

**MODELO DE PRECONCENTRACIÓN DE MINERALES PARA AUMENTAR
LA RENTABILIDAD, REDUCIR EL IMPACTO AMBIENTAL Y ALIVIAR
ETAPAS POSTERIORES DE PROCESAMIENTO.**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Técnico Universitario en Minería y
Metalurgia.

Alumno:

Valentina Milenka Fernández Lasnibat

Profesor Guía:

Ing./Sr Erick Kohnenkamp

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de título principalmente a mi familia por apoyarme y acompañarme en este largo proceso, por creer en mí, por cada consejo y por cada una de sus palabras que me motivaron y guiaron en el camino, a mi madre Rose Marie Lasnibat por acompañarme en mis largas y agotadoras noches de estudio siempre con un café que preparaba con mucho amor, a mi hermana Bárbara Fernández quien con su inmensa sabiduría y sus palabras de aliento siempre estuvo para mí, a mi padrastro Jorge Salmon quien con su infinita paciencia, siempre encontraba las palabras para calmar mi estrés y lograr centrarme, además agradecer a mis profesores y compañeros quienes compartieron sus conocimientos y este lindo proceso de aprendizaje y superación.

RESUMEN

El principal objetivo del presente estudio es analizar la tecnología de preconcentración de minerales en inglés “ore sorting”, los beneficios que conlleva su implementación a la minería actual chilena la cual presenta dificultades naturales que se encuentran fuera del control de la industria minera (caída de las leyes de mineral, En Chile desde 1992 a la fecha las leyes del metal rojo disminuyeron en 46%, pasando de 1,61% a 0,87%. (Villarino, 2012).), además de muchos otros factores que influyen a que en la actualidad producir cobre no sea tan rentable como lo era hace años atrás, se enseñaran los beneficios que promete los cuales son principalmente la reducción de los costos asociados al procesamiento de grandes volúmenes que contienen un bajo valor económico y la reducción de recursos como el agua y la energía en los diferentes procesos, se explicara a detalle en que consiste la tecnología de preconcentración de minerales, su principio de funcionamiento, sus tipos de sensores de clasificación (radiométricos, fotométricos, de rayos x, de resonancia magnética, etc.),n, casos en donde se implementó esta tecnología, principales proveedores y una evaluación económica sobre esta tecnología la cual dio como resultado un VAN del proyecto es de 5.13 millones de dólares, El TIR dio un valor total de 153.15% superior a 11.91% que fue el costo de oportunidad calculado, mostrando así su viabilidad económica y el PAYBACK tiene un periodo de retorno de la inversión de 0.58 años.

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVO GENERAL.....	11
1. CONTEXTO MINERIA EN CHILE	12
1.1. PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN A LA MINERÍA CHILENA 13	
1.1.1. Disminución de las leyes del mineral.....	13
1.1.2. Consumo energético en los procesos de conminución.....	14
1.2. BENEFICIOS.....	16
1.2.1. Disminución de depósitos de relaves	16
1.2.2. Sostenibilidad	17
1.2.3. Aumento en la vida útil de la mina.....	17
1.2.4. Reducción del costo unitario \$/ton	17
1.2.5. Reducción en los costos de energía.....	19
1.2.6. Reducción en los costos de transporte.....	19
1.3. BENEFICIOS GENERALES	21
1.4. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO.....	22
1.4.1. Marco histórico.....	23
2. PRECONCENTRACION DE MNERALES BASADA EN SENSORES.....	24
2.1. MÁQUINAS CLASIFICADORAS	24
2.1.1. Clasificador tipo cinta o correa	24
2.1.2. Clasificador tipo tolva	25
2.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	26
2.2.1. Acondicionamiento de la alimentación	26
2.2.2. Presentación del material.....	26
2.2.3. Detección.....	27
2.2.4. Procesamiento de datos	27
2.2.5. Separación	27
2.3. PRINCIPALES FLOWSHEET.....	28
2.3.1. Preconcentración de mineral ROM	28
2.3.2. Preconcentración etapa post-chancado.....	28
2.3.3. Preconcentración etapa post-molino SAG.....	29
2.4. TIPOS DE SENSORES	30
2.4.1. Rayos X.....	31
2.4.1.1. XRT- Transmisión de Rayos X	31
2.4.1.2. XRF- Fluorescencia de Rayos X	31
2.4.1.3. XRL- Luminiscencia de Rayos X.....	33
2.4.2. Radiométricos.....	34

2.4.3.	NIR- Espectroscopia de infrarrojo cercano	34
2.4.4.	Resonancia magnética	35
2.4.5.	Fotométrico (PM)	36
2.4.6.	Electromagnético	36
2.4.7.	Sensor PGNAA y PFTNA.....	37
2.4.8.	Color/Óptica	37
3.	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE PRECONCENTRACIÓN DE MINERALES	38
3.1.	CLASIFICACIÓN DE MINERALES EN OTROS PAÍSES Y EN CHILE 38	
3.1.1.	Mina San Rafael, Perú.....	38
3.1.2.	Mina Karowe en Botswana, África	39
3.1.3.	Mina El Soldado Anglo American, Chile	40
3.1.4.	Mina de cobre en el Suroeste, Estados Unidos	41
3.2.	INDICADORES DE RENTABILIDAD EN PROYECTOS DE INVERSIÓN 42	
3.2.1.	VAN	42
3.2.2.	TIR.....	42
3.2.3.	Payback	42
3.3.	EVALUACIÓN ECONÓMICA SOBRE ORE SORTING	43
3.3.1.	CAPEX.....	43
3.3.2.	Flujo de caja	43
3.3.3.	VAN	44
3.3.4.	TIR.....	45
3.3.5.	Payback	45
3.4.	PROVEEDORES	46
3.4.1.	Steinert GmbH.....	46
3.4.2.	TOMRA Sorting Solutions Mining.....	46
3.4.3.	ABH Engineering	46
4.	CONCLUSIONES.....	47
	BIBLIOGRAFÍA	48

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1-1: Principales productores de minerales metálicos, año 2020.....	12
Figura 1-2: Ley de mineral en la industria del cobre	14
Figura 1-3: Consumo Energético en los procesos de la Minería	15
Figura 1-4: Proyección del consumo energético en la minería del cobre 2016-2027.....	15
Figura 1-5: Aumento en la acumulación de relaves.....	16
Figura 1-6: Costos por procesamiento de cobre 2003-2013	18
Figura 1-7: Costo inversión por unidad 2003-2013	18
Figura 1-8: Costos en los diferentes procesos de la minería.....	20
Figura 1-9 Beneficios generales.....	21
Figura 1-10: Sistemas de preconcentración	22
Figura 2-1: Clasificador tipo cinta	24
Figura 2-2: Clasificador tipo tolva	25
Figura 2-3: Clasificación Pre-Chancad	28
Figura 2-4: Clasificación Pos chancado.....	29
Figura 2-5: Clasificación Pos Molienda.....	29
Figura 2-6: Muestras de material probado para separación de cobre.....	32
Figura 2-7: Muestras probadas con el sensor de transmisión (“XRT”).	32
Figura 2-8: Aplicación de luminiscencia de rayos X.....	33
Figura 2-9: Sensor NIR	35
Figura 3-1: Planta de clasificación de minerales en la mina San Rafael	39
Figura 3-2: Planta de clasificación de minerales basada en sensores en la mina Karowe	40
Figura 3-3: bulk sorting- El Soldado.....	41

ÍNDICE TABLAS

Tabla 2-1 Resumen Tipos de sensores de preconcentración.....	30
Tabla 3-1: Calculo CAPEX.....	43
Tabla 3-2 Flujo de caja.....	43
Tabla 3-3: Interpolación para VAN = 0	45

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

Acarreo: Acción de acarrear (transportar).

Al: Aluminio.

CAPEX: (Capital Expenditure), en español gasto en capital, es la inversión en capital.

Co: Cobalto

Cr: Cromo

Cu: Cobre

Desmante: Desechos que se generan producto de los trabajos realizados para llegar a la zona donde se encuentra el mineral.

EBIT: Beneficio antes de intereses e impuestos

EBITDA: Ganancias antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones

Estéril: Material sin valor económico extraído para permitir la explotación del mineral útil.

FCF: Free cash Flow, en español Flujo de caja libre

Fe: Hierro

Ganga: Minerales sin valor económico y que acompañan a los que contienen los elementos metálicos

Izaje: Forma de levantar o mover objetos con ayuda de algunos dispositivos

Ley del Mineral: Corresponde al porcentaje promedio de un determinado mineral dentro de una roca extraída de un yacimiento

Mena: Material natural del que se pueden extraer minerales o metales con beneficio económico

Metales base: Los metales base son metales comunes que se empañan, oxidan o corroen con relativa rapidez cuando se exponen al aire o la humedad.

Metales Ferrosos: Los metales ferrosos se definen como aquellos metales que contiene hierro

Metales preciosos: Metal que posee características que lo hacen resistente al ataque de ácidos y agentes corrosivos; también resistente a la oxidación atmosférica

Metrados: Agrupamiento de datos recopilados a partir de cálculos, mediciones y planos de construcción

Mg: Magnesio

Mineral ROM: Procesado mediante chancado primario

Minerales industriales: Material geológico (roca, mineral, líquido, o gas) con valor comercial minable que no tiene un uso como metal, combustible, o gema

Minerales metálicos: Contienen uno o más elementos metálicos

Mn: Manganeso

MW: Megavatios

Ni: Níquel

Nm: Newton-metro

NOPAT: Beneficio operativo después de impuestos

OPEX: Operational expenditure, En español gastos operativos.

Oz: Onza

Pallaqueo: Escoger manualmente las rocas con contenido de mineral

PAYBACK: Plazo de recuperación de una inversión

Pebble: (en inglés: guijarros, trozos o piedras pequeñas) son el resultado de la molienda del mineral

Piedras preciosas: Pieza de cristal mineral que, en forma cortada y pulida, se usa para hacer joyas u otros adornos

Problemas de cuellos de botella: Aquella actividad o fase de la producción que suele ser más lenta o costosa

Reactivos: Sustancia o compuesto añadido a un sistema para provocar una reacción química

Relave: Residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados.

Rocas fosfóricas: Roca sedimentaria no detrítica que contiene altas cantidades de minerales fosfatados.

Sensor: Dispositivo que capta magnitudes físicas (variaciones de luz, temperatura, sonido, etc.) u otras alteraciones de su entorno.

Si: Silicio

TIR: Tasa interna de retorno

US\$: dólar estadounidense

VAN: Valor actual net

INTRODUCCIÓN

A medida que se agotan los depósitos de alta ley, las industrias mineras se encuentran con calidades de alimentación cada vez menores. Entre 2003 y 2013, se estima que la ley promedio en las minas de cobre mundiales disminuyó en un 25 por ciento (Calvo, Mudd, Valero, & Valero, 2016). Por tanto, los depósitos restantes son generalmente de menor ley, esto exige la explotación y el procesamiento de un volumen de material mucho mayor por tonelada de producto, además de un aumento de costo por transporte, trituración y el consumo de agua y energía por tonelada de producto.

La preconcentración consiste en el descarte preliminar de una fracción significativa de la alimentación que contiene poco o nada de mineral de interés, reduciendo de esta manera la masa y el volumen a procesar en las operaciones posteriores como trituración, molienda, flotación, etc. Esta tecnología de sensores consiste en analizar y procesar de forma automática las propiedades del material, separando el mineral del estéril por medio de eyectores de aire, agua o mecánicos. Puede mejorar significativamente la economía de un proyecto, debido a que aumenta la calidad de material que se encuentra por debajo de la ley de corte, reduce la masa total y aumenta la ley del mineral, teniendo como resultado una alta recuperación, procesando de esta forma, un mineral de mayor valor a un menor costo. “Se emplearon sensores de transmisión de rayos X, que identificaron inclusiones de estaño y los separaron con eyectores neumáticos, generando incrementos de ley promedio de 0.6% a 2.76%, con recuperación de 90.4% y reduciendo el producto a 20% en peso”, (Condori, 2018)). Eliminando el material estéril se reduce significativamente los costos de procesamiento ya que el material ganga suele tener altos contenidos de silicatos, que son más duros y competentes que los minerales valiosos (Valery, Duffy, 2017). También podrían reducirse los requisitos de transporte de minerales, tales como el izaje y el acarreo en camiones o cintas transportadoras, y habría un consumo menor de agua y un volumen menor de relaves finos y húmedos para desechar por tonelada de producto, La industria minera considera más que nunca la preconcentración de minerales como una gran opción para el diagrama de flujo del proceso. Este creciente interés se debe a la cantidad de trabajos de prueba cada vez mayor en los centros de prueba de los proveedores, es una tecnología que ofrece cambios significativamente positivos lo que nos lleva a replantear el modo en que operan los circuitos de procesamiento.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar desde un punto técnico-económico esta tecnología de clasificación de minerales, exponiendo sus ventajas tanto ambientales como económicas para incentivar a la innovación y cambios necesarios que van en pro de la reducción de costos y facilitación de los procesos

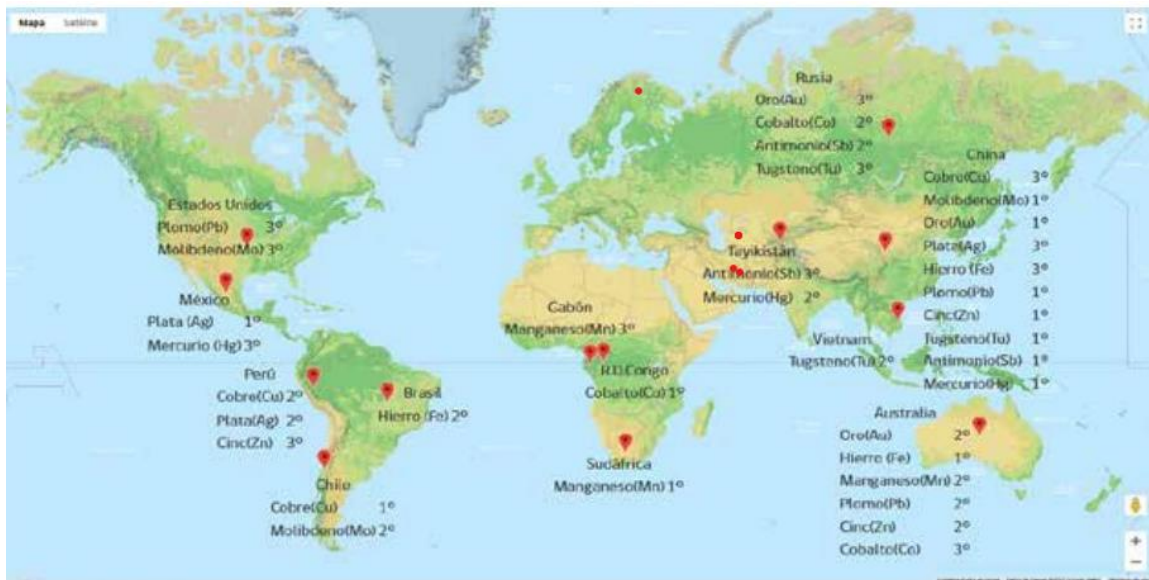
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Actualizar el conocimiento acerca del comportamiento de la minería chilena y sus principales problemáticas, presentar los principales beneficios que propone esta tecnología de preconcentración la cual se va a describir de manera transitoria.
- Presentar las principales tecnologías existentes de selectividad de mineral en la industria minera.
- Analizar variables económicas asociadas a la tecnología de preconcentración en conjunto con contenidos.

1. CONTEXTO MINERIA EN CHILE

Chile es el primer productor mundial de cobre y la importancia de este mineral para Chile es inobjetable. Sin embargo, nuestro país es rico en diversos minerales, su minería es mucho más que cobre. Con relación a la producción nacional 2020 de minerales metálicos, el cobre y el oro disminuyeron su producción, con relación al 2019, en 0,8% y 11,9%, respectivamente, y aumentaron su producción, principalmente, el zinc (410%), la plata (20,4%), el hierro (17,4%) y el molibdeno (10,8%). En cuanto a las rocas y minerales industriales, aumentaron su producción, principalmente, las arcillas (49,7%), los compuestos de potasio (41,9%), los compuestos de azufre (16,9%), los nitratos (14,9%) y los compuestos de litio (10,7%), y la disminuyeron, entre otros, las rocas fosfóricas (38,6%), las rocas ornamentales (22,6%), los compuestos de boro (18,2%), los recursos silíceos (9,0%) y el cloruro de sodio (8,6%).

Asimismo, con relación a su participación en la producción mundial 2020 de minerales metálicos, y no obstante las cifras de producción nacional del año 2020 respecto del año 2019, el país mantuvo el primer lugar en la producción mundial de cobre, con un 28,5% de esa producción alcanzando 5,773 millones de toneladas métricas, y el segundo lugar en molibdeno con un 20,2% produciendo 59.319 toneladas métricas, y avanzó a un quinto lugar en la plata con un 6,4%. (SERNAGIOMIN, 2020).



Fuente: SERNAGEOMIN

Figura 1-1: Principales productores de minerales metálicos, año 2020

1.1. PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN A LA MINERÍA CHILENA

Existen muchos factores que influyen en las problemáticas que presenta la minería chilena en la actualidad, como son el aumento del consumo y costo por energía, aumento del consumo de agua, lo cual es muy importante debido a la sequía que se presenta en la actualidad en Chile y el más importante la disminución de las leyes de mineral en los depósitos del país.

1.1.1. Disminución de las leyes del mineral

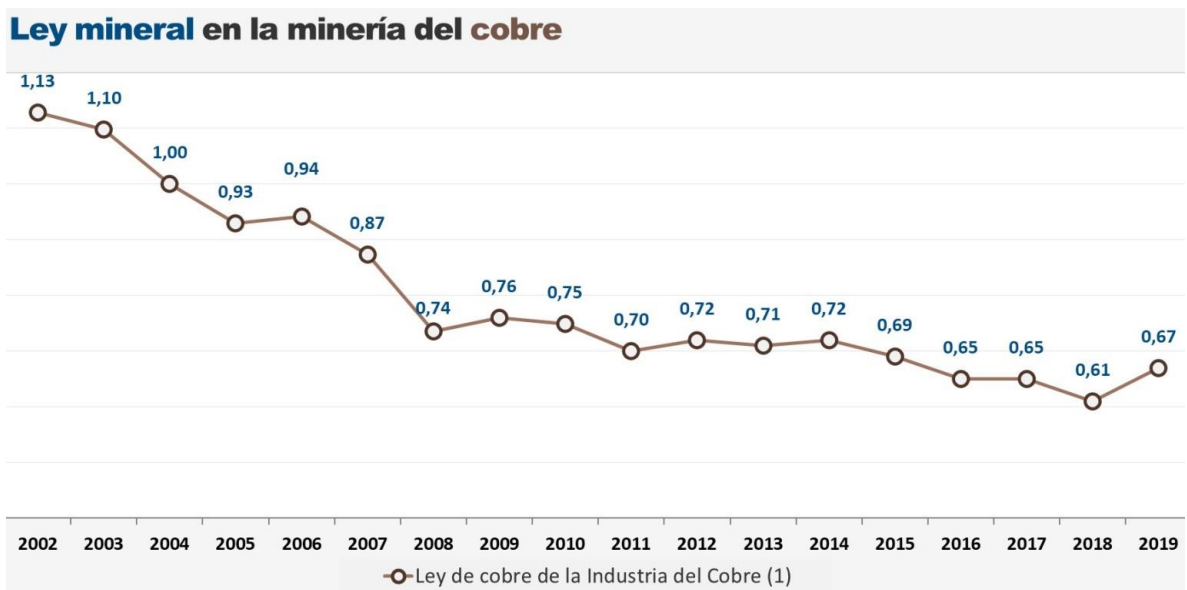
Los depósitos de la minería chilena en la actualidad presentan la caída de las leyes de cabeza del mineral provocando así un aumento de costos y recursos en diferentes procesos de la minería debido a que los depósitos restantes son generalmente de menor ley y requieren de la extracción y el procesamiento de mayores volúmenes de material por tonelada de producto,

La ley es crítica para la rentabilidad de una operación minera, pero existen características naturales que se encuentran fuera del control de la minería. Entre 2003 y 2013, se estima que la ley promedio en las minas de cobre mundiales disminuyó en un 25 por ciento (Calvo, Mudd, Valero, & Valero, 2016). A medida que disminuyen las leyes en todo el mundo, y los nuevos descubrimientos de yacimientos de alta ley son cada vez más escasos, las minas en operación y los proyectos en desarrollo se enfrentan a una presión cada vez mayor para mejorar la eficiencia de los sistemas mineros.

En Chile desde 1992 a la fecha las leyes del metal rojo disminuyeron en 46%, pasando de 1,61% a 0,87%. Esta disminución de la ley del mineral en Chile es mayor que en otros países productores de cobre debido a que el desarrollo minero aquí empezó antes. (Villarino, 2012)

El proceso de extracción de material es cada vez mayor debido a la baja de las leyes de los depósitos de mineral “hoy en día aparecen proyectos nuevos con leyes más bajas que 0,5%, cosa que en años anteriores era imposible imaginar que alguien se atreviera a invertir en un proyecto así” (Nelson Pizarro, 2012).

La mina Chuquicamata comenzó con leyes superiores al 2%, hoy ronda cercano al 0,6%. Escondida recuperaban 30 libras de cobre fino por tonelada tratada. Al año 2012 se recuperaron alrededor de 15 libras. Actualmente hay minas que están siendo desarrolladas pensando en que recuperarán alrededor de 6 libras de cobre fino por tonelada de materia. Esta disminución en las leyes de cabeza genera un aumento del volumen de procesamiento, gasto energético en el proceso de trituración y molienda, consumo y pérdida de agua por tonelada de mineral, etc. Aumentando así los gastos de producción y originando que cada vez sea más costoso producir cobre.



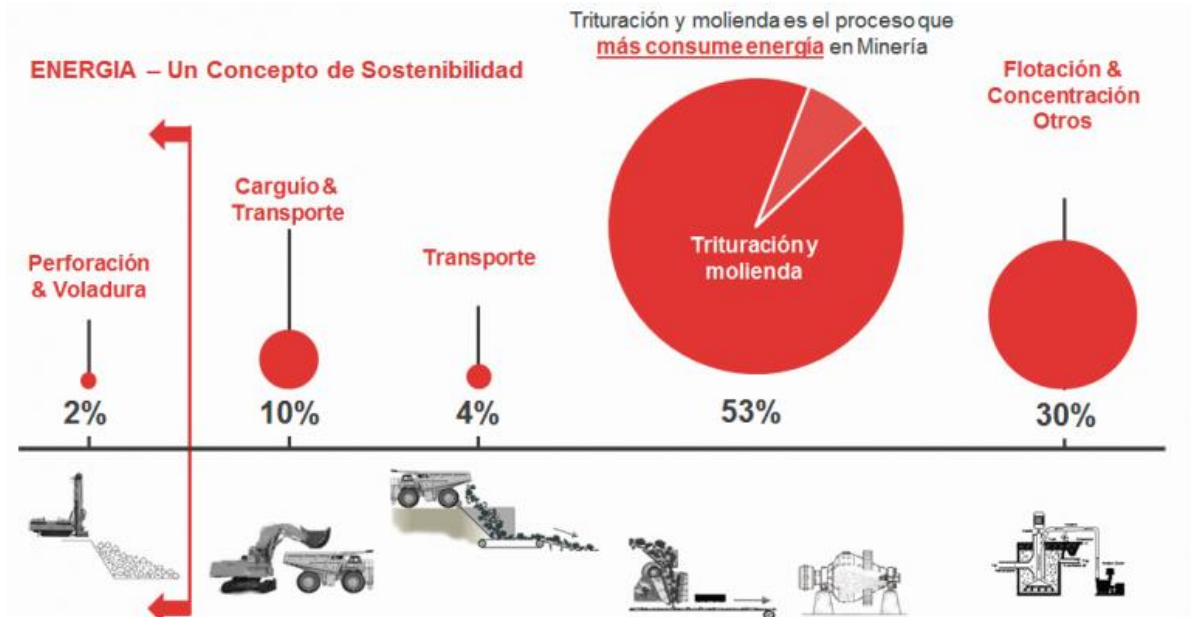
Fuente: (Cifras actualizadas de la Minería, s. f.)

Figura 1-2: Ley de mineral en la industria del cobre

1.1.2. Consumo energético en los procesos de conminución

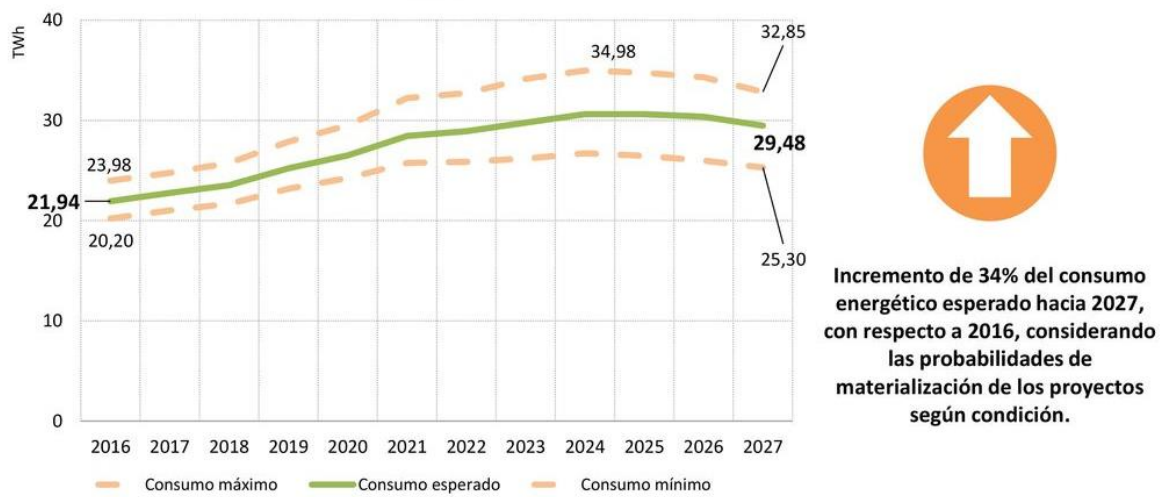
El proceso de trituración o chancado al igual que la molienda corresponden al proceso de reducción de tamaño o al proceso de separación de mineral en fracciones más pequeñas del mismo, este proceso representa, en promedio, más del 50% del consumo de energía de una planta minera (Figura 1-3) y el 20% de los costos totales de producción.

Por consecuencia de la caída progresiva de las leyes de cobre y lo que responde al incremento en la dureza del mineral, si el mineral tiene una baja ley de cobre tendrá gran cantidad de material ganga que son más duros y competentes que el mineral de interés aumentando así, los procesos de conminución y de esta forma también al consumo energético, se cree que al año 2027 el incremento en el consumo energético será de un 34% con respecto al año 2016 (Figura 1-4). El costo de la energía eléctrica en Chile es entre 67% y 91% más alto que en otros países mineros (McKinsey, 2012) Es por este motivo que la implementación de nuevas tecnologías y la innovación de proyectos que puedan disminuir el consumo energético en los procesos mineros es necesaria.



Fuente: Burdaga, 2018

Figura 1-3: Consumo Energético en los procesos de la Minería



Fuente: COCHILCO

Figura 1-4: Proyección del consumo energético en la minería del cobre 2016-2027

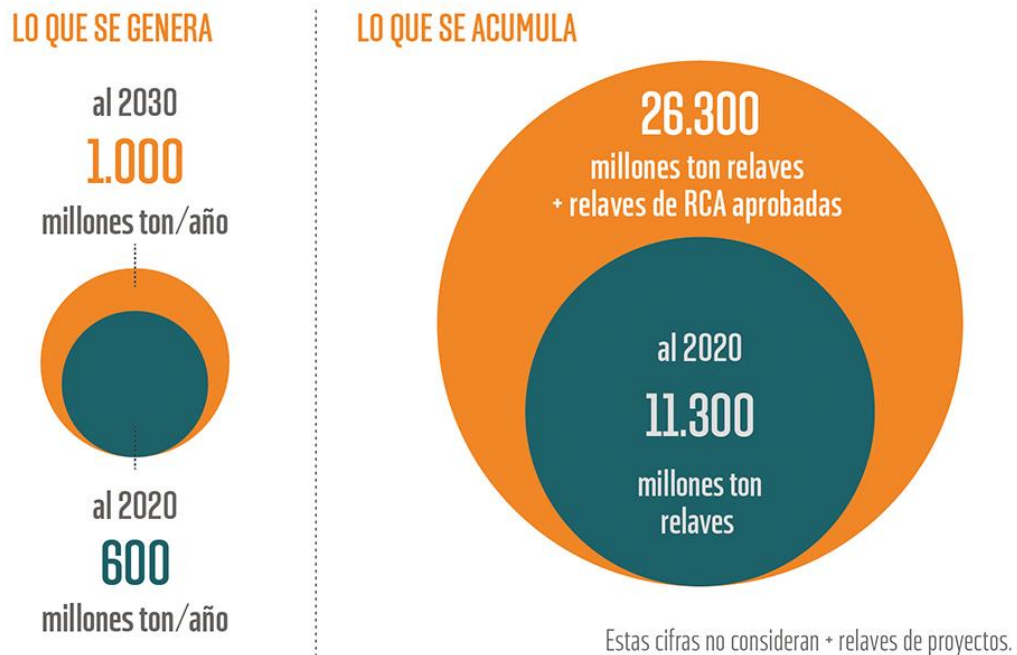
1.2. BENEFICIOS

Al implementar la tecnología de clasificación de minerales existe una gran cantidad de ventajas tanto económicas como no económicas las cuales serán descritas a continuación

1.2.1. Disminución de depósitos de relaves

El relave corresponde al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación. Los relaves aumentan y continuarán incrementándose porque las leyes de los minerales procesados bajan y, en consecuencia, es necesario procesar cada vez más material para producir la misma cantidad de cobre fino. El 67% de la alimentación se rechaza como material de relave. En Chile a noviembre de 2016 se han visitado y muestreado 606 depósitos de relaves, de los cuales 100 están activos, 266 inactivos, 239 abandonados y 1 depósito en condición de emergencia. En Chile se depositan cerca de 537 millones de toneladas anuales de relaves (SERNAGEOMIN, 2017)

Se debe determinar la mejor manera de deshacerse de la roca rechazada. Reducir la cantidad específica de relaves finos generados por tonelada de producto producido es, un incentivo cada vez más importante para la implementación de la clasificación de minerales basada en sensores.



Fuente: Elaborado según catastro por Sernageomin

Figura 1-5: Aumento en la acumulación de relaves

1.2.2. Sostenibilidad

La clasificación basada en sensores es una técnica de procesamiento que necesita poco o nada de agua, sin reactivos y poca energía. Las instalaciones completas son pequeñas cuando se comparan con la separación del medio denso y se pueden operar en áreas ambientalmente sensibles para producir un pre concentrado que se transporta a un sitio central de procesamiento. Los desechos gruesos rechazados tienen menos superficies que reaccionan químicamente y reducen el impacto del drenaje ácido de las minas.

En algunos casos, los residuos gruesos podrían incluso venderse como agregados, lo que contribuiría tanto a la utilización de la reserva como a la rentabilidad. La reducción descrita anteriormente de la ley de corte contribuye a la utilización máxima de los recursos. En general, la clasificación basada en sensores agrega beneficios económicos, ambientales y sociales a las operaciones mineras.

1.2.3. Aumento en la vida útil de la mina

A medida que el paso de clasificación de mineral mejora la ley del mineral puede hacer posible la extracción de zonas de baja ley que de otro modo se hubieran considerado antieconómicas. En otras palabras, el uso de la clasificación de minerales puede hacer posible que las minas aumenten sus reservas económicas y la vida útil de la mina. Durante las fases de puesta en marcha de una mina, normalmente se debe eliminar una cantidad significativa de sobrecarga para comenzar a extraer el yacimiento. Esta sobrecarga se puede procesar a través de clasificadores de mineral para recuperar cualquier cantidad de valor de metal a una fracción del costo típico. Esto es muy importante durante la puesta en marcha cuando una mina busca amortizar rápidamente la inversión en equipo de capital. Por otro lado, una vez que el capital de una mina ha sido completamente pagado, cualquier material procesado adicional es un ingreso menos los gastos operativos. La clasificación de mineral afecta este flujo de efectivo al (1) reducir los costos operativos por tonelada de material y (2) extender la vida útil de la mina mejorando las zonas generalmente no económicas de la mina a leyes de cabeza rentables

1.2.4. Reducción del costo unitario \$/ton

Como se muestra en la (Figura 1-6) desde el año 2003 al año 2008 Chile obtuvo costos más bajos en comparación al resto de los países que producen cobre, en promedio 10,7% más bajos, sin embargo, desde el año 2009 se observa que los costos aumentaron en comparación a los otros países de la industria minera, en promedio un 11,1% más altos.



Fuente: Elaborado por consejo minero con datos extraídos de COCHILCO

Figura 1-6: Costos por procesamiento de cobre 2003-2013



Fuente: Elaborado por consejo minero con datos extraídos de COCHILCO

Figura 1-7: Costo inversión por unidad 2003-2013

Uno de los principales factores que explican este aumento es el deterioro geológico en las industrias mineras, ya que la ley de mineral ha descendido desde 1% en 2004 a un 0,7% en 2013. Esto significa que, si para obtener una tonelada de cobre fino en 2004 debían procesarse 100 toneladas de material, en 2013 debieron procesarse 143 toneladas. Ese 43% de aumento en las toneladas procesadas significa mayor costo de inversión, energía, insumos y personal, entre otros (CM, 2014).

Aumentando el grado de alimentación por medio de la preconcentración de minerales, estos costos se reducen significativamente, debido a que, entrara al proceso solo el mineral de interés, reduciendo los costos ya antes mencionados y haciendo que la extracción de minerales sea más viable. En una de las implementaciones realizadas se obtuvo al emplear la preconcentración una reducción del Cash Cost de 879 \$/oz a 795 \$/oz.

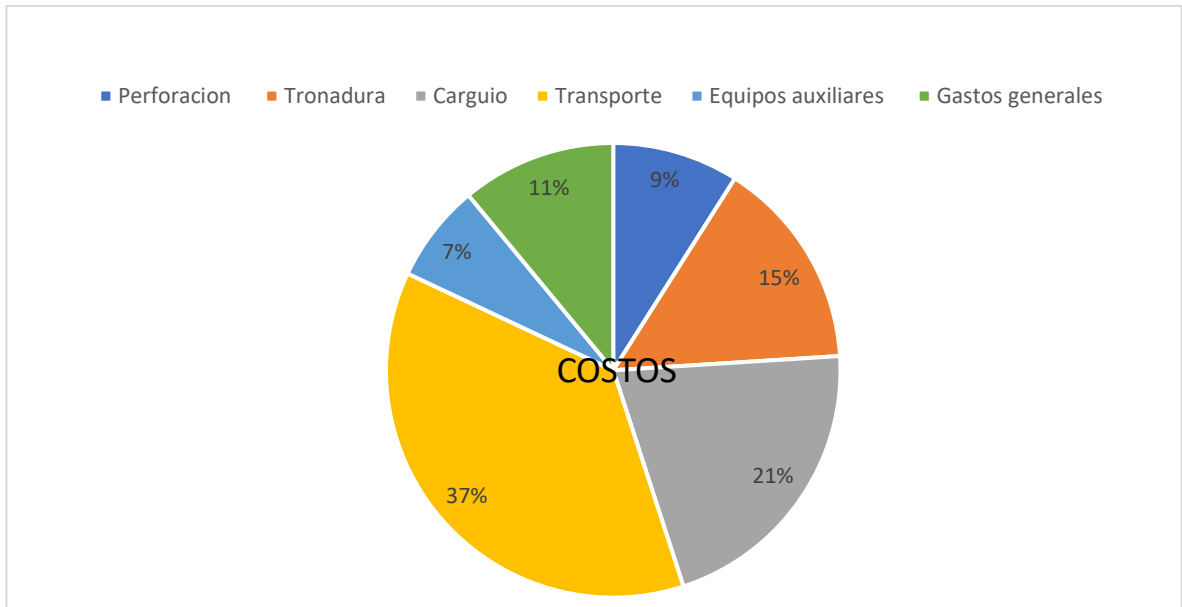
Al aumentar las leyes de alimentación, ingresa al proceso un material con mayor ley de mineral reduciendo de esta forma los costos de procesamiento debido a que no se procesara mineral de baja ley sino que solo el mineral de valor, cuando el mineral sin valor económico se extrae del flujo de la minas, se reduce el costo específico por tonelada de mina, reduciendo el costo en los procesos de trituración, lixiviación, flotación y fundición, esto tiene impacto directo en la reducción del consumo de reactivos y agua.

1.2.5. Reducción en los costos de energía

Debido al rechazo masivo de los clasificadores de mineral, se envía mucho menos material a la trituradora terciaria y a los molinos de bolas, lo que resulta en una reducción en el requerimiento de energía. Según una de las pruebas realizadas de preconcentración, se obtuvieron los siguientes resultados. “La potencia total de la trituradora se reduce de 5,9 MW a 3,2 MW; La potencia total del molino de bolas se reduce de 51,0 a 16,6 MW” (J. Lessard y col. 2014). Según los datos anteriores el consumo de energía de la trituradora o chancador se redujo un 54,24% y la potencia total del molino de bolas se redujo un 32,55% esta reducción del consumo energético tiene relación directa con la reducción de costo por energía. Cada tonelada de mineral estéril o de poco valor (ganga) que no se procesan reduce los costos de trituración y los costos asociados de desgaste y mantenimiento de los equipos.

1.2.6. Reducción en los costos de transporte

El Proceso de Carguío y Transporte Minero es el encargado de transportar el mineral desde el rajo a los distintos puntos de entrada que alimentan las plantas de procesamiento, Este proceso representa, en promedio, entre un 45% y 65% del costo de la mina (Figura 1-8). Transportar grandes cantidades de volúmenes con una ley baja no es factible para la minería ya que se debe de transportar cada vez más volumen de material, con un valor cada vez menor, esto aumenta respectivamente en los costos de mantención de los equipos, su vida útil, además de la relación existente entre los equipos y el costo de combustible.



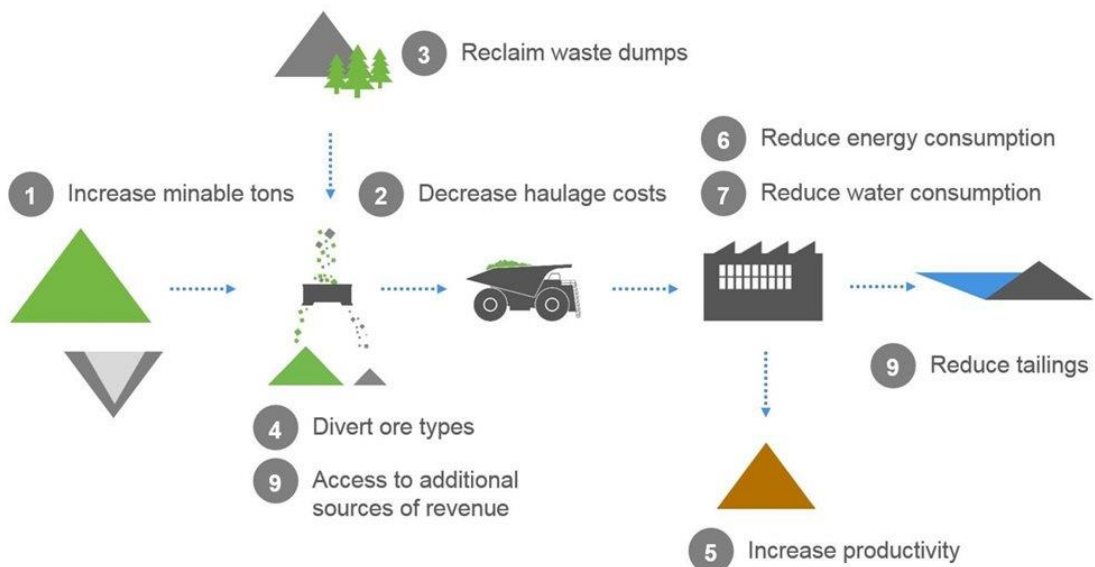
Fuente: Elaboración propia con información de Ronald Guzmán V.

Figura 1-8: Costos en los diferentes procesos de la minería

Si la pre concentración de minerales se lleva a cabo en una etapa temprana de los procesos (frente de la mina) puede reducir significativamente los requisitos de transporte de mineral al rechazar el material estéril y transportar de esta forma menos mineral a la planta de procesamiento además de reducir requisitos como izaje y acarreo en camiones y cintas transportadoras y permitiendo de esta forma que el mineral de interés y los desechos se dirijan a destino apropiado (vertedero o proceso de desechos y planta de procesamiento). La clasificación basada en sensores es una técnica compacta y flexible que requiere poca infraestructura y puede aplicarse en ubicaciones estratégicas dentro de la operación física de minería y procesamiento de minerales.

1.3. BENEFICIOS GENERALES

- Reduce la ley de corte, extendiendo la vida útil de la mina.
- Aumenta la valoración de la mina debido al aumento de los recursos y reservas mineras.
- Reduce los costos de transporte de mineral ROM y crea la oportunidad de contar con material de relleno en minas subterráneas.
- Reduce la producción de relaves y aumenta la capacidad de las instalaciones de relaves existentes.
- Reduce los consumos específicos de agua, energía y reactivos.
- Aumenta la ley del mineral ROM, la recuperación de metales y mejora el desempeño de las plantas de procesamiento de minerales.
- Genera posibles flujos de ingresos mediante la venta de áridos de desecho.
- Aumentar las toneladas extraíbles



Fuente: Ore Sorting the Road to Optimizing Your Operation, 2017

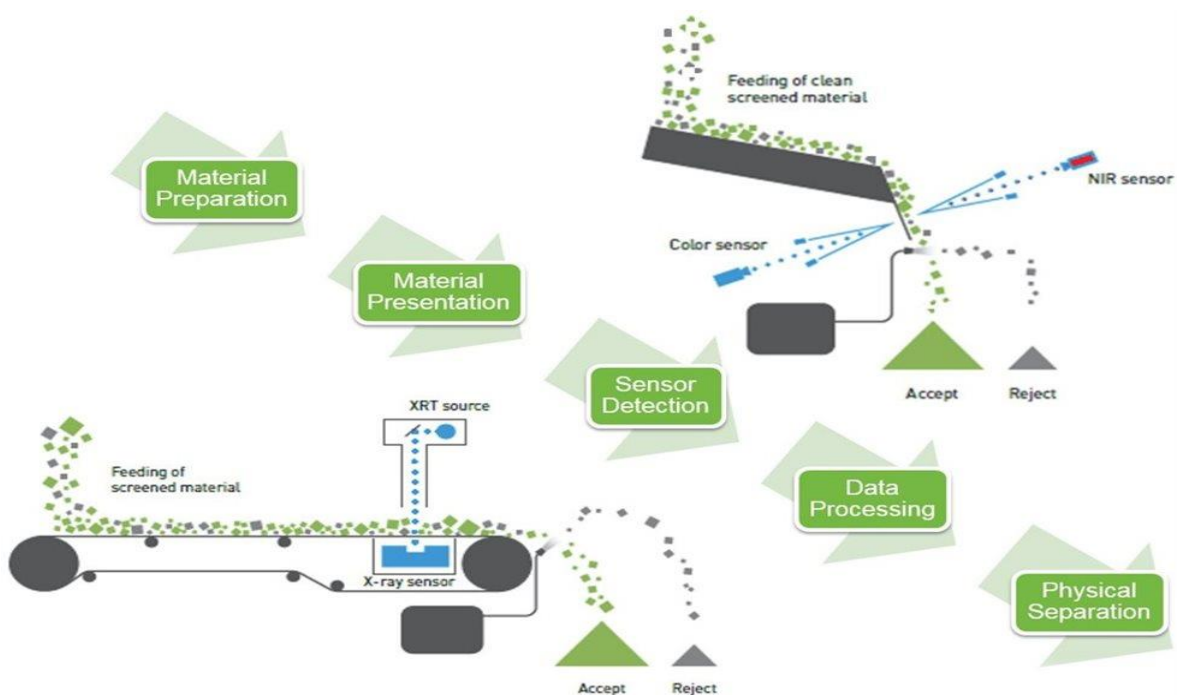
Figura 1-9 Beneficios generales

1. Disminuir el coste del transporte
2. Recuperar los vertederos
3. Desviar los tipos de mineral
4. Aumentar la productividad
5. Reducir el consumo de energía
6. Reducir el consumo de agua
7. Acceso a fuentes de ingresos adicionales
8. Reducir los residuos

1.4. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

La preconcentración de minerales o en inglés, “ore sorting” consiste en separar la mena en una etapa anticipada del proceso por medio de la selección de rocas que contienen o no mineral mediante un análisis y procesamiento automático de datos que se le otorgan. Todas las plantas se basan en cinco principios: Acondicionamiento del material, presentación del material, detección, procesamiento de datos y separación.

El material se presenta a los sensores como una monocapa de partículas liberadas. Cada pieza individual es analizada por diferentes tipos de sensores. Un algoritmo decide que roca se eyecta dependiendo de las mediciones detectadas y los criterios de selección. El sistema puede usar eyectores de aire, agua o medios mecánicos para separar las partículas seleccionadas. La decisión de omitir o eliminar un fragmento se toma en 30 milisegundos. En la actualidad existen equipos capaces de seleccionar en el rango de 100 toneladas por hora, lo que es dependiente de las propiedades del material y características de la aplicación. Si se desea clasificar flujos mayores se pueden instalar equipos en paralelo. Existen diferentes tipos de sensores (electromagnéticos, fotométricos, radiométricos, de rayos x, etc.) y pueden ser combinados dependiendo de las propiedades del mineral todos con la misma función; separar el mineral del estéril en un principio del proceso para así aliviar etapas posteriores y poder ahorrar en costos y recursos como agua, energía y reactivos. A la actualidad se están creando una cantidad cada vez mayor de equipos para escala de producción de alta capacidad.



Fuente: Ore Sorting the Road to Optimizing Your Operation, 2017

Figura 1-10: Sistemas de preconcentración

1.4.1. Marco histórico

La preconcentración existe desde hace muchos años, la forma más antigua era llamada “pallaqueo” esta forma de clasificación consiste en seleccionar manualmente las rocas con contenido de minerales como oro que se hallaban en los desmontes desechados en la etapa de extracción, esta es la forma más antigua de selección de minerales.

Los principios de la tecnología de preconcentración por sensores se han desarrollado a partir de la década de 1920, sin embargo, su aplicabilidad era estándar y aplicable solo para piedras preciosas, industria de reciclaje y alimentos. En la década de 1970 comenzaron su aplicabilidad a minerales industriales, para medir las características de los materiales, primero se utilizaron sensores radiométricos y fotométricos. Esta tecnología era muy cara, lo que es típico de todos los nuevos desarrollos, y los recursos informáticos eran extremadamente limitados, por lo que su uso a menudo no estaba justificado económicamente.

Gracias a la revolución de la informática en el cambio de milenio, la potencia informática ha aumentado y la tecnología se ha vuelto barata y asequible. El proceso de clasificación ya no se limita a la conciliación, validación y análisis de datos. Ahora toda la atención durante la investigación y el desarrollo se centra en nuevos sensores y en mejorar su precisión. Hoy en día, la clasificación basada en sensores está comenzando a revelar su potencial. Su aplicación sirve para básicamente todos los segmentos de la producción de minerales (minerales industriales, piedras preciosas, metales base, metales preciosos, metales ferrosos, etc.)

2. PRECONCENTRACION DE MNERALES BASADA EN SENSORES

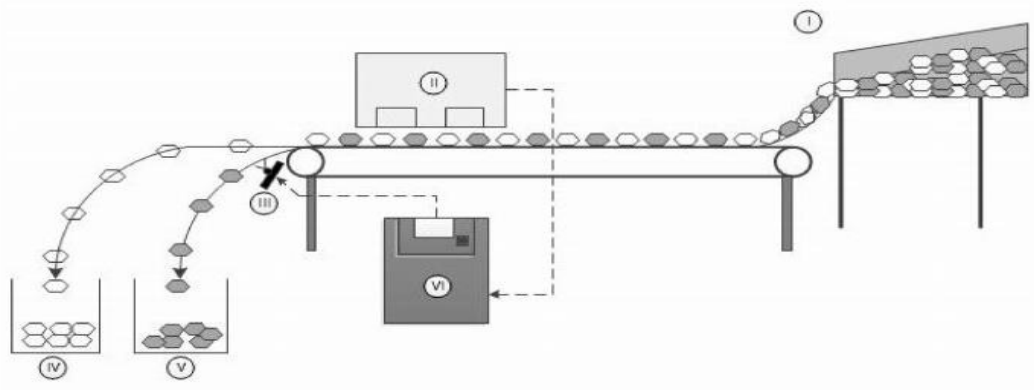
Consiste en la selección de las rocas que contienen mineral mediante el análisis y procesamiento automático de sus propiedades medidas por medio de sensores de rayos x, color, resonancia magnética, entre otros y posteriormente la separación de mineral y estéril mediante eyectores de aire comprimido, agua o neumáticos.

2.1. MÁQUINAS CLASIFICADORAS

Esta tecnología de clasificación de minerales cuenta principalmente con dos máquinas, la de tipo tolva y la máquina de tipo cinta o correa, las cuales se debe analizar.

2.1.1. Clasificador tipo cinta o correa

Suele utilizarse cuando la roca transportada al sistema es pequeña y necesita ser adherida. Además, la presentación del material es más estable porque se ubica en la superficie, lo que lo convierte en un excelente candidato para materiales muy desiguales y aplicaciones más complejas.



Fuente: Robben y Wotruba (2019)

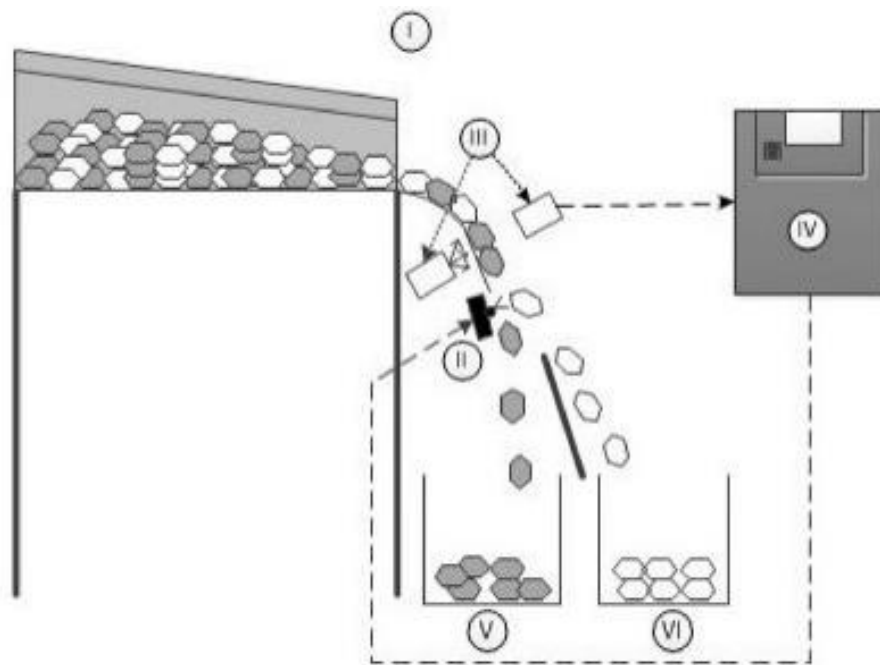
Figura 2-1: Clasificador tipo cinta

Sistema de clasificación con alimentación por cinta transportadora:

- i. Alimentación de material desde el alimentador vibratorio a la cinta
- ii. Los sensores están montados en la parte superior
- iii. Mecanismo de separación (por ejemplo, neumático)
- iv. Unidad central de procesamiento
- v. Aceptación
- vi. Rechazo

2.1.2. Clasificador tipo tolva

Este tipo de maquinaria tiene un costo más bajo de utilización y de inversión, debido a que contiene menos partes móviles. En general es aplicable cuando se utiliza detección por superficie, es decir reflexión, debido a la posibilidad de escanear la partícula por ambos lados.



Fuente: Robben y Wotruba (2019)

Figura 2-2: Clasificador tipo tolva

Sistema de clasificación con alimentación por tolva:

- i. Alimentación de material desde el alimentador vibratorio a la tolva
- ii. Los sensores están montados en el lateral
- iii. Mecanismo de separación (por ejemplo, neumático)
- iv. Unidad central de procesamiento
- v. Aceptación
- vi. Rechazo

2.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Consiste en un sistema de procesamiento el cual abarca 5 subprocesos, los cuales contribuyen al rendimiento de la máquina de clasificación basada en sensores, estos principios serán resumidos a continuación

2.2.1. Acondicionamiento de la alimentación

El material alimentado al clasificador basado en sensores debe prepararse para la detección y para el proceso de separación mecánica con aire comprimido. La mayoría de los clasificadores pueden procesar rocas de 3/4 de pulgada hasta 6 pulgadas.

Dependiendo del tamaño del material alimentado las tasas de tratamiento pueden llegar hasta 100 toneladas por hora por máquina. Para todas las aplicaciones y técnicas de detección, la alimentación debe ser tamizada en intervalos de tamaño con una relación entre el tamaño máximo de partícula y el tamaño mínimo de partícula de menos de tres (3:1). Para esta relación se introduce el término "coeficiente de tamaño rango", ya que es una cifra clave para describir la aplicabilidad de la clasificación basada en sensores a una fracción.

La relación es una cifra efectiva. Si es demasiado alta, la precisión de la detección disminuye porque las partículas grandes pueden cubrir las pequeñas. Para la separación mecánica, una relación demasiado elevada es también desventajosa, ya que las partículas pequeñas podrían ser arrastradas hacia la fracción rechazada por turbulencias en la cámara de rechazo cuando se rechazan las partículas más grandes.

2.2.2. Presentación del material

La función principal de este subproceso es generar un flujo de material constante, predecible y de una velocidad constante, para de esta forma facilitar el análisis y la separación de este.

Para poder realizar la detección, evaluación y eyección de partículas individuales, cada partícula debe presentarse de forma solitaria al sistema de detección. El objetivo es conseguir un flujo de partículas con la mayor cercanía y cobertura posible sin que estas se toquen entre sí. La presentación se logra mediante los sistemas antes mencionados (clasificador tipo tolva y clasificador tipo cinta) estos sistemas mecánicos cuentan con un alimentador vibratorio por el cual pasan las partículas sobre una rampa de aceleración.

2.2.3. Detección

En esta etapa, se detectan las características que se buscan en el material para su posterior separación o clasificación. Existen diferentes sistemas de detección y tecnologías, que están disponibles para la clasificación basada en sensores con aplicación en la industria minera, los cuales se analizan con mayor detalle en otras secciones. Existen tecnologías de reflexión y de transmisión.

Las de reflexión deben pasar por una etapa previa en la cual se condiciona el material para la correcta detección del sensor.

2.2.4. Procesamiento de datos

La información espacial y espectral es recolectada por el sistema de detección y luego analizada para generar una respuesta del tipo si/no, es decir si se activa el mecanismo de eyección o no. Los datos adquiridos por el sistema de detección se evalúan mediante algoritmos de clasificación previamente definidos. El algoritmo describe parámetros para decidir si las partículas están destinadas a ser rechazadas o aceptadas.

Para derivar la decisión, se pueden evaluar y combinar todos los parámetros de los datos multidimensionales (información espacial e información de propiedades) para introducir patrones y combinaciones de propiedades en algoritmos de clasificación inteligentes y confiables.

2.2.5. Separación

En esta sección se procede a eliminar del proceso de refinamiento del mineral, aquellas rocas que no cumplan con el criterio con el que se definió la identificación.

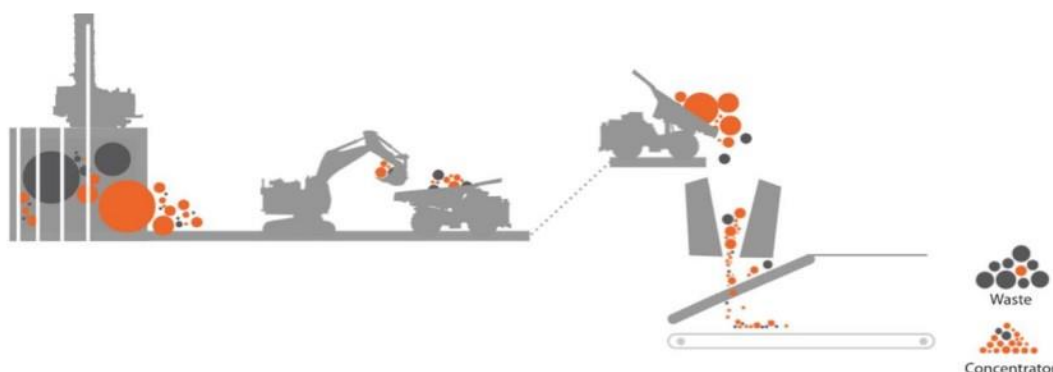
Este subproceso es dependiente del anterior proceso de análisis, y de que se haya hecho correctamente para que la eyección cumpla con el requerimiento principal del seleccionador, es decir que se remueva del flujo el residuo, o roca con poco valor. Actualmente se utilizan eyectores neumáticos, de aire y agua a una alta velocidad. La alimentación se divide en la máquina en una fracción aceptada y rechazada, siendo una de ellas el concentrado y la otra las colas o viceversa.

2.3. PRINCIPALES FLOWSHEET

A continuación, se explicarán las principales metodologías para la clasificación de minerales según su ubicación en el diagrama de flujo

2.3.1. Preconcentración de mineral ROM

Corresponde a la clasificación de minerales en la etapa de pre-chancado, es decir, el mineral ROM el cual tiene un tamaño de partícula de aproximadamente 40 pulgadas (COCHILCO, 2013), que viene directamente de la etapa de explotación, este mineral ROM puede ser clasificados durante el uso de baldes de pala, camiones, correas transportadoras e incluso ser instalados en las perforadoras, separando el mineral de poco valor en el momento. para así tomar la decisión respecto al destino de los materiales, es decir, si el material es estéril, mineral o stock, para, de esta forma, maximizar la ley del mineral y minimizar la dureza del material que entrara al chancador primario y así ampliar su uso, reemplazando el mineral de menor beneficio económico por otro con un perfil de mejor calidad (ley, subproducto, dureza, etc.)

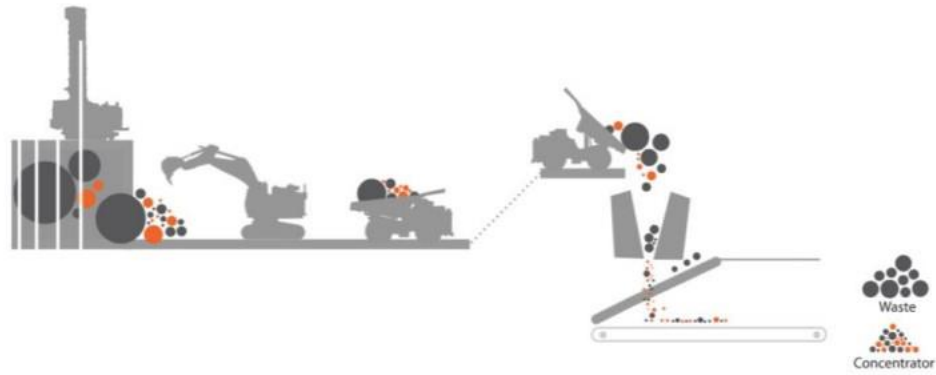


Fuente: Sanhueza, 2021 (modificado de CRC Ore)

Figura 2-3: Clasificación Pre-Chancad

2.3.2. Preconcentración etapa post-chancado

En esta etapa a diferencia de la anterior, la clasificación de minerales se realiza con una partícula que ya ha sido previamente modificada, posterior al chancador primario, donde el mineral ya tiene una fracción granulométrica muy diferente al mineral ROM, entre 8 a 6 pulgadas (COCHILCO, 2013), esto se debe a los requisitos del mineral extraído y a los requisitos de algunas de las tecnología de selección las cuales requieren una distribución de tamaño específica para lograr una buena interacción con la roca y permitir de esta forma la separación de las partículas individualmente.

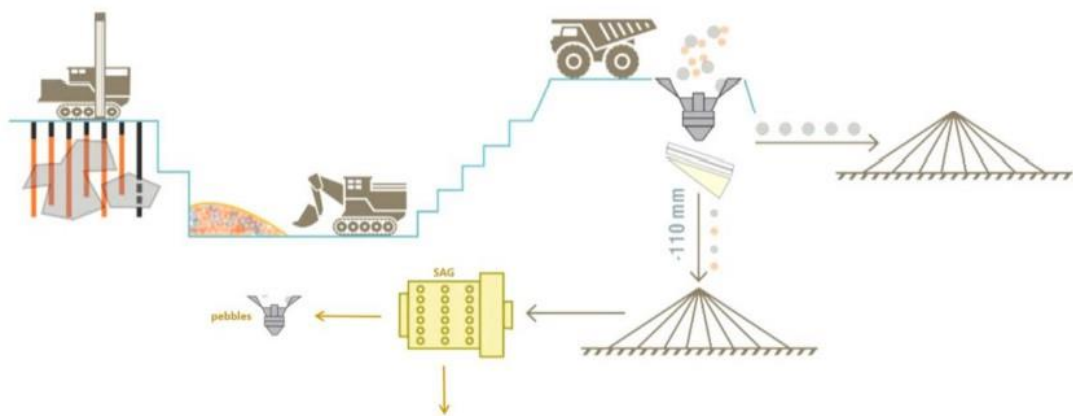


Fuente: Sanhueza, 2021 (modificado de CRC Ore)

Figura 2-4: Clasificación Pos-chancado

2.3.3. Preconcentración etapa post-molino SAG

En esta etapa se clasifica el mineral con una partícula 6000 veces más pequeña que el mineral ROM, posterior a la etapa de molienda, entre 150 a 300 micrómetros (COCHILCO, 2013), al obtener este tamaño de partícula se genera los denominados “pebbles” los cuales se debe de estudiar su valor económico ya que generalmente son desechados debido a que existe la hipótesis de que estos podrían no tener valor económico y son fragmentos de baja ley.



Fuente: Sanhueza, 2021 (modificado de CRC Ore)

Figura 2-5: Clasificación Pos Molienda

2.4. TIPOS DE SENSORES

Actualmente existe casi una docena de sensores de detección, su aplicabilidad dependerá completamente de la mineralogía y propiedades del mineral a pre concentrar, dentro de los más importantes para la industria de metales contamos con los detectores de rayos X y sensores ópticos a continuación se mostrará una tabla de resumen una gran variedad de sensores, se explicarán a detalle algunos de los sensores más utilizados en la minería.

Tabla 2-1 Resumen Tipos de sensores de preconcentración

Tipo de detección	Propiedades de separación	Propiedad de detección	Aplicación de minerales
(XRT)	Absorción de rayos X (Densidad atómica)	Penetrante	Metales básicos/preciosos como carbón, diamante
(XRF)	Emisión de rayos x secundarios (Fluorescentes)	Superficie	Metales comunes/preciosos
(XRL)	Luminiscencia de rayos X	Superficie	diamantes
Radiométrico	Radiación gamma natural	Penetrante	Uranio, Metales preciosos
Visual/Óptica/Color	Reflexión, absorción y transmisión	Superficie	Metales, Piedras preciosas
infrarrojo cercano (NIR)	Espectrometría, Reflexión, Absorción	Superficie	Metales comunes
Infrarrojo térmico (TIR)	Conductividad térmica, Disipación de calor	Superficie	Metales comunes, Metales preciosos
Fotométrico (PM)	Reflexión, Absorción monocromática	Superficie	Minerales industriales, Piedras preciosas
Electromagnético	Conductividad, Permeabilidad	Penetrante	níquel, cobre y oro
Triangulación láser	Emite un rayo láser sobre la superficie. Este punto es reflejado so un detector.	Superficie	Metales comunes, Metales preciosos, Metales ferrosos
PGNAA	Análisis instantáneo de activación de neutrones de rayos gamma	Penetrante	Metales ferrosos
PFTNA	Activación de neutrones rápidos y térmicos pulsados	Penetrante	Ni, Fe, Co, Mg, Si, Al, Mn, Cr
(LIBS)	Espectrometría atómica mediante pulso laser de alta energía	Superficie	Minerales industriales
Resonancia Magnética	Emisión de pulsos de onda de radio cortos	Penetrante	Minerales de Cu, Ni, minerales sulfuros

Fuente: Elaboración propia

2.4.1. Rayos X

Dentro de esta tecnología existen diferentes tipos de clasificadores de Rayos X:

2.4.1.1. XRT- Transmisión de Rayos X

La detección de rayos X (XRT) es uno de los sistemas de clasificación más popular en la actualidad, debido a que este sistema es más universal, sirve para varios tipos de materias primas minerales, principalmente se utilizaba para metales como carbón, tungsteno y oro, actualmente su aplicación funciona para estaño, cobre, hierro, cromita, diamantes, etc.

Esta tecnología permite la identificación y separación de mineral por medio del principio de la diferenciación de absorción de rayos X, en otras palabras, mediante la absorción de la energía es que se diferencia el mineral, por lo que esta propiedad depende principalmente de la densidad atómica específica del mineral.

Una de las principales ventajas de este sistema de detección es que los rayos X penetran toda la partícula de mineral por lo que permite mirar dentro de las rocas, sumar el peso del material valioso y decidir si una roca en particular debe ser aceptada o rechazada.

El sistema genera una imagen de rayos X para cada roca a medida que pasa a través del clasificador y utiliza procesamiento de imágenes digitales de alta velocidad para determinar la cantidad de mineral deseado dentro de cada roca.

El mineral que es más denso atenúa los rayos X que logran pasar al receptor, por lo que aparecen de color más oscuro, mientras que los minerales con un número atómico más pequeño en promedio se observan más claros (Knapp et al., 2014).

Tiene la ventaja de no confiar en la información de la superficie de la roca, a diferencia de los métodos de detección alternativos, que se basan en la fluorescencia óptica superficial o propiedades de reflectancia de la luz para indicar la ley.

Vancouver, Columbia Británica - 29 de marzo de 2019 (Newsfile Corp.) Nicola Mining Inc. (TSXV: NIM) se complace en anunciar los resultados positivos del Estudio de inspección inicial de Outotec, en el que se evaluó el material de las terrazas y zonas altamente mineralizadas en el Proyecto de Cobre New Craigmont de propiedad absoluta ("Proyecto Craigmont"). El trabajo de prueba se llevó a cabo en el Centro de pruebas de Tomra Sorting en Hamburgo, Alemania. Este estudio demostró con éxito que el clasificador COM terciario XRT puede distinguir claramente el mineral del material de desecho.



Fuente: (Nicola Mining Inc., 2019)

Figura 2-6: Muestras de material probado para separación de cobre

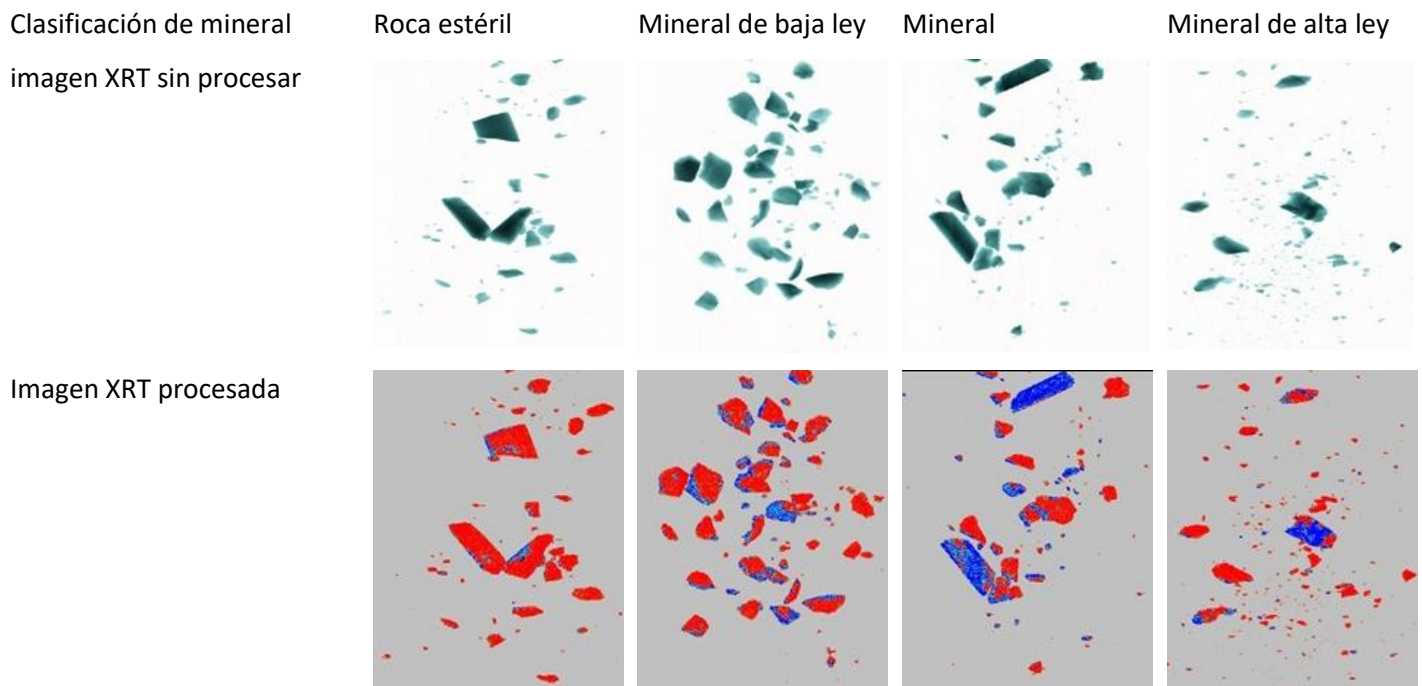


Figura 2-7: Muestras probadas con el sensor de transmisión (“XRT”).

Fuente: (Nicola Mining Inc., 2019)

2.4.1.2. XRF- Fluorescencia de Rayos X

La fluorescencia de rayos X es un método de análisis elemental independientemente de la humedad, el color y la contaminación de la superficie y ofrece muchas posibilidades de aplicación en el campo de la clasificación de materiales valiosos, es una técnica analítica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras, incluidos sólidos, líquidos, lodos y polvos sueltos.

Esta tecnología se basa en el análisis espectral de rayos x secundarios emitido desde la superficie de las muestras debido a la irradiación por rayos x. Esto se debe a la excitación de los átomos del material causado por la radiación de rayos X de alta energía la cual genera que los átomos se ionicen, y así los electrones de capas internas se desprenden. Luego los electrones, al volver a su estado inicial, emiten lo que se llama fluorescencia de rayos X. La fluorescencia emitida es característica según la abundancia de algún elemento en específico, por lo que se puede utilizar para la cuantificación de la composición química del material. A diferencia de los rayos X esta tecnología solo detecta las características en las superficies de las partículas.

2.4.1.3. XRL- Luminiscencia de Rayos X

La primera y más extensa tecnología de clasificación basada en sensores para minerales es la concentración de diamantes, utilizando clasificadores basados en luminiscencia de rayos X (XRL), Las máquinas XRL se han aplicado sistemáticamente desde la década de 1960, la clasificación de diamantes de hoy en día se logra mediante la aplicación de técnicas de luminiscencia de rayos X y transmisión de rayos X (XRT).

La clasificación con XRL está limitada al rango de clases de 1,25 mm a 32 mm debido a la auto absorción asociada con diámetros más grandes, superiores a 32 mm. El modelo analítico policromático XRL se basa en la señal luminiscente EXAFS (Estructura fina de absorción de rayos X extendida).

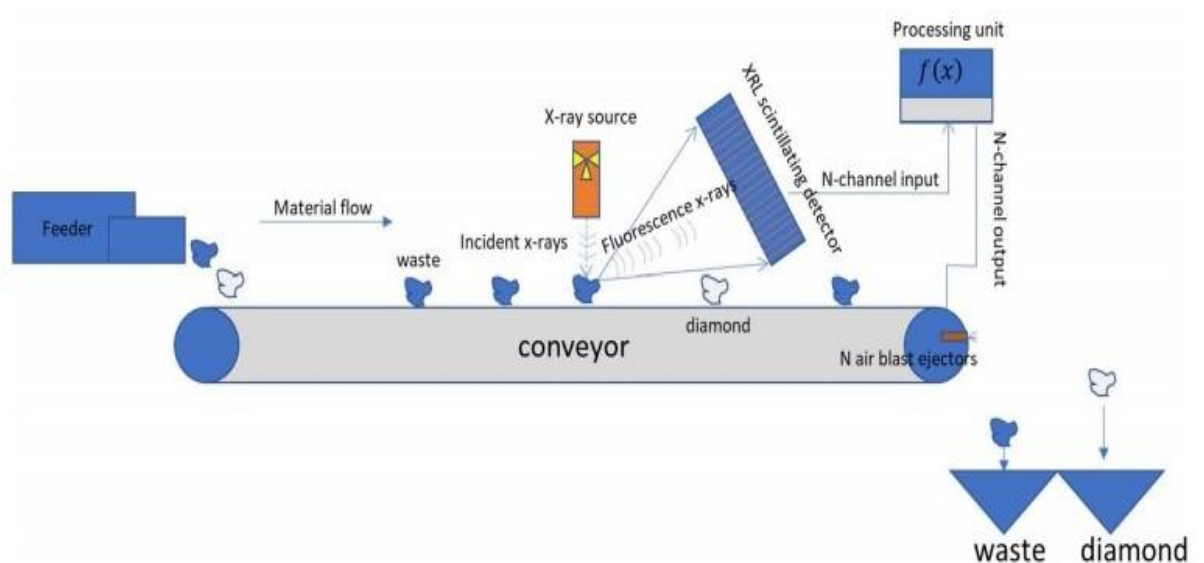


Figura 2-8: Aplicación de luminiscencia de rayos X

2.4.2. Radiométricos

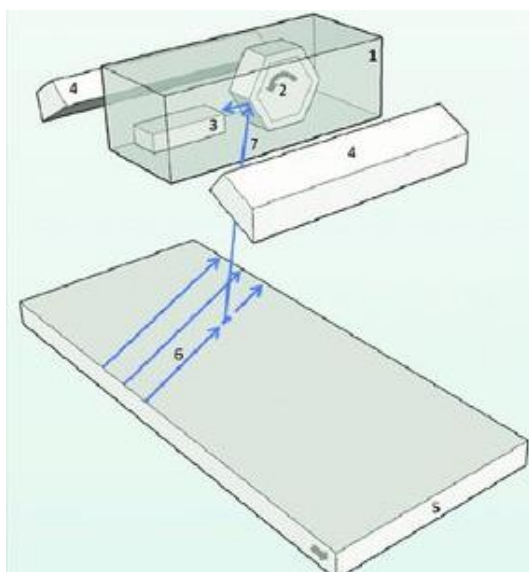
Esta detección se basa en la medición de la radiación natural emitida de los minerales, debido a que cada partícula tiene una radiación diferente. Es mayormente utilizada para la clasificación de uranio debido a que las primeras aplicaciones de la clasificación radiométrica de minerales fueron aplicadas en roca estéril de este. El principio de esta tecnología se basa la medición de fotones emitidos del material irradiado al someterlo a una radiación altamente energética. Los fotones se emiten y se dirigen a un cátodo sensible a la luz del tubo fotomultiplicador que después genera la liberación de electrones de un cátodo, las partículas individuales son detectadas por *centelladores* que están montados bajo la banda transportadora.

2.4.3. NIR- Espectroscopia de infrarrojo cercano

Esta tecnología de detección de infrarrojo cercano se basa en la absorción de la radiación aplicada al material y posterior detección, análisis e interpretación de la radiación reflejada en la región NIR a longitudes de onda entre 800 y 2700 nm. Consiste en medir la reflectancia de las áreas de la superficie de las partículas iluminadas con luz NIR e interpretar esta información en términos de información mineralógica (Iyakwari, 2017). La intensidad de la reflectancia espectral y por tanto las características específicas de absorción dependerán de la composición mineralógica de la partícula.

Es posible derivar las propiedades físicas y químicas de los materiales a un nivel muy detallado (Clark, 1999). El principio de detección de superficies requiere superficies de partículas limpias y la implementación de un clasificador de tipo tolva para el reconocimiento de doble cara para minimizar los efectos de sombras. (Robben & Wotruba, 2019). La clasificación basada en NIR se evaluó sistemáticamente por primera vez para determinar su aplicabilidad en la minería en 2008.

Una aplicación exitosa resultó ser la concentración de mineral de kimberlita, en 2016 se publicó un estudio sobre el trabajo de prueba de rendimiento y la operación piloto, dicho trabajo también ha dado lugar a la instalación de clasificación basada en NIR para la concentración de kimberlita en la mina Renard en Canadá. “La solución Tomra que utilizamos nos ofrece una forma muy económica, eficiente y fiable de recuperar diamantes ásperos sin generar ineficiencias ni provocar daños en ellos”. “Es una forma estupenda de extraer esos diamantes de la kimberlita en las fases iniciales del proceso. Reducimos los costes energéticos y el desgaste del material. Aún seguimos optimizando la unidad y creemos que lograremos aún más ventajas en el proceso de recuperación de diamantes”. (Halle, 2019).



1. Sistema de sensor NIR
2. Pol giratorio-espejo
3. Detector
4. Fuente de luz NIR
5. Cinta transportadora
6. Ruta del punto de detección
7. Haz de luz reflejada.

Fuente: Knapp, Robben, Wotruba, 2012.

Figura 2-9: Sensor NIR

2.4.4. Resonancia magnética

El sistema de detección por resonancia magnética (RM) consiste en la emisión de pulsos de onda de radio cortos que penetran la muestra móvil de mineral y se mide la respuesta. La señal de radio se sintoniza específicamente a la frecuencia de resonancia característica única del mineral objetivo. La señal de respuesta recibida es directamente proporcional al número de átomos metálicos medidos en la fase mineral sintonizada. (por ejemplo, cobre como calcopirita). Este número de átomos de metal se calcula como un peso y se correlaciona con la lectura de un medidor de peso para producir mediciones de ley en tiempo real (NextOre, 2020).

Una de las principales ventajas es el alcance de la profundidad de penetración del campo de alta frecuencia para una gran cantidad de materias primas y minerales como calcocita, tenantita, hematita, tenorita, covellita, enargita, cuprita, arsenopirita, calcopirita, magnetita, etc. Otra ventaja es que la partícula no depende del estado de su superficie ni del contenido de humedad. La tecnología de RM fue desarrollada por CSIRO, accionista y socio de investigación y desarrollo de NextOre. La tecnología se aplicó por primera vez a la detección de minerales en las instalaciones de CSIRO en Nueva Gales del Sur, Australia, a principios de los años 2000. El primer analizador de banda de RM a escala real fue instalado en una operación minera subterránea de cobre y oro en Australia en el 2013.

2.4.5. Fotométrico (PM)

Tienen como principio de funcionamiento la diferencia de luz reflejada que pueden tener los componentes de una roca, este sensor de detección reconoce color, brillo y tono como diferencias del material. Equipos instalados en Black Pine Mining Co. Montana (EE. UU) ocuparon esta tecnología para la separación de sulfuros como pirita, calcopirita, galena, argentita, etc. con contenidos de plata y cobre de la ganga cuarcífera. En Yerakini (Grecia) utilizaron esta tecnología para separar magnésita de ganga (serpentina y dunita) y en Mount Carbide (Australia) para separar wolframita y scheelita en vetas de cuarzo.

2.4.6. Electromagnético

Electromagnético (EM) El sensor electromagnético promueve la diferenciación de los materiales analizados en base a características electromagnéticas por medio de la conductividad y permeabilidad electromagnéticas, utilizan la interacción entre metales y campos magnéticos como un criterio. Estos consisten en dos elementos principales, una bobina transmisora y una receptora. La bobina transmisora emite un campo electromagnético alterno que interactúa con el metal.

Esta interacción es medida por la bobina receptora, la cual emite una señal que luego es procesada para la separación del material (Mesina, De Jong, & Dalmijn, 2003).

Este sensor se aplica comúnmente en la industria del reciclaje, sin embargo, existen aplicaciones en minerales conductores como níquel, cobre y oro.

Hay equipo para clasificación que utiliza esta tecnología en la mina de Cobre Rocklands de CuDeco, ubicado en el estado de Queensland, Australia. El equipo es capaz de pre concentrar cobre nativo a un caudal de 200 toneladas por hora, con una recuperación del 85 al 95% del metal alimentado (Cardoso, 2017) En el mundo existen dos grandes empresas que venden estas soluciones a la industria minera, TOMRA y Steinert GmbH.

El principal problema de estas soluciones es que contienen una gran variedad de sensores dentro de los equipos, para poder aplicarlos a variados minerales, lo que encarece el valor de adquisición. El hecho que contengan una gran variedad de sensores es debido a que se deben hacer varias pruebas con los diferentes sensores para obtener el más idóneo para cada mineral y cada yacimiento. Este último aspecto es el más importante, ya que la composición general de las rocas extraídas dependerá directamente de su yacimiento, cambiando completamente las características que se desean analizar.

2.4.7. Sensor PGNAA y PFTNA

Las tecnologías PGNAA (Activación de neutrones gamma rápidos) y PFTNA (Activación de neutrones térmicos rápidos pulsantes). El análisis rápido de activación de neutrones gamma y la activación de neutrones térmicos rápidos pulsados se basan en una reacción subatómica entre un neutrón de baja energía y el núcleo de un átomo. Cuando un neutrón térmico, o más bien de baja energía se acerca lo suficiente o choca con un núcleo de un átomo, se produce una interacción entre el neutrón y el núcleo. La energía del neutrón se transfiere al núcleo y lo eleva temporalmente a un estado de energía excitada. Luego, la energía se libera, casi instantáneamente, en forma de rayo gamma. El rayo gamma emitido tiene una energía distinta asociada con el átomo del que fue liberado. En esencia, el rayo gamma emitido es como una "huella digital" del elemento. Los rayos gamma emitidos se detectan y se genera un espectro de energía que luego se puede analizar para determinar la composición elemental.

Los analizadores en línea que utilizan PGNAA o PFTNA pueden medir con precisión la calidad de los materiales enviados a la planta de procesamiento con anticipación y permitir la toma de decisiones para clasificar materiales de calidad inferior a la derecha y depositarlos a una pila de escombros o de baja ley de mineral.

2.4.8. Color/Óptica

Este sensor de color observa cada partícula de manera similar a un ojo humano o una cámara de esta manera determina que partícula debe ser eliminada o conservada en función de su color, transparencia y brillo, normalmente se utilizan cámaras a color CCD lo que permite separar la partícula sin la necesidad de un fondo no reflectante, esto significa que ahora las partículas pueden ser detectadas mientras viajan en una cinta a una velocidad mucho mayor y son separadas con mayor precisión por lo que si hay una diferencia de color en las rocas de mineral que se desean clasificar, esta tecnología será la mejor opción.

3. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE PRECONCENTRACIÓN DE MINERALES

En el siguiente capítulo se demostrará la viabilidad de la tecnología de preconcentración en inglés conocido como “ore sorting”, utilizando herramientas de análisis financiero se puede mencionar los siguientes puntos.

La inversión para implementar esta tecnología no es menor, las ganancias se ven de acuerdo con el ahorro de consumo energético, agua, costos de transporte, etc. El costo de inversión tiene una relación directa con las capacidades de procesamiento, por lo que es accesible tanto para pequeña minería como también para las grandes empresas de este rubro, debido a que, el costo de inversión tiene relación directa con la cantidad de volumen de material. Esta inversión puede recuperarse según lo visto en diversos casos en un máximo de 1 año dependiendo de las características mineralógicas del material, la reducción de costos aplicando la tecnología de preconcentración no es menor, es una tecnología que ofrece cambios significativamente positivos lo que nos lleva a replantear el modo en que operan los circuitos de procesamiento.

3.1. CLASIFICACIÓN DE MINERALES EN OTROS PAÍSES Y EN CHILE

Se presentan a continuación casos de implementación de esta tecnología de sensores los cuales según información publicada y testimonios tuvieron resultado positivos.

3.1.1. Mina San Rafael, Perú

La mina San Rafael de la compañía Minsur es la principal productora de estaño de Sudamérica, en el año 2016 implementó la tecnología de clasificación de minerales para poder pre concentrar desmontes de baja ley de corte en una planta de 3600 toneladas diarias, se instalaron 4 máquinas en alineación paralela. “Se emplearon sensores de transmisión de rayos X, que identificaron inclusiones de estaño y los separaron con eyectores neumáticos, generando incrementos de ley promedio de 0.6% a 2.76%, con recuperación de 90.4% y reduciendo el producto a 20% en peso. Dicho pre concentrado alimenta a la planta concentradora actual”. “Si lo vemos en términos financieros, con la inversión de US\$ 24 millones, vamos a generar en el 2017, US\$ 57 millones y en el 2018, más o menos US\$ 96 millones. El proyecto se ha pagado en 4 meses porque es altamente rentable. Además, está basado en una desmontera que hemos acumulado en los últimos 20 años de producción. Con la tecnología Ore Sorting logramos subir de 0.9% a 2.4% la ley del mineral, lo cual genera un panorama muy alentador para nuestra industria” (Condori. 2018).



Fuente: 1 Tomra Sorting

Figura 3-1: Planta de clasificación de minerales en la mina San Rafael

3.1.2. Mina Karowe en Botswana, África

La mina Karowe es una de las principales mineras productoras de diamantes de gran tamaño y calidad, Uno de sus hallazgos históricos es el diamante “Lesedi La Rona” de 1.109 quilates, que es el segundo mayor diamante de calidad gema descubierto en el mundo. El diamante, que es el segundo diamante de calidad gema más grande de la historia y el más grande jamás recuperado a través de una instalación de procesamiento moderna, fue recuperado por una máquina de recuperación de diamantes grandes (LDR) de TOMRA que utiliza sensores de transmisión de rayos X que se encargó en Karowe anteriormente (Tomra Sorting, 2015).

“En 2015, y tras menos de 2 semanas de haber implantado el nuevo circuito de recuperación de diamantes grandes, extrajimos esos dos diamantes excepcionalmente grandes. Si bien nos supuso una inversión de entre 30 y 35 millones de dólares, en menos de 15 días obtuvimos un beneficio que doblaba la inversión realizada” (Thomas, 2019)

Seis clasificadoras TOMRA XRT están en funcionamiento en la mina de diamantes de Karowe desde mayo de 2015, cada clasificador puede tratar hasta 150 toneladas. Las ventajas de la tecnología XRT incluyen su tamaño compacto, bajos costos operativos, altas tasas de recuperación y rendimientos de concentrado extremadamente bajos.



Fuente: Tomra Sorting

Figura 3-2: Planta de clasificación de minerales basada en sensores en la mina Karowe

3.1.3. Mina El Soldado Anglo American, Chile

La minera El Soldado perteneciente a la empresa Anglo American está realizando pruebas industriales de bulk ore sorting, tecnología complementaria al ore sorting. Consiste en la separación de partículas a granel, el material es depositado y llevado por medio de paladas a la tecnología de preconcentración la cual caracteriza y separa el material en un tramo de la correa transportadora. Se pensaba obtener un aumento del 5% en la ley de la cabeza, pero de hecho se ha obtenido alrededor del 20%, el grado aumento de 7% a una 20%, implementado en cobre, níquel y PGM. La producción de El Soldado se incrementó en 3 % llegando a 54.200 toneladas (frente a 52.700 toneladas en 2018), lo que se explica por las mayores leyes previstas (0,93% vs. 0,85% de 2018). Los costos unitarios C1 se mantuvieron en general en consonancia con 2018 en 205 c/lb (206 c/lb en 2018), (Minero, 2020). Fueron 12 meses de prueba con resultados positivos, debido se construyeron unidades de prueba en Brasil en Barro Alto (Níquel) y Sudáfrica en Mogalakwena (metales grupo del platino) y se ha previsto ampliarlo a más instalaciones durante los próximos años.



Fuente: (International Mining, 2019)

Figura 3-3: bulk sorting- El Soldado

3.1.4. Mina de cobre en el Suroeste, Estados Unidos

Especialistas del Orchard Material Technology de Estados Unidos y la empresa proveedora de equipos de clasificación automática Steinert de Alemania, realizaron una evaluación económica de la instalación de la tecnología de preconcentración en ingles ore sorting en esta mina de cobre ubicada al suroeste de EE. UU.

La mina estudiada usa dos molinos semi autógenos (SAG) para procesar 1200 toneladas por hora de mineral extraído, cuya descarga es tamizada enviando la fracción de bajo tamaño al molino de bolas y posterior flotación; y el material rechazado por sobre tamaño, es enviado al chancador para ser retroalimentado a los molinos SAG. En este caso, el circuito de material de sobre tamaño (denominado “pebbles”) tiene un flujo de 300 t/h y es un candidato ideal para la clasificación de minerales. En operaciones típicas, el circuito de pebbles reciclado representa el 10-15% de la alimentación al circuito de molinos SAG; sin embargo, en esta mina es una cifra mayor lo que disminuye la producción de la planta. Una motivación importante para investigar la utilización del ore sorting es eliminar problemas de cuellos de botella en la planta. Considerando una inversión para una planta de ore sorting de 300 t/h de US\$ 10 millones, una ley de cobre de los pebbles de 0,45% y un precio del cobre de US\$ 2 la libra, los especialistas antes indicados determinaron que el período de retorno de la inversión es de 19,3 meses para el escenario que considera una tasa de rechazo del 30% de la corriente de pebbles y de sólo 11,3 meses para el escenario de una tasa de rechazo del 60% (SONAMI, 2020).

3.2. INDICADORES DE RENTABILIDAD EN PROYECTOS DE INVERSIÓN

Para medir la rentabilidad de un proyecto lo primero que se debe hacer es una evaluación financiera esta se realiza por los siguientes tres criterios.

3.2.1. VAN

El valor actual neto (VAN) es un indicador financiero que sirve para determinar la viabilidad de un proyecto. Muchas empresas lo emplean cuando desean homogeneizar los flujos de caja netos. El VAN es capaz de reducir hasta una sola unidad los montos de dinero generados o que se aportan con el paso del tiempo.

3.2.2. TIR

Es uno de los indicadores de rentabilidad más utilizados. Se trata de encontrar una sola tasa o rendimiento del proyecto. Una inversión tiene que ser tomada en cuenta si la TIR excede el rendimiento requerido. En caso contrario, tiene que ser rechazada.

La TIR es el rendimiento requerido para que el cálculo del Valor Presente Neto con esa tasa sea igual a cero. Se puede decir que la Tasa Interna de Retorno es el porcentaje de beneficio o pérdida que conllevará cualquier inversión. Es una medida ampliamente utilizada para la evaluación de los proyectos de inversión.

3.2.3. Payback

El Payback o plazo de recuperación es un criterio para evaluar inversiones que se define como el periodo de tiempo requerido para recuperar el capital inicial de una inversión.

3.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA SOBRE ORE SORTING

Evaluación económica de alternativas para la explotación y tratamiento de mineral marginal mediante “ore sorting” Alpacay, Minera Yanaquihua S.A.C., Arequipa-Perú (Gallegos, 2017).

3.3.1. CAPEX

A continuación, se detalla los principales criterios considerados para la elaboración del

- El porcentaje de contingencia es de 30% que considera principalmente algunas partidas o componente que no hayan sido considerados en esta etapa de ingeniería.

El nivel de precisión del CAPEX es de +/-35% y considera la siguiente:

- +/-20% de precisión en los metrados debido a nivel de ingeniería desarrollado.
- +/-10% de precisión por disponibilidad de materiales como son la explotación de canteras y otros aspectos mecánicos no considerados especialmente en la planta de procesos.
- +/-5% de precisión por variación de los precios unitarios.

Tabla 3-1: Calculo CAPEX

Descripción	Monto \$
Equipamiento	700.000
Instalaciones Mecánicas	290.839
Montaje	66.853
Costo directo construcción	1.057.692
Gastos generales, 20% CD	211.538
Utilidad, 10% CD	105.769
Costo construcción	1.375.000
Contingencia, 15% C	275.000
CAPEX, C + CO	1650.000

Fuente: Gallegos, 2017

3.3.2. Flujo de caja

Tabla 3-2 Flujo de caja

Años	2018	2019	2020
Ventas	50.292.527	50.292.527	50.292.527
Costo de Mina	-5.509.630	-5.509.630	-2.754.815
Costo de Acopio	-20.393.454	-20.393.454	-10.196.727
Costo de Ore Sorting	-454.680	-454.680	-227.340
Costo de tratamiento	-8,661,456	-8,661,456	-4,330,728
Costo G&A	-2,043,306	-2,043,306	-1,021,653
Margen bruto	13,230,003	13,230,003	6,615,001

Gastos administrativos Lima		-1.856.422	-1,856,422	-928,211
Gastos de Venta		-543,159	-543,159	-271,580
EBITDA		10,830,421	10,830,421	5,415,211
Tasa de Gravamen Minero				
Gravamen Minero especial				
Depreciación		-880,202	-880,202	-440,101
EBIT		9,950,219	9,950,219	4,975,109
Impuesto a la Renta		-2,786,061	-2,786,061	-1,393,031
Participación a trabajadores		-796,018	-796,018	-398,009
Depreciación		880,202	880,202	440,101
NOPAT		7,248,342	7,248,342	3,624,171
Inversiones de sostenimiento		-500,000	-500,000	-250,000
Inversión Ore Sorting	-1,650,000			
FCF	-1,650,000	6,748,342	6,748,342	3,374,171
Análisis del Valor del Proyecto				
FCF 1	-1,650,000	6,748,342	6,748,342	3,374,171
FCF 2		3,912,797	3,912,797	1,956,399
Diferencial	-1,650,000	2,835,545	2,835,545	1,417,773

Fuente: Gallegos, 2017

En este escenario se evalúa el flujo de efectivo de la empresa considerándose el tratamiento de las desmonteras al ser pre concentradas con clasificación basada en sensores.

Los variables más sensibles en este caso son la reducción de peso y la recuperación de finos. El indicador que modela estas dos variables es el factor de enriquecimiento de la ley. Es importante tener en cuenta que el flujo que resulta de esta evaluación deberá ser restado del flujo del caso base para calcular el flujo de efectivo adicional que generará este proyecto.

3.3.3. VAN

Se han calculado el VAN para el escenario 1, que es cuando la empresa incluye en sus operaciones tratar las 500,000 toneladas de desmonte pre concentrándolas con la tecnología de ore sorting.

El cálculo del VAN se realiza sobre el flujo de caja diferencial y su valor es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 VAN &= -1,650,000 + \frac{2,835,545}{(1 + 0.1191)} + \frac{2,835,545}{(1 + 0.1191)^2} + \frac{1,417,773}{(1 + 0.1191)^3} \\
 &= 5,128,169
 \end{aligned}$$

El VAN del proyecto es de 5.13 millones de dólares.

3.3.4. TIR

Para cada escenario se ha formulado matemáticamente y despejado mediante interpolación.

$$0 = -1,650,000 + \frac{2,835,545}{(1 + TIR)} + \frac{2,835,545}{(1 + TIR)^2} + \frac{1,417,773}{(1 + TIR)^3}$$

Ahora, se va a trabajar con interpolaciones para calcular el TIR a un Van 0.

Tabla 3-3: Interpolación para VAN = 0

160%	-59.281
TIR	0
150%	28.643

Fuente: Gallegos, 2017

Con lo cual se tiene una regla de tres simple donde la variable incógnita es el TIR:

$$\frac{TIR - 150\%}{160\% - 150\%} = \frac{0 - 28.643}{-59.281 - 28.643}$$

$$TIR = 150\% + \frac{10\% \cdot 28.643}{87.924}$$

$$TIR = 153,15\%$$

El TIR dio un valor total de 153.15% superior a 11.91% que fue el costo de oportunidad calculado, mostrando así su viabilidad económica.

3.3.5. Payback

Se calculó el total de inversión del proyecto del ore sorting que asciende a 1.65 millones de dólares, tiene un periodo de retorno de la inversión de 0.58 años.

3.4. PROVEEDORES

A continuación, se mencionarán los principales proveedores de la tecnología de preconcentración.

3.4.1. Steinert GmbH

Steinert es uno de los líderes mundiales en el suministro de tecnologías de separación, proporciona tecnologías de clasificación para las industrias de reciclaje y minería utilizando una variedad de sensores, como sensores ópticos de rayos X, inductivos, NIR y de color y una cámara láser 3D, que se pueden combinar para clasificar una variedad de materiales. Cuenta con un sistema de posventa preparado para satisfacer las necesidades más variadas de nuestros clientes, como pueden ser la puesta en marcha, asistencia técnica, visitas en campo para evaluación de equipos, operación asistida, revisión de equipos y suministro de piezas de repuesto. En la actualidad, cuentan además con un centro de pruebas propio para la realización de ensayos, agilizando en gran medida el proceso y permitiendo dar una respuesta rápida a las necesidades del cliente.

3.4.2. TOMRA Sorting Solutions Mining

Compañía dedicada a diseñar y desarrollar soluciones tecnológicas, basada en sensores para los sectores mundiales de tratamiento de minerales y minería.

Un proveedor de equipos de clasificación basados en sensores con una gran base instalada en las industrias de minería, reciclaje y alimentos. Los equipos y servicios de clasificación basados en sensores de Tomra para el segmento de metales preciosos y metales básicos se comercializan a través de un acuerdo de cooperación con Outotec de Finlandia, que reúne la amplia experiencia en trituración, procesamiento y aplicación de Outotec junto con la tecnología y aplicación de clasificación de minerales basada en sensores de Tomra.

3.4.3. ABH Engineering

El equipo técnico de ABH ofrece resultados exitosos en la clasificación de minerales además de ofrecer estudios de alcance y viabilidad, revisiones de aplicabilidad de tecnología, modelado de impacto económico.

4. CONCLUSIONES

El aumento de los costos de energía, la caída de las leyes de la cabeza de los yacimientos y la reducción de los márgenes de ganancia en los productos de valor agregado han dificultado la operación minera. La preconcentración de minerales es una clase de tecnologías que ofrece posibles soluciones a estos problemas al identificar los valores de los metales en una corriente de extracción y separar las piedras que contienen mineralización valiosa de las piedras estériles.

Hay muchos beneficios, que incluyen: reducción del consumo de energía y agua (por tonelada de metal producida); expansión de recursos al reducir la ley de corte y potencialmente aumentar la vida útil de la mina; aumento en la producción total de metal, reduce gastos de capital, costos de transporte, reduce el almacenamiento de desechos y los riesgos relacionados.

Debido a su capacidad incomparable para aumentar el VAN y el PAYBACK del proyecto, la clasificación de minerales es actualmente la tecnología líder para agregar valor al diagrama de flujo de procesamiento. Al disminuir la cantidad de material de desecho que se procesa, la clasificación de minerales puede reducir tanto el OPEX como el CAPEX, aumentar sus ingresos y recursos extraíbles e incluso reducir la ley de corte de la mina. La clasificación ofrece la oportunidad de mejorar el VAN del proyecto al aumentar la cantidad de metal valioso procesado con el tiempo. Este enfoque hace que el efectivo avance, aumentando significativamente la viabilidad de la operación.

La preconcentración puede tener una exitosa aplicación en Chile, existe una gran oportunidad para la minería del cobre y también para otros minerales, actualmente las compañías que se encuentran en el desarrollo de estas máquinas están enfocadas únicamente a aumentar las capacidades de procesamiento, debido a que la aplicación de los sensores de detección ha tenido un éxito implacable para la preconcentración.

BIBLIOGRAFÍA

Albor Polo C, Berrios Argel P, Carrascal Minorta D, Navarro Herrera J, Peña Flores J, Prieto Gutiérrez A, (2019, 31 de Agosto) “Eficiencia energética en la producción de Ferróniquel” [Tesis] Para optar al título Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.

Arcoya, E. (2021, 26 agosto). VAN y TIR. Economía Finanzas. <https://www.economiafinanzas.com/que-son-van-tir/>

Bulk ore sorting and coarse particle recovery – leading the way in mineral processing innovation. (s/f). Angloamerican.com. Recuperado el 21 de junio de 2021, de <<https://www.angloamerican.com/futuresmart/stories/our-industry/mining-explained/bulk-ore-sorting-and-coarse-particle-recovery-leading-the-way-in-mineral-processing-innovation>>

Burdaga, S. (2018, 5 octubre). Fragmentación y tronadura: Optimización energética de operaciones mineras. latinomineria.cl. <<http://www.latinomineria.cl/reportajes/fragmentacion-tronadura-optimizacion-energetica-operaciones-mineras/#>>

Carcausto Edwin, M (2019). “Optimización de CAPEX – OPEX en la explotación de desmontes de mineral de Estaño de baja ley mediante Ore Sorting en la unidad minera San Rafael- Minsur S.A.”. Para optar al título universitario Ingeniero en Minas. Universidad nacional del altiplano de Puno, Perú. <http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/14293/Carcausto_Mamani_Edw_in.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cestari, A. (2020, 12 Mayo). Bulk Ore Sorting in Base and Precious Metals. Advancing Mining. Thermofisher. <<https://www.thermofisher.com/blog/mining/bulk-ore-sorting-in-base-and-precious-metals/>>

Cifras actualizadas de la Minería. (s. f.). Consejo Minero. Recuperado 27 de Agosto de 2021, de <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/cifras-actualizadas-de-la-mineria/>

COCHILCO. (2013, 16 marzo). *Procesamiento*. Slideshare. Recuperado 12 de octubre de 2021, de https://es.slideshare.net/roque_21/procesamiento-17268990

Condori, P. (2018, 15 febrero). Experiencia del Ore Sorting en San Rafael (Sn) y estudios con minerales de cobre y polimetálicos. iimp. <https://iimp.org.pe/noticias/experiencia-del-ore-sorting-en-san-rafael-sn-y-estudios-con-minerales-de-cobre-y-polimetalicos>

Gallegos Gutiérrez A, (2017) “Evaluación económica de alternativas para la explotación y tratamiento de mineral marginal mediante “Ore Sorting” y lixiviación en pilas en U.P. Alcapay, Minera Yanaquihua S.A.C., Arequipa-Peru,2017” [Tesis] Para optar al Título Ingeniero En minas, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.

H. Knapp, M. Robben, H. Wotruba. (Septiembre de 2012). Near-infrared Sorting for Minerals. 26 mayo, de researchgate.net Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/268122669_Applicability_of_near_Infrared_Sorting_in_the_Minerals_Industry#fullTextFileContent

International Mining. (2019, 26 marzo). Anglo bulk copper ore sorting moving ahead at El Soldado with demo facility. Recuperado 23 de octubre de 2021, de <https://im-mining.com/2019/03/04/anglo-bulk-copper-ore-sorting-moving-ahead-el-soldado-demo-facility/>

Knapp, H. Neubert K. Schropp C. Wotruba H, (2014, 13 Mayo). Viable Applications of Sensor-Based Sorting for the Processing of Mineral Resources. Academia.edu<https://www.academia.edu/17851454/Viable_Applications_of_Sensor-Based_Sorting_for_the_Processing_of_Mineral_Resources>

L, von Ketelhodt, C. Bergmann. (2010, Julio). “The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy”. Disponible en <<http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v110n7/07.pdf>>

Mallqui José R. (2017, Septiembre 14), Scribd. <<https://es.scribd.com/presentation/358936793/Tecnologia-Ore-Sorting-pptx>>

Mesina, M. B., de Jong, T. P. R., & Dalmijn, W. L. (2003, 27 enero). Improvements in Separation of Non-Ferrous Scrap Metals Using an Electromagnetic Sensor. Hindawi. <https://www.hindawi.com/journals/psse/2003/180856/>

Minero, P. (2020, 24 febrero). Producción de cobre de Anglo American alcanza las 638.000 toneladas en 2019. Portal Minero. Recuperado 4 de septiembre de 2021, de

<https://www.portalminero.com/wp/produccion-de-cobre-de-anglo-american-alcanza-las-638-000-toneladas-en-2019/>

Mining—Past, Present and Future, Universidad RWTH de Aquisgrán, Lochnerstrasse. Aquisgrán, Alemania. <<https://www.mdpi.com/2075-163X/9/9/523/htm#B79-minerals-09-00523>>

Mza, G. C. (2018, 13 Octubre). Ore Sorting. Scribd. <<https://es.scribd.com/presentation/390765761/Ore-Sorting>>

Nicola Mining Inc. (2019, 29 Marzo). Nicola Mining Announces Positive Results on Copper X-Ray Sorting as a First Step to Copper Ore Upgrading. Newsfile. <<https://www.newsfilecorp.com/release/43749/Nicola-Mining-Announces-Positive-Results-on-Copper-XRay-Sorting-as-a-First-Step-to-Copper-Ore-Upgrading>>

Ore Sorting Automation for Copper Mining with Advanced XRF Technology: From Theory to Case Study. (2020, 5-7 Agosto), Automining, Chile. <https://nicolaides.cl/wp-content/uploads/2021/02/ATM20_Nicolaides_OreSorting-XRF.pdf>

Ore Sorting de minerales y metales preciosos, (2020). Thermofisher, Disponible en: <<https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CAD/Application-Notes/ore-sorting-app-note-es.pdf>>

Ore sorting the road to optimizing your operation. (2017, 16 de octubre). Metso Outotec. Recuperado 08 de mayo de 2021, de <<https://www.mogroup.com/insights/blog/mining-and-metals/ore-sorting-the-road-to-optimizing-your-operation/>>

Panorama económico de la minería, (2013 – 2014), Consejo Minero. <<https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/01/Panorama-Economico-2013.pdf>>

Preetham Nayak, (2021, 09 de Junio), Como aumentar el valor del proyecto con ore sorting. Redacción ProActivo. Disponible en: <<https://proactivo.com.pe/como-aumentar-el-valor-del-proyecto-con-ore-sorting/>>

Robben, C., & Wotruba, H. (2019). Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining—Past, Present and Future. Minerals, 9(9), 523. <https://doi.org/10.3390/min9090523>

Sanhueza, A. R. (2021), Evaluación económica de técnicas de selectividad de mineral (ore sorting) para su aplicación en Collahuasi, Tesis para optar al grado de magister en gestión y dirección de empresas, Universidad de Chile, Repositorio Académico de la Universidad de Chile <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181626?show=full>

STEINERT GmbH. (s. f.). Optimice con eficiencia el tratamiento de minerales en minería

- STEINERT. Recuperado 27 de septiembre de 2021, de <https://steinertglobal.com/es/mineria/separacion-preliminar-de-mineral-bruto/>

Tecnología de Transporte de Minerales. (2021, 14 Enero). Clasificación Selectiva Automatizada de Minerales (Ore Sorting). SONAMI: Sociedad Nacional de Minería, Chile. <<https://www.sonami.cl/v2/clasificacion-selectiva-automatizada-de-minerales-ore-sorting/>>

Thalgott, B. (2021, 20 Mayo). Let's Get Sorted in Here: SRC uses Science to Maximize Sorting Efficiency Saskatchewan Research Council. SRC. <<https://www.src.sk.ca/blog/lets-get-sorted-here-src-uses-science-maximize-sorting-efficiency>>

Tomra Sorting Solutions. (2012, 17 Mayo). TOMRA SORTING SOLUTIONS - PDF Free Download. DOC PLAYER. <<https://docplayer.net/39428567-Tomra-sorting-solutions.html>>

Tomra Sorting. (2015, 1 Diciembre). Large Diamond Recovery. Tomra. <https://www.tomra.com/en/sorting/mining/case-studies/lucara-diamonds>

Tomra Sorting. (s. f.). San Rafael Tin Mine. Tomra. Recuperado 13 de mayo de 2021, de <<https://www.tomra.com/en/sorting/mining/case-studies/san-rafael>>

Tusa L, Kern M, Leibner T, Van Den Boogaart K, Gutzmer J. (2019, 10 octubre). Optimal sensor selection for sensor-based sorting based on automated mineralogy data. ScienceDirect. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619322243>>

Valery. W, K. Duffy (2017, Agosto). Preconcentración: cómo y por qué. HATCH. <<https://www.hatch.com/es-CL/About-Us/Publications/Technical-Papers/2017/07/Why-preconcentrate-and-how>>

Villarino, J. (2012, 28 junio). EyN: Grandes mineras advierten caída de casi 50% en leyes de mineral de cobre en 20 años. Recuperado 7 de octubre de 2021, de <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=97921>