

## Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos del trabajo.....	2
1.2	Alcances.....	3
2	Revisión bibliográfica .....	4
2.1	Caracterización de la mediana minería en Chile.....	4
2.2	Modelos en estado estacionario de las operaciones unitarias .....	8
2.3	Resumen de los modelos presentados.....	28
2.4	Herramientas de simulación de circuitos de conminución.....	29
3	Desarrollo del simulador.....	30
3.1	Selección de modelos principales.....	30
3.2	Definición de circuitos típicos .....	31
3.3	Definición de variables y parámetros.....	32
3.4	Herramienta de simulación .....	34
3.5	Link de descarga .....	43
3.6	Caso de estudio .....	43
4	Resultados .....	55
4.1	Resultados de la simulación - Caso base .....	55
4.2	Análisis de escenarios.....	59
4.3	Análisis de sensibilidad de variables operacionales .....	67
5	Conclusiones y recomendaciones.....	70
	Bibliografía .....	71
	Anexo A: Códigos de programación - Script.....	73
	Anexo B: Balances y reportes – Caso base .....	74

Anexo C: Balances y reportes globales - Análisis de casos .....	83
Anexo D: Manual de usuario .....	89

## Índice de tablas

Tabla 1: Definiciones de la mediana minería de acuerdo a distintos organismos chilenos.	4
Tabla 2: Producción de cada segmento en la minería, expresadas en toneladas métricas finas [tmf]. Fuente (SERNAGEOMIN, 2015).	4
Tabla 3: Ejemplos de proyectos de la mediana minería ingresados al SEIA. Fuente: Elaboración propia a partir de información del SEIA (SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, 2017)	6
Tabla 4: Parámetro $P_T$ en modelo de chancado de King.	15
Tabla 5: Valores típicos utilizados para parámetro $t_{10}$ en la matriz de ruptura de Whiten - Awachie.	17
Tabla 6: Valores típicos utilizados para la Matriz de Clasificación - Modelo de Whiten.	17
Tabla 7: Factores de corrección - Modelo de Karra.	22
Tabla 8: Modelos de conminución	28
Tabla 9: Resumen de modelos de clasificación.	28
Tabla 10: Resumen de modelos de cinética de ruptura para chancado.	28
Tabla 11: Resumen de modelos de cinética de ruptura para molienda.	28
Tabla 12: Variables y parámetros modelo de chancado.	32
Tabla 13: Variables y parámetros modelo de molienda.	33
Tabla 14: Variables y parámetros modelos de clasificación.	33
Tabla 15: Características de la alimentación - Caso base.	44
Tabla 16: Alimentación ROM - Caso base.	44
Tabla 17: Equipos principales circuito de chancado - Caso base.	44
Tabla 18: Características de harneros - Caso base.	44
Tabla 19: Características molino de bolas - Caso base.	45
Tabla 20: Características hidrociclón - Caso base.	45
Tabla 21: Valores típicos de parámetros de modelos de conminución.	48
Tabla 22: Valores típicos de parámetros de modelos de clasificación.	49
Tabla 23: Parámetros de chancadores - Caso base.	57
Tabla 24: Parámetros de molienda - Caso base.	58
Tabla 25: Características nueva alimentación ROM - Análisis de casos.	59
Tabla 26: Cambios en variables de operación- Análisis de casos.	61
Tabla 27: Efecto sobre el tonelaje alimentado por equipo - Análisis de casos.	61
Tabla 28: Variación en los resultados globales dado un cambio en la alimentación ROM - Análisis de casos.	62
Tabla 29: Variación en la potencia calculada en equipos de chancado producto del aumento en el $W_i$ de chancado - Análisis de casos.	62
Tabla 30: Variación en los resultados globales producto del aumento en el $W_i$ de molienda - Análisis de casos.	63
Tabla 31: Cambios en los flujos para respetar las capacidades transporte del caso base - Análisis de casos.	64
Tabla 32: Efecto producto del desgaste de revestimientos - Análisis de casos.	65
Tabla 33: Resumen análisis de casos.	66
Tabla 34: Efecto del cambio en el tonelaje en $\pm 20\%$ sobre el parámetro $d_{50c}$ en harneros - Análisis de sensibilidad.	67
Tabla 35: Efecto del cambio en el tonelaje sobre el parámetro $d_{50c}$ en hidrociclones - Análisis de sensibilidad.	68

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Exportaciones chilenas por sector económico. Fuente: (COMISIÓN CHILENA DEL COBRE, 2016).	5
Ilustración 2: Relación entre la función selección y el tamaño de partículas.	10
Ilustración 3: Diagrama modelo de chancado de Whiten.	16
Ilustración 4: Ejemplos de curvas de eficiencia de harneros e hidrociclones respectivamente.	21
Ilustración 5: Desarrollo de simuladores de procesamiento de minerales en el mundo. Fuente: Apuntes del curso, MI5022 - Análisis y simulación de procesos mineralúrgicos, Primavera 2016.	29
Ilustración 6: Circuito de chancado en tres etapas previo a lixiviación.	31
Ilustración 7: Circuito de chancado en tres etapas más molienda unitaria previo a flotación.	31
Ilustración 8: Extracto de hoja principal de herramienta de simulación - Datos generales.	34
Ilustración 9: Extracto de hoja principal de herramienta de simulación - Ingreso de granulometría ROM.	35
Ilustración 10: Extracto de hoja principal de herramienta de simulación - Datos de chancado.	36
Ilustración 11: Extracto de hoja principal de herramienta de simulación - Datos de harneros.	37
Ilustración 12: Extracto de hoja principal de herramienta de simulación - Datos de molino de bolas.	37
Ilustración 13: Extracto de hoja principal de herramienta de simulación - Datos de hidrociclón.	38
Ilustración 14: Extracto de hoja principal de herramienta de simulación - Resultados globales de simulación, circuito de chancado.	39
Ilustración 15: Extracto de hoja principal de herramienta de simulación - Resultados globales de simulación, circuito de molienda.	40
Ilustración 16: Extracto de hoja de balances de chancado.	41
Ilustración 17: Esquema de rutina de cálculo en chancadores.	42
Ilustración 18: Esquema de rutina de cálculo en molino de bolas.	42
Ilustración 19: Esquema de rutina de cálculo en equipos de clasificación.	43
Ilustración 20: Flowsheet de chancado - Caso base.	46
Ilustración 21: Flowsheet de molienda - Caso base.	47
Ilustración 22: Distribución de tamaño para distintos mecanismos de conminución.	49
Ilustración 23: Resultados de simulación por operación unitaria - Caso base.	56
Ilustración 24: Resultados simulación etapa de chancado - Caso base.	57
Ilustración 25: Resultados simulación etapa de molienda unitaria - Caso base.	58
Ilustración 26: Distribución granulométrica - Análisis de casos.	60
Ilustración 27: Extracto reporte de chancado, aumento del $W_i$ de chancado - Análisis de casos.	63
Ilustración 28: Reporte de balance de chancado - Caso base.	74
Ilustración 29: Reporte de balance de molienda - Caso base.	74
Ilustración 30: Reporte chancador primario - Caso base.	75
Ilustración 31: Reporte chancador secundario - Caso base.	76
Ilustración 32: Reporte chancador terciario - Caso base.	77
Ilustración 33: Reporte equipo Grizzly - Caso base.	78
Ilustración 34: Reporte harnero secundario - Caso base.	79

Ilustración 35: Reporte harnero terciario - Caso base.	80
Ilustración 36: Reporte molino de bolas - Caso base.	81
Ilustración 37: Reporte hidrociclón - Caso base.	82
Ilustración 38: Reportes etapa de chancado, aumento de granulometría ROM - Análisis de casos.	84
Ilustración 39: Balances etapa de chancado, aumento granulometría ROM - Análisis de casos.	85
Ilustración 40: Reporte global etapa de molienda, aumento de granulometría ROM - Análisis de casos.	85
Ilustración 41: Balances etapa de molienda, aumento de granulometría ROM - Análisis de casos.	86
Ilustración 42: Reportes etapa de chancado, aumento de $W_i$ de chancado - Análisis de casos.	87
Ilustración 43: Reportes etapa de molienda, aumento de $W_i$ de molienda - Análisis de casos.	88
Ilustración 44: Balances etapa de molienda, aumento de $W_i$ de molienda - Análisis de casos.	88

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Función ruptura - Modelo de Broadbent y Callcott.	8
Ecuación 2: Función ruptura - Modelo de Austin y Luckie.	9
Ecuación 3: Relación entre parámetro $t_{10}$ y la energía específica de fragmentación - Modelo de Narayanan.	9
Ecuación 4: Relación entre $t_{10}$ y $t_n$ para determinar la función ruptura - Modelo de Narayanan.	9
Ecuación 5: Función Selección - Modelo de Austin y Luckie.	10
Ecuación 6: Función selección - Modelo de Austin.	11
Ecuación 7: Relación entre la función selección, la tasa específica de ruptura y el consumo específico de energía (CEE).	11
Ecuación 8: Función selección específica - Modelo de Herbst y Fuerststenau	11
Ecuación 9: Modelo de molienda de bolas balance poblacional macroscópico en continuo.	12
Ecuación 10: Modelo de molienda de bolas (solución matricial).	12
Ecuación 11: Calculo de potencia por consideraciones mecánicas - Modelo de Rowland.	12
Ecuación 12: Corrección por tamaño de medios de molienda - Modelo de Rowland.	13
Ecuación 13: Masa de medios de molienda.	13
Ecuación 14: Calculo de energía específica de conminución - Modelo de Morrell.	14
Ecuación 15: Función de ajuste - Modelo de Morrell.	14
Ecuación 16: Parámetro $r_i$ , relación de tamaño con el <i>setting</i> - Modelo de King.	14
Ecuación 17: Parámetros $KU$ , $KL$ y $Pb$ - Modelo de King.	15
Ecuación 18: Distribución de tamaño - Modelo de King.	15
Ecuación 19: Solución matricial de modelo de chancado de Whiten.	16
Ecuación 20: Función ruptura - Modelo de Whiten.	16
Ecuación 21: Matriz de clasificación - Modelo de Whiten.	17
Ecuación 22: Modelo de potencia para chancado - Ecuación de Bond.	18
Ecuación 23: Energía específica de conminución por tamaño - Modelo de Andersen.	18
Ecuación 24: Potencia requerida por chancador - Modelo de Andersen.	19
Ecuación 25: Potencia total consumida por chancador - Modelo de Andersen.	19
Ecuación 26: Potencia requerida por chancador - Modelo de Morrell.	19
Ecuación 27: Capacidad de Harnero - Modelo de Karra.	21
Ecuación 28: Abertura efectiva - Modelo de Karra.	21

Ecuación 29: Función de clasificación - Modelo de Karra.	22
Ecuación 30: Determinación de parámetro $d_{50c}$ - Modelo de Karra.	23
Ecuación 31: Función de clasificación - Modelo de Plitt.	24
Ecuación 32: Predicción de $d_{50c}$ - Modelo de Plitt.	24
Ecuación 33: Parámetro $\alpha$ - Modelo de Plitt.	25
Ecuación 34: Porcentaje del flujo volumétrico de pulpa al sobretamaño - Modelo de Plitt.	25
Ecuación 35: Función clasificación - Modelo de Nageswararao.	26
Ecuación 36: Ecuación para $d_{50c}$ - Modelo de Nageswararao.	26
Ecuación 37: Ecuación de la capacidad y reparto de flujos de hidrociclón - Modelo de Nageswararao.	26

## Índice de gráficos

Gráfico 1: Sensibilidad factor $\alpha_1$	50
Gráfico 2: Sensibilidad factor $\alpha_2$ .	51
Gráfico 3: Sensibilidad factor $\alpha_3$ .	52
Gráfico 4: Sensibilidad factor $k_1$ .	53
Gráfico 5: Sensibilidad factor $k_2$ .	54