

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Motivación del Trabajo..... | 1 |
| 1.2. Relevancia del Trabajo | 2 |
| 1.3. Objetivos..... | 2 |
| 1.3.1. Objetivo General | 2 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 2 |
| 1.4. Alcances..... | 3 |
| 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1. Contexto de mercado – Mediana minería | 4 |
| 2.2. El concepto “Mine to Mill”..... | 6 |
| 2.3. Aplicabilidad en minería subterránea | 10 |
| 2.4. Parámetros y variables relevantes de los procesos | 12 |
| 2.4.1. ROM..... | 13 |
| 2.4.2. Planta..... | 14 |
| 3. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN | 15 |
| 3.1. Etapa 1: Obtención, análisis y limpieza de la base de datos..... | 16 |
| 3.2. Etapa 2: Generación de un modelo predictivo de granulometría ROM..... | 16 |
| 3.3. Etapa 3: Evaluación del efecto granulométrico en carguío y transporte | 16 |
| 3.4. Etapa 4: Simulación en estado estacionario del proceso de conminución..... | 17 |
| 3.5. Etapa 5: Evaluación económica global | 17 |
| 3.6. Etapa 6: Análisis, conclusiones y discusión | 17 |
| 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 18 |
| 4.1. Obtención de la base de datos de granulometrías de tronadura | 18 |
| 4.1.1. Análisis preliminar de los datos y variables candidatas | 22 |
| 4.1.2. Filtro de datos..... | 23 |
| 4.2. Modelo predictivo de granulometría ROM..... | 26 |
| 4.2.1. Estructuración del modelo predictivo..... | 26 |
| 4.2.2. Estructura de los modelos definitivos | 27 |
| 4.2.3. Validación del modelo | 30 |
| 4.2.4. Generación de un simulador de granulometría ROM | 32 |
| 4.2.5. Casos de estudio | 42 |
| 4.3. Efecto de la granulometría en el carguío y transporte | 46 |
| 4.3.1. Relación entre la porosidad y la granulometría..... | 47 |

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.2. | Cálculo de la densidad aparente en los distintos escenarios | 48 |
| 4.4. | Simulaciones de escenarios en planta | 51 |
| 4.4.1. | Estructura del simulador de planta: Caso Base | 52 |
| 4.5. | Evaluación económica – Caso de estudio | 57 |
| 4.5.1. | Consideraciones económicas de la mina | 58 |
| 4.5.2. | Consideraciones económicas de la planta | 59 |
| 4.5.3. | Consideraciones económicas de mercado | 60 |
| 5. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 69 |
| 5.1. | Conclusiones | 69 |
| 5.2. | Recomendaciones | 70 |
| 6. | BIBLIOGRAFÍA | 72 |
| | ANEXO-I: Código modelo predictivo del P80 | 73 |
| | ANEXO-II: Código modelo predictivo de K | 76 |
| | ANEXO-III: Modelos de chancado y clasificación | 78 |
| | Modelo de chancado – Whitten (1972)..... | 78 |
| | Modelo de Clasificación – Curvas de Eficiencia | 79 |
| | ANEXO-III: Casos de simulación en planta | 80 |
| | Caso 1: Base – Base | 81 |
| | Caso 2: Base – Fino | 82 |
| | Caso 3: Base – Grueso | 83 |
| | Caso 4: Duro – Base | 84 |
| | Caso 5: Duro – Fino | 85 |
| | Caso 6: Duro – Grueso | 86 |
| | Caso 7: Blando – Base | 87 |
| | Caso 8: Blando – Fino | 88 |
| | Caso 9: Blando – Grueso | 89 |

Índice de ilustraciones

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>ILUSTRACIÓN 1: FLOWSHEET COMÚNMENTE IMPLEMENTADOS EN FAENAS DE MEDIANA MINERÍA.</i> | 1 |
| <i>ILUSTRACIÓN 2: PARTICIPACIÓN PORCENTUAL DE LOS SECTORES MINEROS PARA DISTINTOS METALES (PROMEDIO 2011-2013). CÁLCULO EN BASE A INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR SERNAGEOMIN. (SONAMI, 2014)</i> | 4 |
| <i>ILUSTRACIÓN 3: EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL PRECIO, NOMINAL Y REAL, DEL COBRE. BASE NOMINAL AL AÑO 2014: 311.26 [CUSD/LB] (SONAMI, 2014)</i> | 5 |
| <i>ILUSTRACIÓN 4: PARTICIPACIÓN ANUAL (PORCENTUAL) DE LA PEQUEÑA Y MEDIANA MINERÍA, A PARTIR DE PROMEDIOS ANUALES DE PRODUCCIÓN DE COBRE. (SONAMI, 2014)</i> | 6 |
| <i>ILUSTRACIÓN 5: FACTORES QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO DE LA MOLIENDA.</i> | 7 |
| <i>ILUSTRACIÓN 6: RESUMEN GRÁFICO Y TEMPORAL DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL CONCEPTO MINE TO MILL.</i> | 9 |
| <i>ILUSTRACIÓN 7: EFECTO DEL GASTO EN TRONADURA SOBRE LOS COSTOS OPERACIONALES Y TOTALES.</i> | 10 |
| <i>ILUSTRACIÓN 8: VARIACIÓN DE PARÁMETROS PARA UN AUMENTO DEL RENDIMIENTO A UNA POTENCIA INSTALADA.</i> | 12 |
| <i>ILUSTRACIÓN 9: ESQUEMA TENTATIVO DEL FLOWSHEET A UTILIZAR, DESTACANDO LAS PRINCIPALES OPERACIONES DEL PROCESO.</i> | 13 |
| <i>ILUSTRACIÓN 10: FLUJO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA APLICACIÓN DEL CONCEPTO MINE TO MILL.</i> | 15 |
| <i>ILUSTRACIÓN 11: EFECTO DE LA DISMINUCIÓN DE TIROS A UN MISMO TOTAL PERFORADO EN UNA MALLA DE DISPAROS.</i> | 29 |
| <i>ILUSTRACIÓN 12: EFECTO DEL AUMENTO EN EL NÚMERO DE TIROS A UN MISMO TOTAL PERFORADO EN UNA MALLA DE DISPAROS.</i> | 30 |
| <i>ILUSTRACIÓN 13: GRÁFICOS DE DISPERSIÓN (ARRIBA) E HISTOGRAMAS (ABAJO) DEL SUBCONJUNTO DE VALIDACIÓN (DER.) Y AJUSTE (IZQ.) PARA LA VALIDACIÓN POR MONTECARLO DEL MODELO DE K.</i> | 31 |
| <i>ILUSTRACIÓN 14: GRÁFICOS DE DISPERSIÓN (ARRIBA) E HISTOGRAMAS (ABAJO) DEL SUBCONJUNTO DE VALIDACIÓN (DER.) Y AJUSTE (IZQ.) PARA LA VALIDACIÓN POR MONTECARLO DEL MODELO DE P80.</i> | 32 |
| <i>ILUSTRACIÓN 15: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO DE ROCA BLANDA.</i> | 35 |
| <i>ILUSTRACIÓN 16: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO DE ROCA MEDIANAMENTE DURA.</i> | 35 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>ILUSTRACIÓN 17: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO DE ROCA DURA.....</i> | <i>36</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 18: RESUMEN COMPARATIVO DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL TIPO DE ROCA.</i> | <i>36</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 19: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO DE BAJA CARGA DE EXPLOSIVO.....</i> | <i>37</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 20: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO DE CARGA INTERMEDIA DE EXPLOSIVO.</i> | <i>38</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 21: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO DE ALTA CARGA DE EXPLOSIVO.</i> | <i>38</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 22: RESUMEN COMPARATIVO DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO A LA CARGA DE EXPLOSIVO.</i> | <i>39</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 23: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO DE BAJA DENSIDAD DE PERFORACIÓN.....</i> | <i>40</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 24: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO DE DENSIDAD DE PERFORACIÓN INTERMEDIA.</i> | <i>40</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 25: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO DE ALTA DENSIDAD DE PERFORACIÓN.....</i> | <i>41</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 26: RESUMEN COMPARATIVO DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO A LA PERFORACIÓN.</i> | <i>41</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 27: DIAGRAMA DE PERFORACIÓN PARA EL CASO DE GRANULOMETRÍA FINA.....</i> | <i>43</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 28: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO FINO.</i> | <i>43</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 29: DIAGRAMA DE PERFORACIÓN PARA EL CASO DE GRANULOMETRÍA INTERMEDIA (BASE).</i> | <i>44</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 30: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO BASE.</i> | <i>44</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 31: DIAGRAMA DE PERFORACIÓN PARA EL CASO DE GRANULOMETRÍA GRUESA.....</i> | <i>45</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 32: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANULOMETRÍA ROM. CASO GRUESO.</i> | <i>45</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 33: RESUMEN COMPARATIVO DE DISTRIBUCIONES GRANULOMÉTRICAS DE LOS CASOS DE ESTUDIO</i> | <i>46</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 34: FLOWSHEET DE LA OPERACIÓN.....</i> | <i>52</i> |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>ILUSTRACIÓN 35: ESTRUCTURA DE COSTOS EN UNA PLANTA DE MEDIANA MINERÍA. REFERENCIA DEL CASO DE ESTUDIO.....</i> | <i>60</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 36: ESQUEMA DEL MODELO DE CHANCADO DE WHITEN (1972).</i> | <i>78</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 37: RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CASO BASE.</i> | <i>81</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 38: RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CASO BASE - FINO.....</i> | <i>82</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 39: RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CASO BASE - GRUESO.....</i> | <i>83</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 40: RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CASO DURO - BASE.....</i> | <i>84</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 41: RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CASO DURO - FINO.....</i> | <i>85</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 42: RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CASO DURO - GRUESO.....</i> | <i>86</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 43: RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CASO BLANDO - BASE.....</i> | <i>87</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 44: RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CASO BLANDO - FINO.....</i> | <i>88</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 45: RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CASO BLANDO - GRUESO.</i> | <i>89</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 46: RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CASO BLANDO - GRUESO, AJUSTANDO EL TONELAJE DE ENTRADA.....</i> | <i>90</i> |

Índice de tablas

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>TABLA 1: COMPOSICIÓN Y CARACTERIZACIÓN (PARCIAL) DE LA ROCA. BASE DE DATOS A UTILIZAR.....</i> | <i>18</i> |
| <i>TABLA 2: CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA. BASE DE DATOS A UTILIZAR.....</i> | <i>19</i> |
| <i>TABLA 3: PARÁMETROS OPERACIONALES DE TRONADURA. BASE DE DATOS A UTILIZAR.....</i> | <i>20</i> |
| <i>TABLA 4: INFORMACIÓN GRANULOMÉTRICA. BASE DE DATOS A UTILIZAR.....</i> | <i>21</i> |
| <i>TABLA 5: INFORMACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA BASE DE DATOS, SEGREGADA POR SUBCONJUNTOS DE DATOS CON INCONSISTENCIAS.....</i> | <i>24</i> |
| <i>TABLA 6: DISPERSIÓN DE K DE LOS SUBCONJUNTOS DE DATOS INCONSISTENTES, DESTACANDO (NEGRITA) LOS DATOS DE MENOR DISPERSIÓN.</i> | <i>25</i> |
| <i>TABLA 7: BASE DE DATOS FILTRADA.</i> | <i>25</i> |
| <i>TABLA 8: RESUMEN DE INDICADORES DE LA VALIDACIÓN POR MONTECARLO.</i> | <i>32</i> |
| <i>TABLA 9: ESTRUCTURA DEL SIMULADOR DE GRANULOMETRÍA ROM.....</i> | <i>33</i> |
| <i>TABLA 10: RANGOS DE OPERACIÓN DE LAS VARIABLES QUE COMPONEN LOS MODELOS PREDICTIVOS DE GRANULOMETRÍA ROM.....</i> | <i>33</i> |
| <i>TABLA 11: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS, MALLA TYLER, CONSIDERANDO LA SIMULACIÓN DE UN CASO INTERMEDIO.</i> | <i>34</i> |
| <i>TABLA 12: PARÁMETROS BASES PARA ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL TIPO DE ROCA.</i> | <i>34</i> |
| <i>TABLA 13: PARÁMETROS BASES PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO A LA CARGA DE EXPLOSIVO.....</i> | <i>37</i> |
| <i>TABLA 14: PARÁMETROS BASES PARA ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO A LA PERFORACIÓN.....</i> | <i>39</i> |
| <i>TABLA 15: CASOS DE ESTUDIO PARA ESCENARIOS DE GRANULOMETRÍA.....</i> | <i>42</i> |
| <i>TABLA 16: CÁLCULO DE LA DENSIDAD APARENTE. CASO FINO.....</i> | <i>48</i> |
| <i>TABLA 17: CÁLCULO DE LA DENSIDAD APARENTE. CASO BASE.....</i> | <i>48</i> |
| <i>TABLA 18: CÁLCULO DE LA DENSIDAD APARENTE. CASO GRUESO.</i> | <i>49</i> |
| <i>TABLA 19: EQUIPOS CONSIDERADOS PARA LAS OPERACIONES DE CARGUÍO Y TRANSPORTE.....</i> | <i>49</i> |
| <i>TABLA 20: CÁLCULO DE RENDIMIENTO Y COSTO OPERACIONAL DEL CARGUÍO.</i> | <i>50</i> |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 21: CÁLCULO DEL RENDIMIENTO Y COSTO OPERACIONAL DEL TRANSPORTE. | 50 |
| TABLA 22: CONSIDERACIONES DE WORK INDEX PARA LOS DISTINTOS TIPOS DE MINERAL (BLANDO, BASE Y DURO). | 51 |
| TABLA 23: COMBINACIÓN DE ESCENARIOS DE GRANULOMETRÍA Y TIPO DE MINERAL. | 51 |
| TABLA 24: ENERGÍA VERSUS TAMAÑO PARA ESTIMAR EL CONSUMO DE ENERGÍA EN EL CHANCADO. | 53 |
| TABLA 25: FUNCIÓN RUPTURA. | 53 |
| TABLA 26: TASA DE RUPTURA EN MOLIENDA DE BOLAS. | 53 |
| TABLA 27: VARIABLES Y PARÁMETROS OPERACIONALES PARA MODELOS DE CHANCADO. | 53 |
| TABLA 28: VARIABLES Y PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA MOLIENDA. | 54 |
| TABLA 29: VARIABLES Y PARÁMETROS OPERACIONALES PARA MODELOS DE CLASIFICACIÓN. | 54 |
| TABLA 30: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DEL MINERAL DE DUREZA INTERMEDIA (BASE). | 55 |
| TABLA 31: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DEL MINERAL DURO. | 55 |
| TABLA 32: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DEL MINERAL BLANDO. | 56 |
| TABLA 33: RESUMEN COMPARATIVO DE LAS SIMULACIONES DE LOS 9 ESCENARIOS. | 57 |
| TABLA 34: CONSIDERACIONES DEL COSTO DE INSUMOS DE TRONADURA. | 58 |
| TABLA 35: CONSIDERACIONES DE COSTOS OPERACIONALES DE EQUIPOS MINA. | 58 |
| TABLA 36: COSTOS OPERACIONALES DE LA MINA. REFERENCIA DEL CASO BASE. | 59 |
| TABLA 37: CONSIDERACIÓN DEL COSTO (INVARIANTE) DE "OTROS". | 59 |
| TABLA 38: CONSIDERACIONES OPERACIONALES DE LOS EQUIPOS DE CONMINUCIÓN. | 59 |
| TABLA 39: COSTO DE LA ENERGÍA CONSIDERADO PARA EL CASO DE ESTUDIO. | 60 |
| TABLA 40: CONSIDERACIONES ECONÓMICAS DE MERCADO. | 61 |
| TABLA 41: RESUMEN DE ASPECTOS TÉCNICOS DE LA GEOLOGÍA. | 62 |
| TABLA 42: RESUMEN DE LOS ASPECTOS TÉCNICOS DE LA MINA. | 62 |
| TABLA 43: RESUMEN DE LOS ASPECTOS TÉCNICOS DE LA PLANTA. | 63 |
| TABLA 44: EVALUACIÓN ECONÓMICA ENMARCADA EN EL CONTEXTO DE MERCADO Y ESTRUCTURA DE COSTOS. | 65 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>TABLA 45: EVALUACIÓN ECONÓMICA ENMARCADA EN EL CONTEXTO DE MERCADO Y ESTRUCTURA DE COSTOS (CONTINUACIÓN).</i> | 66 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>TABLA 46: VARIACIÓN DE RENDIMIENTO EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS DE ESTUDIO.</i> | 67 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|

Índice de ecuaciones

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>ECUACIÓN 1: RELACIÓN GENERALIZADA ENTRE EL RENDIMIENTO EN CONMINUCIÓN Y LAS PROPIEDADES DEL MINERAL.</i> | 11 |
| <i>ECUACIÓN 2: RELACIÓN DE RENDIMIENTO EN CONMINUCIÓN Y PROPIEDADES DEL MINERAL POR MEDIO DE LA ECUACIÓN DE BOND.</i> | 11 |
| <i>ECUACIÓN 3: ECUACIÓN DE BOND SIMPLIFICADA PARA PARTÍCULAS GRUESAS.</i> | 11 |
| <i>ECUACIÓN 4: MODELO DE GAUDIN SCHUMANN.</i> | 21 |
| <i>ECUACIÓN 5: CRITERIO DEL FILTRO DE DATOS A PARTIR DEL LÍMITE DE DETECCIÓN.</i> | 23 |
| <i>ECUACIÓN 6: ESTRUCTURA DEL MODELO PREDICTIVO DE K.</i> | 27 |
| <i>ECUACIÓN 7: ESTRUCTURA DEL MODELO PREDICTIVO DE P80.</i> | 27 |
| <i>ECUACIÓN 8: RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO DE PARTÍCULAS Y LA POROSIDAD (YU ET. AL., 1997).</i> | 47 |
| <i>ECUACIÓN 9: CORRECCIÓN DE LA POROSIDAD DE YU.</i> | 47 |
| <i>ECUACIÓN 10: CÁLCULO DE LA DENSIDAD APARENTE A PARTIR DE LA POROSIDAD CORREGIDA DE YU.</i> | 47 |
| <i>ECUACIÓN 11: ESTIMACIÓN DE MONO-TAMAÑOS (D) A PARTIR DE LA ABERTURA DE LA MALLA (X).</i> | 49 |
| <i>ECUACIÓN 12: MODELO DE CHANCADO (WHITTEN, 1972)-</i> | 78 |
| <i>ECUACIÓN 13: EXPRESIÓN PARA LA MATRIZ DE RUPTURA, SEGREGANDO EN FINOS Y GRUESOS.</i> | 78 |
| <i>ECUACIÓN 14: EXPRESIÓN PARA LA MATRIZ DE CLASIFICACIÓN.</i> | 79 |
| <i>ECUACIÓN 15: EXPRESIONES DEL MODELO DE CLASIFICACIÓN POR CURVAS DE EFICIENCIA, VÁLIDAS PARA HARNEROS E HIDROCICLONES.</i> | 79 |