

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DEL CIRCUITO 1-A DE MOLIENDA Y
CLASIFICACIÓN EN LA PLANTA CONCENTRADORA CUAJONE MEDIANTE EL USO
DE HIDROCICLONES CAVEX Y SIMULACIÓN CON JKSIMMET**

PRESENTADO POR:

Br. EDWIN BATALLANOS HUAMAN

Br. JUAN LUIS GUERRA CHALLCO

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

ASESOR:

Ing. ALFREDO TOMÁS BENITO ARAGÓN

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: OPTIMIZACION DE LA PRODUCTIVIDAD DEL CIRCUITO 1-A DE MOLIENDA Y CLASIFICACION EN LA PLANTA CONCENTRADORA CHATONE MEDIANTE EL USO DE HIDROCIGLONES CAVEX Y SIMULACION CON JKSIMMET

presentado por: BATAUANOS HUAMAN EDWIN con DNI Nro.: 71418492, presentado por: GUERRA CHALLCO JUAN LUIS con DNI Nro.: 70340155 para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALURGICO.

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 06%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 10 de AGOSTO de 2027

Firma

Post firma ALFREDO TOMÁS BENITO ARAÇÓN

Nro. de DNI 23914405

ORCID del Asesor 0000-0002-5666-4047

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:372278907

NOMBRE DEL TRABAJO

TesisFinal-E. Batallanos-J. Guerra .pdf

AUTOR

JUAN-LUIS GUERRA

RECUENTO DE PALABRAS

20101 Words

RECUENTO DE CARACTERES

114731 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

119 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

2.4MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 10, 2024 9:35 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Aug 10, 2024 9:37 AM GMT-5**● 6% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 1% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

Presentación

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica (FIGMM), y distinguidos miembros del jurado:

En cumplimiento con las normativas establecidas en el reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, y con el propósito de obtener el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico en la modalidad de desarrollo y defensa de tesis, se presenta el siguiente trabajo intitulado:

**“OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DEL CIRCUITO 1-A DE
MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN EN LA PLANTA CONCENTRADORA CUAJONE
MEDIANTE EL USO DE HIDROCICLONES CAVEX® Y SIMULACIÓN CON
JKSIMMET”
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

En el presente trabajo de investigación se pretende incrementar el tonelaje de procesamiento de mineral y consecuentemente aumentar la cantidad de cobre producido en el circuito 1–A de molienda y clasificación de la Planta Concentradora de Cuajone en Moquegua, esto se logra mediante la instalación de hidrociclones con tecnología de vanguardia tipo Cavex® que posibilita la optimización y la reducción de la huella de carbono apoyado mediante simulación con el software metalúrgico JKSimmet.

Batallanos Huaman, Edwin

Guerra Chalco, Juan Luis

Dedicatoria

Todo el esfuerzo se lo dedico a mi mamá por su abundante amor y apoyo en mi crecimiento profesional, soy una obra que ella cuidadosamente ha desarrollado y ha cultivado desinteresadamente, mis logros son una exhibición de la profunda e inagotable inspiración que ella me brinda siempre, este es un logro más que permite que ella se sienta orgullosa, verla con una sonrisa o con sollozos de felicidad no tiene precio.

Así mismo quiero dedicar el esfuerzo a mis hermanos añoro servirles de ejemplo y continuar siento su mentor para que sigan creciendo en plenitud día a día, los amo mucho.

A mi compañera de aventuras quien siempre me alentó a culminar este objetivo.

Juan Luis Guerra Challo

Dedicatoria

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de tener una mamá tan alentadora que eternamente estaré en deuda por haberme dado la vida, y lecciones de superación porque sé que no tuvo una vida fácil. No solo me enseñó a sumar y restar, sino que también me dio la confianza necesaria para construir mi propio camino, cometer errores y entender que todo tiene un propósito. Y por siempre creer en mí como hijo, como profesional y ahora como padre de familia.

Agradezco a mi papá por siempre darme el ejemplo de cómo ser un buen hombre en el trabajo y en la familia, y porque a pesar de muchas circunstancias su apoyo de papá siempre estuvo presente, gracias papá!!!

Agradezco a mi cita perfecta Keyklyn, por siempre estar junto a mí, por entender mi forma de ser y por creer en mí, sé que siempre está al pendiente de mis logros profesionales, así como yo estoy pendiente de sus logros y su empoderamiento como mujer, mamá y como mi esposa.

Agradezco a Dios por darme el mejor título que una persona pueda tener, y es el de ser padre, Diogo Barek llegaste a mi vida para hacerla mucho más brillante, mucho más feliz, y quiero siempre ser tu modelo a seguir, aconsejarte en tus momentos de alegría y enseñarte a como levantarse de cada caída que tengas, tienes un gran camino que te espera, y yo estaré siempre al pendiente de ti, ahora tu eres mi mayor motivación para seguir avanzando y aprendiendo.

Edwin Batallanos Huaman

Resumen

La investigación se fundamenta en el problema de tipo tecnológico de baja productividad en términos de cobre fino en el circuito 1–A de molienda y clasificación en la Planta Concentradora de Cuajone, situación que continuará dentro de las condiciones actuales de trabajo. El estudio propone como objetivo la optimización de la productividad del mencionado circuito mediante el uso e implementación de hidrociclones Cavex® y a través de simulación en el software especializado JKSimmet. El tipo de investigación es tecnológica, se aplica los métodos inductivo y deductivo, el nivel es de alcance descriptivo comparativo, el diseño es experimental cuyos resultados se describen y comparan. La investigación tiene como población de estudio al área integral de la planta de molienda y clasificación de la Concentradora Cuajone la cual dispone de 11 molinos. El estudio se centralizó en el circuito del molino 1–A, se realizó muestreos probabilísticos de pulpa en la alimentación fresca al molino; el “Overflow”, “Underflow” y alimentación a los hidrociclones, esta información es usada en la línea base de la investigación y está acompañada de revisión de datos confiables en el PI System de la concentradora Cuajone relacionados principalmente al tonelaje, potencia, presión de pulpa, metros cúbicos de agua de alimentación y dilución. Para el análisis de los datos se utilizó el software JKSimmet, Minitab y las hojas de cálculo de Excel, fue imperante realizar una correlación de las variables usadas en la comparación con el método de Anova junto a una prueba de hipótesis donde se pone de manifiesto la hipótesis nula de la mejora de producción en el circuito del molino 1–A, esta última demuestra que los resultados esperados en la hipótesis y en las simulaciones se cumplen satisfactoriamente.

Palabras clave: Optimización, Molienda y clasificación, hidrociclones, JKSimmet, Cavex®.

Abstract

The purpose of the research was to investigate the optimization of the productivity of the 1A milling and sorting circuit in the Cuajone Concentrator Plant through the use of Cavex® hydrocyclones and simulation in the JKSimmet software.

The research is experimental and applied, where the results obtained are described and compared. The research has as a population the entire milling and sorting plant of the Cuajone Concentrator (11 mills) from which the sample was obtained, which will be used to demonstrate that an improvement in the classification with new hydrocyclones allows optimizing production; the analysis carried out is only to the mill circuit 1A using different probabilistic samples of pulp in the Overflow, Underflow, fresh feed to the mill and feeding to the hydrocyclones, information used in baseline research and comparison of results after the implementation of Cavex® hydrocyclones, the baseline is accompanied by a review of reliable data in the PI System (Cuajone concentrator database), data such as tonnage, power, pulp pressure, cubic meters of feed and dilution water as the most important.

For data analysis, whether in metallurgical, statistical and other balances, JKSimmet software, Minitab and Excel spreadsheets were used respectively, it was prevailing to make a correlation of the variables used in the comparison with the method of Chi Cuadrado and Anova together with a hypothesis test where we show the null hypothesis of the improvement of production in the circuit of mill 1A, The latter showed that the expected results in the scenario and the simulations are met satisfactorily.

Keywords: Optimization, Milling and classification, hydrocyclones, JKSimmet, Cavex®.

Agradecimientos

A Dios por guiar nuestras vidas a este punto y bendecirnos con la felicidad de nuestra familia, salud y trabajo.

A la universidad Nacional de San Antonio Abad y a la excelente plana de docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

A nuestro asesor Ing. Alfredo Tomás Benito Aragón por su apoyo y mentoría en el desarrollo de la investigación.

A la empresa Southern Perú y a los profesionales que laboran en la unidad productiva de Cuajone quienes nos brindaron total apoyo durante la ejecución de la investigación.

A la empresa Weir Minerals por permitirnos desarrollar esta tesis con la aplicación de los hidrociclones Cavex®.

Juan Luis y Edwin

Introducción

El trabajo de investigación planteó una alternativa de solución al problema de bajo tonelaje de procesamiento diario en el circuito 1–A de la Planta Concentradora de Cuajone, la causa primordial del inconveniente, se debe al cambio de las propiedades mineralógicas del mineral de cabeza tratado en planta y que por la antigüedad de explotación y génesis del yacimiento, cada vez se trata mineral de mayor dureza lo que no permite a los equipos instalados en el circuito hacer frente ante esta nueva condición de mineral. Actualmente se sigue trabajando con los equipos y máquinas de la ampliación realizada el año 1999, lo que ocasiona una baja performance de los mismos, afectando así la productividad de cobre esperado en el circuito 1–A.

Por lo expuesto, para resolver el problema objeto de investigación se planteó una nueva alternativa para optimizar el circuito de molienda y clasificación 1–A con el uso del hidrociclón Cavex® 700CVX, el cual según los análisis es un equipo mucho más eficiente en comparación a los hidrociclones convencionales Krebs® D-33, que actualmente operan en Cuajone, y colateralmente se utilizó el software de simulación metalúrgico JKSimmet con el propósito de evaluar posibles escenarios de mejora al realizar el ajuste de los datos actuales de planta, de esta forma se logró optimizar la eficiencia en la clasificación y paralelamente se redujo el “By-pass” de finos al circuito, de tal manera que permitió maximizar el tonelaje de tratamiento diario e incrementó la producción de mineral molido y por ende la cantidad de cobre fino, trayendo como consecuencia una mayor rentabilidad en beneficio de la empresa Southern Peru Cuajone.

Índice

Presentación	2
Resumen.....	3
Abstract	6
Dedicatoria.....	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimientos	7
Introducción	8
Índice.....	9
Índice de Tablas	15
Índice de Figuras.....	15
Índice de Términos y Símbolos	16
Capítulo I: Planteamiento del Problema.....	17
1.1 Situación Problemática.....	17
1.2 Formulación del Problema	18
1.2.1 Problema General.....	18
1.2.2 Problemas Específicos	19
1.3 Justificación de la Investigación	19
1.3.1 Justificación Tecnológica.....	19
1.3.2 Justificación Económica	20

	10
1.3.3 Justificación Social	20
1.3.4 Justificación Medioambiental	20
1.4 Limitaciones de estudio.....	21
1.5 Objetivos de la Investigación	21
1.5.1 Objetivo General.....	21
1.5.2 Objetivos Específicos.....	22
Capítulo II: Marco Teórico	23
2.1 Antecedentes de la Investigación (Estado del Arte).....	23
2.1.1 Antecedentes locales	23
2.1.2 Antecedentes Nacionales	24
2.1.3 Antecedentes Internacionales.....	25
2.2 Bases Teóricas.....	25
2.2.1 Procesamiento de Minerales	25
2.2.2 Conminución.....	28
2.2.3 Equipos de Conminución.....	28
2.2.4 Simulación y Optimización.....	31
2.2.5 Eficiencia de Clasificación	32
2.2.6 Productividad	34
2.2.7 Hidrociclones Cavex®.....	36
2.3 Definición de Términos Básicos	40

	11
2.3.1 Mena	40
2.3.2 Over Flow	40
2.3.3 Under Flow	40
2.3.4 Vortex	40
2.3.5 Ápex.....	40
2.3.6 P80	40
2.3.7 F80	41
2.3.8 Alpha.....	41
2.3.9 By-Pass	41
2.3.10 Carga Circulante	41
2.3.11 Parámetros De Operación	41
2.4 Software JKSimmet.....	41
2.4.1 Modelos Matemáticos Usados	42
2.4.2 Introducción al Ajuste de Modelos	47
Capítulo III: Hipótesis y Variables.....	49
3.1 Hipótesis.....	49
3.1.1 Hipótesis General.....	49
3.1.2 Hipótesis Específicas	49
3.2 Identificación de Variables e Indicadores	50
3.2.1 Variables Dependientes	50

	12
3.2.2 Variables Independientes	50
3.2.3 Indicadores	50
3.2.4 Operacionalización de Variables	51
Capítulo IV: Diseño metodológico	52
4.1 Ámbito de Estudio: Localización Política y Geográfica	52
4.2 Diseño de la Investigación: Tipo, Método y Nivel de Investigación	53
4.3 Unidad de Análisis	54
4.4 Población de Estudio	54
4.4.1 Tamaño de Muestra	54
4.4.2 Técnicas de Selección de Muestra	54
4.4.3 Técnicas de Recolección de Información	55
4.4.4 Técnicas de Análisis e Interpretación de La Información	55
4.4.5 Técnicas Para Demostrar la Verdad o Falsedad - Hipótesis Planteadas	56
Capítulo V: Pruebas en Concentradora Cuajone	57
5.1 Línea Base Circuito 1–A	57
5.2 Línea Base Estadística	57
5.3 Línea Base Metalúrgica	58
5.4 Montaje e Instalación de Equipos	59
5.5 Comisionamiento de Hidrociclones Cavex®	61
5.6 Desarrollo de Prueba	61

5.6.1	Muestras de Pulpa al Circuito	62
5.6.2	Cambios de configuración al circuito	63
5.7	Balances de masa en JKSimmet Krebs Vs Cavex®	64
Capítulo VI: Análisis y Discusión de Resultados		66
4.1	ANOVA de un solo factor Productividad versus Hidrociclón	66
4.1.1	Método	66
4.1.2	Información del Factor	66
4.1.3	Medias	66
4.1.4	Análisis de Varianza	67
4.1.5	Conclusión del Análisis	68
4.2	ANOVA de un Solo Factor P80 versus Hidrociclón	68
4.2.1	Método	68
4.2.2	Información del Factor	68
4.2.3	Medias	68
4.2.4	Análisis de Varianza	69
4.2.5	Conclusión del Análisis	69
4.3	ANOVA de un Solo Factor Presión de Clasificación versus Hidrociclón	70
4.3.1	Método	70
4.3.2	Información del Factor	70
4.3.3	Medias	70

	14
4.3.4	Análisis de Varianza 71
4.3.5	Conclusión del Análisis 71
4.4	ANOVA de un Solo Factor By-Pass de Finos versus Hidrociclón 72
4.4.1	Método 72
4.4.2	Información del Factor 72
4.4.3	Medias 72
4.4.4	Análisis de Varianza 73
4.4.5	Conclusión del Análisis 73
4.5	Validez de Ajuste con el Modelo de JK Simmet 74
4.5.1	Comparativo Valor Experimental vs Ajustado con JK Simmet 74
4.5.2	Conclusión del Análisis 75
Conclusiones 76	
Recomendaciones 77	
Bibliografía 78	
ANEXOS 80	
A.	Matriz De Consistencia 81
B.	Diagrama de Flujo – Planta Molienda Unidad Minera Cuajone 82
C.	Diagrama de flujo General – Concentradora Unidad Minera Cuajone 83
D.	Cronograma de Muestreos 84

Índice de Tablas

Tabla II-1: Partes del Hidrociclón Cavex®	39
Tabla III-1: Matriz de Operacionalización de Variables	51
Tabla V-1: Resumen de Parámetros de Control – Circuito 1-A.....	57
Tabla V-2: Resumen Parámetros Metalúrgicos – Circuito 1-A.....	58
Tabla V-3: Parámetros de Ajuste del Modelo Nageswararao – Circuito 1-A	59
Tabla V-4: Resumen de Resultados Krebs versus Cavex®	64
Tabla VI-1: Relación de Variables Experimentales Versus Ajuste en JKSimmet	74

Índice de Figuras

Figura II-1: Procesos de Producción en un Yacimiento	27
Figura II-2: Chancadora Giratoria	29
Figura II-3: Molinos de Bolas y SAG.....	30
Figura II-4: Hidrociclón.....	31
Figura II-5: Curvas de Eficiencia de Clasificación.....	33
Figura II-6: Batería Hidrociclones Cavex® 700.....	38
Figura II-7: Partes del Hidrociclón Cavex®	39
Figura II-8: Software JKSimmet.....	42
Figura II-9: Parámetros Para Llenar el Ajuste en JKSimmet	48
Figura IV-1: Mapa Ubicación Mina Cuajone	52
Figura V-1: Hidrociclones convencionales – Circuito 1-A	59
Figura V-2: Hidrociclón Cavex® 700CVX + ACB	60
Figura V-3: Batería de Hidrociclones Cavex® Instalada en el Circuito 1-A	60

Figura V-4: Sistema de Control del Circuito 1-A.....	61
Figura V-5: Diagrama de Flujo del Circuito 1-A con sus Puntos de Muestreo.....	63
Figura V-6: Línea del Tiempo de Cambios – Circuito 1-A.....	64
Figura VI-1: Gráfica de Intervalos de Confianza Productividad versus Hidrociclón.....	67
Figura VI-2: Gráfica de Intervalos de Confianza P80 versus Hidrociclón.....	69
Figura VI-3: Gráfica de Intervalos de Confianza Productividad versus Hidrociclón.....	71
Figura VI-4: Gráfica de Intervalos de Confianza Productividad versus Hidrociclón.....	73

Índice de Términos y Símbolos

TMS/H: Toneladas métricas por hora.

TMS: Toneladas métricas.

\$/TM: dólares por tonelada métrica.

TM/D: Toneladas métricas por día.

Mm: Milímetros.

\$/año. Dolares por año

KWh/Tc: Indicador de Work Index en Kilowatts hora por tonelada corta.

\$/disparo: Dolares por dispero.

KPI: Key Performance Indicator, en español indicador de proceso.

SAG: Molienda semi autógena.

UMC: Unidad minera Cuajone.

P80: Tamaño por donde pasa el 80% de un flujo, la letra P, indica que es el producto.

PSI: Pound per Square Inch.

ANOVA: Análisis de varianza, o por sus siglas en Ingles ANalysis Of VAriance.

Capítulo I: Planteamiento del Problema

1.1 Situación Problemática

.La minería ha sido una actividad esencial para el desarrollo del Perú, posicionando al país como referente en la extracción y procesamiento de minerales en Sudamérica y el mundo. Perú cuenta con una variedad de minerales como cobre, plomo, plata, oro, zinc y molibdeno, lo que le confiere una categoría mundial en este sector y lo convierte en un destino atractivo para la inversión privada en producción de concentrados minerales.

En el sur del Perú, regiones como Tacna, Moquegua, Arequipa, Cusco y Apurímac albergan operaciones mineras de clase mundial, con plantas que procesan más de 90,000 toneladas métricas por día. Entre estas operaciones destaca la empresa Southern Perú, la cual inició sus actividades en 1960 con la construcción de la unidad minera Toquepala y la fundición de Ilo. Más adelante, en 1976, se inauguró la Planta Concentradora Cuajone (UMC), que en su momento fue un referente mundial en términos de tonelaje y tecnología avanzada.

Actualmente, la Planta Cuajone enfrenta desafíos debido al aumento en el Work Index del mineral tratado, que ha alcanzado valores entre 19 y 23 KWh/Tc. Este incremento ha limitado la producción total de la planta, en parte debido a la capacidad operativa de los hidrociclones convencionales, que procesan 595.3 TMS/h con un P80 entre 265 y 272 μm y una presión de clasificación entre 6.4 y 6.8 psi, generando un By-Pass de finos del 56 al 57 %. Estos factores han afectado la capacidad del circuito 1-A, cuyo rendimiento actual oscila entre 100 y 101.8 %, con un procesamiento entre 15,000 y 15,275 TM/D, valores inferiores al KPI establecido de 15,000 TM/D.

Para enfrentar estas limitaciones, la UMC considera fundamental la renovación tecnológica en el área de molienda. En el contexto actual, y con el soporte de herramientas informáticas avanzadas, la modernización de equipos se vuelve prioritaria para optimizar la competitividad y eficiencia del proceso de producción. La planta se encuentra en proceso de transformación digital, con apoyo de la alta gerencia y un equipo de liderazgo comprometido en implementar mejoras tecnológicas.

Una de las principales recomendaciones es la instalación de hidrociclones Cavex en el circuito 1-A, cuyo diseño innovador busca reducir el By-Pass de finos, disminuir el P80 e incrementar la presión de clasificación. Con esta tecnología, se espera mejorar la clasificación y aumentar la productividad del circuito, alcanzando y superando los objetivos operativos establecidos.

1.2 Formulación del Problema

Las condiciones actuales de trabajo en la planta concentradora de Cuajone presentan problemas de tipo tecnológico y baja productividad debido al incremento del Work Index del mineral de cabeza lo que genera un incremento en el By-Pass de finos, incremento en el tamaño de partícula P80 a flotación y baja presión de clasificación. Sumado a que para realizar algún cambio estos no pasan por simulaciones que puedan ayudar a predecir el impacto que tendrá en la operación lo que en conjunto perjudica el tonelaje total de procesamiento del circuito 1-A y el cual esta estrechamente relacionado a la productividad.

1.2.1 Problema General

¿Cuál es el porcentaje de incremento en tonelaje seco de procesamiento por hora al optimizar la productividad del circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet?

1.2.2 Problemas Específicos

¿Cuánto es la reducción del tamaño P80 para la clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet?

¿Cuánto es el incremento de presión para la clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet?

¿Cuánto es la reducción del porcentaje de “By-pass” de finos en la clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet?

¿En qué porcentaje se ajusta las simulaciones con el software JKSimmet en relación con los resultados experimentales en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet?

1.3 Justificación de la Investigación

1.3.1 Justificación Tecnológica

En la UMC, existe problemas por las nuevas condiciones de mineral tratado (como ejemplo se puede mencionar), durezas mayores a 19 KWh/Tc y mineral complejo de procesar. Estas nuevas condiciones sumado al envejecimiento de los equipos que en su mayoría siguen operando desde el año 1999 (última ampliación), contribuye a que los circuitos de molienda clasificación no

respondan eficientemente, concretamente el circuito 1–A. Es por ello que en el presente trabajo se planteó una alternativa tecnológica que va a permitir el incremento en la productividad del circuito sino también en una mejor operatividad del proceso es decir en un mejor performance del proceso de molienda y clasificación.

1.3.2 Justificación Económica

La mejora en la clasificación con los nuevos hidrociclones del tipo Cavex®, permitirá cumplir con los indicadores de producción y repercutirá en la cantidad de cobre fino producido anualmente, lo mencionado anteriormente en conjunto va a permitir incrementar las ganancias de la UMC perteneciente al Grupo México.

1.3.3 Justificación Social

Una mayor rentabilidad de la empresa significa un mayor aporte mediante el canon y regalías mineras, lo cual favorece económicamente a la sociedad en conjunto.

1.3.4 Justificación Medioambiental

Con la propuesta planteada en este trabajo, el de renovar y optimizar el sistema de clasificación, se lograr una reducción de impactos generados como en el caso de los residuos, desgaste prematuro de los revestimientos en los hidrociclones convencionales que tienen una duración entre 4 a 5 meses lo que genera entre 2 a 3 cambios por año eso incrementa la cantidad de residuos sólidos, con la tecnología Cavex se busca reducir la cantidad de cambios a uno por año.

1.4 Limitaciones de estudio

Como limitaciones de estudio tenemos las siguientes:

- Los muestreos que se realizaron como línea base antes de realizar la prueba con los hidrociclones Cavex® fueron solo 2, esto por la premura que planteó la UMC en probar la nueva tecnología.
- Para brindar seguimiento en campo a la prueba solo se pudo realizar en turno A (de 08:00 AM a 20:00 PM) esto debido a políticas internas de la UMC, en relación con los horarios de trabajos de un contratista.
- Fue imposible probar todas las configuraciones de “Apex”, “Vortex” e “Inlet” para la prueba esto por temas operativos, cambiar estos componentes de manera continua hubiera significado el uso del puente grúa de la planta concentradora y por ende limitar su normal uso para las demás actividades programadas, en adición a ello al plazo en que la UMC esperaba encontrar resultados.

1.5 Objetivos de la Investigación

Para la investigación planteamos los siguientes objetivos: general y específicos respectivamente:

1.5.1 *Objetivo General*

Optimizar la productividad del circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.

1.5.2 *Objetivos Específicos*

1.5.2.1 Reducir el P80 de clasificación en el circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.

1.5.2.2 Incrementar la presión para la clasificación en el circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.

1.5.2.3 Reducir el porcentaje de by-pass de finos en la clasificación en el circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.

1.5.2.4 Evaluar el porcentaje de ajuste de las simulaciones con el software JKSimmet en relación con los resultados experimentales en el circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Antecedentes de la Investigación (Estado del Arte)

2.1.1 Antecedentes locales

Según el trabajo de investigación llevado a cabo por Cardenas Castro, M. & Huaman Condori, E. (2022) en su tesis titulada "Optimización de la recuperación de cobre mediante la influencia de P80, pH y dosificación de reactivos de flotación en la Cia. Minera Antapaccay S.A.", basada en la Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco, se presenta un estudio de optimización que examina el impacto del P80, el pH y la dosificación de los reactivos Z-6 y F-501. Se observó que en un rango de P80 de (240-255) μm se lograron las recuperaciones más altas (84-87) %. Se observaron recuperaciones más bajas (= 83.61 %) con valores de P80 menores a 240 μm debido a la finura excesiva de las partículas. Asimismo, se obtuvieron recuperaciones bajas (= 84.40 %) con valores de P80 mayores a 255 μm , ya que el tamaño de las partículas era demasiado grande para adherirse a la burbuja. Se logró una recuperación máxima del 86.65% con un P80 de 242.80 μm , a un pH de 8.5 y con dosis de reactivos Z-6: 20.13 g/TMS y F-501: 17.58 g/TMS, lo que representa el punto más alto obtenido y se propone como una estrategia de control operacional para la planta concentradora

Según Arenas Farfán, W. (2019) en su tesis denominada "Procesos y mejoras en el área de molienda de la planta concentradora – Minera Las Bambas", investigación sustentada en la Universidad Nacional San Antonio Antonio Abad del Cusco, nos brinda el entendimiento operacional de una planta concentradora de gran minería, pone de manifiesto el proceso de optimización en la conminución basándose en forros del molino SAG.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

En su investigación titulada "Evaluación del circuito de molienda-clasificación en la planta concentradora de la Compañía Minera Lincuna S.A. utilizando el software Molycop Tools", Licla, C. & Padilla, J. (2021), basados en la Universidad Nacional Mayor De San Marcos, destacan la evaluación exhaustiva del circuito de molienda a través de una campaña de muestreo. Durante este proceso, se identificaron oportunidades de mejora, como la optimización de la granulometría de la alimentación a la molienda, el ajuste del tamaño de las bolas y la revisión del diagrama de flujo.

Además, la tesis ofrece una contribución significativa al explorar nuevos escenarios en el área de molienda mediante el uso del software MolyCop 3.0. Los resultados obtenidos fueron alentadores, ya que se determinaron condiciones para aumentar el tonelaje de 2,640 t/d a 4,008 t/d, al tiempo que se logró obtener un producto de molienda más fino. Específicamente, el tamaño de partícula P80 se redujo de 298 μm a 249.33 μm utilizando los molinos existentes en la planta.

En su trabajo de investigación titulado "Evaluación del circuito de molienda-clasificación en la planta concentradora Toquepala", Misael, H. (2020), de la Universidad Nacional De San Agustín, destaca la importancia de determinar el impacto de la fineza de la alimentación fresca en dicho circuito. El objetivo principal de la investigación es procesar el máximo tonelaje posible y reducir la carga circulante en la planta de Toquepala de Southern Perú, con el fin de maximizar la capacidad de procesamiento.

Según Castro Chamorro (2005) en su investigación denominada "Optimización del proceso de flotación de concentrado de zinc en la Compañía Minera Yauliyacu S.A. mediante diseños experimentales" sustentada para la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, se pudo evidenciar que la optimización del proceso de producción no solo conlleva a obtener un mejor producto, sino que además posibilitó incrementar la producción mejorando la calidad. Las mejoras

en el proceso permitió el aumento en el precio de venta final, pasando de 256.62 \$/TM a 271.81 \$/TM, esto se traduce en un 5.9% de incremento en las ganancias para la empresa.

2.1.3 Antecedentes Internacionales

Según Ö. Genç (2016) en su investigación denominada “Optimization of an industrial scale open circuit three-compartment cement grinding ball mill with the aid of simulation” quien realizó estudios en la optimización de un molino de bolas en la industria del cemento, el simuló características diferentes de estos circuitos de molienda con el software JKSimmet para obtener un aumento en la capacidad de tratamiento igual a 10%.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Procesamiento de Minerales

La minería no solo implica la operación de perforación y voladura, sino que involucra una alta demanda de profesionales, los mismos que aportan con su experiencia y conocimiento al proceso de producción. Vemos que no solo se está arraigado a la etapa en mina, sino que continúa su transición hacia la planta concentradora antes de lograr obtener el producto final que es la concentración de las especies mineralógicas valiosas, de esta manera podemos afirmar que existen diversos procesos de extracción de minerales, los cuales dependen de las características mineralógicas del mineral, los cuales están divididos entre los sulfuros y los óxidos. Para el caso de la investigación nos centraremos en la Unidad Minera Cuajone, en la cual se realizan ambos procesos de producción, pero al enfocarnos en la propuesta de mejora nos enfocaremos en la concentración de minerales sulfurados de cobre, específicamente en la que es conocida como molienda – clasificación.

A continuación, detallaremos las etapas implicadas para poder obtener el concentrado de mineral.

Según Rojas Cornejo (2009) todo tipo de actividad productiva relacionada a la concentración de minerales según la especie mineralógica que se trate, ya sea óxidos o sulfuros, permitirá obtener el producto intermedio deseado, por ejemplo concentrado de cobre o hasta obtener el producto final como lo son los cátodos de cobre, y en algunos casos algún subproducto como lo es el molibdeno. Según el autor cada mineral tiene su propia “receta” o forma de procesar para poder obtener el producto deseado, en el Perú principalmente la minería está enfocada a la obtención de concentrados de cobre, oro, plomo, zinc, plata, y molibdeno.

Según Rojas Cornejo (2009), el objetivo de las operaciones en un yacimiento de cobre es extraer diversas especies mineralógicas y separarlas de las rocas que las contienen. En las primeras fases del proceso, los fragmentos de mineral pueden alcanzar hasta 60 pulgadas de longitud, lo que complica la recuperación del mineral valioso. Por ello, es necesario reducir el tamaño del material a partículas de aproximadamente 200 micrones, dependiendo del proceso y las características del mineral, para maximizar la recuperación del cobre y otros subproductos.

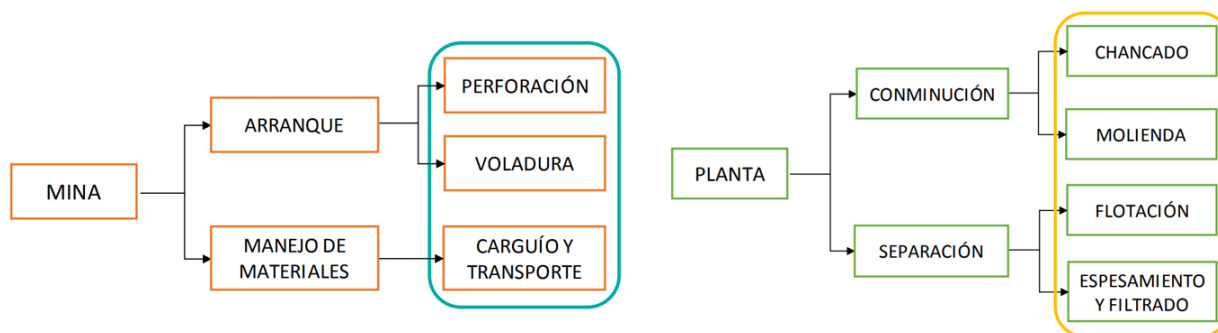
En nuestro país, existen yacimientos de diferentes escalas, desde pequeños y medianos hasta grandes operaciones de clase mundial, con capacidades de tratamiento que van desde 90,000 hasta 360,000 TM/D. Aunque las capacidades varían, los procesos para extraer las especies mineralógicas son similares; la principal diferencia radica en el tamaño de los equipos utilizados. La figura II.1 muestra un resumen de las actividades en un yacimiento de clase mundial, desde la explotación minera hasta el tratamiento en planta y la obtención del producto final.

Según (Metso Minerals, 2015) El objetivo del procesamiento de minerales es producir el máximo valor a partir de una materia prima dada. Este objetivo puede ser un producto triturado con un tamaño y forma específicos o una recuperación completa de metales a partir de un mineral

complejo. Las tecnologías para lograr estos objetivos son clásicas, complementarias y bien definidas.

Figura II-1:

Procesos de Producción en un Yacimiento



Nota: Elaboración propia.

Los primeros procesos como son la: perforación, voladura y carguío; son desarrollados por el equipo de operaciones mina, los mismos que se encargan de la parte técnica involucrada para poder obtener la mayor eficiencia en el proceso sin ocasionar lesiones o daños tanto a la propiedad como a la integridad de los trabajadores.

El mineral habiendo sido procesado en mina sirve como alimentación a la planta concentradora donde se realiza los procesos de liberación de partículas valiosas, desde las etapas de chancado la cual recibe el material de mina, pasa a la etapa de molienda donde se realizan la reducción de tamaño mediante el uso de equipos conocidos como molinos hasta un tamaño de 0.18 mm, en esta etapa se hace uso de equipos clasificadores conocidos como hidrociclones que sirven como restricciones para evitar que tamaños de partícula mayores a lo establecido metalúrgicamente en el proceso pueda llegar a las etapas posteriores, y finalmente el mineral ya liberado pasa a la etapa de flotación y filtro donde se obtienen los concentrados finales, que son filtrados para reducir la humedad hasta un 9% de esta manera el material es transportado hasta los

puertos de embarque y despachados a las principales fundiciones del mundo para la obtención de productos finales.

En la investigación nos enfocaremos a uno de los procesos más críticos, la cual es la molienda donde se invierte alrededor del 40% a 60% del consumo de energía total consumida en las actividades de un yacimiento minero

2.2.2 Conminución

La palabra conminución deriva del latín *comminuere* que significa “hacer pequeño”. Hacer pequeñas partículas a partir de partículas grandes es una tecnología humana sorprendentemente omnipresente (T. J. Napier-Munn, 1999)

2.2.3 Equipos de Conminución

Chancadora. Según Sisa Sillocca, (2019) “Como su nombre lo indica de una manera literal, es una maquinaria electromecánica, la cual realiza un movimiento excéntrico para poder generar esfuerzos de compresión y de cizalla, los mimos que son utilizados para lograr disminuir la granulometría de un mineral proveniente de mina. Como es definido en las palabras del autor este equipo es el primero en ser utilizado en las operaciones en planta, recibe tamaños de hasta 60 pulgadas y logra productos de hasta 7 pulgadas, existen diversas clases de chancadoras, para la investigación haremos mención a la conocida como giratoria”. En la figura II.2 de la página 33 podemos observar al equipo en mención.

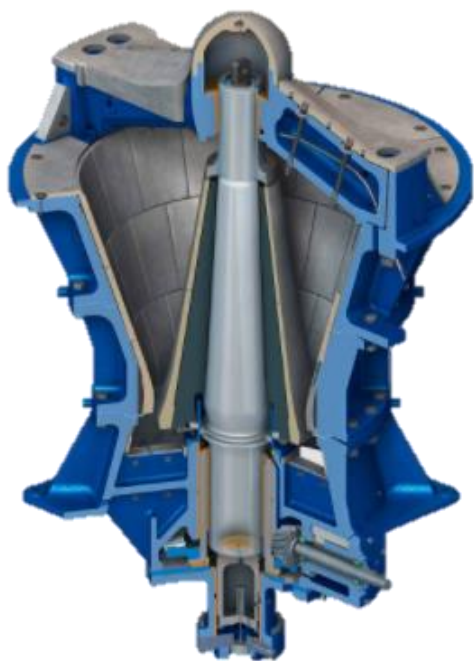
Molino. Estos equipos de la operación unitaria de molienda son los que reciben el producto proveniente del proceso de chancado, siendo el corazón o parte más fundamentales en el proceso de producción en una planta concentradora. Según Silva Balochi (2013) plantea que en esta etapa se logra la reducción en la granulometría del mineral hasta el tamaño deseado para las siguientes etapas del proceso, para lograr este objetivo se requiere de equipos de gran dimensión

denominados molinos, que en su geometría son de tipo cilíndricos que además utilizan diferentes medios de molienda como por ejemplo las barras o bolas de acero.

De acuerdo con lo mencionado por la autora estos equipos se encargan de la reducción de los minerales de tamaños de hasta 7" hasta tamaños finales de 200 micrones, o su equivalente a 0.2 milímetros. En el sector de la minería en Perú podemos encontrar molinos de barras, molinos de bolas y molinos SAG, para el caso de la investigación se cuenta con un molino de bolas en el circuito 1-A de la planta concentradora Cuajone. En la figura II.3 se puede tener una vista de los equipos.

Figura II-2:

Chancadora Giratoria



Nota: Tomado de *FLSmidth - Chancadora Giratoria NT*

Hidrociclón. Los circuitos de molienda siempre van de la mano con los equipos de clasificación. Según Laura Cuba (2018) menciona que este equipo tiene el diseño de un cilindro con terminación cónico, que además de contar con un ingreso de flujo tangencial, también posee

dos áreas que sirven como salida para el flujo que realiza su paso por el ciclón, además que utiliza la fuerza centrífuga para poder permitir incrementar el ratio de sedimentación.

Estos equipos son fundamentales, ya que garantizan que las partículas de alimentación tengan un tamaño uniforme para los procesos posteriores en la planta concentradora. La ingeniería aplicada a estos equipos es crucial, ya que influye significativamente en el rendimiento del circuito de molienda y clasificación. Sin una adecuada optimización, se pueden generar pérdidas en la capacidad de tratamiento, lo que lleva a una disminución en la producción de cobre fino. Esta investigación se centrará en mejorar la eficiencia de estos equipos para alcanzar los objetivos de aumento de productividad planteados. En la Figura II.4 se muestra el equipo en cuestión.

Figura II-3:

Molinos de Bolas y SAG



Nota: Tomado de FLSmidth – Molinos Horizontales

Figura II-4:

Hidrociclón



Nota: Tomado de Weir Minerals – Hidrociclón Cavex®

2.2.4 Simulación y Optimización

De acuerdo con T. J. Napier-Munn (1999) Inevitablemente, en vista de su pedigrí, en el libro se hace hincapié en la simulación por ordenador como principal optimización también. En este caso, la simulación implica la predicción del rendimiento en estado estable de un circuito, en términos de propiedades de la corriente, como flujo másico, concentración de sólidos y distribución de tamaño, en función de las propiedades del material, las especificaciones de la máquina y las condiciones de funcionamiento.

T. J. Napier-Munn (1999) Afirma que “El gran poder de la simulación como una herramienta de la optimización y de hecho de diseño, es su capacidad para explorar muchos escenarios diferentes de manera rápida y eficiente” Según T. J. Napier-Munn (1999) esta practica permite al ingeniero de procesos predecir con confianza la precisión para un óptimo diseño y proceso en todas sus formas, en términos de maximizar el rendimiento o minimizar el tamaño de producto, por ejemplo sin la necesidad de un trabajo de prueba costoso que en términos generales no siempre se llega un resultado conclusivo, y de tal manera que permitirá obtener información

confiable del proceso para así poder evaluar nuevas alternativas de mejora, reconocer puntos de botella y otros.

Según T. J. Napier-Munn (1999) como mínimo la simulación permite que el trabajo de planta se diseñe de manera eficiente, lo que lleva a costos reducidos de tal manera que permita minimizar la pérdida de producción y una mayor confianza en el resultado final.

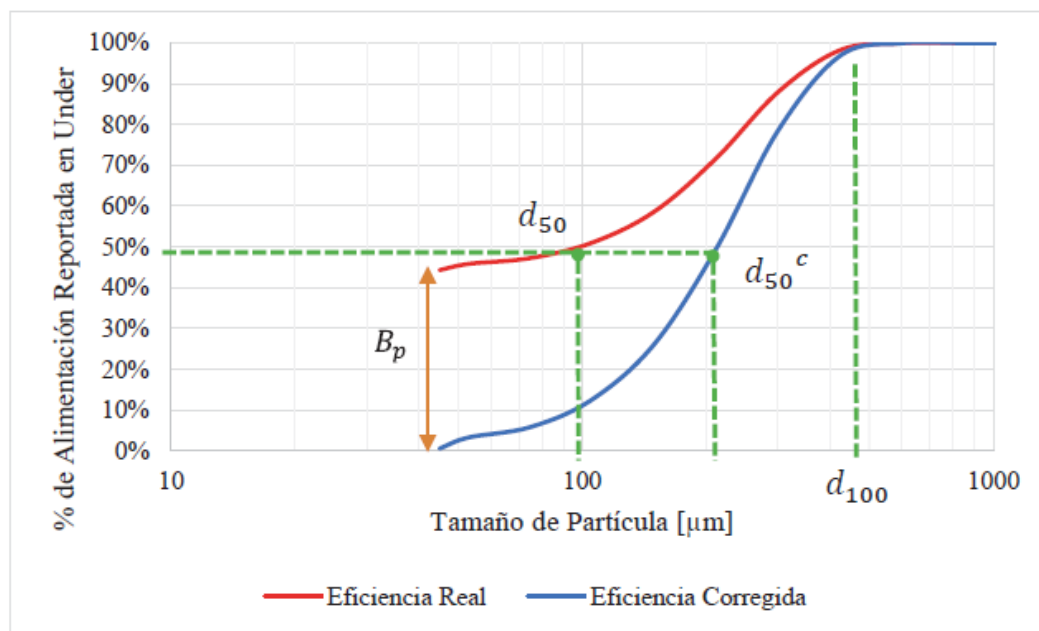
2.2.5 Eficiencia de Clasificación

Para poder determinar la eficiencia de un sistema de clasificación se emplean varios conceptos, uno de los más importantes son las curvas de eficiencia. “Estas curvas representan la razón entre la masa de tamaño i en la descarga y la masa de tamaño i en la alimentación” (Raby Ibacache, 2016, p. 24). Además, se indica que en la interpretación de estas curvas podemos observar dos distintos escenarios, el primero el cual está relacionado con las granulometrías gruesas donde se obtiene eficiencias de hasta 100%, debido a que la fuerza centrífuga tiene mayor efecto en las partículas de mayor masa. “No obstante, se observa que para los tamaños más finos la eficiencia no es 0%, indicando que una cierta cantidad de finos será arrastrada por el agua hacia la descarga del clasificador” (Raby Ibacache, 2016, p. 25). Y el segundo escenario donde a diferencia de las partículas gruesas, en el cual ya se mencionó el efecto de la fuerza centrífuga, en las de granulometría fina esta fuerza se ve menguada ya que se tratan partículas de rangos entre 50 a 300 micrones, bajo estas condiciones, en teoría la eficiencia debería ser 0%, ya que lo que se busca en el hidrociclón es obtener el producto fino en el “OverFlow” y el grueso en el “UnderFlow”, pero no se llega a dar este concepto ya que la cantidad de agua o bien llamado porcentaje de sólidos, el cual no llega a un 100%, generará siempre un arrastre natural o “By-Pass” de las partículas finas con el agua hacia la descarga de gruesos del hidrociclón.

Como se señaló previamente, la discrepancia entre las curvas de eficiencia real y corregida se atribuye al “By-Pass” de finos, los cuales son arrastrados por el agua en el flujo de descarga del ciclón, también conocido como “UnderFlow” en inglés. Este parámetro reviste una importancia crucial para evaluar la eficacia de un sistema de clasificación, dado que un mayor arrastre de finos hacia el “UnderFlow” puede resultar en un aumento de la carga circulante del sistema y, consecuentemente, en una clasificación deficiente. En los casos más desfavorables, esto puede provocar una disminución en la capacidad de tratamiento o afectar la calidad del producto en el circuito de molienda-clasificación. En la figura II.5 se presentan las curvas de eficiencia para una mejor comprensión.

Según T. J. Napier-Munn (1999) La eficiencia de clasificación, o la agudeza de la curva de eficiencia, ejerce una influencia significativa en el rendimiento general del sistema, aunque su manipulación directa resulta desafiante. Por lo general, la curva de eficiencia reducida permanece constante para un diseño de ciclón y condiciones de alimentación específicas. En este contexto, la agudeza real del corte tiende a maximizarse, lo que limita la proporción de agua que se desvía hacia el overflow. Aunque hay evidencia de que un aumento en la presión puede mejorar la agudeza, su efecto suele ser moderado. Es importante evitar cualquier acción que pueda reducir la capacidad del circuito, y se debe prestar especial atención al diseño del vortex finder, asegurándose de que ni sea muy largo ni muy corto.

Figura II-5:
Curvas de Eficiencia de Clasificación



Nota: Tomado de Raby Ibacache (2016)

Incrementar el ángulo del cono o el tamaño del “Vortex” también puede mejorar la agudeza. Sin embargo, concentraciones de sólidos en la alimentación excesivamente altas o altas concentraciones de barros, que aumentan la viscosidad del fluido transportador, pueden resultar en una agudeza de corte reducida. Para abordar este problema, suele ser más efectivo diluir la alimentación del sistema.

2.2.6 Productividad

Al hablar de productividad, nos referimos a la medida económica determinada por la comparación entre los bienes o servicios producidos, y la expectativa o la cuota mínima de producción indispensable. O dicho en términos más simples: es la relación que hay entre lo producido y lo que se necesita producir, tomando en cuenta los factores e insumos necesarios para poner en marcha el proceso. En el caso de plantas de procesamiento de minerales la productividad se mide en función al tonelaje procesado en la planta de molienda lo que permite cuantificar el mineral procesado en función a la capacidad de diseño (Dr. Jaime E. Sepúlveda, 1986).

Según Editorial Etecé los Tipos de Productividad son los siguientes:

Productividad laboral. Conocida también como productividad por hora trabajada, tiene que ver con el aumento o la disminución del rendimiento en pro de la obtención del producto final.

Productividad total de los factores (PTF). Aumento o disminución del rendimiento debido a la variación de uno o varios de los factores que intervienen en la producción, como lo son el trabajo, capital o los conocimientos. Está asociada además a la tecnología y la eficiencia técnica en relación a las variaciones interanuales o al ritmo de crecimiento de la empresa.

Productividad marginal. También llamado “producto marginal” del insumo, se trata de la variación experimentada en la producción de un bien, cuando se incrementa uno solo de los factores que intervienen en su producción, mientras el resto permanece constante.

Según Editorial Etecé los Factores que intervienen en la Productividad son los siguientes:

Factores atribuibles a los diseños e insumos no laborables. Es decir, aquellos que tienen que ver con los elementos materiales, pero no con el proceso mismo sino con el diseño y mantenimiento de los elementos, como son el diseño de los productos y servicios, la estabilidad de los diseños, la calidad de las materias primas, la calidad y el mantenimiento de la maquinaria, la expectativa de calidad del producto final y el tamaño de la empresa.

Factores atribuibles a la organización del trabajo. Aquellos que atañen a la estructura y el funcionamiento de la organización, tales como la disposición y empleo del espacio de trabajo, el método específico de trabajo, la planificación de los insumos, del entorno, o los tiempos de trabajo.

Factores atribuibles a los trabajadores. Aquellos que tienen que ver con la fuerza de trabajo o el capital humano, tales como la formación educativa de los trabajadores, su estado físico durante las horas de trabajo, su motivación hacia el trabajo y su puntualidad.

Factores atribuibles a condiciones externas. Aquellos que no tienen que ver con el interior de la empresa per se, sino con elementos foráneos. Tales como la mercadotecnia y las necesidades del mercado de consumo, las variables del entorno económico, o la internacionalización del producto final.

2.2.7 Hidrociclones Cavex®

Desde el lanzamiento comercial de los hidrociclones Cavex® en la década del noventa, la industria de la minería cambió debido no solo a la mayor capacidad volumétrica, sino que también al incremento en la eficiencia de clasificación respecto a la competencia.

Las principales características del ciclón Cavex® según Weir Minerals (2017):

- El diseño Cavex® reduce la resistencia y turbulencia del flujo de lodo, gracias a su cámara geométrica helicoidal de alimentación. Esto permite aumentar el flujo procesado de los hidrociclones instalados.
- La disminución de turbulencia provoca menos desgaste localizado y un desgaste más parejo del revestimiento.
- En circuitos de molienda, los hidrociclones Cavex® aumentan la capacidad del circuito, reduciendo el número de partículas desclasificadas en el flujo inferior (Underflow).
- Los hidrociclones Cavex® se pueden equipar opcionalmente con un Sistema de Monitoreo de Ciclón Cavex®, que permite controlar y anticiparse a las condiciones de acordonamiento, que obstaculiza la obtención de resultados óptimos en el proceso de clasificación. Los hidrociclones Cavex® pueden ser equipados con una cámara de rebalse – ACB (estabilizador del núcleo de aire) – en la salida del rebalse, lo que

proporciona más estabilidad al hidrociclón en el núcleo de aire, reduciendo la posibilidad de acordonamiento y mejorando su eficiencia de corte.

El ciclón a lo largo de los años ha demostrado su superioridad frente a los competidores, la descripción del ciclón es la siguiente, según Weir Minerals (2017):

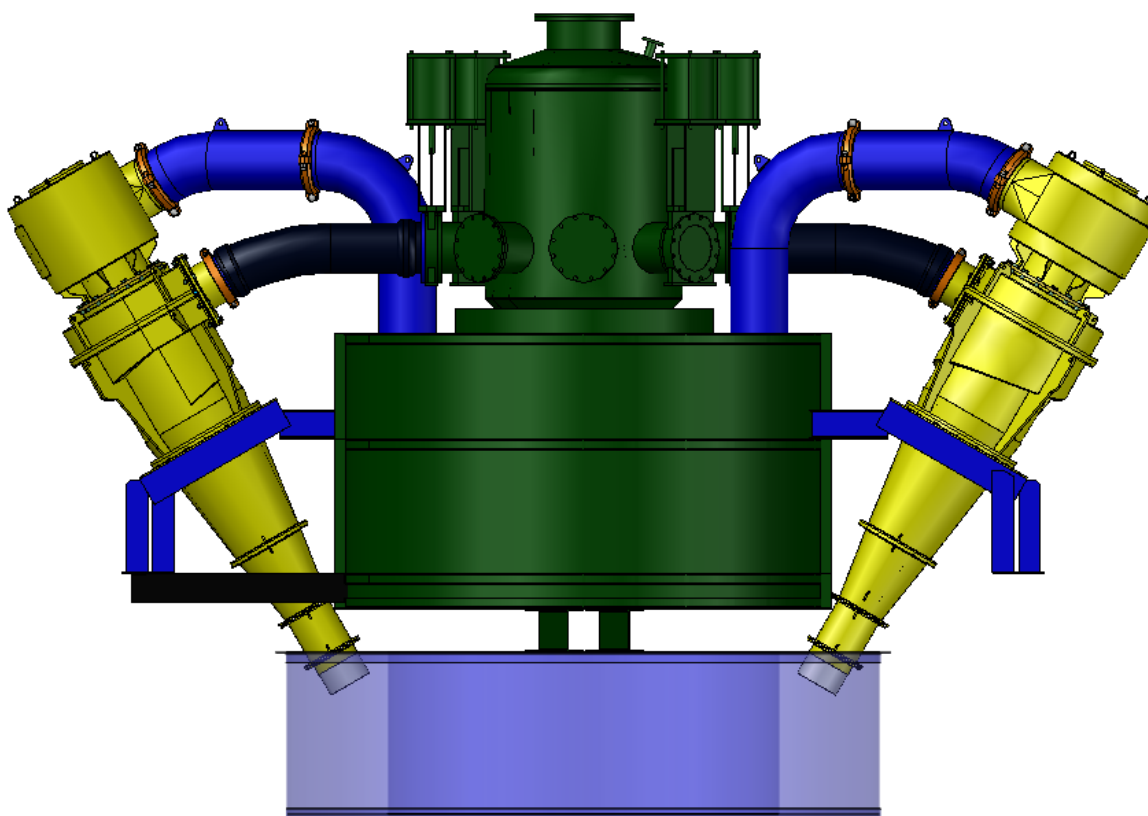
- La cámara de alimentación del hidrociclón Cavex® posee un diseño en espiral que genera un flujo natural sin turbulencia interna. El hidrociclón Cavex® está diseñado para condiciones de trabajo pesado y durabilidad, incluyendo varios componentes como: carcasa rígida con sus revestimientos anti-abrasivos recambiables correspondientes. Las carcasas son apernadas con pernos métricos y/o abrazaderas de rápida acción, disponibles según su tamaño.
- El sistema de revestimiento del hidrociclón Cavex® está diseñado para fijarse a la carcasa sin necesidad de adhesivos. Los revestimientos son moldeados para lograr un ajuste preciso en cada componente de carcasa.
- Esta característica permite al personal de la planta cambiar los componentes gastados sin los retrasos que implican los revestimientos cuando son adheridos, eliminando también los peligros y el impacto ambiental implícito en el uso de adhesivos.

Lo descrito se refiere al diseño del ciclón, que no solo permite mejorar la eficiencia en la clasificación, sino que también facilita un mayor flujo másico, lo que a su vez posibilita incrementos en el tonelaje procesado. Además, el ciclón se adapta a diferentes condiciones del mineral, como la dureza y la abrasión, con revestimientos diseñados para resistir el desgaste natural causado por estos materiales. Cabe destacar que el diseño del ciclón también simplifica el

mantenimiento de los revestimientos, los cuales no requieren adhesivos para fijarse a la carcasa metálica, lo que reduce significativamente el tiempo dedicado a las labores de mantenimiento.

Figura II-6:

Batería Hidrociclones Cavex® 700

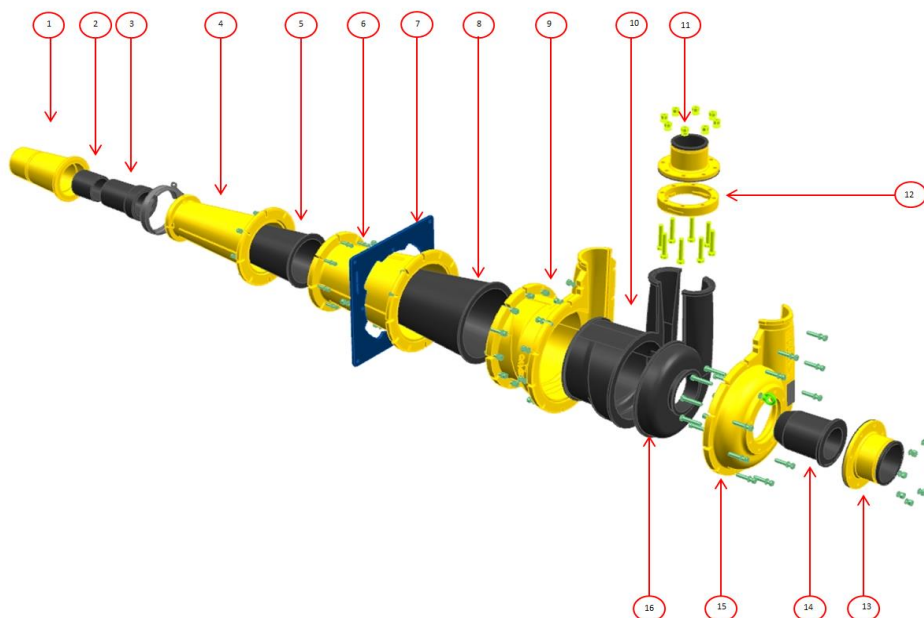


Nota: Tomado de Manual instalación, operación y mantenimiento hidrociclones Cavex®

La imagen hace alusión al diseño de la batería de hidrociclones instalada en UMC como parte de una prueba contra rendimiento de resultados. Esta batería consta de 6 hidrociclones del modelo Cavex® 700 CVX. El modelo descrito anteriormente es el primero en ser probado a nivel de Perú, debido al éxito de otros modelos como el 400 CVX, 800 CVX, 650 CVX, fueron los precedentes para que la Unidad Minera Cuajone apostará por la marca Cavex® para su operación en el circuito 1-A de su Planta Concentradora Cuajone.

Figura II-7:

Partes del Hidrociclón Cavex®



Nota: Tomado de Manual instalación, operación y mantenimiento hidrociclones Cavex®

Tabla II-1:

Partes del Hidrociclón Cavex®

Item	Parte	Item	Parte
1	Porta "Ápex"	9	Cámara de alimentación
2	Protector de aspersor	10	Revestimiento de cámara de alimentación
3	Ápex	11	Adaptador de alimentación
4	Cono	12	Brida de alimentación
5	Revestimiento del cono	13	Adaptador de rebalse
6	Cono superior	14	"Vórtex Finder"
7	Placa de montaje	15	Tapa
8	Revestimiento del cono superior	16	Tapa de revestimiento

Nota: Tomado de Manual instalación, operación y mantenimiento hidrociclones Cavex®

2.3 Definición de Términos Básicos

2.3.1 Mena

“El término mena se utiliza a menudo, en términos generales, para designar cualquier mineral extraída de una mina, técnicamente es un agregado de minerales y ganga, a partir del cual pueden extraerse uno o más metales” (Universidad de Santiago de Chile, 2017).

2.3.2 Over Flow

Es el flujo de rebose del hidrociclón, el flujo que partiendo de la clasificación se deriva por el “Vortex” y se dirige a la siguiente etapa de concentración “flotación”, se dice que es la pulpa que tiene la mayor proporción de material fino.

2.3.3 Under Flow

Es el flujo de descarga del hidrociclón, partiendo de la clasificación es el flujo que se va por el “Ápex”, este flujo contiene mayor cantidad de material de granulometría gruesa, generalmente es enviado al molino para que sea liberado.

2.3.4 Vortex

Es el dispositivo que permite la salida del “OverFlow”, a través del flujo de rebose del hidrociclón, su diámetro influye en la cantidad de carga circulante que se genera en el sistema.

2.3.5 Apex

Es el dispositivo que regula la entrada de aire al hidrociclón por medio del “UnderFlow”, a través del flujo de la descarga. Su diámetro influye en la densidad de salida del flujo y por ende en la cantidad de finos que se genera.

2.3.6 P80

Tamaño de partícula del “OverFlow” en micrones en la cual el 80% de la carga logra pasar sin ser retenido.

2.3.7 F80

Tamaño de partícula en la alimentación fresca en micrones, en la cual el 80% de la carga logra pasar sin ser retenido.

2.3.8 Alpha

Parámetro adimensional que indica la nitidez de la curva de partición.

2.3.9 By-Pass

Porcentaje de material fino que es arrastrado hacia el “UnderFlow”.

2.3.10 Carga Circulante

Cantidad de carga que recircula en el circuito de molienda – clasificación.

2.3.11 Parámetros De Operación

Son todas los parámetros de control que influyen en la operación que son considerados imprescindibles, como, por ejemplo: presión de clasificación, número de hidrociclones en operación, porcentajes de sólidos, densidades de pulpa, etc.

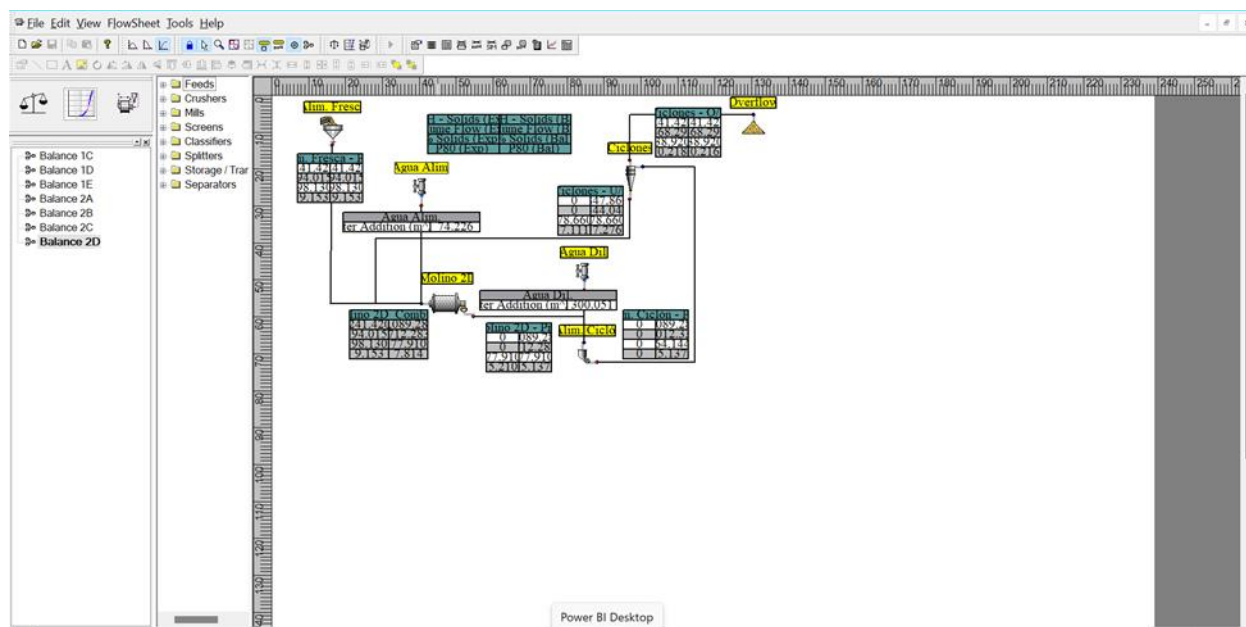
2.4 Software JKSimmet

T. J. Napier-Munn (2005) indicó:

JKSimmet es un poderoso y amistoso programa de simulación de estado de equilibrio, es amistoso porque es muy fácil de usar, este se basa prácticamente en diversos estudios de investigación por parte del “Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre” (JKMRC). El programa puede ser instalado en Windows y Mac; contiene modelos robustos y útiles de la mayoría de las unidades de proceso de conminución y clasificación que se encuentran en las plantas de procesamiento de mineral.

A continuación, se muestra El entorno del Software en su versión 6.2 (cabe señalar que actualmente se tiene la versión 6.3):

Figura II-8:
Software JKSimmet



Nota: Tomado del Software JKSimmet 6.2

2.4.1 Modelos Matemáticos Usados

Según Whiten W. J, (1984) donde afirma:

Las etapas clave en los circuitos de molienda son los molinos de bolas y los hidrociclones. El molino de bolas se caracteriza por su modelo de mezclado perfecto, que guarda similitudes con el modelo de balance poblacional. Este enfoque supone una homogeneidad total dentro del molino, simplificando así muchas de las complicaciones inherentes al balance poblacional. Ambos modelos, el de mezclado perfecto y el de balance poblacional, coinciden en este punto.

Alimentación + Partículas que entran = Producto + Partículas que salen

Además, es necesario familiarizarse con dos factores controlan el rompimiento de las partículas dentro del molino, estas son las siguientes:

a) La función de selección, la cual define la probabilidad de rompimiento de las partículas.

$$p_i = d_i s_i$$

Podemos afirmar que d_i es la función de descarga en el molino y s_i es la función de selección; entonces podemos generar la siguiente ecuación

$$\text{partículas que salen} = r_i s_i$$

b) La función de rompimiento, esta es la teoría que indica como las partículas seleccionadas son quebradas o rotas en el interior del molino de bolas, según la siguiente ecuación:

$$\text{partículas que entran} = a_{ij} r_j s_j$$

Donde a_{ij} significa la función aparente de quebrado o llamado por otros autores como función apariencia, es decir, las partículas que son quebradas al tamaño i y que llegan a ser parte del tamaño j , por último, según (Whiten W. J, 1984), la ecuación de balance en función del tamaño de partícula es la siguiente:

$$f_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} p_i \frac{r_i}{d_i} = p_i + p_i \frac{r_i}{d_i}$$

Se puede determinar la relación $\frac{r_i}{d_i}$ para cada fracción de tamaño utilizando la distribución de tamaños en la alimentación y descarga del molino de bolas, junto con una estimación adecuada de la función aparente de quebrado (a_{ij}).

El modelo que aborda el proceso de clasificación en hidrociclones se fundamenta en ecuaciones empíricas, como propuesto por Lynch y Rao en 1975.

Las ecuaciones siguientes detallan este modelo:

$$\frac{d_{50c}}{D_C} = K_{D1} \left(\frac{D_O}{D_C}\right)^{0.52} \left(\frac{D_U}{D_C}\right)^{-0.47} \lambda^{0.93} \left(\frac{P}{\rho_p g D_C}\right)^{-0.22} \left(\frac{D_I}{D_C}\right)^{-0.50} \left(\frac{L_C}{D_C}\right)^{0.20} \theta^{0.15}$$

Donde;

$$K_{D1} = K_{D0} D_C^{-0.65}$$

$$Q_f = K_{Q1} D_C^2 \left(\frac{P}{\rho_p} \right)^{0.50} \left(\frac{D_O}{D_C} \right)^{0.68} \left(\frac{D_I}{D_C} \right)^{0.45} \theta^{-0.10} \left(\frac{L_C}{D_C} \right)^{0.20}$$

Debemos asumir que:

$$K_{Q1} = K_{Q0} D_C^{-0.10}$$

K_{D0} y K_{Q0} estos dos parámetros dependen específicamente de las características de la alimentación de sólidos. Según (K. Nageswararao, 2004) cada valor de la ecuación es explicado de la siguiente forma:

- D_I es el diámetro de entrada, m.
- D_O es el diámetro de finos (vortex), m.
- D_U es el diámetro de gruesos (ápex), m.
- D_C es el diámetro del cilindro, m.
- L_C es la longitud de la sección cilíndrica, m.
- Θ es el ángulo del cono.
- P es la presión de operación, kPa.
- ρ_p es la densidad de pulpa, ton/m³.
- g es la gravedad, 9.81 m/s².
- Q_f es la velocidad de flujo, m³/h.
- R_f es la recuperación de agua a los gruesos, %.
- R_v es la recuperación volumétrica de pulpa a gruesos, %.
- K_{D0} es la constante del modelo.
- K_{Q0} es la constante del modelo.
- λ es un factor de corrección,
- C_v es la fracción volumétrica de sólidos en la pulpa de alimentación.

El d_{50c} se obtiene mediante el uso de la ecuación que describe la curva de eficiencia corregida de separación.

$$d_{50c} = C \left[\frac{(1 + \beta \beta^* x)(\exp(\alpha) - 1)}{\exp(\alpha \beta^* x) + \exp(\alpha) - 2} \right]$$

Donde:

- α es un parámetro de eficiencia.
- β es el factor de corrección del efecto de gancho.
- C es la recuperación de agua a los finos, $C=100-R_f$, %.

Según (K. Nageswararao, 2004) Se seleccionó el factor de sedimentación obstaculizado v_H/v_T , λ con el propósito de considerar el efecto del movimiento diferencial de las partículas sólidas, y, en consecuencia, la influencia de la concentración de sólidos en la distribución de tamaño D50. Se asumió que este factor tendría en cuenta adecuadamente las variaciones en la viscosidad de la pulpa y los efectos viscosos derivados de los cambios en la composición de la alimentación. Se contemplaron las opciones más evidentes para las variables de diseño.

- Diametro del ciclón, D_c ;
- “Vortex finder” reducido, D_o/D_c ;
- “Spigot o Apex” reducido, D_u/D_c ;
- “Inlet” reducido, D_i/D_c ;
- Longitud reducida de la sección cilíndrica L_c/D_c ;
- Angulo del cono, Θ .

Según (K. Nageswararao, 2004) Cuando las entradas no presentaban forma circular, se consideró que el tamaño de la entrada equivalía al de un círculo con la misma área. A pesar de que los hidrociclones pudieran ser geoméricamente similares y operar en condiciones de funcionamiento idénticas (por ejemplo, con la misma lectura del manómetro en la concentración

de sólidos de entrada y alimentación), no se anticipaba que mostraran un rendimiento idéntico. Por lo tanto, fue necesario incluir el tamaño (diámetro) del ciclón como una variable independiente.

Según (K. Nageswararao, 2004) Se optó por excluir deliberadamente otras variables de diseño, como la rugosidad de la pared interior de los revestimientos y el tipo de entrada (por ejemplo, involuto, tangencial, etc.). Como resultado, cualquier influencia que estas variables pudieran tener, si es significativa, podría introducir errores en el modelo. Además, un supuesto implícito destacado en la construcción del modelo es la consideración de propiedades fijas del medio fluido. Esto implica que el modelo solo es aplicable en situaciones donde el agua actúa como el medio fluido.

Con el fin de extender la aplicabilidad del modelo, se determinó que era necesario incluir las 'características de la materia prima' como una variable independiente. Los siguientes ejercicios conceptuales sirven para respaldar esta afirmación.

Según (K. Nageswararao, 2004) Si consideramos un hidrociclón que procesa dos materiales distintos pero homogéneos (por ejemplo, piedra caliza y mineral de hierro) en condiciones operativas idénticas, y suponemos que las distribuciones de tamaño y forma de las partículas son idénticas, con la única diferencia siendo el material tratado, aun así anticiparíamos que las características de rendimiento del ciclón como (Q , D_{50c} y R_f) difieran.

De manera similar, al visualizar el funcionamiento de un ciclón tratando un solo material (por ejemplo, piedra caliza) pero con distribuciones de tamaño de alimentación distintas (digamos 25% malla -270 en un caso y 50% malla -270 en otro), bajo condiciones de operación y diseño idénticas, también esperaríamos observar diferencias en las características de rendimiento.

Esto proporciona una comprensión básica de cómo la distribución del tamaño y la densidad del material de alimentación influyen en las características de rendimiento del ciclón. Es

importante tener en cuenta que, además de estos efectos, la descripción precisa del efecto de la materia prima es intrínsecamente compleja. No existe una simplicidad para cuantificar cualquier material específico en términos de tamaño nominal del producto, densidad, etc. En su lugar, se optó por utilizar las características del material de alimentación y combinarlas en un único parámetro, km . Y se resumen matemáticamente de la siguiente manera:

$$P_i = f(K_m, D_c, D_0/D_c, D_u/D_c, D_i/D_c, L_c/D_c, \Theta, \lambda, \left\{ P / (\rho_p g D_c) \right\} \nu_1, \nu_2, \dots)$$

Según (K. Nageswararao, 2004) Es evidente que ν_1, ν_2, \dots y así sucesivamente, representan las variables o factores operativos y de diseño cuyos valores son desconocidos o no cuantificables. No pretendemos determinar cuantitativamente el efecto independiente de cada uno de ellos.

Ecuaciones del Modelo.

$$\frac{Q}{D_c^2 \sqrt{P/\rho_p}} = K_{Q_0} \{D_c^{-0.10}\} \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^{0.68} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0.45} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.2} \Theta^{-0.10}$$

$$\frac{d_{50c}}{D_c} = K_{D_0} \{D_c^{-0.65}\} \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^{0.52} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{-0.50} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0.2} X \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.2} \Theta^{0.15} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0.2} \lambda^{0.93}$$

$$R_f = K_{W_0} \{D_c^{0.00}\} \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^{-1.19} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{2.4} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0.5} X \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.22} \Theta^{-0.24} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0.53} \lambda^{0.27}$$

$$R_v = K_{V_0} \{D_c^{0.00}\} \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^{-0.94} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{1.83} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0.25} X \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.22} \Theta^{-0.24} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0.31}$$

Ver lista de términos de la ecuación de Lynch y Rao.

2.4.2 Introducción al Ajuste de Modelos

Arroyo (2021) menciona:

El proceso de ajuste del modelo permite que JKSimmet se adapte con precisión a cada planta y a las condiciones operativas específicas, e incluso a tipos de mineral particulares, lo que nos permite encontrar la configuración óptima de la planta en función de diversos criterios. Este

software ajusta los parámetros seleccionados del modelo en función de las discrepancias sistemáticas entre los datos de productos medidos y los datos de productos predichos por el modelo. Al igual que en el balance de masa, este proceso requiere principalmente la recopilación de datos experimentales precisos, ya sea a escala piloto o a escala de planta completa. Cualquier parámetro dentro de los modelos de conminución puede ser incorporado en el proceso de ajuste. Por lo general, los parámetros del modelo se refieren a las características intrínsecas de los equipos de conminución y clasificación, mientras que los datos que se ajustan corresponden a los flujos específicos dentro del proceso.

Figura II-9:

Parámetros Para Llenar el Ajuste en JKSimmet

Parametros	Descripción
Parámetros del equipo.	Estos dependen del equipo a utilizar, suele tratarse de dimensiones y ajustes operativos clave.
Parámetros del mineral.	Dependen del mineral (Indicie de trabajo, gravedad específica)
Parámetros de operación.	Estos dependen de una combinación de los dos parámetros antes mencionados y algunos otros (Ej. La presión de alimentación al hidrociclón).
Flujos del circuito.	El instrumento del proceso a menudo proporciona una estimación de los flujos de sólidos y líquidos en el circuito.
Parámetros del modelo que se pueden ajustar.	Cada modelo tiene una lista de parámetros que se pueden ajustar. Cada parámetro que se va a ajustar se selecciona de un menú para ese modelo.

Nota: Tomado de Arroyo (2021)

Capítulo III: Hipótesis y Variables

3.1 Hipótesis

El desarrollo de la presente investigación permite determinar la influencia del uso de nuevos hidrociclones de tecnología contemporánea con el apoyo de la simulación y control en un programa informático especializado. Por tanto, las hipótesis de trabajo planteadas son las siguientes.

3.1.1 *Hipótesis General*

Con el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet se logra optimizar en 1% la productividad del circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone.

3.1.2 *Hipótesis Específicas*

3.1.2.1 Se reduce el tamaño P80 en 5 micrones la clasificación en el circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.

3.1.2.2 Se incrementa la presión en 1 psi para la clasificación en el circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.

3.1.2.3 Se reduce el porcentaje de “By-pass” de finos en 5% para la clasificación en el circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.

3.1.2.4 El uso del modelo de simulación con el JKSimmet en comparación con la data de planta permite ajustar favorablemente los parámetros operativos en el circuito 1–A de molienda y

clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.

3.2 Identificación de Variables e Indicadores

3.2.1 Variables Dependientes

Optimización de la productividad del circuito de molienda y clasificación 1–A de la planta concentradora Cuajone.

3.2.2 Variables Independientes

- P80 del circuito.
- Presión de clasificación al nido de hidrociclones.
- By-Pass de finos.
- Parámetros del modelo para simulación.

3.2.3 Indicadores

- Toneladas de mineral procesado por día.
- Diámetro equivalente de la sección transversal de alimentación al hidrociclón.
- Margen de porcentaje de solidos en la alimentación al hidrociclón.
- Tipo de descarga en el “Underflow” del hidrociclón.

3.2.4 Operacionalización de Variables

Tabla III-1:

Matriz de Operacionalización de Variables: Optimización de la Productividad del Circuito 1-A de Molienda y Clasificación en la Planta Concentradora Cuajone Mediante el Uso de Hidrociclones Cavex® y Simulación con JKSimmet

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidades	Instrumento
(VD) Variable dependiente.	Productividad del circuito 1A.	Técnicamente la productividad se define como una medida que permite calcular cuántos bienes y servicios se produjeron por cada factor utilizado (Drew, 2024, p 200).	Tonelaje descargado por el “Overflow” del nido de hidrociclones en TMSD entre el KPI del circuito 1–A, se determina mediante la balanza instalada en la faja 12-1A.	Total de tonelaje producido por día de trabajo, cuyo valor oscila entre 14,000 a 16,000 TMSD, dividido entre el KPI de 15,000 TMSD	Toneladas de mineral procesado por día en el flujo de finos para flotación.	TMSD Balanza, Ramsey Microtech 2000, en faja de alimentación. Rango 0 a 20,000 TMS.
	P80 del circuito	Tamaño de partícula en la alimentación fresca en micrones, en la cual el 80% de la carga logra pasar sin ser retenido. (J. Sepulveda 1986, p. 34).	Medición en micrones del tamaño del producto del Overflow de los hidrociclones hacia flotación.	Diámetro de partículas expresados en micrones cuyo valor oscila entre 220 a 280 um.	Margen de P80 Bajo: 220 – 240 um Optimo: 240 – 260 um Alto: 260 – 280 um	mm Rotap, equipo para análisis granulométrico para la determinación del P80.
(VI) Variables independientes.	By-Pass de finos	Porcentaje de material fino que es arrastrado hacia el “UnderFlow”. (Napier-Munn, 2005, p. 54).	Determinación del porcentaje de By-Pass de finos, mediante balances metalúrgico.	Cantidad en porcentaje de partículas finas que van al “Underflow” que oscila entre 40% a 60%.	Margen de By-Pass de finos: Bajo: 30-40% Optimo: 40-50% Alto: 50-60%	% Balances metalúrgicos, Balanza Vega 100 para el pesado de las muestras.
	Presión de clasificación al nido de hidrociclones.	Presión donde la fuerza centrífuga ejerce el efecto de separación de partículas gruesas (Napier-Munn, 2005).	Medición de la presión en psi, a la cual se genera la clasificación de partículas finas de las gruesas.	Presión de la clasificación cuyo valor oscila entre 6 a 12 psi.	Tipo de descarga en el “Underflow” del hidrociclón: Acordonada, óptima y paraguas.	Psi Manómetro tipo Bourdon marca Vegabar 52 en nido de hidrociclones Rango de 0 a 15 psi
	Parámetros del modelo para simulación	Parámetros que el modelo del programa JKSimmet ajusta con base a los datos muestreados y a la base de datos disponible (Napier-Munn, 2005, p. 98).	Cuantificación del ajuste de los parámetros del modelo para la simulación en porcentaje.	Relación de ajuste en porcentaje, objetivo 100 %, valores que oscilan entre 60 a 110%.	Relación de ajuste: Bajo: 60 – 80%. Optimo: 95 – 110%	Adimensional Programa JKSimmet Versión 6.2.

Nota: Elaboración propia

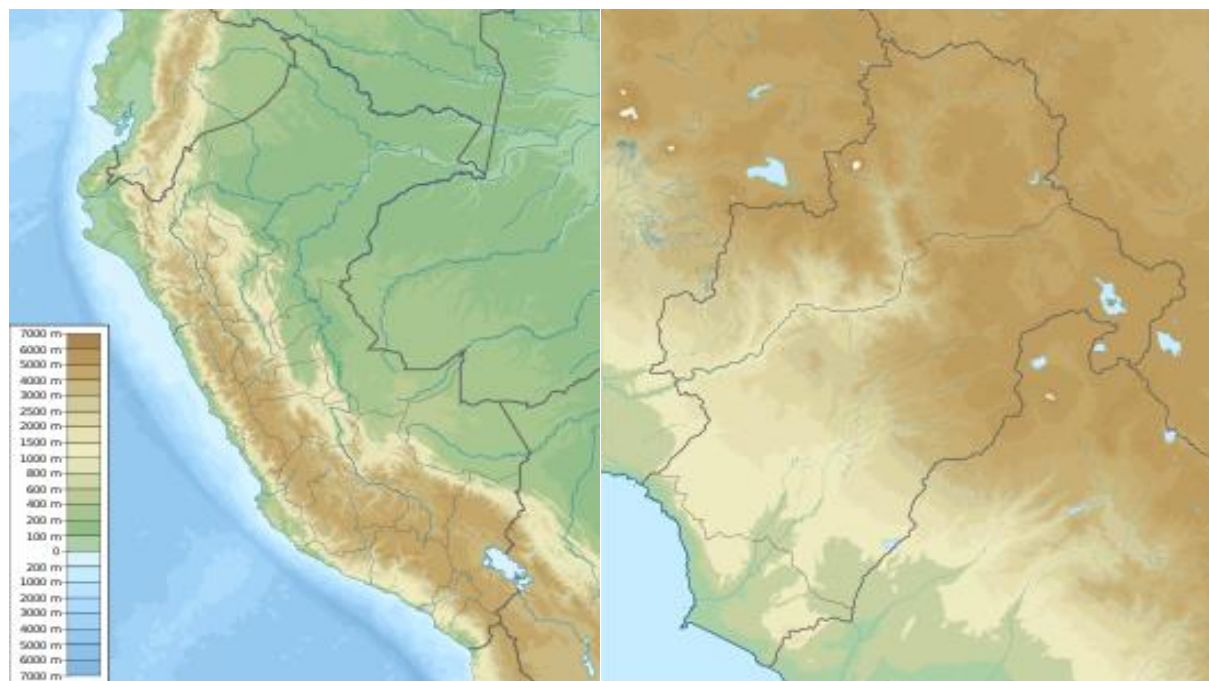
Capítulo IV: Diseño metodológico

4.1 Ámbito de Estudio: Localización Política y Geográfica

Southern Peru Cuajone es una mina de cobre a cielo abierto políticamente ubicada en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua, Perú a 161 Km aproximadamente del puerto de Ilo (Longitud -70.759000, Latitud -17.062000). El depósito se sitúa en la franja occidental de la Cordillera Occidental, en la región sur de los Andes peruanos, formando parte de un distrito minero que incluye dos yacimientos bien conocidos: Toquepala y Quellaveco. Se encuentra a una altitud aproximada de 3500 metros sobre el nivel del mar, la zona sísmica es el UBC 4, La temperatura del aire se encuentra entre 2 a 26 °C, con una humedad relativa de 44%, la velocidad del aire se encuentra aproximadamente 27 KM/H y la precipitación anual en promedio es de 127 mm).

Figura IV-1:

Mapa Ubicación Mina Cuajone



Nota: Tomado de Wikipedia (2022)

La Unidad Minera de Cuajone se encuentra conectada a la ciudad de Moquegua a través de una carretera asfaltada de 33 km, la cual se extiende por la carretera binacional en dirección de Moquegua a Torata. Asimismo, la distancia total desde la mina hasta el Puerto de Ilo es de 135 km por la misma vía binacional.

La concentradora tiene una capacidad de tratamiento de 87,100 toneladas de mineral al día, el tipo de roca alimentada al momento de realizar la tesis tiene la siguiente distribución: 34.54% latita porfirítica, 33.98% andesita basáltica, 12.07% andesita intrusiva, 5.04% de Reolita porfirítica y 13.96% de brecha. Este mineral tuvo una ley de Cu de 0.648%, la ley de Cu en el concentrado fue de 25.45%, con una recuperación de 84.83%. La ley de Mo en la cabeza fue de 0.022%, el grado del concentrado de molibdeno alcanzó 53.77% de Mo con una recuperación Overall de 65.74%. El porcentaje acumulado de malla +1/2” en la alimentación a molinos para este periodo registró 6.90% y el % de malla +65 en el “Overflow” fue de 24.79%. El “Work Index” operacional fue 18.55 Kwh/TC. El “Work Index” por el método de Bond para la muestra compósito de alimentación al momento de redactar la tesis es de 18.70 Kwh/TC, sin embargo, estos valores tienen puntuales mayores a 19 Kwh/TC.

4.2 Diseño de la Investigación: Tipo, Método y Nivel de Investigación

El tipo de investigación es tecnológica, tiene como propósito determinar la influencia de la performance de los hidrociclones Cavex® en la clasificación del circuito 1-A en una planta de tratamiento de minerales de cobre que opera a gran escala durante las 24 horas.

El nivel de la investigación es de alcance descriptivo comparativo, debido a que en el cuerpo de la tesis donde se muestra una comparación de resultados antes y después de la instalación de los hidrociclones Cavex® en el circuito 1-A.

El enfoque de la investigación es de tipo cuantitativo. “Es lo usual cuando la muestra está disponible en un solo lugar y se tienen facilidades de acceso” (Vara Horna, 2012, p. 219). Unidad de Análisis

4.3 Unidad de Análisis

La UMC tiene 11 líneas de producción (ver anexo B), para la investigación se consideró como unidad de análisis los datos del proceso en el circuito 1–A de molienda y clasificación.

4.4 Población de Estudio

Para determinar la población de estudio, se consideró los datos obtenidos en el proceso de molienda y clasificación de todas las líneas de producción que cuenta la planta concentradora de la UMC, que según el Anexo B son en total 11.

4.4.1 *Tamaño de Muestra*

El circuito en prueba tuvo un plan de muestreos y procedimientos, asociados al proceso de producción de esta manera se permitió obtener la mayor muestra representativa para realizar el análisis del circuito en investigación.

Las condiciones y procedimientos descritos anteriormente se refieren a los muestreos de pulpa en 4 puntos determinados en el protocolo de prueba, estos contemplan; La alimentación de mineral al circuito, alimentación de pulpa a la batería de hidrociclones, descarga “UnderFlow” y el rebose “OverFlow”. Los muestreos o cortes de pulpa se realizaron por un periodo de 1 hora, cada 15 minutos, de esta manera se pudo obtener la muestra representativa del proceso y fue procesada por el área de laboratorio metalúrgico de la Unidad Mina Cuajone. Los muestreos se realizaron con una frecuencia mensual de acuerdo a la disponibilidad de personal del área encargada y según el cronograma de muestreos (ver anexo C).

4.4.2 *Técnicas de Selección de Muestra*

El muestreo del circuito de producción fue probabilístico. “En las muestras probabilísticas, todo integrante de la población tiene una probabilidad determinada y conocida de conformar la muestra, y esa probabilidad puede ser calculada con precisión estadística” (Vara Horna, 2012, p. 223). Debido a que el circuito en prueba continuó con su normal operación; los cortes de pulpa realizados durante el muestreo fueron representativos y probabilísticos ya que no se interrumpió el proceso de producción.

4.4.3 *Técnicas de Recolección de Información*

Para el tipo y nivel de investigación elegidos, los instrumentos de selección adecuados vienen a ser la revisión de bases de datos. Dado la naturaleza del circuito de producción, toda la data generada es almacenada en tiempo real en una base de datos con el histórico de data de operación del circuito 1A de molienda y clasificación, la cual se encuentra a disposición del usuario en caso de que se requiera hacer alguna evaluación o análisis al circuito de producción. La base de datos que usa la planta concentradora de Cuajone es el PI System. La información fue recolectada desde un periodo de 3 meses antes de la prueba de los equipos hasta el término de la prueba que tuvo por duración 6 meses. Además, esta información fue complementada con la data de los muestreos de pulpa del circuito, de esta manera se contó con una línea base, data que fue balanceada en el software JKSimmet y que además sirvió para la construcción de un modelo de simulación para establecer la línea de mejora con la data experimental de los muestreos durante la prueba de los hidrociclones Cavex® y con las que se realizó las comparaciones.

4.4.4 *Técnicas de Análisis e Interpretación de La Información*

Con la data de operación del circuito obtenido del PI System, y la recopilada de los muestreos de pulpa al circuito de producción 1–A, se realizó una evaluación estadística con el

software Minitab en su versión 18 y para el análisis metalúrgico se usó el software JKSimmet en su versión 6.2.

4.4.5 Técnicas Para Demostrar la Verdad o Falsedad - Hipótesis Planteadas

Para poder determinar la verdad o falsedad de las hipótesis planteadas se realizó un análisis de varianza ANOVA con el software Minitab en su versión 18, y se evaluó si el cambio que se generó con la prueba de los equipos es estadísticamente significativo o no.

Capítulo V: Pruebas en Concentradora Cuajone

5.1 Línea Base Circuito 1–A

Como punto de partida previo a las pruebas con los hidrociclones Cavex® se realizó un análisis al circuito de producción 1–A, recopilando el promedio mensual de los principales parámetros de control para el circuito, y en adición a ello se complementó con dos muestreos de pulpa, con la finalidad de obtener la línea base estadística y metalúrgica previo al cambio a los nuevos equipos de clasificación.

5.2 Línea Base Estadística

Se recopiló data del sistema de control desde el día de 01 setiembre de 2020 hasta el 23 de noviembre de 2020, obteniendo la información necesaria para establecer la línea base estadística con los principales parámetros de control, los cuales se muestran a continuación:

Tabla V-1:

Resumen de Parámetros de Control – Circuito 1–A

Parámetro Control	Unidad	Septiembre - 2020	Octubre - 2020	Noviembre - 2020
Tonelaje Alimentación	Tm/h	628.37	646.23	628.21
Potencia Molino	Kw	6,422.05	6,296.89	6,468.06
Agua a Molino	m ³ /h	48.36	52.00	51.62
Agua Dilución	m ³ /h	680.44	668.71	654.76
Presión Clasificación	psi	6.49	6.89	6.5
%Malla +65	%	27.14	25.96	23.81
%Sólidos Clasificación	%	66.21	66.98	66.13

Nota: Tomado de Planta Concentradora Cuajone – Circuito 1–A

5.3 Línea Base Metalúrgica

Se realizó dos muestreos de pulpa al circuito 1–A, los cuales fueron en las siguientes fechas: 17/Sep/2020 y 14/Nov/2020; la data se procesó de acuerdo al estándar de preparación de muestras del área de metalurgia de la UMC, obteniéndose la información necesaria para elaborar el balance metalúrgico del circuito 1A en el software JKSimmet, y su posterior modelamiento con el fin de obtener las constantes del modelo de clasificación de Nageswararao, el cual es uno de los modelos más confiables y utilizados a nivel mundial. El resumen de variables metalúrgicas se presenta en la siguiente tabla a continuación:

Tabla V-2:

Resumen Parámetros Metalúrgicos – Circuito 1–A

Parámetros	Unidad	17/Sep/2020	14/Nov/2020
Tonelaje Circuito	Tms/h	620.54	628.35
% Sólidos Clasificación	%	68.30	67.69
Presión de Clasificación	psi	6.29	6.44
F80 Mineral Fresco	um	9,257	9,250
F80 Alimento a Hidrociclones	um	1,453	1.475
P80 Circuito	um	266	266
Ratio Reducción Circuito	---	34.761	34.823
Malla +65	%	23.4	24.2
#Hidrociclones en Operación	und	4	4
Nitidez de Clasificación (alpha)	---	1.78	1.87
Carga Circulante	%	431.8	401.1
“Bypass” Finos	%	57.301	54.893

Nota: Tomado de datos de la Planta Concentradora Cuajone – Circuito 1–A

En la Tabla V-3 se muestran los parámetros obtenidos al realizar el ajuste en el software JKSimmet para el modelo de clasificación de Nageswararao.

Tabla V-3:

Parámetros de Ajuste del Modelo Nageswararao – Circuito 1–A

Constante	Unidad	17/Sep/2020	14/Nov/2020
KD0 (D50 - total)	-----	8.009E-05	6.4556E-05
KQ0 (Capacity)	-----	785.28	876.76
KV1 (Volume Split)	-----	7.35	7.70
KW1 (Water Split)	-----	8.49	8.04
Efficiency Curve - Alpha	-----	2.42	2.57

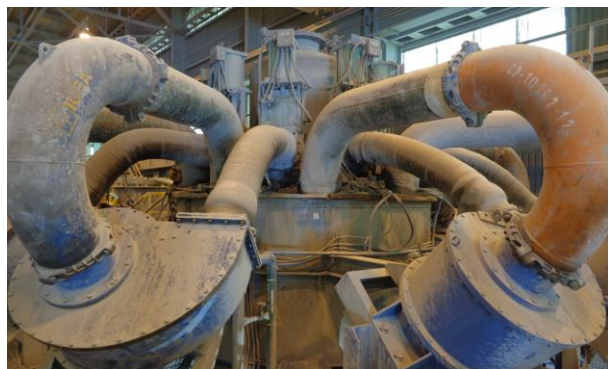
Nota: Tomado de datos de la Planta Concentradora Cuajone – Circuito 1–A

5.4 Montaje e Instalación de Equipos

Para el comienzo de la prueba de hidrociclones Cavex® en el circuito 1–A, se tuvo que realizar el desmontaje de los equipos convencionales, que tuvo como fecha de inicio el día 21 de noviembre de 2020 hasta el día 26 de noviembre del 2020 que vendría a ser la fecha de culminación del montaje.

Figura V-1:

Hidrociclones convencionales – Circuito 1A



Nota: Tomado de las instalaciones de la Planta Concentradora Cuajone

En la Figura V-2 se aprecia el hidrociclón Cavex® ubicado en la zona de almacén temporal de equipos, y su preparación para a maniobra de izaje en el área de molienda; y por último en la Figura V-3 se muestra el circuito 1-A con los 06 hidrociclones Cavex® instalados y operativos

Figura V-2:

Hidrociclón Cavex® 700CVX + ACB



Nota: Tomado de las instalaciones de la Planta Concentradora Cuajone

La configuración de los hidrociclones para el arranque y su puesta en marcha fue de 200 mm de diámetro para el ápex y 305 mm de diámetro para el vórtex, lo cual equivale a 7.87 in y 12 in aproximadamente

Figura V-3:

Batería de Hidrociclones Cavex® Instalada en el Circuito 1-A



Nota: Tomado de las instalaciones de la Planta Concentradora Cuajone

La instalación tomo un total de 06 días calendario, donde no se registraron incidentes de seguridad ni daños a la propiedad.

5.5 Comisionamiento de Hidrociclones Cavex®

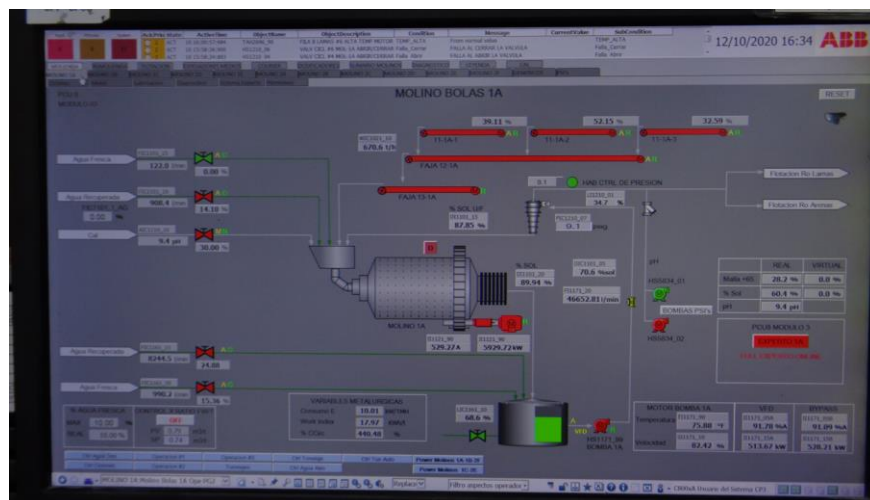
El día 26 de noviembre de 2020 a las 15:30 horas se dio inició, con 04 hidrociclones Cavex® en funcionamiento y 02 en “Stand-By”, se dio inicio al comisionamiento de los equipos comprendiendo un total de 07 días calendario, tiempo en el cual se verificó que no haya fugas de pulpa entre la unión de las secciones del hidrociclón, y se estabilizó el circuito a condiciones normales de operación.

5.6 Desarrollo de Prueba

Con la etapa de comisionamiento culminada y coordinación con el área de metalurgia y operaciones de la gerencia de planta concentradora, se estableció como fecha de inicio de prueba el día 03 de diciembre de 2020 la misma que serviría como punto de partida para la recopilación de data del sistema de control, así como también los muestreos programados de pulpa al circuito de producción 1A. En la figura V-4 se observa el sistema de control del circuito 1-A.

Figura V-4:

Sistema de Control del Circuito 1-A



Nota: Tomado de Planta Concentradora Cuajone

Durante todo el desarrollo de los 06 meses de prueba se estuvo recopilando data del proceso, se consideró principalmente las siguientes variables: tonelaje de alimentación al circuito, potencia de motor de los molinos, presión de clasificación de los hidrociclones, volumen de agua de ingreso al circuito para el control de porcentaje de sólidos, entre otras. Con el control de estas variables se tomaba acción inmediata ante cualquier cambio y/o anomalía en la normal operación del circuito.

La data fue recopilada hasta el día 20 de junio de 2021, fecha en la que se decidió dar por culminada la prueba inicial de 6 meses, la data se utilizó para el análisis estadístico de la prueba y la posterior toma de decisiones.

5.6.1 Muestras de Pulpa al Circuito

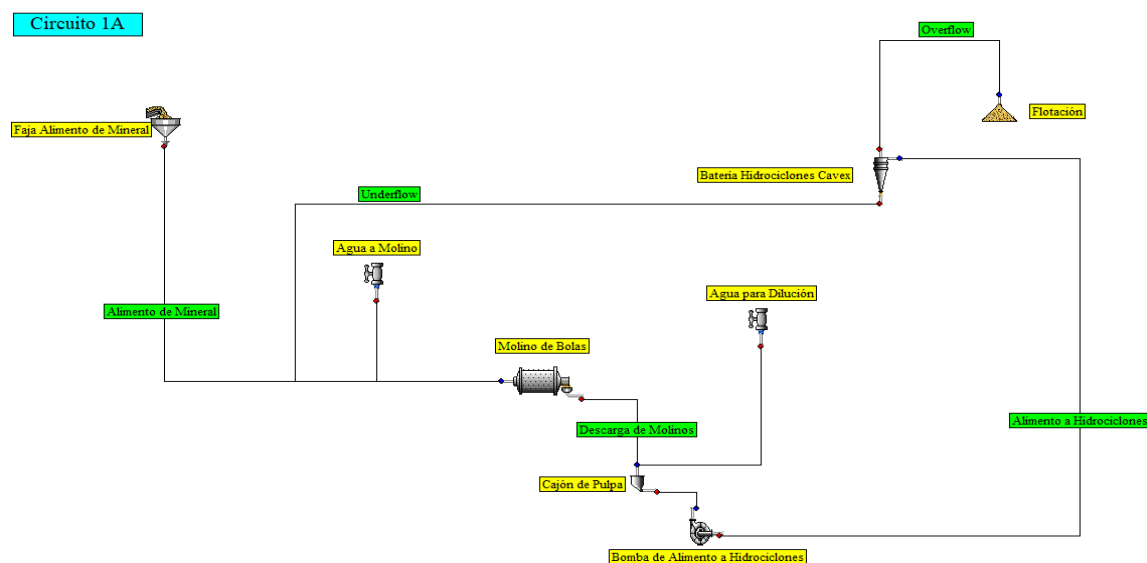
Para efectos de evaluar el comportamiento metalúrgico del circuito fue necesario la toma de muestras de pulpa, por tal motivo se llevaron a cabo en total 06 campañas de muestreos a los siguientes flujos: faja de alimentación de mineral proveniente del área de chancado, alimento a la batería de hidrociclones, “Overflow” de la batería de hidrociclones y “Underflow” de la batería de hidrociclones.

Las fechas de las campañas para la toma de muestras al proceso fueron las siguientes: 10/Dic/2020, 25/Dic-2020, 28/Ene/2021, 04/Feb/2021, 31/Mar/2021 y 11/May/2021. El procedimiento para la toma de muestras al circuito 1-A, se realizó bajo el estándar del área de metalurgia de la UMC.

En la Figura V-5 se observan un total de 5 puntos de muestreo, de los cuales solo se consideró 4, esto es debido a la potencial condición de riesgo para el personal encargado de la toma de muestras, por lo que se tomó la decisión de omitir la toma de muestra a la descarga de molinos.

Figura V-5:

Diagrama de Flujo del Circuito 1-A con sus Puntos de Muestreo

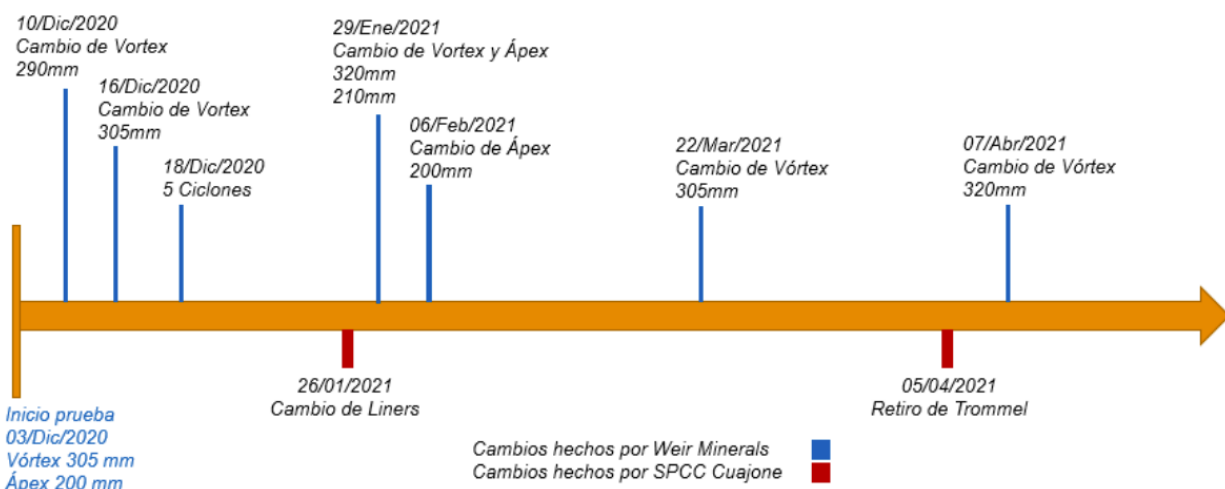


Nota: Elaboración propia

Los resultados de los muestreos se utilizaron para simular las condiciones de trabajo del circuito con distintos diámetros de ápex y vórtex, así como la influencia del porcentaje de sólidos en el performance del circuito, de manera que se pudo tener una simulación previa al cambio de componentes en la batería de hidrociclones Cavex®.

5.6.2 Cambios de configuración al circuito

Durante el desarrollo de la prueba se realizó un total de 7 cambios en la configuración del circuito de clasificación para mejorar el rendimiento del circuito 1-A, para cada cambio propuesto previamente se realizó una simulación la cual fue evaluada por el equipo de metalurgia de la UMC; el resumen gráfico de los cambios se evidencian en la figura V-6, donde se presenta una línea del tiempo para un mejor entendimiento y comprensión de lo ocurrido durante el desarrollo de la prueba de hidrociclones, de igual manera se observan los cambios en el circuito realizados por motivos de mantenimiento y nuevas oportunidades de mejora hechas por el equipo de operaciones.

Figura V-6:**Línea del Tiempo de Cambios – Circuito 1-A**

Nota: Elaboración propia

5.7 Balances de masa en JKSimmet Krebs Vs Cavex®

Con la ayuda del Software JKSimmet se realizó el balance de masa con las dos condiciones de línea base evaluadas, y la tabla resumen se muestra a continuación.

Tabla V-4:**Resumen de Resultados Krebs versus Cavex®**

Parámetros	Unidad	Krebs		Cavex					
		17-09-2020	14-Nov-20	10-Dic-20	24-Dic-20	28-Ene-21	4-Feb-21	30-Mar-21	11-May-21
Tonelaje Circuito	Tm s/h	620.54	628.35	658.23	661.54	635.12	650.14	633.51	636.49
% Sólidos Clasificación	%	68.30	67.69	65.89	64.62	67.27	67.47	66.68	67.29
Presión de Clasificación	psi	6.29	6.44	8.28	6.55	6.84	6.72	6.42	8.88
F80 Mineral Fresco	mm	9.26	9.25	9.49	8.81	9.12	11.14	8.87	9.47
F80 Alimento a Hidrociclones	mm	1.45	1.48	3.13	1.59	1.49	2.97	1.46	1.39
P80 Circuito	mm	0.2663	0.2656	0.25	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
Ratio Reducción Circuito	---	34.76	34.82	37.36	34.41	35.33	42.99	34.23	36.51
Malla +65	%	29.09	27.86	26.80	24.66	25.00	24.88	24.91	24.91
#Hidrociclones en Operación	und	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Nitidez de Clasificación (alpha)	---	1.78	1.87	2.14	2.56	0.91	3.22	1.95	2.59
Carga Circulante	%	431.80	401.07	3.59	3.52	3.86	3.72	3.80	3.85
By – Pass Finos	%	57.30	54.89	45.91	48.43	46.12	47.65	46.88	46.16

Nota: Elaboración propia

En la Tabla V – 4 de izquierda a derecha de muestras los resultados del balance de masa y ajuste del circuito de molienda y clasificación 1-A con los hidrociclones Krebs y Cavex®. Los datos mostrados son el resultado del ajuste de la data experimental realizado en el programa JKSimmet cuyo origen de los datos son los muestreos de pulpa en el circuito los mismos que fueron procesados en el Laboratorio Metalurgico de la UMC, de estos se pueden destacar el By-Pass de finos el cual es el indicador que mide el rendimiento de clasificación de un hidrociclón.

Para la comparación de los dos tipos de hidrociclones el valor de By-Pass resultantes son entre 54.89 a 57.30 % para los Krebs y entre 45.91 a 48.93 % para los Cavex. Resultados que se seguirá detallando y discutiendo en el Capítulo V.

Capítulo VI: Análisis y Discusión de Resultados

Con los datos de desempeño diario del molino 1A antes y después del cambio a hidrociclones Cavex® se realizó un análisis de varianza de la productividad como resultado del tipo de hidrociclón usado en la clasificación del molino 1A; para hallar cuan significativo resulta la implementación de nuevos hidrociclones, se planteó en todos los casos una hipótesis alternativa que indica que las medias de los parámetros que vamos a evaluar son diferentes para cada tipo de hidrociclón, en cada uno de los análisis describiremos si el desempeño de los hidrociclones Cavex® fue mejor o peor estadísticamente.

4.1 ANOVA de un solo factor Productividad versus Hidrociclón

Ö. Genç (2016), en su investigación titulada “*Optimization of an Industrial Scale Open Circuit Three-Compartment Cement Grinding Ball Mill with the Aid of Simulation*”, logró una mejora del 10% en la eficiencia de molienda. Este avance es relativamente alcanzable en la industria del cemento, aunque en la minería resulta más complejo debido a las limitaciones de modificar únicamente equipos secundarios que no interrumpan las operaciones, como los hidrociclones. En la tesis considerada como antecedente también se realizó un análisis estadístico.

4.1.1 Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2 Información del Factor

Factor	Niveles	Valores
Hidrociclón	2	Krebs; Cavex®

Fuente: Elaboración Propia

4.1.3 Medias

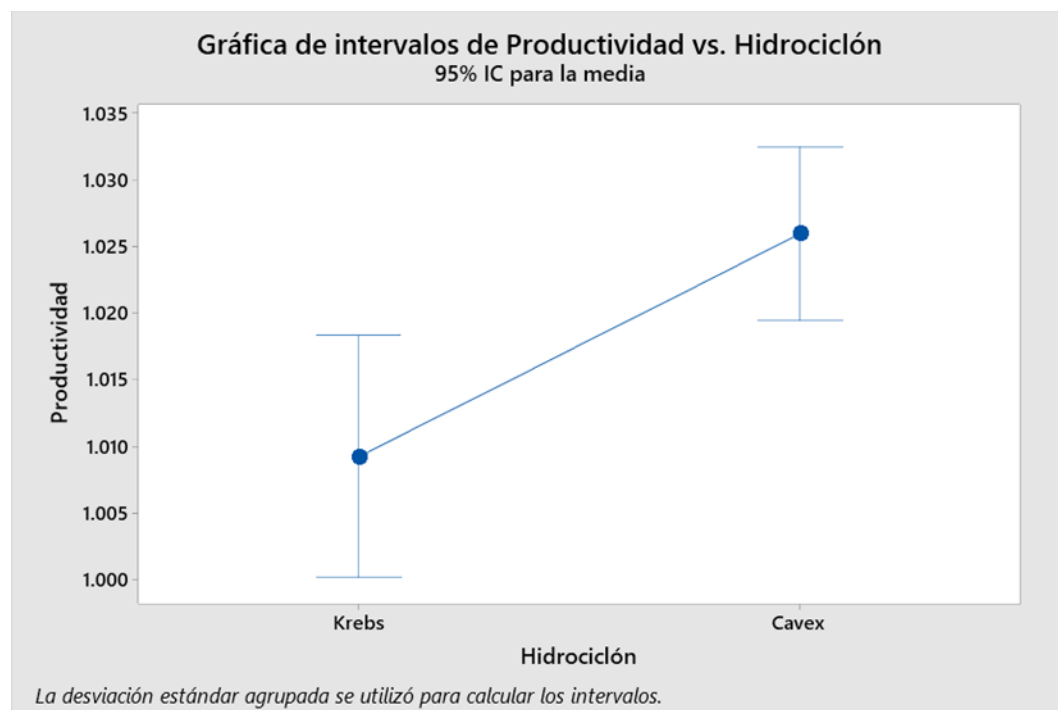
Hidrociclón	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Krebs	71	1.00924	0.03312	(1.00015; 1.01834)
Cavex®	137	1.02597	0.04150	(1.01942; 1.03251)

Fuente: Elaboración Propia

Se tiene una diferencia de 0.01673 a favor de los hidrociclones Cavex®, o su equivalente porcentual de 1.65768%. De manera gráfica se explica en la figura VI-1 mediante el uso de intervalos de confianza.

Figura VI-1:

Gráfica de Intervalos de Confianza Productividad versus Hidrociclón



Fuente: Elaboración Propia

4.1.4 Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Hidrociclón	1	0.01308	0.013076	8.66	0.004
Error	206	0.31104	0.001510		
Total	207	0.32412			

Fuente: Elaboración Propia

4.1.5 Conclusión del Análisis

Considerando el valor de significancia de 0.05 y teniendo como resultado de la prueba ANOVA que el valor p es igual a 0.004, el cual es menor a 0.05, razón por la cual se concluye que el uso de hidrociclones Cavex® en el circuito 1-A de molienda y clasificación logra optimizar la productividad en 1.65768%, valor que resulta ser significativo estadísticamente por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

4.2 ANOVA de un Solo Factor P80 versus Hidrociclón

En el trabajo de investigación de Cárdenas Castro, M. y Huamán Condori, E. (2022), titulado “Optimización de la recuperación de cobre mediante la influencia de P80, pH y dosificación de reactivos de flotación en la Cía. Minera Antapaccay S.A.”, se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el efecto del P80 en la recuperación de cobre. Por esta razón, en la presente tesis se emplea también esta técnica, buscando obtener conclusiones precisas sobre la influencia de este parámetro en el proceso de recuperación del mineral.

4.2.1 Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Fuente: Elaboración Propia

4.2.2 Información del Factor

Factor	Niveles	Valores
Hidrociclón	2	Krebs; Cavex®

Fuente: Elaboración Propia

4.2.3 Medias

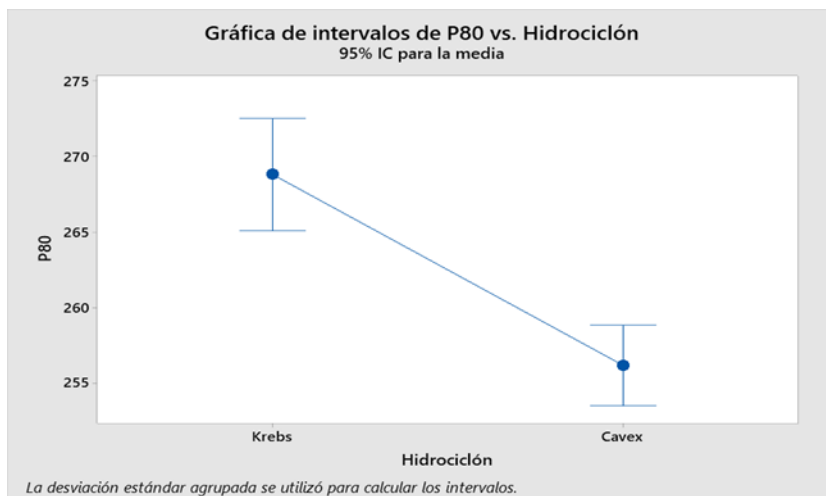
Hidrociclón	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Krebs	71	268.80	17.55	(265.07; 272.53)
Cavex®	137	256.17	15.03	(253.48; 258.85)

Fuente: Elaboración Propia

Se tiene una diferencia de -12.63 μm a favor de los hidrociclones Cavex®, o su equivalente porcentual de -4.69866%. De manera gráfica se explica en la figura VI-2.

Figura VI-2:

Gráfica de Intervalos de Confianza P80 versus Hidrociclón



Fuente: Elaboración Propia

4.2.4 Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Hidrociclón	1	7463	7462.9	29.41	0.000
Error	206	52277	253.8		
Total	207	59739			

Fuente: Elaboración Propia

4.2.5 Conclusión del Análisis

Considerando el valor de significancia de 0.05 y teniendo como resultado de la prueba ANOVA que el valor p es igual a 0.000, el cual es menor a 0.05, razón por la cual se concluye que el uso de hidrociclones Cavex® en el circuito 1-A de molienda y clasificación logra reducir el P80 de Overflow a flotación en -12.63 μm , valor que resulta ser significativo estadísticamente por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

4.3 ANOVA de un Solo Factor Presión de Clasificación versus Hidrociclón

4.3.1 Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2 Información del Factor

Factor	Niveles	Valores
Hidrociclón	2	Krebs; Cavex®

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3 Medias

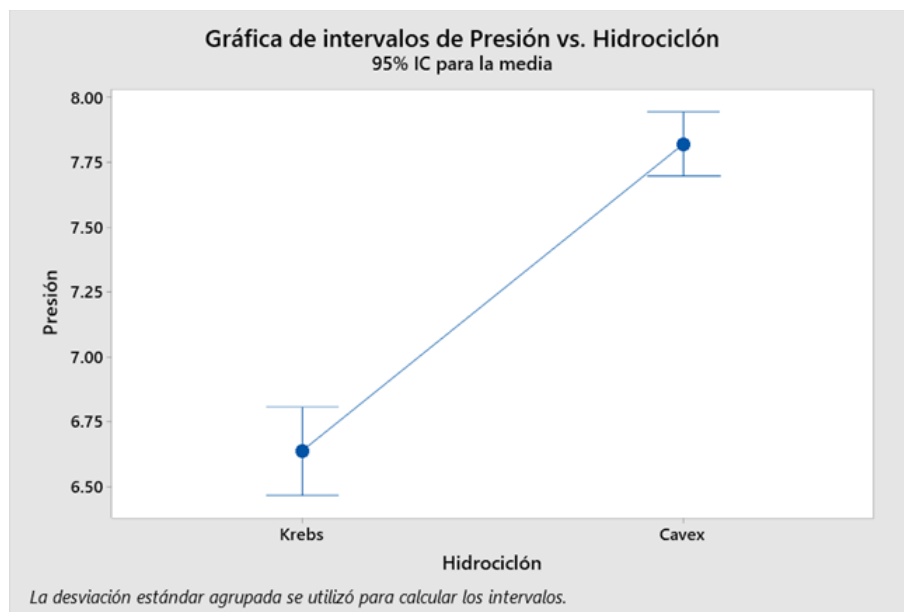
Hidrociclón	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Krebs	71	6.6386	0.4116	(6.4677; 6.8094)
Cavex®	137	7.8200	0.8488	(7.6970; 7.9430)

Fuente: Elaboración Propia

Se tiene una diferencia de 1.1814 psi a favor de los hidrociclones Cavex®, o su equivalente porcentual de 17.79592%. En el gráfico VI-3, se observa de manera gráfica.

Figura VI-3:

Gráfica de Intervalos de Confianza Productividad versus Hidrociclón



Fuente: Elaboración Propia

4.3.4 Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Hidrociclón	1	65.27	65.2674	122.41	0.000
Error	206	109.84	0.5332		
Total	207	175.11			

Fuente: Elaboración Propia

4.3.5 Conclusión del Análisis

Considerando el valor de significancia de 0.05 y teniendo como resultado de la prueba ANOVA que el valor p es igual a 0.000, el cual es menor a 0.05, razón por la cual se concluye que el uso de hidrociclones Cavex® en el circuito 1-A de molienda y clasificación logra incrementar la presión de clasificación en 1.1814 psi, valor que resulta ser significativo estadísticamente por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

4.4 ANOVA de un Solo Factor By-Pass de Finos versus Hidrociclón

En su investigación titulada "*Evaluación del circuito de molienda-clasificación en la planta concentradora Toquepala*", Misael, H. (2020) concluye que una molienda fina, lograda al reducir el By-Pass de finos en la clasificación, mejora el tonelaje procesado. En la presente tesis se utilizó el análisis ANOVA para comparar datos antes y después del uso de ciclones y evaluar su influencia en la reducción del By-Pass de finos.

4.4.1 Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Fuente: Elaboración Propia

4.4.2 Información del Factor

Factor	Niveles	Valores
Hidrociclón	2	Krebs; Cavex®

Fuente: Elaboración Propia

4.4.3 Medias

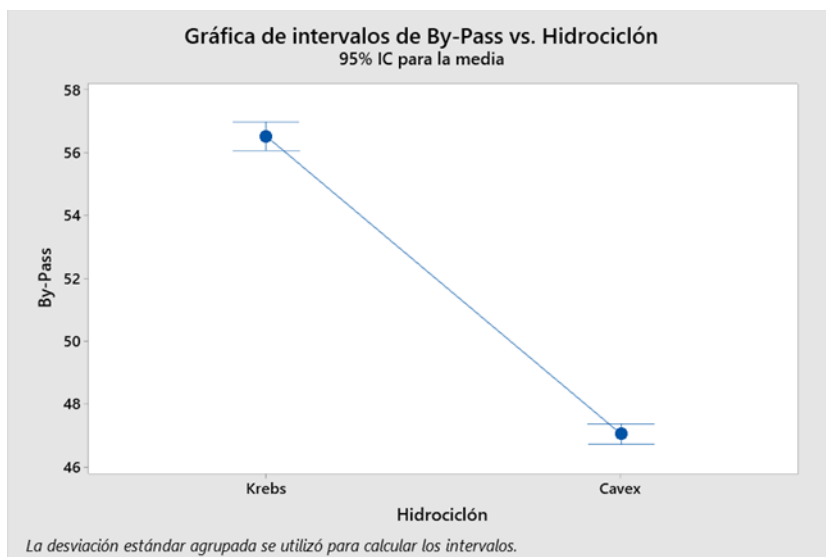
Hidrociclón	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Krebs	71	56.520	2.124	(56.062; 56.979)
Cavex®	137	47.048	1.872	(46.718; 47.379)

Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica VI-4, se visualiza los resultados de reducción de By-Pass de finos.

Figura VI-4:

Gráfica de Intervalos de Confianza Productividad versus Hidrociclón



Fuente: Elaboración Propia

4.4.4 Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Hidrociclón	1	4195.6	4195.65	1091.00	0.000
Error	206	792.2	3.85		
Total	207	4987.9			

Fuente: Elaboración Propia

4.4.5 Conclusión del Análisis

Considerando el valor de significancia de 0.05 y teniendo como resultado de la prueba ANOVA que el valor p es igual a 0.000, el cual es menor a 0.05, razón por la cual se concluye que el uso de hidrociclones Cavex® en el circuito 1–A de molienda y clasificación logra reducir el By-Pass de finos en 9.472%, valor que resulta ser significativo estadísticamente por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

4.5 Validez de Ajuste con el Modelo de JK Simmet

Así como la tesis Evaluación del circuito de molienda-clasificación en la planta concentradora de la Compañía Minera Lincuna S.A. utilizando el software Molycop Tools", Licla, C. & Padilla, J. (2021) se usó un programa de simulación llamado JKSimMet que ya detallamos, en la tesis usada como antecedente se realizaron simulaciones con configuraciones a gran escala lo que les permitió saber el impacto que significarían aun sin estar en operación, en la presente tesis se realizó la simulación con los nuevos hidrociclones y diferentes configuraciones de Apex y Vortex como se muestra a continuación.

4.5.1 Comparativo Valor Experimental vs Ajustado con JK Simmet

Se realizó una relación de las variables más importantes de la operación del circuito 1–A de molienda y clasificación, entre ellas: tonelaje de alimento (TMS Faja 12), p80 del Overflow al circuito de flotación y el porcentaje de sólidos de alimento al nido de hidrociclones. Resultando en una comparación de los datos experimentales entre los datos ajustados con los modelos del software JKSimmet. Se tomo en consideración el total de 6 modelos elaborados.

Tabla VI-1:

Relación de Variables Experimentales Versus Ajuste en JKSimmet

Año	Mes	Descripción	TMS Faja 12	P80	%Sólidos
2020	Noviembre	Experimental	633.1	264.7	66.70
		Ajustado con JK	628.4	265.6	67.69
		Relación	1.008	0.996	0.985
	Diciembre	Experimental	659.4	255.3	66.66
		Ajustado con JK	659.9	255.0	65.26
		Relación	0.999	1.001	1.021
Enero	Experimental	629.2	257.4	64.24	

		Ajustado con JK	635.1	258.2	67.30
		Relación	0.991	0.997	0.955
		Experimental	655.2	261.2	66.32
	Febrero	Ajustado con JK	650.1	259.2	67.50
		Relación	0.991	1.008	0.955
2021		Experimental	632.8	254.8	64.15
	Marzo	Ajustado con JK	633.5	259.3	66.70
		Relación	0.999	0.983	0.962
		Experimental	632.8	257.5	65.35
	Abril	Ajustado con JK	636.5	259.3	67.30
		Relación	0.994	0.993	0.971

Fuente: Elaboración Propia

4.5.2 Conclusión del Análisis

De la tabla VI-1, podemos observar que la relación que existe entre el valor experimental al ajustado con JK oscila entre un rango de 0.955 a 1.021, lo cual, o su equivalencia porcentual de 95.5% a 102.1%, resultados que se encuentra en el rango de tolerancia del software de 10%.

Conclusiones

1. Se optimizó la productividad del circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone se incrementa en 1.65768% mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.

2. Se redujo el tamaño del P80 de 268.8 a 256.17 micrones para la clasificación en el circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet, los resultados mediante las pruebas experimentales arrojaron que con el uso de los hidrociclones Cavex® el P80 se redujo en 4.93%, lo que indica que existe una mejor clasificación en el circuito, así mismo a menor tamaño del producto el beneficio en la flotación es mayor.

3. Se incrementó la presión de 6.63 a 7.82 psi para la clasificación en el circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet, los resultados arrojaron unas presiones de 17.8% mayores a cuando se usaban los hidrociclones Krebs.

Se redujo el porcentaje de “By-pass” de finos de 56.52% a 47.08% en la clasificación en el 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet, lo que significa un 16.7% menor respecto al uso de hidrociclones Krebs.

4. Se evaluó el porcentaje de ajuste de las simulaciones con el software JKSimmet en relación con los resultados experimentales en el circuito 1–A de molienda y clasificación, se observó que la relación existente entre el valor experimental al ajustado con JK oscila entre un rango de 0.955 a 1.021, lo cual, o su equivalencia porcentual de 95.5% a 102.1%, lo cual está dentro del rango de tolerancia de +/- 10%.

Recomendaciones

1. Se recomienda seguir realizando simulaciones con el cambio de “Apex” en los hidrociclones Cavex®, para continuar con las optimizaciones y búsqueda de las mejores condiciones de operación del circuito.

2. Se recomienda realizar el cambio de impulsor de la bomba de hidrociclones, esto debido a que existen nuevas tecnologías que podrían permitir aumentar el flujo y la presión con el objetivo de mejorar la clasificación en los hidrociclones.

3. Se recomienda tener continuos muestreos de planta para seguir buscando oportunidades de mejora en la molienda y clasificación del circuito 1–A.

Bibliografía

- American Psychological Association [APA]. (n.d.). *Quick Answers - Formatting*. Retrieved from <http://www.apastyle.org/learn/quick-guide-on-formatting.aspx#Heading%20levels>
- Arroyo, A. G. (2021). *Manual del JKSimMet. Balance y simulación de procesos de reducción de tamaño de partícula*. Universidad de Guanajuato .
- Castro Chamorro, J. A. (2005). *CYBERTESIS Repositorio de Tesis Digitales*. Retrieved from Universidad Nacional Mayor de San Marcos: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/2638>
- Castro, M. C., & Condori, E. H. (2022). *Optimizar la recuperación de cobre por la influencia de P80, el PH y la dosificación de reactivos de flotación en la Cia. Minera Antapaccay S.A.* Cusco: Repositorio Unsaac.
- Dr. Jaime E. Sepúlveda, I. L. (1986). *Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras mediante Técnicas de Modelación Matemática*. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica.
- Drew. (2024, Junio 26). *Productividad en la industria*. Retrieved from <https://marketing.wearedrew.co/que-es-la-productividad>
- Farfán, W. A. (2019). *Procesos y mejoras en el área de molienda de la planta concentradora - Minera Las Bambas*. Cusco: Repositorio Unsaac.
- Fernández Dávila, R. (2012). *Revista Lidera*. Retrieved from Pontificia Universidad Católica del Perú: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/revistalidera/article/view/16599>
- Genç, Ö. (2016). *Optimization of an industrial scale open circuit three-compartment*. Turkey: ELSEVIER.
- Haro Lozada, M. (2020). *Evaluación de circuito molienda clasificación de la planta concentradora Toquepala*. Arequipa: Repositorio UNSA.
- Jáuregui Aquino, O. A. (2009, Noviembre). *Tesis PUCP*. Retrieved from Pontificia Universidad Católica del Perú: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/696>
- JK Tech Pty Ltd. (2015). *JK Simmet Version 6.2 User Manual*. Brisbane: JK Tech SMI Technology Transfer.
- JKTech Pty Ltd. (2015). *User Manual versión 6.2*. Brisbane: JKTech.
- K. Nageswararao, D. W.-M. (2004). *Two empirical hydrocyclone models revisited*. ELSIEVER.
- Laura Cuba, R. A. (2018). *Repositorio Institucional UNCP*. Retrieved from Universidad Nacional del Centro del Perú: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/4502>
- Metso Minerals. (2015). *Basics in Minerals Processing*. Metso Corporation.
- Minitab Inc. (2014). *Introducción a Minitab 17*. Pensilvania: Minitab Inc.
- Napier-Munn, T. (2005). *Mineral Conminution Circuits*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Center.
- Pacahuala Aguirre, M. C. (2015). *Repositorio Institucional UNCP*. Retrieved from Universidad Nacional del Centro del Perú: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/2179>
- Palaco Guzman, D. B. (2021). *Mejoramiento del mantenimiento de hidrociclones con controles de calidad en los distribuidores de pulpa de la línea 001 - 002 en la unidad minera Antapaccay*. Arequipa: Universidad Continental.

- Paul, L. Q. (2021). *Evaluación del circuito de molienda-clasificación en la planta concentradora de la Compañía Minera Lincuna S.A. usando el software Molycop Tools*. Lima : Repositorio institucional Cybertesis.
- Performance Associates International, Inc. (1999). *Manual de Operaciones de Molienda de la Concentradora Cuajone de Southern Peru Copper Corporation*. Tucson.
- Raby Ibacache, M. (2016, Abril). *Repositorio Universidad Católica de Valparaíso*. Retrieved from http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-5500/UCD5751_01.pdf
- Reyes Marroquin, P. B. (2019). *Repositorio Institucional UTP*. Retrieved from Universidad Tecnológica del Perú: <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/UTP/2380>
- Rojas Cornejo, M. (2009, Octubre). *Repositorio Académico de la Universidad de Chile*. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103330>
- Sampieri Hernández, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Silva Balochi, M. A. (2013). *Repositorio Académico de la Universidad de Chile*. Retrieved from <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116302>
- Sisa Sillocca, E. (2019). *Repositorio Institucional UNSA*. Retrieved from Universidad Nacional de San Agustín: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10067>
- T. J. Napier-Munn, S. M. (1999). *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation*. Isles Road, Indooroopilly, Queensland 4068, Australia: The University of Queensland.
- T.J., N.-M. (2005). *Application of central composite rotatable design to modelling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone*. International Journal Of Mineral Processing.
- Universidad de Santiago de Chile. (2017, Diciembre 14). *Procesamiento de Minerales*. Retrieved from [Metalurgia.usach.cl: http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/capitulo12.pdf](http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/capitulo12.pdf)
- Vara Horna, A. A. (2012). *Desde la idea hasta la sustentación: 7 pasos para una tesis exitosa*. Lima: Universidad de San Martín de Porres.
- Weir Minerals. (2017). *Manual de Instalación, Operación y Mantenimiento de ciclones Cavex*. Santiago.
- Whiten W. J, K. (1984). *Studies on Scale -up of Bali Mills*. Soc. Mining Engineering Fall.

ANEXOS

A. Matriz De Consistencia

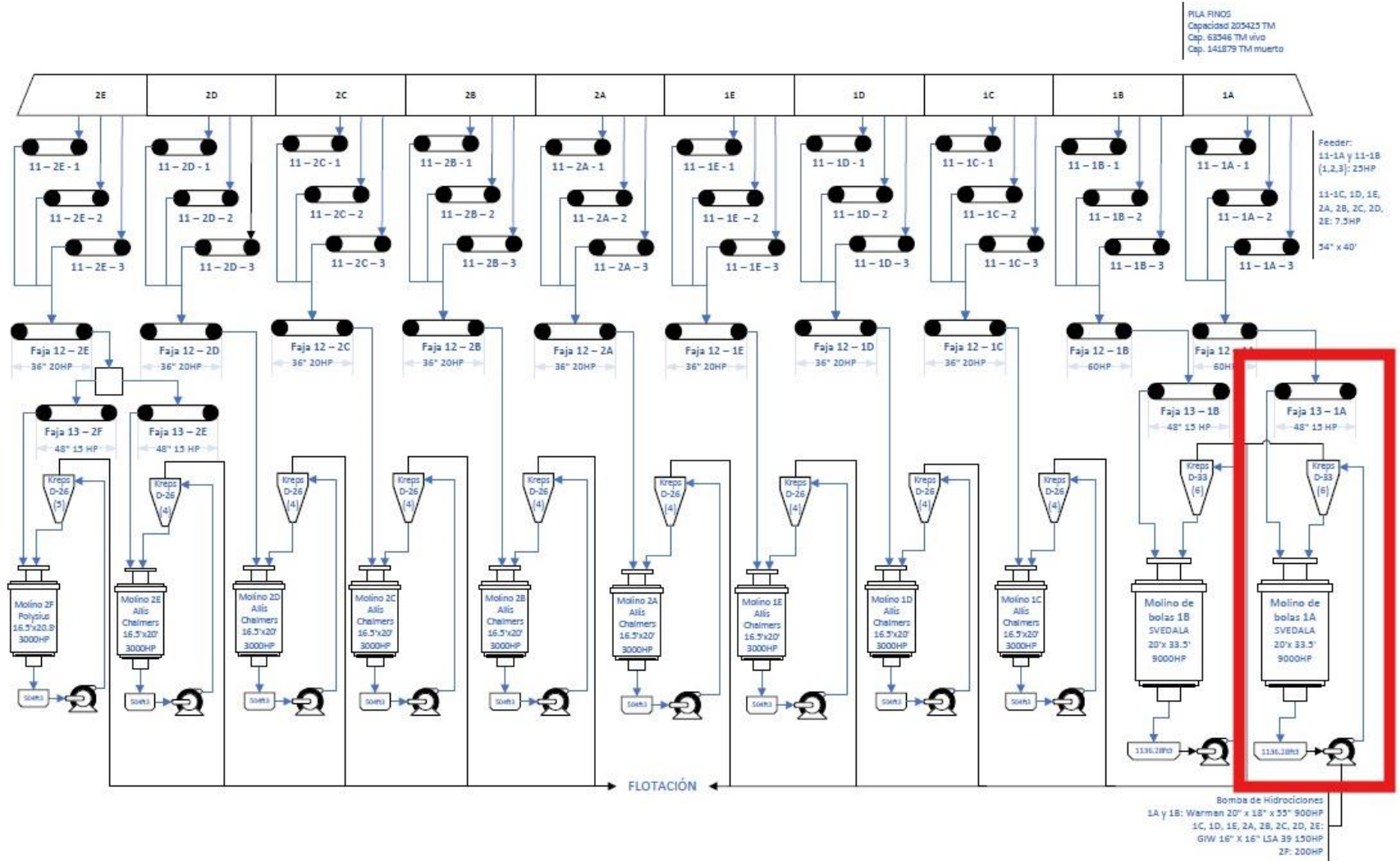
Optimización de la productividad del circuito 1–A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y simulación en el software JKSimmet.

Problema	Objetivo	Hipótesis	VARIABLES / Dimensiones	Metodología
<p>Problema General: ¿Cuál es el porcentaje de incremento en tonelaje seco de procesamiento por hora al optimizar la productividad del circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet?</p>	<p>Objetivo General: Optimizar en 1% la productividad del circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.</p>	<p>Hipótesis General: Con el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet se logra optimizar en 1% la productividad del circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone.</p>	<p>Variable Dependiente - Productividad del circuito de molienda y clasificación 1-A de la planta concentradora Cuajone. Dimensiones - Total de tonelaje producido por día de trabajo, cuyo valor oscila entre 14,000 a 16,000 TMSD, dividido entre el KPI de 15,000 TMSD. Indicadores - Toneladas de mineral procesado por día en el flujo de finos para flotación. Variable Interviniente - Work Index, eficiencia, y distribución granulométrica Dimensiones - Consumo energético por tonelada de mineral reducido. Grado de liberación del mineral valioso a una determinada malla. Peso de partículas de mineral distribuido en varios rangos de tamaño. Indicadores - Índice de trabajo (Kw-H/Ton), Eficiencia de molienda y clasificación (%), Distribución granulométrica (%)</p>	<p>Tipo de Investigación Tecnológica</p> <p>Diseño de Investigación Descriptiva – Comparativa X_{1,2,3,4} <-----> Y₁ X₁: Variable independiente 1 X₂: Variable independiente 2 X₃: Variable independiente 3 X₄: Variable independiente 4 Y₁: Variable dependiente 1 -->: Relación causa-efecto</p> <p>Población Datos obtenidos en el proceso de molienda clasificación de las 11 líneas de producción Muestreo: probabilístico Muestra: Datos de la operación obtenidos del circuito 1-A.</p>
<p>Problemas Específicos: ¿Cuánto es la reducción del tamaño P80 para la clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet?</p> <p>¿Cuánto es el incremento de presión para la clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet?</p> <p>¿Cuánto es la reducción del porcentaje de “By-pass” de finos en la clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet?</p> <p>¿En qué porcentaje se ajusta las simulaciones con el software JKSimmet en relación con los resultados experimentales en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet?</p>	<p>Objetivos Específicos: Reducir 5 micrones el P80 de clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet. Incrementar la presión para la clasificación en 1 psi en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet. Reducir el porcentaje de by-pass de finos en 5% para la clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet. Evaluar el porcentaje de ajuste de las simulaciones con el software JKSimmet en relación con los resultados experimentales en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.</p>	<p>Hipótesis Específicas: Se reduce el tamaño P80 en 5 micrones la clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet. Se incrementa la presión en 1 psi para la clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet. Se reduce el porcentaje de “By-pass” de finos en 5% para la clasificación en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet. El uso del modelo de simulación con el JKSimmet en comparación con la data de planta permite ajustar favorablemente los parámetros operativos en el circuito 1-A de molienda y clasificación en la planta concentradora de Cuajone mediante el uso de hidrociclones Cavex® y la simulación en el software JKSimmet.</p>	<p>Variable Independiente - P80 del circuito. By-Pass de finos. Presión de clasificación al nido de hidrociclones. Ajuste del modelo para simulación. Dimensiones - Tamaño de la partícula de 220 a 280 um. By-Pass de finos que oscila entre 40 a 60 %. Presión de la clasificación cuyo valor oscila entre 6 a 12 psi. Ajuste de los parámetros del modelo para simulación con JKSimmet que oscila entre 60 a 110% Indicadores - Toneladas de mineral procesado por día. Diámetro equivalente de la sección transversal de alimentación al hidrociclón. Margen de porcentaje de sólidos en la alimentación al hidrociclón. Tipo de descarga en el “Underflow” del hidrociclón. Margen de alimentación fresca en toneladas por hora al molino 1-A.</p>	<p>Técnicas e instrumentos de recojo de datos Técnica: Data de operación recopilada del sistema de control, 3 meses antes de cambio hasta 6 meses posterior al cambio. Además de data de muestreos al circuito 1-A. Instrumentos: Base de datos del circuito, reporte de laboratorio. Técnica de análisis de datos: Análisis de varianza ANOVA.</p> <p>Técnicas de simulación y análisis de datos Minitab versión 18. Software JKSimmet 6.2.</p>

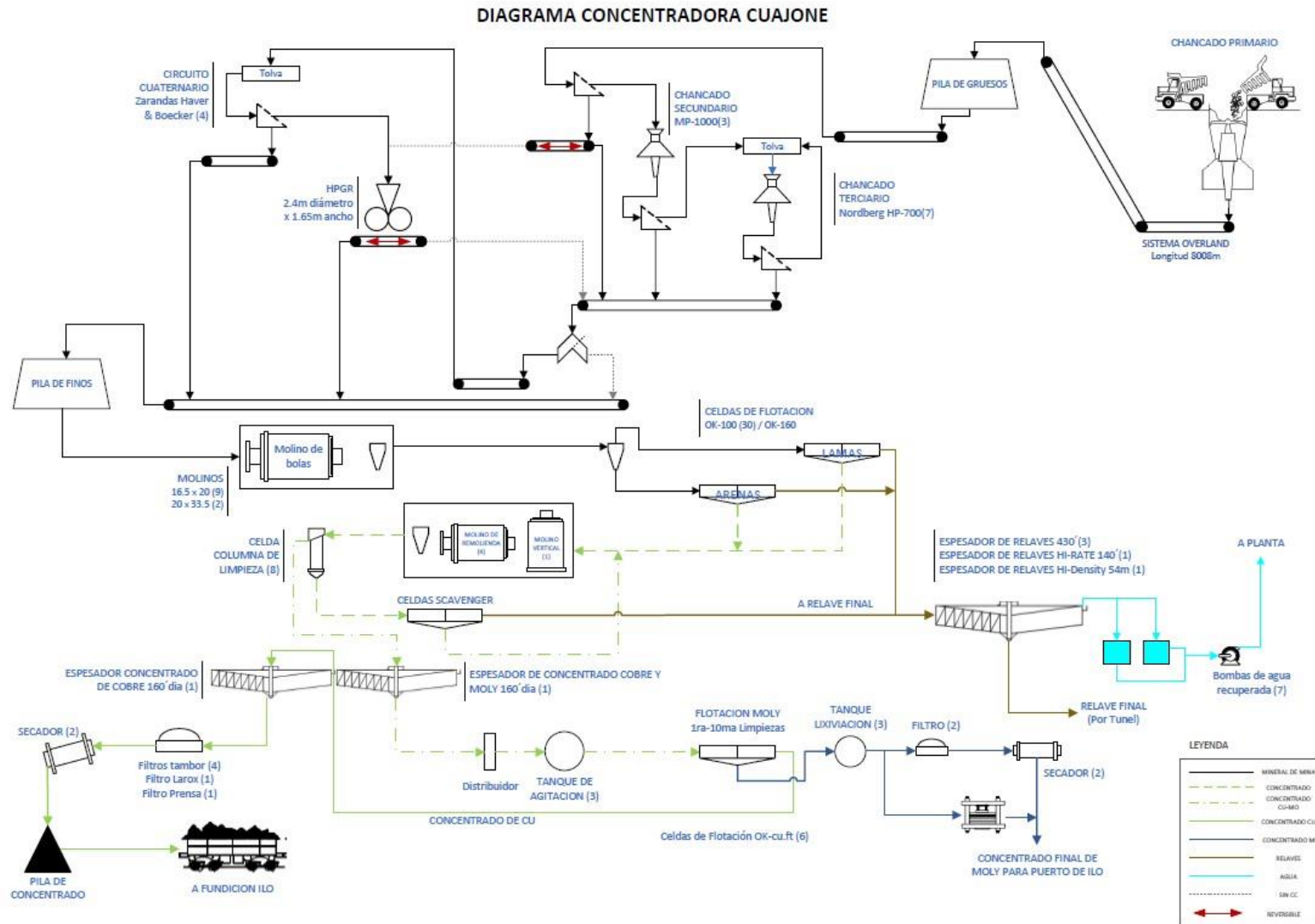
Fuente: Elaboración propia

B. Diagrama de Flujo – Planta Molienda Unidad Minera Cuajone

CIRCUITO DE MOLIENDA



C. Diagrama de flujo General – Concentradora Unidad Minera Cuajone



D. Cronograma de Muestreos

GANTT DE ACTIVIDADES PRUEBA CAVEX® – SPCC U.M. CUAJONE

Durante todo el desarrollo de la prueba se contará con personal de Weir Minerals Perú para monitoreo de equipos y soporte.

