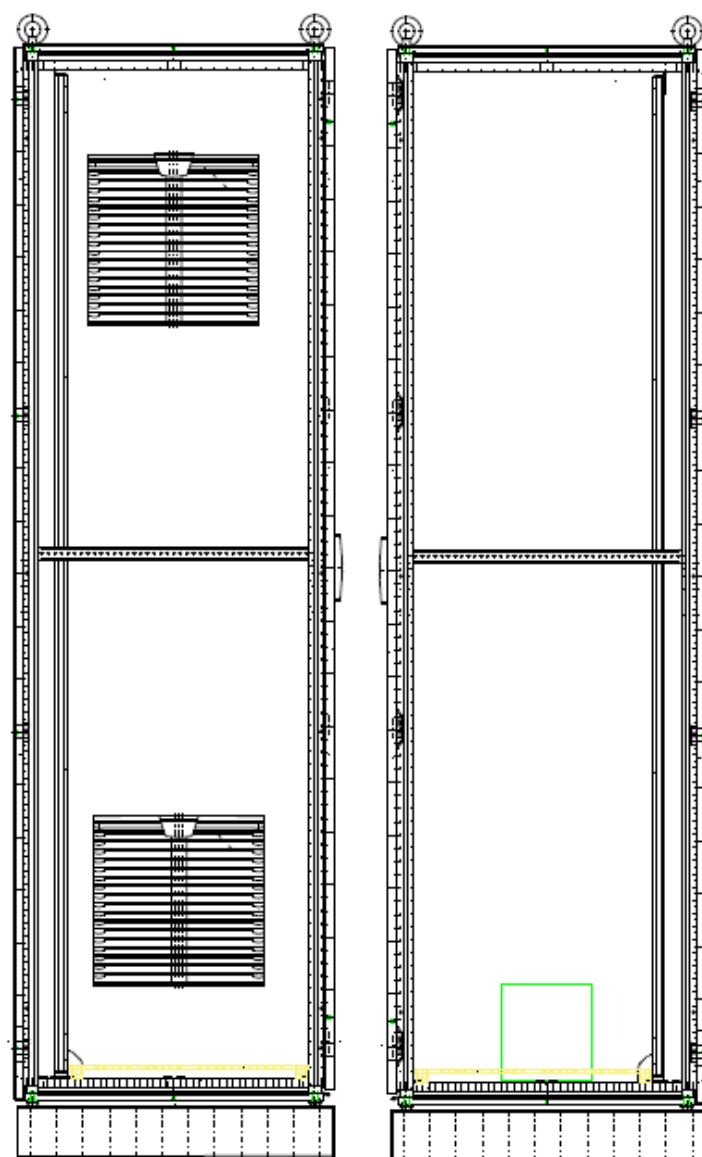


Figura 45

Lado derecho e izquierdo del tablero de control y potencia



3.3.4 Cálculo de la Muestra

El proceso de muestreo se divide en dos fases principales: la fase primaria y la fase secundaria. Cada una de estas etapas cuenta con métodos y condiciones de operación particulares, que deben ajustarse según los flujos operativos de la Faja Principal.

En la fase primaria del proceso de muestreo, el sistema automatizado se encargará de recolectar muestras representativas del material transportado por la Faja Principal. Para ello, se utilizará un muestreador de corte tipo Cross Belt, que extraerá las muestras y las transferirá a través del Chute de descarga hacia la Faja de Alimentación Primaria del sistema. Esta faja tiene como función transportar el material hacia la fase secundaria del proceso.

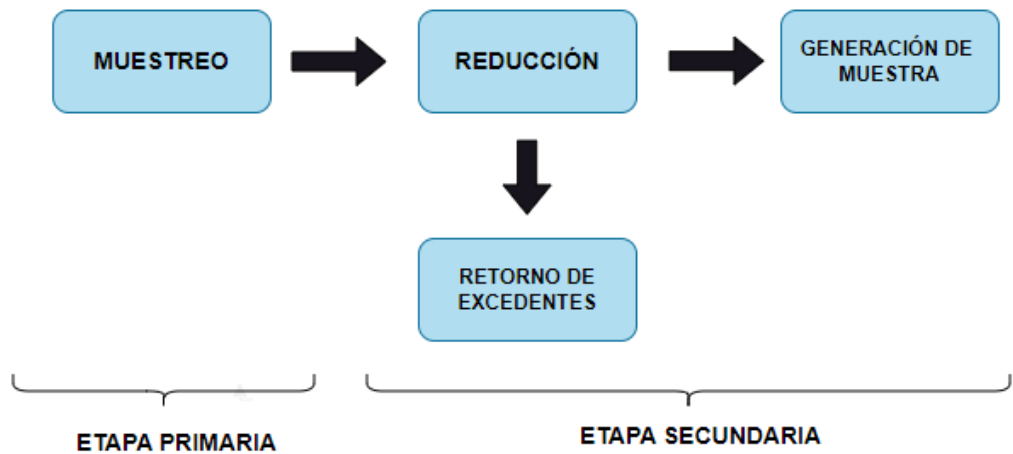
En la fase secundaria, se encuentra el Muestreador Secundario diseñado para reducir el tamaño de las muestras hasta obtener aproximadamente 1kg de concentrado de cobre. Posteriormente, estas muestras serán embolsadas y etiquetadas automáticamente por una embolsadora automática, mientras que el excedente será devuelto a la Faja Principal a través de la Faja de Retorno.

A continuación, se presenta el cálculo para la determinación del número de incrementos primarios(cortes) por sublote que es un aspecto crítico en la obtención de la muestra, ya que asegura que las muestras recolectadas sean estadísticamente representativas del lote total. Este cálculo permite evaluar la homogeneidad del material transportado y minimizar la variabilidad en el análisis, garantizando que los resultados sean confiables y cumplan con las normas como la ISO 12743. Además, optimizar el número de incrementos primarios contribuye a un balance eficiente entre la precisión del muestreo y el uso de recursos

operativos, lo cual es esencial para la calidad y la consistencia del concentrado de cobre

Figura 46

Etapas del proceso



3.3.4.1 Masa del Lote

Es fundamental definir los parámetros del lote. En este caso, el muestreo se realizará sobre un lote diario compuesto por 3000 toneladas de material de cobre, considerando también la velocidad operativa de la Faja Principal.

Tabla 26

Datos del Lote

LOTE	
DESCRIPCIÓN	VALOR
Masa del Lote Diario[T]	3000
Velocidad de la Faja Principal [m/s]	1.5

3.3.4.2 Masa del Sublote

Para facilitar el análisis y lograr una representación precisa del contenido y las propiedades del lote, se ha determinado dividirlo en 12 sublotes, cada uno

con una masa de 250 toneladas de cobre. Esta segmentación permite un análisis más detallado y exacto de cada porción del lote, facilitando la evaluación de sus características. Cada sublote constituye una fracción representativa del lote total y proporciona información clave para respaldar la toma de decisiones.

Tabla 27

Datos del Sublote

SUBLOTE	
DESCRIPCIÓN	VALOR
Número de Sublotes	12
Masa del Sublote[T]	250

3.3.4.3 Abertura del Cortador

Es fundamental establecer las dimensiones de la abertura del cortador o del instrumento de muestreo en función del tamaño nominal máximo de las partículas del concentrado, ya que este parámetro influye en la determinación del número de incrementos.

Según lo especificado en la norma ISO 12743, la abertura del cortador (en un corte transversal) debe ser, como mínimo, de 30 mm. En caso de que existan aglomerados superiores a este tamaño, la abertura deberá ser tres veces el tamaño nominal máximo de las partículas del concentrado. Por lo tanto, se ha definido que la apertura de la cuchara para los muestreadores primario y secundario será de 150 mm.

Tabla 28*Medidas de abertura del cortador*

ABERTURA DEL CORTADOR	
DESCRIPCIÓN	VALOR
Muestreador Primario[mm]	150
Muestreador Secundario[mm]	150

La abertura en el cortador primario y en el secundario debe ser idéntica para garantizar la obtención de muestras uniformes y representativas, lo que contribuye a una mayor precisión en los análisis. Asimismo, mantener esta medida estandarizada asegura que los resultados obtenidos sean consistentes y comparables, aspecto clave para evaluar de manera confiable la calidad del concentrado de cobre.

Definido el lote, sublote y de acuerdo con la teoría del muestreo para determinar el **número de incrementos primarios por sublote** es fundamental determinar la varianza total, varianza analítica, la varianza entre incrementos primarios y la varianza de procesamiento de muestra

3.3.4.4 Varianza Total (S_T^2)

Para garantizar la precisión y confiabilidad en la determinación del contenido de concentrado de cobre, el esquema de muestreo debe minimizar las fuentes de error en todas sus etapas, desde la recolección primaria hasta el análisis final. Basándose en los datos experimentales obtenidos y siguiendo las directrices de la norma, se ha calculado la varianza total del proceso, un indicador clave que refleja el nivel de control alcanzado en la representatividad de las muestras y la consistencia de las mediciones realizadas. Este valor proporciona una medida estadística esencial para validar la calidad del muestreo y asegurar la conformidad del concentrado con los estándares establecidos

Tabla 29*Varianza total*

VARIANZA TOTAL	
DESCRIPCIÓN	VALOR
$S_T[\%]$	0.04

3.3.4.5 Varianza Analítica (S_A^2)

La varianza analítica es un parámetro experimental que se calcula procesando muestras duplicadas y evaluando las características de calidad, en cumplimiento con los lineamientos establecidos por la norma ISO 12744 (NTP-ISO 12743).

El valor presentado en la tabla refleja una baja variabilidad en el proceso analítico empleado para evaluar las muestras representativas del concentrado de cobre. Esto indica que el método de muestreo utilizado es altamente preciso y confiable, asegurando consistencia en los resultados obtenidos

Tabla 30*Varianza Analítica*

VARIANZA ANALÍTICA	
DESCRIPCIÓN	VALOR
$S_A[\%]$	0.02

3.3.4.6 Determinación de la varianza entre incrementos primarios ($S_{b_1}^2$)

Es una medida de la variación de los resultados de tamaño de partícula obtenidos en cada uno de los incrementos primarios en una muestra de concentrado de cobre, y se utiliza para evaluar la homogeneidad de la muestra y la confiabilidad de los resultados obtenidos; de acuerdo a eso se tiene:

Tabla 31

Varianza entre incrementos primarios

VARIANZA ENTRE INCREMENTOS	
DESCRIPCIÓN	VALOR
$s_{b_1}[\%]$	0.04

El valor presentado en la tabla revela que la dispersión de los valores individuales de concentración de cobre en la muestra es relativamente baja en comparación con el límite del 0.05 % establecido en la norma ISO 12743 (página 21). Esto indica que los valores de concentración están menos dispersos y más próximos al promedio, lo cual es un indicador positivo de precisión y consistencia en el proceso de muestreo y análisis. Este nivel de control estadístico asegura que las mediciones sean confiables y representativas de las características del lote analizado.

3.3.4.7 Determinación de la varianza de procesamiento de muestra (S_p^2)

La varianza de procesamiento de muestra, al igual que la varianza analítica, es un parámetro obtenido experimentalmente que refleja la variabilidad inherente al proceso de preparación y acondicionamiento de las muestras antes de su análisis. Este tipo de variabilidad surge de factores como las técnicas

empleadas, las condiciones de operación y los equipos utilizados durante el procesamiento.

Tabla 32

Varianza de procesamiento de muestra

VARIANZA DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA	
DESCRIPCIÓN	VALOR
S_p [%]	0.05

El valor registrado indica que la preparación y el manejo de las muestras generan una variabilidad que contribuye a la varianza total observada en los resultados del análisis del concentrado de cobre. Un valor más bajo en este parámetro señala una menor incidencia de la variabilidad del procesamiento en los resultados finales, lo que se traduce en una mayor precisión y confiabilidad en la evaluación del contenido del lote. Este control estadístico es esencial para garantizar que el muestreo cumpla con los estándares de calidad y representatividad definidos por las normas internacionales

3.3.4.8 Cálculo de la cantidad de incrementos primarios (n_1)

La determinación del número de **incrementos primarios requeridos por lote** se realizó utilizando el método simplificado descrito en la norma ISO 12743 (página 15), diseñado específicamente para evaluar la calidad del concentrado de cobre. Este enfoque metodológico considera parámetros clave del proceso de muestreo, como la representatividad estadística y las características físicas del material, para garantizar que las muestras recolectadas sean consistentes y cumplan con los estándares de precisión requeridos. En base a esta metodología, se empleó la siguiente fórmula:

$$S_T^2 = \frac{s_{b_1}^2}{n_1} + \frac{s_p^2}{k} + \frac{s_A^2}{rk} \quad (1)$$

Donde:

k : cantidad de sub-lotes.

r : análisis repetidos.

Despejamos n_1 en la ecuación (1) y reemplazamos los valores obtenidos de las varianzas:

$$n_1 = \frac{s_{b_1}^2}{S_T^2 - \frac{s_p^2}{k} - \frac{s_A^2}{rk}} \quad (2)$$

Donde:

$$s_{b_1} = 0.4$$

$$s_A = 0.02$$

$$s_p = 0.05$$

$$s_T = 0.04$$

$$k = 12$$

$$r = 2$$

$$n_1 = 116.4 \quad (3)$$

De acuerdo con la Norma (ISO 12743, página 27) se procede a determinar el **intervalo de muestreo**, donde el intervalo entre incrementos primarios para el muestreo con base a masa se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta m \leq \frac{m_L}{n_1} \quad (4)$$

Donde:

Δm = intervalo de masa entre los incrementos primarios, en toneladas

m_L = masa del lote, en toneladas.

n_1 = número de incrementos primarios por lote

$$\Delta m \leq \frac{3000}{116.4}$$

$$\Delta m \leq 25.77 \text{ T}$$

De acuerdo con la norma el valor lo redondeamos a la tonelada más cercana, en este caso a 25 toneladas, para asegurar que el número de incrementos primarios sea mayor que el número requerido, donde por cada sublote de 250 Tmh se realizarán **10 cortes** con intervalos de 25Tmh, eso quiere decir que, se realizaran 10 muestras por cada sublote de 250 toneladas.

3.3.4.9 Análisis de datos históricos del Flujo de Concentrado

El análisis de los datos históricos del flujo de concentrado transportado por la faja principal es una etapa clave en el desarrollo del sistema de muestreo automatizado. Este análisis permite comprender el comportamiento operativo del flujo másico, identificar patrones de variabilidad y evaluar las condiciones que podrían afectar la representatividad de las muestras recolectadas. En el contexto de la minería, donde la calidad del concentrado de cobre es crítica para las operaciones productivas, contar con un flujo estable y un sistema de muestreo ajustado a las condiciones reales es esencial para cumplir con los estándares internacionales de calidad y seguridad.

Tabla 33

Parte de la data recopilada del flujo de concentrado en el periodo 2022-2023

FECHA	TONELADAS PROCESDAS (TpH)
01-Ene-22 00:00:01	0.0144313
01-Ene-22 00:01:01	0.015457222
01-Ene-22 00:02:01	0.016483143
01-Ene-22 00:03:01	0.017509066
01-Ene-22 00:04:01	0.018534988
01-Ene-22 00:05:01	0.019560909
01-Ene-22 00:06:01	0.020586831
01-Ene-22 00:07:01	0.021612752
01-Ene-22 00:08:01	0.022638675
01-Ene-22 00:09:01	0.023664596
01-Ene-22 00:10:01	0.024690518
01-Ene-22 00:11:01	0.025716441
01-Ene-22 00:12:01	0.026742361
01-Ene-22 00:13:01	0.027768284
01-Ene-22 00:14:01	0.028794205
01-Ene-22 00:15:01	0.029820127
01-Ene-22 00:16:01	0.030846048
01-Ene-22 00:17:01	0.031871971
01-Ene-22 00:18:01	0.032897893
01-Ene-22 00:19:01	0.033923816
01-Ene-22 00:20:01	0.034949735
01-Ene-22 00:21:01	0.035975657
01-Ene-22 00:22:01	0.03700158
01-Ene-22 00:23:01	0.038027503
01-Ene-22 00:24:01	0.039053425
01-Ene-22 00:25:01	0.040079344
01-Ene-22 00:26:01	0.041105267

El objetivo principal del análisis de los datos es evaluar la variabilidad y los patrones del flujo másico de concentrado transportado por la faja principal, con el propósito de diseñar un sistema de muestreo automatizado que sea representativo, confiable y cumpla con las normativas internacionales.

En este contexto, las tareas para el análisis de los datos históricos del flujo de concentrado son:

- Identificar patrones operativos y variabilidad en el flujo másico para comprender su comportamiento a lo largo del tiempo y su impacto en la representatividad de las muestras.

- Ajustar los parámetros del sistema de muestreo automatizado, asegurando que este cumpla con las normativas internacionales y que las muestras sean confiables y representativas.
- Optimizar el diseño del sistema automatizado frente a las fluctuaciones del flujo, garantizando su robustez operativa y su capacidad de adaptarse a las condiciones reales de operación.
- Proveer información clave para la planificación operativa y la detección temprana de riesgos, asegurando la continuidad y eficiencia del proceso de muestreo.

En el contexto de esta tesis, estas tareas son fundamentales para desarrollar un sistema de muestreo automatizado que cumpla con los estándares de calidad y seguridad en la minería, reduciendo la incertidumbre asociada al muestreo manual y mejorando la calidad del concentrado. Este análisis refuerza la capacidad del sistema para adaptarse a las condiciones dinámicas del flujo másico, garantizando un control efectivo del proceso.

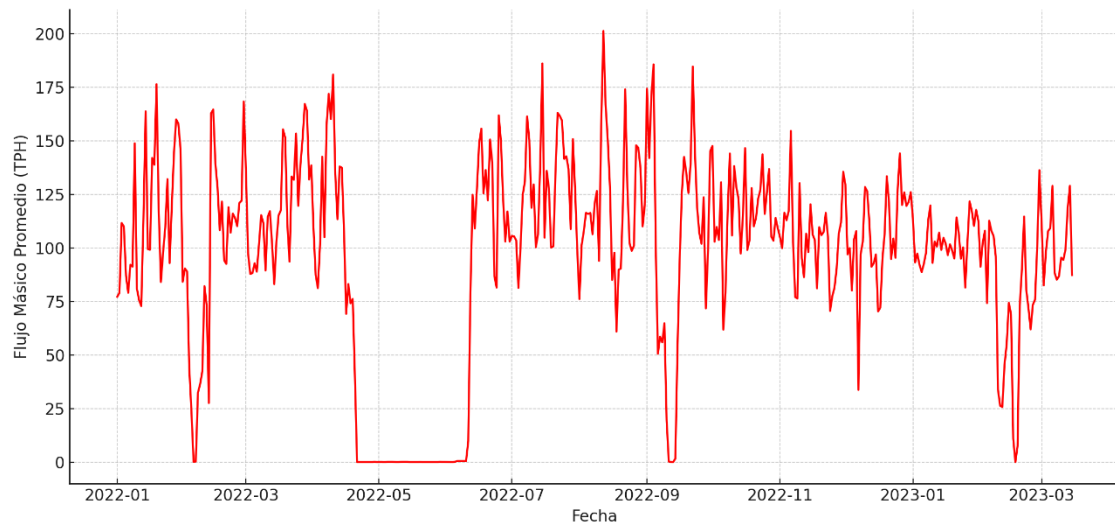
Flujo Másico Promedio Diario: muestra las tendencias promedio del flujo másico en toneladas por hora, destacando períodos de estabilidad y fluctuaciones.

- El flujo promedio diario presenta variaciones significativas durante el período de enero de 2022 a marzo de 2023.
- Existen períodos de estabilidad, pero también varios momentos donde el flujo promedio cae abruptamente, probablemente debido a mantenimientos, interrupciones o cambios operativos.
- Los descensos en el flujo (ceranos a 0) indican que la faja principal estuvo inactiva en varias ocasiones.

- Esto puede reflejar paradas planificadas o fallas operativas

Figura 47

Flujo Másico promedio diario – Faja Principal alimentación de Cu

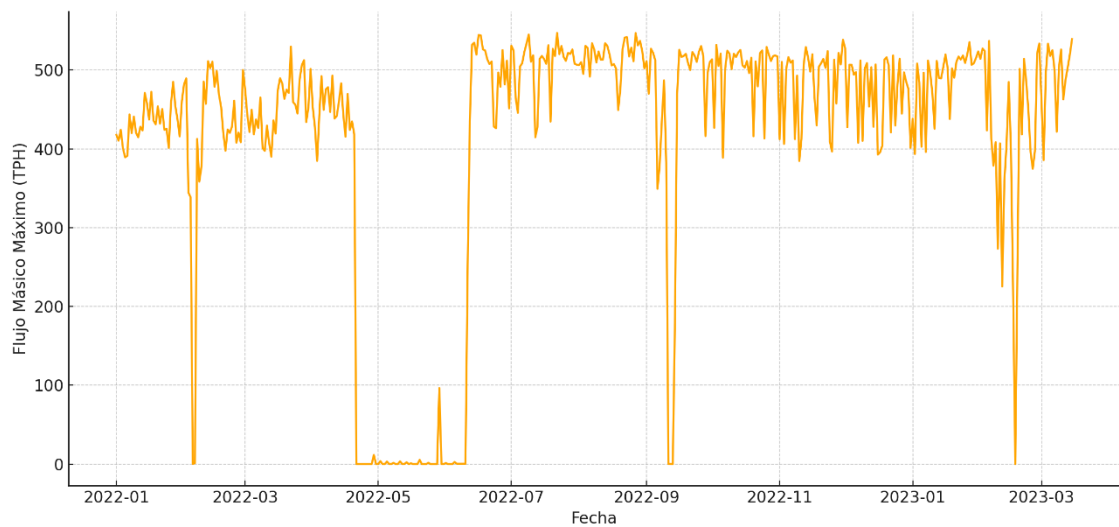


Flujo Másico Máximo Diario: Representa los valores máximos registrados diariamente, revelando picos en ciertos días.

- El gráfico muestra los picos diarios más altos de flujo másico, los cuales son relativamente consistentes en los períodos de operación activa.
- Los valores máximos se acercan a 500 TPH, lo que indica una alta capacidad de la faja principal durante los períodos de operación continua
- Existen momentos donde los valores máximos también descienden abruptamente, alineados con los períodos de interrupción observados en el flujo promedio.
- Esto refuerza la idea de eventos de parada operativa o interrupciones no planificada

Figura 48

Flujo Máximo diario – Faja Principal alimentación de Cu

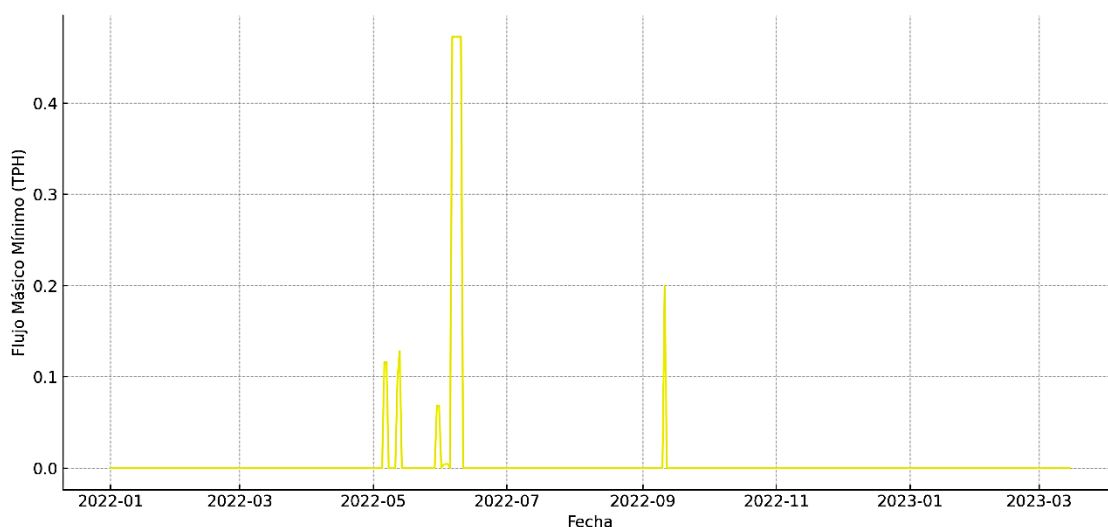


Flujo Másico Mínimo Diario: Presenta los valores mínimos diarios, los cuales destacan los momentos de flujo reducido o interrupciones

- El flujo mínimo diario permanece cercano a cero durante largos períodos, lo que sugiere que hubo numerosos días en los que la faja estuvo completamente inactiva.
- Los pocos picos observados en el flujo mínimo podrían indicar eventos donde el flujo fue marginal pero no totalmente interrumpido.
- La gran cantidad de días con flujo mínimo en cero destaca períodos prolongados de parada total en la operación.

Figura 49

Flujo Másico Mínimo diario – Faja Principal alimentación de Cu



En consecuencia, se determinó que es **imprescindible implementar un sistema de muestreo automatizado con la capacidad de ajustarse dinámicamente a las variaciones del flujo másico del concentrado de cobre que circula por la Faja Principal**. Este sistema debe operar en tiempo real para adaptarse a los cambios en las condiciones operativas, como fluctuaciones de flujo, interrupciones y picos de actividad, asegurando así la representatividad y calidad de las muestras recolectadas.

Debido a la variabilidad del flujo de concentrado de la Faja Principal encontrado en el análisis de los datos, el **flujo mínimo** de operación del sistema se determinará en base a que se requiere 01 Kg de muestra o de concentrado de cobre por incremento(corte), de acuerdo con la norma ISO 12743 se tiene la siguiente formula:

$$m_I = \frac{G \cdot A}{3,6 \cdot V_b} \quad (5)$$

Donde:

- m_I la masa por incremento, en kilogramos;
G la relación del flujo de la corriente de concentrado, en toneladas por hora;
A la apertura del muestreador, en metros:
 V_b la velocidad de la corriente de concentrado, en metros por segundo.

Reemplazando los siguientes valores en la formula:

$$m_{Ip} = 01 \text{ kg};$$

G = Flujo mínimo de operación;

$$A = 0.15 \text{ m};$$

$$V_b = 1.5 \text{ m/s}.$$

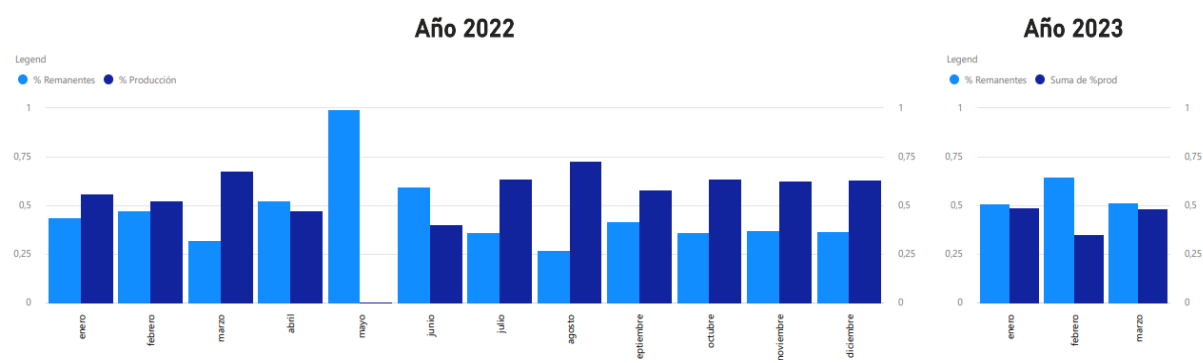
Se establece que el **flujo mínimo** de operación para la Faja Principal es de **25 T/h**, umbral por debajo del cual el sistema automático de muestreo no puede garantizar la obtención de al menos 1 kg de muestra por incremento. Los flujos inferiores a este límite se clasifican como **Flujos Remanentes**, asociados a períodos de baja actividad, interrupciones o transiciones que no contribuyen de manera significativa al proceso operativo. En contraste, los flujos iguales o superiores a 25 T/h se consideran **Flujos de Operación**, ya que cumplen con el requisito mínimo de 1 kg de muestra por incremento, asegurando la representatividad del muestreo. Esta clasificación resulta fundamental para configurar y validar el sistema automatizado, permitiendo diferenciar entre condiciones operativas óptimas y aquellas que podrían comprometer la calidad y confiabilidad de las muestras recolectadas.

En el siguiente gráfico, se muestra los porcentajes de flujos remanentes y de flujos de operación de cada mes del año 2022 y de los tres primeros 03 meses

del año 2023, donde se indica que el sistema operará para los flujos de producción y permanecerá en stand by para los flujos remanentes.

Figura 50

Porcentajes de flujos remanentes y de producción mensual en el año 2022 y 2023



Además, se puede observar el porcentaje de incidencia del rango operativo de los flujos de acuerdo con la data analizada.

Tabla 34

Porcentaje de rangos de flujo de trabajo

FLUJO[T/h]		PORCENTAJE
DESDE	HASTA	
0	1	44.68%
1	37	12.91%
37	50	0.40%
50	100	1.25%
100	150	3.93%
150	200	21.92%
200	250	5.86%
250	300	1.21%
300	350	3.59%
350	400	4.15%
400	450	0.74%
450	500	0.34%
500	550	0.26%

Tabla 35*Porcentaje de incidencia de flujos operativos*

FLUJO DE OPERACIÓN [T/h]		PORCENTAJE
DESDE	HASTA	
25	550	42.41%

Basándonos en la información proporcionada, se puede concluir que el rango de flujos que debe considerarse para el cálculo de las variables en el sistema automático de muestreo de concentrado en la Faja Principal abarca desde las 25 toneladas por hora (T/h) hasta las 550 toneladas por hora (T/h). Este rango de flujos establece los límites entre los cuales el sistema automático de muestreo de concentrado debe ser capaz de funcionar de manera efectiva y precisa. El sistema debe estar diseñado y configurado para manejar el muestreo dentro de este rango, capturando de manera representativa las muestras del concentrado en función de los flujos de producción.

3.3.4.10 Balance de masa para el Sistema Automático de Muestreo

El balance de masa en las etapas primaria y secundaria del Sistema Automático de Muestreo es fundamental para garantizar que las muestras recolectadas sean representativas y cumplan con los estándares internacionales. Utilizando el número de incrementos(cortes) por sublote, junto con los flujos másico mínimo, máximo y nominal, es posible realizar un análisis preciso que permita ajustar el sistema para obtener una masa final de 1 kg en la etapa secundaria.

A partir del análisis de los flujos calculados (ver Tabla 36), se determinó que el flujo nominal del sistema es de 150 T/h, dado que presenta el mayor porcentaje de incidencia en los rangos de flujo de trabajo. Este valor, junto con

los flujos mínimos y máximos de trabajo, representa las condiciones operativas críticas para el diseño y la validación del sistema. Unos de los fabricantes del sistema proporcionaron una hoja de cálculo que permite realizar el balance de masa introduciendo parámetros clave como el flujo másico, la frecuencia de muestreo, la apertura de la cuchara del muestreador y la velocidad de corte. Los datos de entrada esenciales utilizados en esta herramienta son los siguientes:

Tabla 36

Parámetros de entrada para el Balance de masa

TABLA DE PARAMETROS - BALANCE DE MASA		UND.	MUESTREO CON 2 ETAPAS		
			MIN.	NOM.	MAX.
1	Flujo	TPH	100	150	250
2	Sub lote	ton	250	250	250
3	Frecuencia mass based	ton	25	25	25
4	Numero de incrementos	N°	10	10	10
5	Frecuencia corte	min	15	10	6
6	Velocidad de la correa	m/seg	1.5	1.5	1.5
7	Turno	hrs	6	6	6
8	Lote final	TON	1500	1500	1500

El sistema de muestreo primario opera con una velocidad de corte constante de 2.3 m/s, lo que garantiza la uniformidad en la recolección del material. La apertura de la cuchara, que define el volumen del material recolectado por cada corte, varía entre 150 mm y 100 mm, afectando directamente la cantidad recolectada. **La frecuencia de corte se ajusta según el flujo, con incrementos cada 25 toneladas procesadas o a intervalos de tiempo que oscilan entre 6 y 15 minutos**, dependiendo del escenario operativo. Para completar un lote, el sistema realiza 60 cortes, recolectando una muestra primaria por corte de entre 2.8 kg (mínimo), 4.2 kg (nominal) y 4.6 kg (máximo), acumulando en cuatro cortes masas de 11.1 kg, 16.7 kg y 18.5 kg, respectivamente. La masa primaria total por lote, un resultado crítico para evaluar la representatividad, varía entre 666.7 kg en condiciones mínimas, 1,000

kg en condiciones nominales, y hasta 1,111.1 kg en condiciones máximas, cumpliendo con los estándares necesarios para garantizar la calidad y representatividad de las muestras recolectadas.

Tabla 37

Parámetros calculados de la etapa primaria del sistema

TABLA DE PARAMETROS - BALANCE DE MASA		UND.	MUESTREO CON 2 ETAPAS		
			MIN.	NOM.	MAX.
9	MUESTREADOR PRIMARIO				
10	Velocidad de corte	m/seg	2.3	2.3	2.3
11	Abertura Cuchara	m	0.150	0.150	0.100
12	Frecuencia de corte por peso	ton	25.0	25.0	25.0
13	Frecuencia de corte por tiempo	min	15.0	10.0	6.0
14	Número de cortes por Lote	N	60.0	60.0	60.0
15	Muestra Primaria	kg	2.8	4.2	4.6
16	Cortes del primario	N°	4.0	4.0	4.0
17	Muestra Primaria / 4 Corte	kg	11.1	16.7	18.5
18	Muestra Primaria / Lote	kg	666.7	1000.0	1111.1

La faja de alimentación primaria es fundamental en el balance de masa del sistema de muestreo automático, ya que transporta el material hacia el muestreador secundario bajo parámetros clave que aseguran la representatividad del proceso. Opera con una densidad constante del mineral de 2.30 ton/m³ y un ancho de faja de 14 pulgadas, mientras que su velocidad nominal varía entre 6.00 cm/s (mínimo), 8.00 cm/s (nominal) y 10.00 cm/s (máximo), alcanzando un flujo másico de 0.32 kg/s, 0.40 kg/s y 0.43 kg/s, respectivamente. La altura de la cama ajustada a 50 mm define un área transversal de la faja de 88.90 cm² (mínimo) a 107.30 cm² (máximo), lo que, junto con un tiempo total de descarga entre 34.72 y 57.86 segundos, garantiza un flujo continuo de material. Bajo condiciones nominales, la faja permite un flujo de mineral al final de la correa de 1.31 TPH, siendo este un parámetro crítico para asegurar un suministro uniforme y representativo al sistema secundario.

Tabla 38

Parámetros calculados de la Faja de Alimentación Primaria

TABLA DE PARAMETROS - BALANCE DE MASA		UND.	MUESTREO CON 2 ETAPAS		
			MIN.	NOM.	MAX.
21	FAJA DE ALIMENTACIÓN PRIMARIA				
22	Densidad	ton/m ³	2.30	2.30	2.30
23	Ancho	pulg	14.00	14.00	14.00
24	Velocidad Nominal	cm/seg	6.00	6.00	6.00
25	% Operación variador	%	50.00	50.00	50.00
26	Velocidad Operación	cm/seg	3.00	3.00	3.00
27	Altura Cama (ajuste con la cuchilla)	mm	50.00	50.00	50.00
28	Área de Transversal de la cama	cm ²	88.90	88.90	88.90
29	Flujo masico en correa	kg/seg	0.32	0.32	0.32
30	Tiempo total descarga	seg	34.72	52.08	57.86
31	Largo del Corte sobre la cinta	cm	104	156	174
32	Largo entre centros correa	mm	8000	8000	8000
33	Tiempo de viaje del corte hasta el final de la cinta	seg	266.67	266.67	266.67
34	Tiempo de caída del corte en el final de la correa	seg	34.72	52.08	57.86
35	Tiempo de seguridad entre cortes prim.	seg	865.28	547.92	302.14
36	Flujo de mineral durante la caída al final de la correa	kg/seg	0.32	0.32	0.32
37	Flujo de mineral durante la caída al final de la correa	TPH	1.15	1.15	1.15

El muestreador secundario complementa el proceso de muestreo asegurando la reducción y representatividad de la muestra recolectada en la etapa primaria. Este opera con una velocidad nominal constante de 39 cm/s, manteniendo un 100% de operación del variador, lo que garantiza la estabilidad durante su funcionamiento. La carrera del cortador es de 42 pulgadas, con un tiempo de recorrido de ida que varía entre 2.74 y 3.58 segundos, dependiendo de las condiciones de operación (mínima, nominal y máxima). Este sistema realiza entre 11.69 y 15.15 cortes preliminares para formar la muestra final, empleando un solo patín instalado con una apertura constante de 150 mm. Cada corte recolecta una masa de 0.12 kg, y el número de cortes finales varía entre 12 y 16, resultando en una masa total secundaria por corte primario de entre 1.48 kg (mínimo) y 1.97 kg (máximo).

Tabla 39*Parámetros calculados en el Muestreador Secundario*

TABLA DE PARAMETROS - BALANCE DE MASA		UND.	MUESTREO CON 2 ETAPAS		
			MIN.	NOM.	MAX.
38	MUESTREADOR SECUNDARIO				
39	Velocidad Nominal	cm/seg	39.00	39.00	39.00
40	% Operación variador	%	100.00	100.00	100.00
41	Velocidad Operación	cm/seg	39.00	39.00	39.00
42	Carrera	pulg	42.00	55.00	55.00
43	Tiempo de recorrido del cortador (ida)	seg	2.74	3.58	3.58
44	Nº cortes preliminar a muestra primaria (ida y vuelta)	Nº	11.69	13.54	15.15
45	Nº patines instalado	Nº	1.00	1.00	1.00
47	Abertura	mm	150.00	150.00	150.00
48	Masa / Corte	kg	0.12	0.12	0.12
49	Nº cortes finales a muestra prim.	Nº	12.00	14.00	16.00
50	Masa Muestra secundaria por corte primario	kg	1.48	1.72	1.97

La envasadora automática desempeña un papel fundamental en la consolidación de las muestras primarias recolectadas, asegurando que cada sublote sea debidamente acumulado y almacenado para su análisis posterior. Según los cálculos obtenidos, el muestreador secundario recolecta una masa secundaria hacia la envasadora de 1.48 kg para flujos de 100 T/h, 1.72 kg para flujos nominales de 150 T/h, y 1.97 kg para flujos máximos de 250 T/h. Dado que se toman 10 incrementos(cortes) por sublote, la masa acumulada resulta en 14.8 kg para flujos de 100 T/h, 17.2 kg para flujos nominales de 150 T/h, y 19.7 kg para flujos máximos de 250 T/h, superando los 10 kg inicialmente planteados en la teoría. Se esperaba recolectar 1 kg por cada incremento, lo que resultaría en 10 kg por sublote; sin embargo, la variabilidad en los flujos de operación y los parámetros técnicos del sistema resultan en una mayor masa recolectada. Además, en un periodo de 6 horas, se acumulan entre 24 y 60 compositos finales, dependiendo del flujo másico y las condiciones del sistema. Este comportamiento evidencia que las **condiciones reales de operación difieren de las expectativas teóricas**, pero aseguran una representatividad adecuada

en cada sublote, alineándose con los estándares de calidad y confiabilidad requeridos para el análisis.

Tabla 40

Masa recolectada por cada sublote

TABLA DE PARAMETROS - BALANCE DE MASA		UND.	MUESTREO CON 2 ETAPAS		
			MIN.	NOM.	MAX.
51	ENVASADORA AUTOMATICA				
52	Masa de muestra primaria x sub lote (Por Bolsa)	kg	14.8	17.2	19.7
53	Numero de Compositos finales acumulados en 6 Hrs	N°	24.0	36.0	60.0

El análisis del sistema de muestreo revela que, aunque se esperaba obtener 1 kg de muestra por cada incremento, lo que debería resultar en un total de 10 kg por sublote, los datos reales demuestran una desviación significativa debido a la variación en los flujos de operación. Los parámetros técnicos proporcionados por el fabricante, combinados con la fluctuación de los flujos másicos, resultaron en masas mayores a las esperadas: 1.48 kg, 1.72 kg, y 1.97 kg por incremento para flujos de 100 T/h, 150 T/h y 250 T/h respectivamente. En consecuencia, la masa total por sublote asciende a 14.8 kg, 17.2 kg, y 19.7 kg en estos mismos escenarios. Este comportamiento pone de manifiesto la importancia de **considerar las variaciones en el flujo másico** durante la configuración del sistema, ya que estas impactan directamente la representatividad y cantidad de muestra recolectada.

La tabla resume las diferencias entre las expectativas teóricas y los resultados reales.

Tabla 41*Masa teórica y real de cada incremento*

Flujo(T/h)	Frecuencia de Corte (min)	Masa por Incremento Esperada(kg)	Masa por Incremento Real(kg)	Masa total Esperada(kg)	Masa Total Real(kg)
100	15	1	1.48	10	14.8
150	10	1	1.72	10	17.2
250	6	1	1.97	10	19.7

Por lo que se concluye que:

- Se ha determinado a partir del cálculo de los parámetros de muestreo el número de incrementos del sistema, lo que permitirá calcular la masa de cada incremento, ya sea que el muestreo se realice **basado en masa o tiempo**. Estos resultados son fundamentales para garantizar una recolección de muestra precisa y representativa en el proceso de muestreo.
- Se concluye, basándose en la norma ISO 10251, que la cantidad mínima de masa de los incrementos que se debe tomar debe ser mayor o igual a 01 kg para garantizar un análisis óptimo de humedad y ley. Esta referencia normativa establece los estándares y directrices para el muestreo de diferentes minerales y concentrados (níquel, plomo, cobre y zinc), y en este caso, se enfoca en la importancia de una cantidad suficiente de muestra para obtener resultados precisos y representativos.
- Basándonos en la información proporcionada, se puede concluir que el rango de flujos que debe considerarse para el cálculo de las variables en el sistema automático de muestreo de concentrado en la faja principal abarca desde las 25 toneladas por hora (T/h) hasta las 550 toneladas por hora (T/h). Este rango de flujos establece los límites entre los cuales el

sistema automático de muestreo de concentrado debe ser capaz de funcionar de manera efectiva y precisa. El sistema debe estar diseñado y configurado para manejar el muestreo dentro de este rango, capturando de manera representativa las muestras del concentrado en función de los flujos de producción.

3.3.5 Automatización del Sistema

La automatización del sistema de muestreo es una de las fases más importantes de este proyecto, ya que permitirá garantizar un control preciso y eficiente de los equipos involucrados. Este proceso se llevará a cabo siguiendo una metodología estructurada que abarca desde la conceptualización hasta la validación final del sistema. Cada etapa ha sido diseñada para asegurar la correcta integración y funcionamiento de los componentes del sistema en un entorno industrial complejo como el de la planta minera.

La propuesta comenzará con el diseño de la arquitectura, donde se definirá cómo se conectarán y comunicarán los diferentes equipos de control, asegurando una estructura lógica y funcional. Posteriormente, se realizará el mapeo de entradas y salidas digitales y analógicas, permitiendo identificar todos los puntos de interacción del sistema y garantizar que los equipos respondan a las señales adecuadas.

Una vez establecido el marco técnico, se procederá al desarrollo de la filosofía de control, en la que se definirán las estrategias y reglas que gobernarán el funcionamiento del sistema. Con esta base, se iniciará la programación de los equipos de control, como PLCs y HMIs, para implementar las lógicas necesarias que garanticen el desempeño esperado.

A continuación, se llevará a cabo la integración de los equipos de control, asegurando que cada componente funcione en conjunto de manera sincronizada y eficiente. Este proceso será validado mediante la realización de pruebas SAT (Site Acceptance Test), donde se verificará el correcto funcionamiento del sistema en el sitio de instalación.

Finalmente, se realizarán pruebas con carga, simulando condiciones reales de operación para garantizar que el sistema de automatización cumpla con los requerimientos de diseño y se adapte al entorno operativo. Esta secuencia de actividades no solo asegura un desarrollo ordenado y consistente, sino que también permite identificar y resolver posibles problemas antes de la puesta en marcha final.

Con este enfoque integral, la automatización del sistema de muestreo será un pilar clave para mejorar la eficiencia, confiabilidad y seguridad del proceso, alineándose con los objetivos del proyecto.

3.3.5.1 Diseño de la Arquitectura

La arquitectura presentada corresponde al Sistema Automático de Muestreo, diseñado para garantizar una operación eficiente y centralizada de los equipos involucrados en el proceso de muestreo. Este diseño está basado en una red de comunicación Ethernet/IP, que conecta todos los dispositivos clave del sistema, permitiendo un intercambio de datos rápido y confiable.

HMI (Interfaz Hombre-Máquina): Proporciona una interfaz visual para monitorear y controlar el sistema en tiempo real.

PLC (Controlador Lógico Programable): Actúa como el cerebro del sistema, ejecutando las lógicas de control y gestionando las señales de entrada y salida.

Balanza Principal: Equipo existente que realiza mediciones precisas del flujo de material durante el proceso de muestreo.

Balanza Láser: Complementa las mediciones del flujo, mejorando la precisión y confiabilidad del sistema.

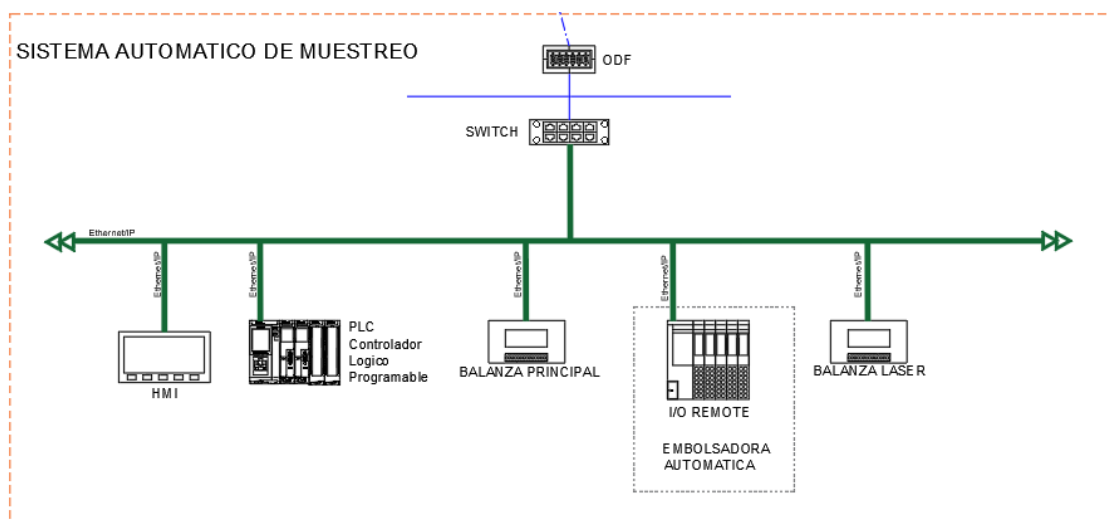
I/O Remoto: Maneja las señales de entrada y salida de equipos periféricos como la embolsadora automática.

Switch Ethernet: Centraliza la comunicación entre todos los equipos conectados en la red Ethernet/IP.

ODF (Optical Distribution Frame): Permite la conexión del sistema a redes externas mediante fibra óptica, garantizando una transferencia de datos eficiente.

Figura 51

Arquitectura del Sistema de Muestreo



3.3.5.2 Selección de Equipos

Controlador Lógico Programable (PLC):

- Marca: Rockwell Automation

- PLC o PAC de alto rendimiento y diseño modular, adaptado para aplicaciones complejas y expansibles.
- Capacidad de memoria mínima de 2 MB para programas y 6.5 MB para datos, con la opción de incluir una tarjeta de memoria externa para almacenamiento adicional.
- Interfaz Ethernet/IP embebida, que permite la integración y comunicación eficiente en redes industriales.
- Soporte para protocolos de comunicación estándar como Profibus DP y Modbus TCP, asegurando una integración fluida con el DCS y otros sistemas de control.

Módulos Digitales-Analógicos:

- Módulos equipados con 02 interfaces Ethernet/IP, configurables para operar como maestro o esclavo según los requisitos definidos en el diagrama de red.
- Entradas y salidas digitales y analógicas configurables, que pueden integrarse en el mismo backplane del controlador principal o instalarse en una estación remota con comunicación Ethernet/IP.
- Reserva del 25% de I/O digitales y analógicos, garantizando flexibilidad para futuras expansiones o modificaciones del sistema.

HMI:

- Pantalla Panel View de la marca Rockwell Automation de 22", diseñada para facilitar la interacción y supervisión del sistema de muestreo.

- Alimentación eléctrica de 110 VAC/60 Hz, adaptada a las especificaciones energéticas de la planta.
- Comunicación mediante protocolo Ethernet/IP, asegurando una integración eficiente en la red de control.
- Grado de protección **IP65**, garantizando resistencia al polvo y a salpicaduras de agua, adecuado para entornos industriales exigentes.
- Instalación en una ubicación estratégica y segura, que minimice riesgos para el operador y facilite el control y monitoreo del sistema.

Balanza Laser

- Capacidad para medir volumen, masa y altura del material en la Faja Principal de forma continua, activando el inicio del proceso de muestreo.
- Instalación ubicada aguas arriba del Sistema de Muestreo, optimizando la detección y monitoreo del material antes de su procesamiento.
- Señal de salida configurable en rangos de 4-20 mA, o mediante protocolos de comunicación industrial como Ethernet/IP.
- Precisión de medición garantizada del 3%, asegurando confiabilidad en los datos generados para el control del sistema.
- Alimentación eléctrica compatible con 220/110 VAC, adaptándose a los requerimientos energéticos de la planta.

Switch:

- Incluye 01 switch industrial de la marca CISCO administrable de capa 3, diseñado para gestionar comunicaciones avanzadas en entornos industriales.

- Compatible con protocolos de comunicación como Ethernet/IP, y capaz de ser administrado remotamente para facilitar la gestión y monitoreo
- Equipado con al menos 8 puertos RJ45 10/100/1000BASE-T y 2 puertos SFP con capacidades de 1Gb/2.5Gb y/o 10Gb, con la posibilidad de ampliar el número de puertos según las necesidades del sistema.
- Diseño para montaje en riel DIN, permitiendo una instalación segura y eficiente dentro del tablero de control.

3.3.5.3 Mapeo de Entradas/Salidas Digitales-Analógicas

El mapeo de entradas y salidas digitales y analógicas es una etapa fundamental en el diseño de la automatización del Sistema Automático de Muestreo de Concentrado. Este proceso permite identificar y documentar todas las señales que interactúan con los diferentes componentes del sistema, asegurando una comunicación eficiente y precisa entre los equipos de campo y los controladores principales.

Las entradas digitales (DI) y analógicas (AI) corresponden a las señales que el sistema recibe de sensores y dispositivos, proporcionando información clave como posición, estado, flujo y densidad del material. Por otro lado, las salidas digitales (DO) y analógicas (AO) permiten al sistema enviar comandos a equipos como válvulas, motores y actuadores para controlar el proceso de muestreo de manera eficiente.

Este mapeo no solo facilita la integración de los dispositivos al controlador lógico programable (PLC), sino que también asegura que el diseño del sistema sea claro y funcional, permitiendo un control completo desde el HMI y el SCADA.

Además, el mapeo se realiza considerando un 25% de reserva en las señales de E/S, asegurando flexibilidad para futuras expansiones o modificaciones en el sistema.

El resultado de este proceso es un esquema detallado que sirve como base para la programación, configuración y pruebas del sistema, garantizando la confiabilidad y operatividad del sistema automatizado.

Tabla 42

Mapeo de Señales

Tipo de señal	Descripción	Protocolo o Tipo de señal	Ubicación
DI	Sensor de posición de la cuchara de muestreo	24VDC	Muestreador Primario
DI	Sensor de puerta abierta/cerrada	24VDC	Chute de Descarga
DI	Para de emergencia	24VDC	Faja de alimentación Primaria
DI	Sensor de posición de la cuchara secundaria	24VDC	Muestreador Secundario
DI	Sensor de desplazamiento del carro	24VDC	Muestreador Secundario
DI	Sensor de nivel de film en porta bobina	24VDC	Embolsadora Automática
DO	Activación del motovibrador	24VDC	Chute de Descarga
DO	Control de compuerta de inspección	24VDC	Chute de Descarga
DO	Activación de motovibradores de chute	24VDC	Muestreador Secundario
DO	Activación de alarma de final de muestra	24VDC	Embolsadora Automática
DI	Velocidad de la faja principal	4-20 mA	Muestreador Primario
DI	Señal de densidad del material	4-20 mA	Faja de Alimentación Primaria
DI	Medición de flujo del material en el chute	4-20 mA	Chute de Descarga
DO	Control de velocidad de la Faja de Alimentación Primaria	Ethernet/IP	Faja de Alimentación Primaria
DO	Control del servomotor de arrastre	Ethernet/IP	Embolsadora Automática
DO	Control de frecuencia del Muestreador	Ethernet/IP	Muestreador Primario

3.3.5.4 Filosofía de Control

La filosofía de control del Sistema Automático de Muestreo de Concentrado establece los principios fundamentales que guiarán el diseño, la configuración y la operación del sistema de automatización. Su propósito es garantizar un control eficiente, seguro y confiable de todos los procesos involucrados, desde la toma de muestras en el muestreador primario hasta el embolsado automático en la etapa final.

Esta filosofía se basa en la integración de equipos a través de un controlador lógico programable (PLC) que actúa como núcleo del sistema, coordinando las señales digitales y analógicas provenientes de sensores, actuadores y otros dispositivos.

Además, se asegura la interacción fluida entre el sistema de control y el HMI/DCS, permitiendo la supervisión en tiempo real y la capacidad de realizar ajustes según las necesidades operativas.

A continuación, se muestran las principales etapas del ciclo de muestreo:

Toma de la muestra:

- El sistema deberá verificar que todos los accionamientos involucrados del muestreador primario se encuentren en automático y sin falla.
- La Balanza Laser que se encuentra a aguas arriba del muestreador deberá detectar el flujo en la Faja Principal y que sea mayor a 25T/h para iniciar el proceso.
- El muestreador primario, la faja de alimentación principal, el muestreador secundario y la embolsadora automática se deberán encontrar en modo automático y sin falla.

- Si algún accionamiento no cumple estas condiciones iniciales de operación, se enviará un mensaje al operador para que revise el problema.
- En caso contrario, se inicia la toma de muestras, se realizarán 10 incrementos por cada sublote de 250 toneladas. En el muestreador primario el número de cortes en cada incremento y la frecuencia de muestreo, entre otros parámetros, se determinarán en función del tipo de método de muestreo utilizado, ya sea basado **en masa o en tiempo**.
- Si durante el proceso ocurre alguna falla, el sistema pausará y generará una alarma. Una vez resuelto el problema, el operador deberá comandar un reinicio de la fase para que continúe.

Transporte de la muestra:

- Las muestras son depositadas mediante el chute de descarga a la faja de alimentación primaria.
- El regulador de cama automático deberá uniformizar el concentrado de acuerdo a la cantidad de masa tomada por cada incremento.
- La velocidad de la faja será determinada por el PROVEEDOR del sistema de muestreo.

Reducción de la muestra:

- El muestreador secundario deberá estar disponible, en automático y sin falla para recibir la muestra.
- Se tomarán la cantidad de cortes de acuerdo con la hoja de cálculo que proporcionó el Proveedor del sistema con el objetivo de obtener 01kg de muestra final como mínimo

Envasado y Etiquetado:

- La embolsadora se encargará de llevar a cabo el envasado de la muestra final. **Para preservar la humedad de la muestra**, el sistema se asegurará de sellar la bolsa, esto evitará que la humedad se escape o se vea afectada por factores externos como el aire o la sequedad del entorno.
- El sistema mostrará un mensaje al operador indicándole que las muestras fueron empaquetadas y etiquetadas de manera satisfactoria.
- Las muestras finales generadas deberán ser etiquetadas, asignándole un número único, correlativo y deberán contener la siguiente información:
 - Sub-Lote
 - ID
 - Status
 - Hora de Muestreo

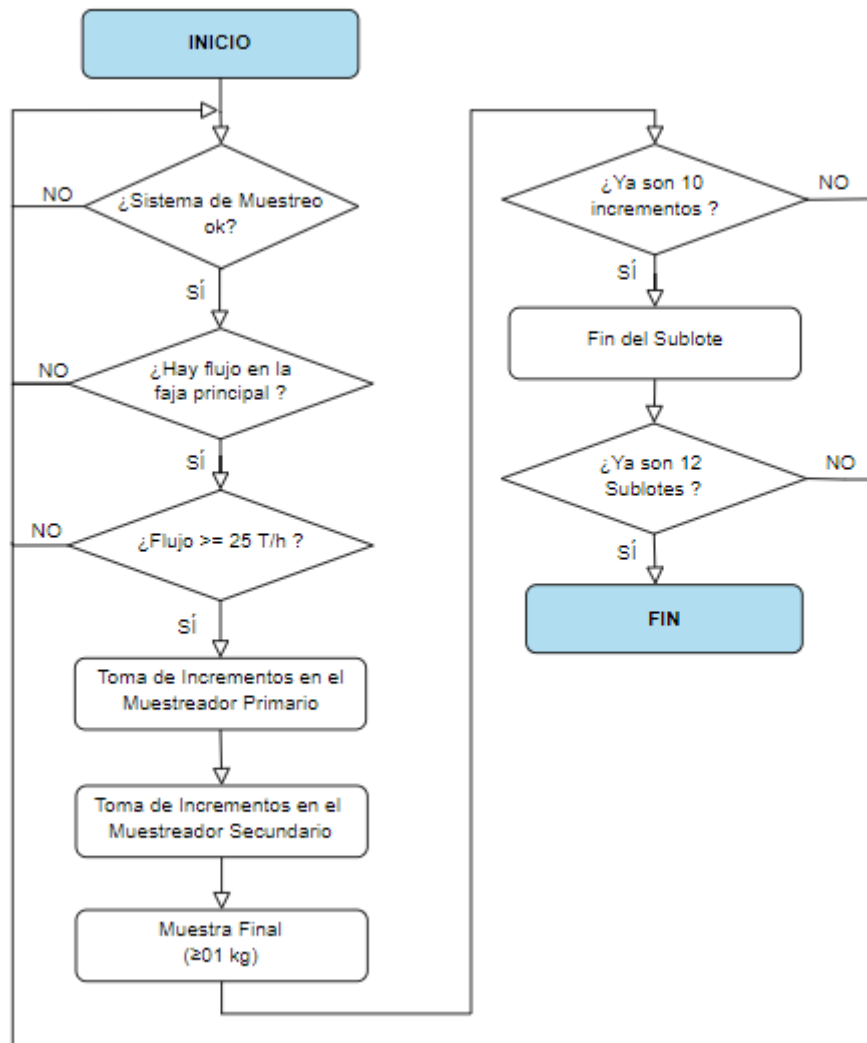
Retorno de Excedentes:

- Una vez obtenida la muestra final, el sistema se encarga de gestionar el excedente restante, el cual es retornarlo a la Faja Principal.

El ciclo de muestreo se repetirá para los 10 incrementos de cada uno de los 12 sublotes correspondiente al lote.

Figura 52

Diagrama de flujo para la toma de muestras del sistema



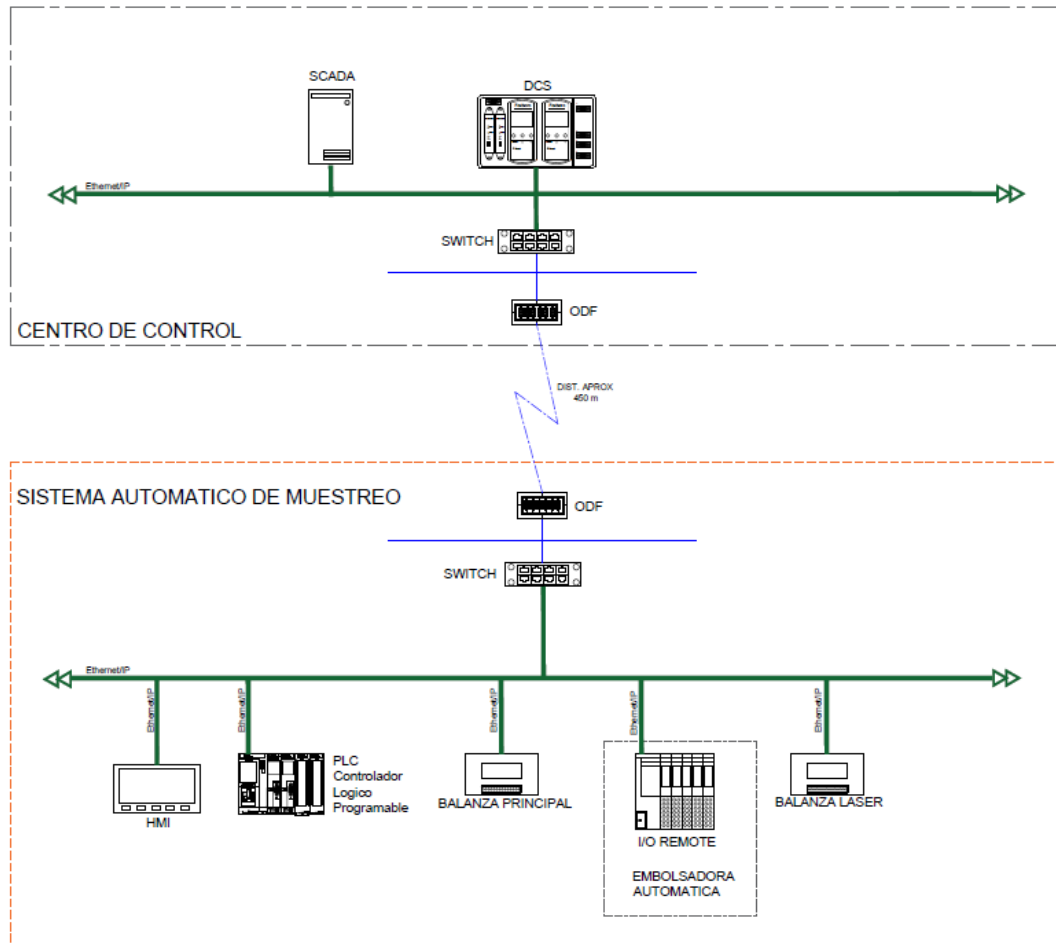
3.3.5.5 Integración al Sistema Scada

El Sistema Automático de Muestreo será configurado para enviar datos relevantes al DCS (Sistema de Control Distribuido), asegurando una comunicación efectiva y una integración adecuada entre ambos sistemas. Se habilitará la opción para que el Sistema de Muestreo Automático pueda operar como esclavo dentro del DCS, facilitando la supervisión y el control desde el entorno centralizado del DCS. Como parte de esta integración, se publicará toda

la información requerida y se proporcionará el puerto de comunicación adecuado para el enlace entre los sistemas.

Figura 53

Integración al sistema Scada



Esta tesis se centra en la propuesta técnica para la implementación del Sistema Automático de Muestreo de Concentrado, abarcando las etapas de diseño, planificación e ingeniería conceptual, las siguientes fases de automatización se implementarán posteriormente, una vez que se inicie la construcción del sistema:

Programación de Equipos de Control: La configuración y programación de los controladores lógicos programables (PLCs) y otros equipos de control será

realizada en la etapa de ejecución, asegurando la implementación adecuada de la filosofía de control propuesta.

Integración de los Equipos de Control: La sincronización y comunicación entre los equipos del sistema de muestreo y el DCS de la planta serán llevadas a cabo como parte de la ejecución operativa, garantizando un funcionamiento coordinado.

Realización de Pruebas SAT (Site Acceptance Test): Estas pruebas serán necesarias para validar el desempeño del sistema instalado bajo condiciones reales en el sitio, asegurando que los componentes cumplen con las especificaciones técnicas.

Realización de Pruebas con Carga: Esta etapa evaluará el comportamiento del sistema bajo condiciones operativas normales, garantizando precisión, confiabilidad y cumplimiento de los objetivos del sistema.

Debido a los costos asociados al proyecto, y en alineación con la política de la empresa que implementará el sistema, es indispensable realizar un proceso de licitación antes de iniciar la construcción. Este proceso permitirá seleccionar un proveedor que cumpla con los estándares técnicos y económicos establecidos, asegurando una ejecución eficiente y dentro de los parámetros presupuestarios.

La realización de estas etapas de implementación posterior es esencial para garantizar que el sistema propuesto en esta tesis pueda materializarse con éxito, cumpliendo con los objetivos operativos y financieros establecidos por la empresa.

CAPITULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Análisis de los resultados

El objetivo principal de este análisis es comparar los métodos de muestreo manual y automático (piloto) con el propósito de evidenciar la factibilidad y los beneficios del sistema automático, utilizando métricas estadísticas y gráficas comparativas como herramientas clave.

Para este estudio se evaluaron dos métodos de muestreo utilizados en el proceso minero para determinar las leyes de cobre de concentrados. Los puntos de muestreo analizados fueron:

Método Automático (Moly Final Tail - SAL 40): Muestreo mediante un sistema automático Thermo Fisher SamSat (piloto) que opera con mayor frecuencia de corte cada **10 minutos**, cuya ubicación es en la línea de pulpa que alimenta al espesador de Cu.

Método Manual (Filtros Prom.): Muestreo realizado de forma manual a la salida de los 03 filtros prensas, como ya se mencionó, la toma de muestras se realiza de forma manual mediante palas con una frecuencia de corte de 2 horas.

Figura 54

Puntos de muestreo

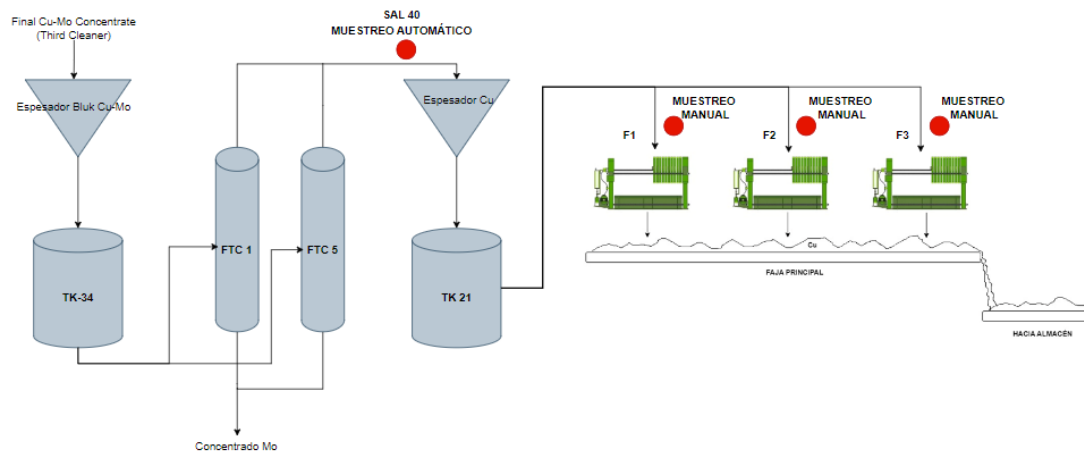


Figura 55

Muestreador Automático Thermo Fisher SamSat



Figura 56

Muestreo manual



4.1.1 Metodología

Se procesaron los datos obtenidos en ambos puntos de muestreo desde el 01 de enero y 31 de octubre del 2022 aplicando el muestreo manual y automático.

Figura 57

Ejemplo de la data obtenida del proceso de muestreo

	Día	Mdy Final Tail - SAL-40	Filtros Prom.
1	1-Ene-22	32.97	32.30
2		32.60	30.39
3	2-Ene-22	34.99	34.49
4		32.47	32.99
5	3-Ene-22	31.38	31.55
6		30.82	30.81
7	4-Ene-22	31.11	30.34
8		29.74	29.08
9	5-Ene-22	31.47	31.25
10		32.05	31.66
11	6-Ene-22	30.11	29.74
12		29.49	28.72
13	7-Ene-22	30.46	29.48
14		31.88	30.90
15	8-Ene-22	34.07	33.52
16		38.63	36.92
17	9-Ene-22	40.64	39.50
18		38.46	38.53
19	10-Ene-22	35.80	34.36
20		33.43	33.00
21	11-Ene-22	34.26	32.37
22		35.49	34.51
23	12-Ene-22	34.99	35.22
24		35.96	36.01

Los datos calculados incluyeron valores de leyes de cobre obtenidos de ambos métodos de muestreo. Las técnicas utilizadas fueron:

a. Estadística Descriptiva:

- Cálculo de métricas como promedio, desviación estándar y coeficiente de variación (CV).
- Evaluación de la dispersión y estabilidad de los valores.

b. Análisis Gráfico

- Comparación visual de las tendencias de las leyes de cobre entre ambos métodos.
- Identificación de variaciones transitorias capturadas por el sistema automático, pero no por el método manual.
- Determinación de la diferencia relativa.

4.1.2 Resultados Técnicos

- a. **Estadísticas Descriptivas:** se calcularon las siguientes métricas clave para ambos métodos.

Tabla 43

Estadísticas descriptivas

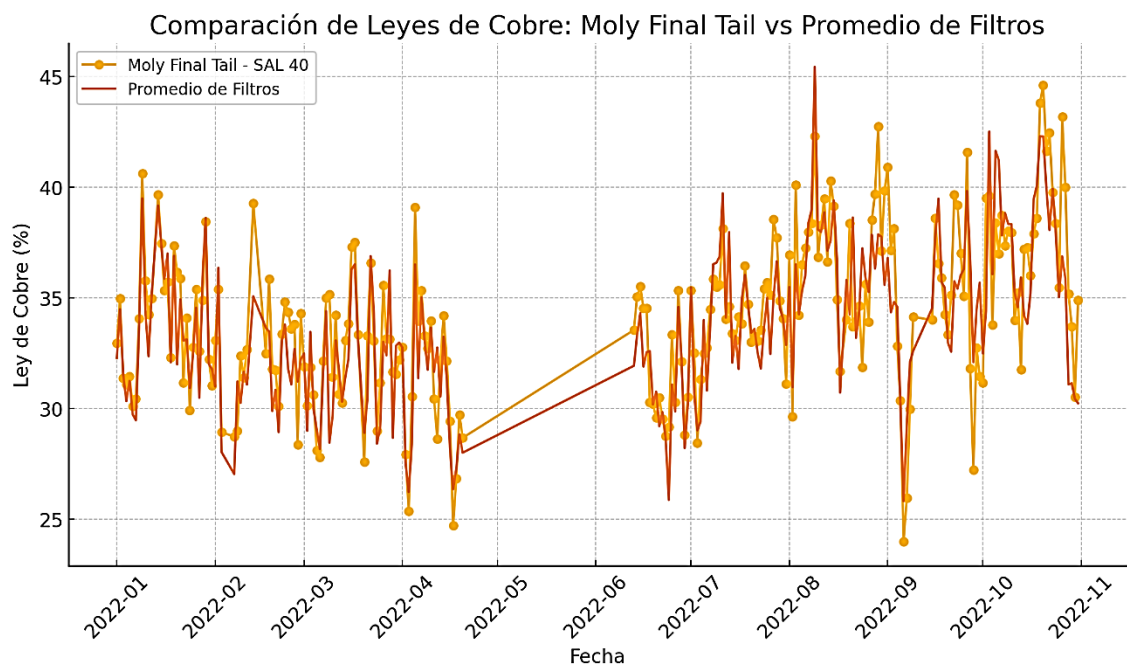
Métrica	Moly Final Tail SAL 40 (automático)	Promedio de Filtros (manual)
Ley de Cobre - Promedio (%)	34.074	33.534
Desviación Estándar	3.8072	3.5827
Coeficiente de Variación (%)	10.77	10.35

- Promedio: El sistema automático mostró un promedio superior, indicando que captura picos altos del proceso, lo que mejora la representatividad.
- Desviación estándar: el sistema automático detecta eventos con mayor precisión debido a su alta frecuencia de muestreo.
- Coeficiente de variación: Este indicador, que mide la relación entre la desviación estándar y el promedio, fue ligeramente menor en el método manual. Sin embargo, la alta frecuencia del sistema automático permite detectar tendencias en tiempo real, lo que es una ventaja operativa clave

b. Análisis Gráfico: El sistema automático de muestreo mostró una mayor resolución temporal, lo que permite capturar cambios rápidos en las leyes de cobre. En contraste, el método manual, debido a su menor frecuencia, omite estos cambios y genera una visión menos precisa del proceso.

Figura 58

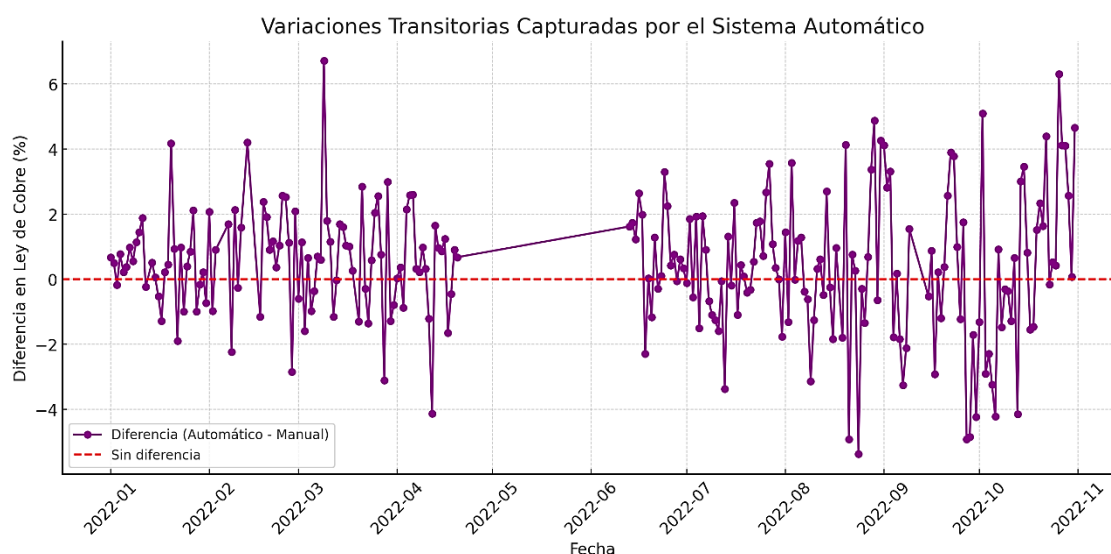
Comparación de leyes



También se muestra las diferencias entre las mediciones del sistema automático y el método manual a lo largo del tiempo. Las variaciones transitorias, representadas por los picos positivos y negativos, evidencian cambios rápidos en las leyes de cobre que el sistema automático captura, pero no el método manual debido a su menor frecuencia.

Figura 59

Variaciones transitorias capturadas



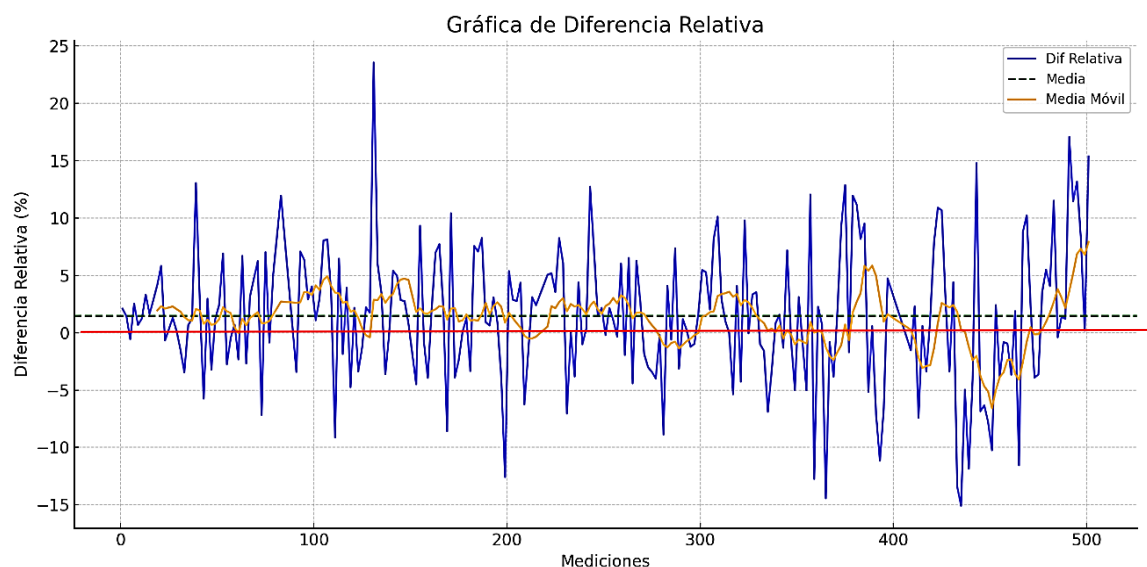
La figura 59, es la diferencia relativa (curva azul) que compara los resultados obtenidos mediante los métodos de muestreo manual (Filtros Prom.) y automático (Moly Final Tail - SAL 40) para determinar las leyes de cobre (%Cu). El eje Y representa la magnitud de la diferencia relativa entre las mediciones de ambos métodos, los valores positivos indican que el método automático midió una ley más alta (diferencia relativa >0) que el manual, esto sugiere que el método manual **subestimó** la cantidad de cobre presente en el concentrado, esto sucede porque el sistema automático realiza muestreos más frecuentes (cada 10 minutos) y representativos capturando mejor las variaciones reales del proceso.

Los valores negativos (diferencia relativa <0) indican que el método manual midió una ley de cobre más alta que el método automático en esa medición, esto sugiere que el método manual podría estar **sobreestimando** la cantidad de cobre presente en ciertas circunstancias, este comportamiento

puede deberse a dos factores: el primero, a los errores humanos durante el muestreo manual debido a que la muestra es menos representativa del total procesado; y segundo, a una frecuencia de muestreo baja (cada 2 horas).

Figura 60

Diferencia relativa de ambos métodos de muestreo



Se concluye que, si el método **manual subestima las leyes** (valores positivos), **la producción de cobre se calcula por debajo de lo real**, lo que podría generar pérdidas económicas por mala gestión del proceso. Si el método **manual sobreestima las leyes** (valores negativos), **puede generar una falsa percepción de calidad**, resultando en penalidades contractuales o decisiones operativas equivocadas.

La media de las diferencias relativas (promedio general de las diferencias relativas), representada por la línea verde, muestra una posición por encima de cero. Esto sugiere que el método automático tiende a registrar leyes más altas

en comparación con el método manual, es decir indica un sesgo promedio a favor del método automático, lo que refuerza su confiabilidad.

La media móvil (promedio dinámico de las diferencias relativas), representada por la gráfica naranja, muestra como el método automático captura mejor las fluctuaciones reales del proceso, mientras que el método manual introduce mayor dispersión.

En resumen, la gráfica de diferencia relativa evidencia la superioridad del método automático (Moly Final Tail - SAL 40) frente al método manual. Su capacidad para capturar mediciones precisas y consistentes respalda la implementación de un sistema de muestreo automático como una solución clave para mejorar la calidad de producción de cobre en la operación minera.

4.1.3 Conclusiones Técnicas

- El sistema automático de muestreo, representado por Moly Final Tail - SAL 40, demostró superioridad técnica en términos de precisión, frecuencia de recolección y estabilidad de los datos.
- Las diferencias estadísticas y gráficas justifican la adopción de sistemas automáticos como una solución eficiente para optimizar el control de calidad en operaciones mineras.
- La implementación de este sistema garantiza una mayor representatividad de las muestras, lo que se traduce en mejores decisiones operativas y estratégicas.

4.1.4 Resultados Económicos

La implementación de un sistema de muestreo automático, como Moly Final Tail - SAL 40, no solo mejora la calidad de las muestras de mineral, sino

que también genera beneficios económicos significativos. Este análisis cuantifica los ahorros y el incremento potencial en los ingresos derivados de una mejor recuperación de cobre y optimización operativa.

Según los informes de producción de una de las mineras más importantes del Perú, en el segundo trimestre de 2023 se alcanzó un récord de ventas de alrededor de 417,000(segundo trimestre) toneladas de concentrado de cobre, esto sugiere una producción diaria promedio de aproximadamente 4,600 toneladas de concentrado y teniendo como referencia el precio promedio del cobre de \$8000 USD por tonelada y el porcentaje de Ley de Cu (Tabla 43), se calcula la producción para cada tipo de muestreo:

a. Cálculo de la Producción Diaria:

- Método Automático - Moly Final Tail - SAL 40:

$$4,600 \text{ toneladas} \times 34.074\% = 1,567.404 \text{ T/día}$$

- Método Manual - Filtros Prom:

$$4,600 \text{ toneladas} \times 33.534\% = 1,542.564 \text{ T/día}$$

- Diferencia de la recuperación de Cu diaria;

$$1,567.404 \text{ T/día} - 1,542.564 \text{ T/día} = 24.84 \text{ T/día}$$

b. Cálculo de los Ingresos adicionales:

- Ingresos Diarios Adicionales:

$$24.84 \text{ toneladas} \times \$8,000\text{USD/t} = \$198,720 \text{ por día}$$

- Ingresos Mensuales Adicionales:

$$\$198,720 \times 30 \text{ días} = \$5,961,600 \text{ USD}$$

c. Reducción de costos Operativos

De acuerdo los datos brindados por la Minera, se tiene un costo del muestreo manual de \$60,000 USD y el sistema automático reduce estos costos, en un escenario conservador, en un 50%, por lo que se tiene:

$$\$60,000 \times 50\% = \$ 30,000 \text{ USD / mes}$$

d. Beneficio Total Mensual:

Sumando ambos beneficios:

- Ingresos adicionales por mejor recuperación: \$5,961,600 USD
- Ahorros en costos operativos: \$ 30,000 USD

Lo que hacen un total de \$5,931,000 por mes

La implementación del sistema de muestreo automático en la Unidad Minera podría generar un beneficio económico mensual de aproximadamente \$6 millones de dólares mensuales, principalmente debido al incremento en la recuperación de cobre.

Este análisis demuestra la importancia de contar con sistemas de muestreo precisos y confiables para maximizar la eficiencia operativa y los ingresos en operaciones mineras de gran escala.

4.2 Contrastación de las hipótesis

4.2.1 Contrastación de la Hipótesis General

Ho: El desarrollo de la Gestión del Proyecto de Automatización de Muestreo mediante metodologías Tradicionales y Ágiles no mejora la Calidad de Producción de Cobre en una Compañía Minera

Hi: El desarrollo de la Gestión del Proyecto de Automatización de Muestreo mediante metodologías Tradicionales y Ágiles mejora la Calidad de Producción de Cobre en una Compañía Minera

Decisión

De acuerdo con los resultados obtenidos de los datos analizados, en especial de la gráfica (Fig.59) de la diferencia relativa, se muestra que el sistema automático (Moly Final Tail - SAL 40) proporciona mediciones más consistentes y con un sesgo promedio positivo frente al método manual (Filtros Prom.). Esto indica que el método automático capta mejor las fluctuaciones reales del proceso y reduce la incertidumbre en las mediciones, mejorando la representatividad de las muestras

Además, medidas más representativas permiten ajustes más precisos en los parámetros operativos, lo que incrementa la recuperación de cobre y optimiza el proceso. Como se calculó previamente, esta mejora genera beneficios económicos significativos (aproximadamente \$6 millones mensuales), demostrando que la calidad de producción mejora directamente con un muestreo más confiable.

Por los resultados mencionados, se acepta la Hipótesis de Investigación y se rechaza la hipótesis nula.

4.2.2 Contrastación de las hipótesis específicas

Hipótesis Específica

Ho: La variabilidad de los flujos de concentrado de cobre en la Faja Principal no permite identificar los parámetros operativos críticos que influyen en el sistema automático de muestreo.

Hi: La variabilidad de los flujos de concentrado de cobre en la Faja Principal permite identificar los parámetros operativos críticos que influyen en el sistema automático de muestreo.

Decisión:

Dado que actualmente el muestreo se realiza de manera manual, lo cual afecta la representatividad y genera incertidumbre en la medición, la implementación de un sistema automático debe considerar cómo las fluctuaciones en los flujos impactan en la precisión del muestreo y en el cumplimiento de normas internacionales como AMIRA P754 y NTP-ISO 12743. Por tanto, analizar y caracterizar esta variabilidad permite determinar los parámetros operativos esenciales para diseñar y calibrar adecuadamente el sistema automático, garantizando representatividad y reduciendo riesgos laborales.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis de investigación y se rechaza la hipótesis nula

Hipótesis Específica b:

Ho: Las diferencias entre los valores teóricos y reales en la masa final recolectada por incremento no permite identificar desviaciones operativas en el sistema de muestreo, lo que contribuye a mejorar su precisión y confiabilidad

Hi: Las diferencias entre los valores teóricos y reales en la masa final recolectada por incremento permite identificar desviaciones operativas en el sistema de muestreo, lo que contribuye a mejorar su precisión y confiabilidad

Decisión:

Las diferencias entre los valores teóricos y reales de la masa recolectada por incremento evidencian desviaciones operativas significativas que deben ser

corregidas para garantizar la precisión del sistema de muestreo. Al identificar y analizar estas desviaciones, como las resultantes de flujos de operación de 100 T/h, 150 T/h y 250 T/h que generan masas mayores a las esperadas (1.48 kg, 1.72 kg y 1.97 kg por incremento, respectivamente), se destaca la necesidad de ajustar los parámetros técnicos y de operación del sistema. Esto optimiza la configuración del muestreo automático, mejorando su confiabilidad y alineándose con los estándares internacionales que exigen muestras representativas y consistentes.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis de investigación y se rechaza la hipótesis nula

Hipótesis Específica c:

Ho: La implementación de un enfoque híbrido de metodologías tradicionales y ágiles no permite abordar las necesidades cambiantes del proyecto

Hi: La implementación de un enfoque híbrido de metodologías tradicionales y ágiles permite abordar las necesidades cambiantes del proyecto

Decisión:

La integración de las metodologías PMBOK y Scrum en un enfoque híbrido permite gestionar eficientemente las diferentes necesidades del proyecto, combinando el control y la estabilidad necesarios para las áreas de infraestructura civil, mecánica y eléctrica, con la flexibilidad y adaptabilidad requeridas para el desarrollo de la automatización del sistema, mejorando así la calidad de la producción de cobre y optimizando los recursos frente a las complejidades y cambios inherentes al proyecto.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis de investigación y se rechaza la hipótesis nula

4.3 Contraste de los resultados

El presente estudio ha demostrado que la implementación de un sistema automático de muestreo mejora significativamente la representatividad y estabilidad de las muestras de concentrado de cobre en comparación con el método manual. Los resultados obtenidos, sustentados en análisis estadísticos descriptivos como los gráficos de diferencia relativa, indican que el sistema automático capta con mayor precisión las variaciones transitorias del proceso y reduce la incertidumbre operacional, tal como se evidencia en la media móvil y la menor dispersión relativa de sus datos.

Estos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos por Cadenillas Luna, H. U. et al (2020), quien evaluó la variabilidad en los sistemas de medición entre la mina y el almacén de acopio de una unidad minera. En su estudio, aplicó técnicas como ANOVA, t-student y Gage R&R para **identificar que las principales fuentes de error estaban asociadas a la falta de estandarización, calibración de equipos y procedimientos operativos heterogéneos.**

Mientras que el estudio de Cadenillas Luna, H. U. et al (2020) se centró en la evaluación del sistema de medición existente y propuso mejoras desde el punto de vista de la **metrología industrial y el control estadístico de calidad**, el presente trabajo trasciende hacia una propuesta de automatización integral. Se incluyen etapas de diseño del sistema, integración con el SCADA y gestión de proyecto híbrida (PMBOK + Scrum), lo que marca una diferencia sustancial en términos de enfoque y aplicabilidad tecnológica.

Además, a diferencia del antecedente que se limitó al análisis de la variabilidad entre puntos fijos (mina y puerto), la investigación enfatiza la mejora del muestreo en línea en tiempo real, con alta frecuencia (cada 10 minutos), lo que permite una intervención oportuna ante desviaciones del proceso. Este avance representa una mejora directa en la confiabilidad operativa y la toma de decisiones de producción.

Asimismo, desde el punto de vista económico, ambos estudios coinciden en que las deficiencias en **los sistemas de muestreo o medición generan impactos económicos negativos**. Sin embargo, en esta tesis se cuantifican los beneficios económicos potenciales de adoptar un sistema automático, lo que representa una contribución adicional respecto al trabajo previo.

CONCLUSIONES

1. El sistema piloto aplicado a un punto distinto de la Faja Principal, demuestra la viabilidad técnica y económica de un sistema automatizado, con beneficios proyectados de \$6 millones de dólares mensuales y una mejora significativa en la determinación de la ley de cobre. Estos resultados refuerzan que la implementación del sistema de Muestreo en la Faja Principal generase aún mayores beneficios, alineando las operaciones con los principios de la Industria 4.0 y asegurando una gestión más segura, precisa y eficiente aplicando un enfoque híbrido de metodologías tradicionales (PMBOK) y ágiles (Scrum).

2. Mediante el estudio detallado de datos históricos, se ha determinado patrones operativos y rangos de flujo másico que evidencian una considerable fluctuación diaria, destacando un rango operativo óptimo entre 25 y 550 T/h. Este análisis fue esencial para establecer las condiciones bajo las cuales el sistema de muestreo puede garantizar una adecuada representatividad de las muestras, asegurando un mínimo de 1 kg por incremento y reduciendo la influencia de flujos remanentes no operativos.

3. A través del análisis de flujos másicos mínimos, nominales y máximos, se determinó la masa real obtenida varió entre 1.48 kg y 1.97 kg debido a las condiciones dinámicas del flujo a pesar de que el objetivo teórico fue recolectar 1 kg por cada incremento. Estas diferencias evidencian la necesidad de ajustar los parámetros técnicos del sistema, como la frecuencia de corte y la velocidad de los muestreadores, para garantizar la precisión y confiabilidad de las muestras recolectadas.

4. El enfoque híbrido permite gestionar de manera efectiva las diferentes fases del proyecto, integrando equipos multidisciplinarios y minimizando riesgos operativos. Además, se logró una sinergia entre la planificación estructurada y la capacidad de respuesta ante cambios, posicionando al sistema propuesto como una solución innovadora, eficiente y adaptable, alineada con los estándares de calidad y las demandas dinámicas del sector minero.

RECOMENDACIONES

1. Implementar un sistema continuo de monitoreo del flujo másico en la Faja Principal con sensores avanzados y tecnología de análisis predictivo, permitiendo ajustes en tiempo real a los parámetros del sistema de muestreo para garantizar representatividad y precisión en las muestras. Esto también facilitará la identificación de patrones y fluctuaciones críticas para el diseño de sistemas más eficientes.

2. La inversión en el sistema de automatización puede ser recuperada en un tiempo corto gracias a los beneficios económicos proyectados. Para ello, se recomienda establecer indicadores clave de desempeño (KPIs) que midan el impacto en productividad, reducción de costos y mejora en la calidad del concentrado. Además, se pueden implementar estrategias de financiamiento por fases, minimizando la presión financiera inicial y asegurando un retorno de inversión gradual y sostenible.

3. El uso de un enfoque híbrido que combine metodologías tradicionales, como PMBOK, con ágiles, como Scrum, proporciona estabilidad en las disciplinas de infraestructura (civil, mecánica, eléctrica) y flexibilidad en la automatización, maximizando la eficiencia y adaptabilidad del proyecto. Este enfoque permite gestionar incertidumbres técnicas de forma iterativa, garantizar el cumplimiento normativo y ofrecer entregables funcionales en plazos más cortos, lo que lo convierte en una estrategia altamente efectiva para proyectos complejos en la minería

4. Realizar un piloto en un punto de operación representativo para validar los cálculos teóricos del balance de masa, los intervalos de muestreo y los

incrementos primarios. Este piloto debe replicar las condiciones operativas reales de la Faja Principal, asegurando la viabilidad técnica del sistema automatizado y proporcionando datos clave para ajustes previos a su implementación a gran escala.

Referencias

- Agudelo Bermúdez, D., & Murillo Giraldo, L. Y. (2018). Análisis comparativo de cuatro estándares internacionales en gerencia de proyectos. Facultad de Ingeniería, Maestría en Gerencia de Proyectos, Santiago de Cali. http://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/handle/10906/90633
- Aguirre Barrera, J., & Aguirre Barrera, S. (2020). Metodologías para el desarrollo de proyectos. Universidad Católica Luis Amigó, Facultad de Administración, Contabilidad y Finanzas, Programa de Administración de Empresas, Colombia. <http://hdl.handle.net/20.500.12237/2037>
- AMIRA P754. (2007). Code of Practice for Metal Accounting. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Bolton, W. (2001). Ingeniería de control (2da ed.). México: Alfaomega Grupo Editor.
- Cohn, M. (2005). Agile Estimating and Planning. Prentice Hall.
- Cohn, M. (2010). Succeeding with Agile: Software Development Using Scrum. Addison-Wesley.
- Grushka-Cockayne, Y. (2015). Un nuevo enfoque híbrido para seleccionar una metodología de gestión de proyectos. Londres, Inglaterra. <https://www.pmi.org/learning/library/consistent-approach-provides-high-performance-9889>
- Guillén Garzaro, M. (s. f.). Metodología para control de proyectos PRINCE2. Facultad de Ingeniería, Universidad Rafael Landívar. Mguillen@inteln.net.gt

- Hadida, S. (2019, octubre). La agilidad en las organizaciones: trabajo comparativo entre metodologías ágiles y de cascada en un contexto de ambigüedad y transformación digital. <https://hdl.handle.net/10419/238381>
- Industria 4.0 en minería: Transformación digital y automatización en la industria minera. (2020). Mining Journal. Disponible en: <https://www.mining-journal.com>
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2017). Norma Técnica Peruana NTP-ISO 12743: Concentrados de cobre, plomo, cinc y níquel. Procedimientos de muestreo para determinar el contenido de metales y humedad.
- Montes Guerra, M., Gimena Ramos, F., & Diez Silva, M. (2013). Estándares y metodologías: Instrumentos esenciales para la aplicación de la dirección de proyectos. Colombia.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6041500>
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. España: Pearson Educación.
- Patino, A. (2020). Metodología Waterfall: Qué es | Ventajas y Desventajas. Recuperado de <https://blog.comparasoftware.com/metodologia-waterfall/>
- Project Management Institute (PMI). (2013). Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK) (5ª ed.). Project Management Institute.
- Project Management Institute (PMI). (2017). Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK) (6ª ed.). Project Management Institute.
- Project Management Institute (PMI). (2021). Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK) (7ª ed.). Project Management Institute.

- Rodríguez, A. (2013). Sistemas Scada. España: Alfaomega Grupo Editor.
- Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). The Scrum Guide: The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game. Scrum.org. Disponible en: <https://www.scrumguides.org>
- Sutherland, J. (2014). Scrum: The Art of Doing Twice the Work in Half the Time. Crown Business. https://books.google.com.pe/books/about/Scrum.html?id=L13frQEACAAJ&redir_esc=y
- Tecpromin. (s. f.). Sistema de muestreo metalúrgico. Recuperado de: <https://www.tecpromin.cl/new/sistema-de-muestreo-metalurgico/>
- Velásquez, M., & Rodríguez, J. (2019). Automatización y control en la industria minera: Retos y oportunidades. Revista de Ingeniería Industrial, 34(2), 125-139.