

GUÍA PARA EL DESARROLLO POR ETAPAS DE PROYECTOS CON ORO MEDIANTE LA CONCENTRADORA JAMESON Y EL ALBION PROCESS™

Por

Paul Bullock, Rebecca McKechnie, Kelvin Roche, Glenn Stieper y Stanko Nikolic

Glencore Technology

Presentador y autor correspondiente

Paul Bullock

paul.bullock1@glencore.com.au

RESUMEN

Extender la vida útil de una mina de oro mermada puede ser tan simple como tratar y recuperar el oro de las gangas y depósitos de sulfuro colindantes. Sin embargo, el oro por lo general está finamente diseminado en sulfuros de hierro en la matriz mineral, lo que vuelve inefectiva la disolución por medio de cianuración directa. Procesar estos minerales refractarios rinde una pobre recuperación de oro, por lo tanto, se requiere un pre tratamiento para concentrar y oxidar estos minerales de sulfuro de hierro antes de la cianuración. Esto incluye la flotación para concentrar la parte con mineral de sulfuros, seguida de una oxidación de sulfuros y la disolución y recuperación del oro. Glencore Technology trabaja de cerca con organizaciones para el desarrollo de recursos con el fin de evaluar la implementación de un plan por etapas con tecnologías para el tratamiento de sus reservas de mineral de sulfuros. Esta relación comienza temprano con la recolección de datos de laboratorio para respaldar el diseño e instalación de una concentradora Jameson, seguida por una trituración ultrafina con la IsaMill™ y, por último, la construcción de una planta Albion Process™ que use nuestros Reactores OxiLeach™ (OLR). El Albion Process™ combina la trituración ultrafina y la lixiviación oxidativa a presión atmosférica, un proceso probado para la oxidación de mineral de sulfuros. La implementación por etapas de la planta permite un calendario de entregas y un diseño de equipo extraordinarios que agilizan el camino para consolidar ganancias. Esto se logra al buscar una producción de concentrado de flotación de grado comercializable en la primera etapa de operación de la planta, con la producción de mineral en el sitio que suceda después de poner en marcha las etapas de la planta subsecuentes. La oxidación de sulfuros en el sitio permite el procesamiento de una cantidad mayor de concentrado de recuperación de grado inferior sin los costos de transporte y los cargos asociados con los términos de explotación de concentrados. El diseño y entrega de estas etapas aguas abajo puede ocurrir al mismo tiempo que la construcción del circuito de flotación de la Jameson Concentrator™. Este planteamiento conlleva grandes riesgos y recompensas. Este documento revisa la aplicación de tecnologías de GT en el contexto de implementación por etapas, incluyendo el cumplimiento de criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG, por sus siglas en inglés) y los impactos en la ejecución del proyecto.

Palabras clave: Gold, Jameson, IsaMill, Albion, Prueba, Implementación por etapas, Producción

1. Introducción

Al tiempo que los minerales de óxido de oro fácilmente recuperables disminuyen, las operaciones buscan cada vez más extender la vida útil de las minas al tratar y recuperar el oro alojado en gangas y depósitos cercanos de sulfuros. En estos cuerpos de minerales, el oro por lo general está finamente diseminado en la matriz de sulfuros, haciéndolo inadecuado para la cianuración directa debido a la baja recuperación de oro. Para dichos proyectos, la cuestión es cómo tratar mejor los minerales de sulfuro, una decisión que se ve influida por múltiples factores, incluyendo las oportunidades de extracción, la legislación y la infraestructura existente. Mientras muchos sitios han elegido generar un concentrado comercializable, los mayores costos de transporte y las multas asociadas con los términos de comercio de concentrados en los que por lo general se incurre, y que en algunos países hay restricciones para la venta de productos intermedios, dejan a las operaciones sin más opciones que la de generar un producto final.

Generar un producto final a partir de minerales de sulfuros requiere un tratamiento previo para dejar el oro finamente diseminado preparado para la lixiviación con cianuro. Esto incluye una etapa de flotación para generar un concentrado de alto grado, seguido de una oxidación de sulfuros. La implementación por pasos de la planta permite una aplicación progresiva del diseño, instalación y puesta en marcha de estas etapas de producción, lo que resulta en un calendario de entregas escalonadas, generación más temprana del producto y un camino rápido para obtener ganancias. La primera etapa de la operación de la planta busca producir un grado comercializable de concentrado de flotación para proporcionar una fuente de ingresos hasta que se logre la producción de doré en el sitio (producto final) después de que se pongan en marcha etapas subsecuentes de la planta.

Glencore Technology (GT) trabaja estrechamente con organizaciones de desarrollo de recursos para crear soluciones de diagrama de flujo a la medida con el fin de lograr los máximos beneficios ambientales y económicos. GT es propietaria de muchas tecnologías especializadas adecuadas para la implementación por etapas y tiene una gran experiencia para evaluar su capacidad para tratar minerales refractarios únicos. Este documento revisa la aplicación de tecnologías de GT en el contexto de implementación por etapas, incluyendo el cumplimiento de criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG, por sus siglas en inglés) y los impactos en la ejecución del proyecto.

2. Implementación por etapas – del mineral al doré

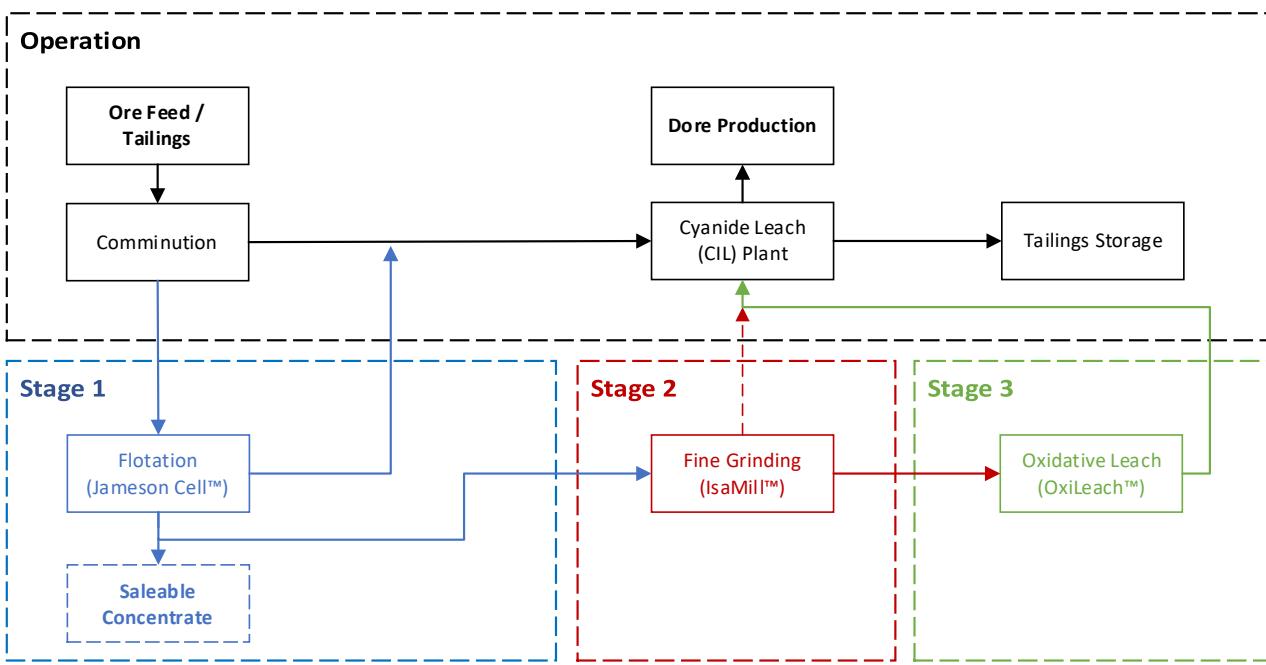


Figura 1: Implementación por etapas mediante tecnologías de GT

El enfoque de GT para el tratamiento de minerales con oro refractario incluye tres etapas (**Error! Reference source not found.**). La primera etapa es la construcción y puesta en marcha de un circuito de flotación para producir un concentrado comercializable. La etapa 2 incluye una trituradora para trituración fina con el fin de lograr una mejor liberación de mineral y aumentar la recuperación. La etapa 3 involucra la construcción y puesta en funcionamiento de una planta de tratamiento oxidativo para mejorar la lixiviación con cianuro aguas abajo. Un enfoque de implementación por etapas permite una generación inicial rápida de ingresos usando tecnología de procesamiento de minerales bien conocida mientras que la planta aguas abajo se prueba, diseña y pone en funcionamiento completamente.

Esta sección describe las tecnologías y procesos de GT y su papel en la implementación por etapas, aprovechando inicialmente un concentrado comercializable para crear capital y construir una planta de lixiviación completa para la producción de doré en el sitio.

2.1 Etapa 1: Flotación y la concentradora Jameson

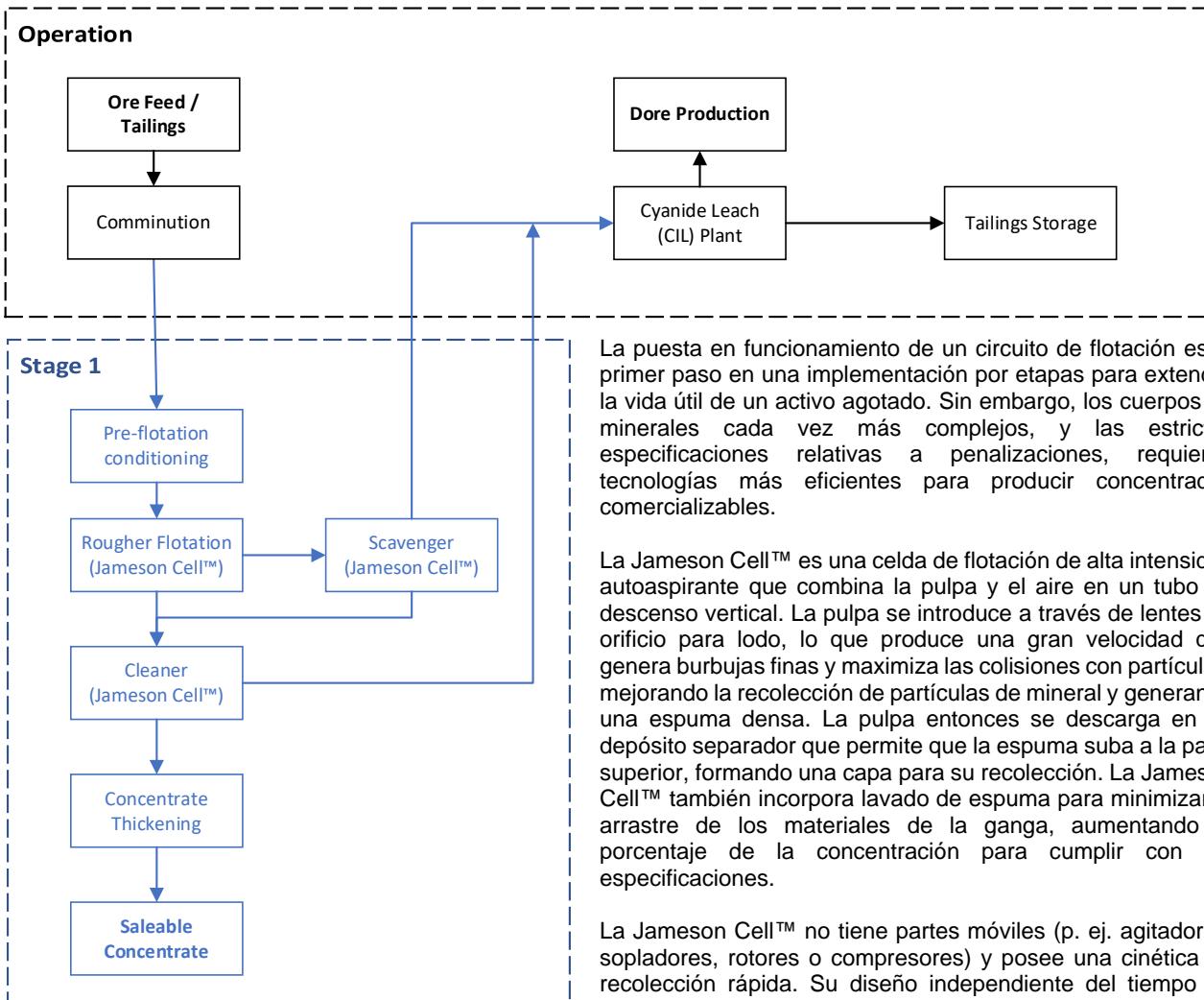


Figura 2: Etapa 1 Concentrador Jameson

Ejemplo 1: Beneficios relacionados con ESG de la concentradora Jameson

GT ha puesto en marcha un diseño de una concentradora para plomo-zinc con capacidad de 7 millones de toneladas anuales para un proyecto con minerales complejos. La flotación convencional hubiera requerido 63 células de depósito. El reemplazo con Celdas Jameson redujo la necesidad de celdas a 19 y disminuyó un 50% el área del circuito de flotación. Adicionalmente, la reducción de las obras de tierras, y el uso de concreto y acero estructural combinada con el uso de solo el 30 a 60% de la energía de un circuito de flotación convencional, da como resultado un ahorro significativo en CAPEX y OPEX.

La tecnología Jameson Cell™ se instaló originalmente al inicio de circuitos de limpieza convencionales para mejorar la capacidad de limpieza, minimizar las reacciones de elementos nocivos y generar un concentrado final de alto grado. Existen cerca de 500 instalaciones de Jameson Cell™ para carbón, metales preciosos y de baja ley, potasa y arenas petrolíferas, lo que demuestra su confiabilidad con los nuevos circuitos y la mejora de los existentes. Las ventajas que tienen las Jameson Cells™ sobre las unidades de flotación convencionales han conducido a la introducción de una configuración completa con la Jameson Concentrator™ en muchas operaciones. La Jameson Concentrator™ es de fácil construcción mediante un EPCM (Ingeniería, Adquisiciones y Gestión de Construcción) para iniciar con rapidez, lo que permite una recuperación rápida y que los ingresos fluyan tan pronto como sea posible. Implementar un circuito de Jameson Concentrator™ produce con rapidez un concentrado comercializable de alto grado e incrementa el capital para implementar las etapas 2 y 3.

La flexibilidad de la Jameson Cell™ pone las bases para una implementación eficiente por etapas, debido a su capacidad para operar en numerosos puntos a lo largo de la curva de recuperación. Cuando una operación progresiva genera un concentrado comercializable a producir doré en el sitio, el circuito de flotación Jameson se puede configurar para maximizar la recuperación. La operación de las celdas Jameson hace posible cambiar la función de la planta para cumplir esta etapa futura del procesamiento donde se requiere un concentrado en bruto de grado bajo, ya sea al operar en un punto diferente de la curva de recuperación o en la configuración del circuito. Se pueden cambiar los limpiadores para

tratar solo el concentrado del depurador o se pueden usar al inicio del circuito para lograr un volumen de producción más alto en general.

La Figura 2 muestra un concentrador típico que consiste de un desbastador, un depurador y un limpiador para producir un grado de concentrado comercializable. Esta configuración sirve para asegurar la capacidad de producir un concentrado comercializable de alto grado. Si se presentan problemas de liberación y mineralogía, podría requerirse una trituración adicional para ayudar a conseguir los resultados deseados. En ciertas aplicaciones y durante el tratamiento del material de transición puede ser posible producir un grado de concentrado final con una recuperación aceptable desde una Jameson Cell™ o un circuito Jameson Cell™ de barido de desbaste.

2.2 Etapa 2: Introducción de trituración fina

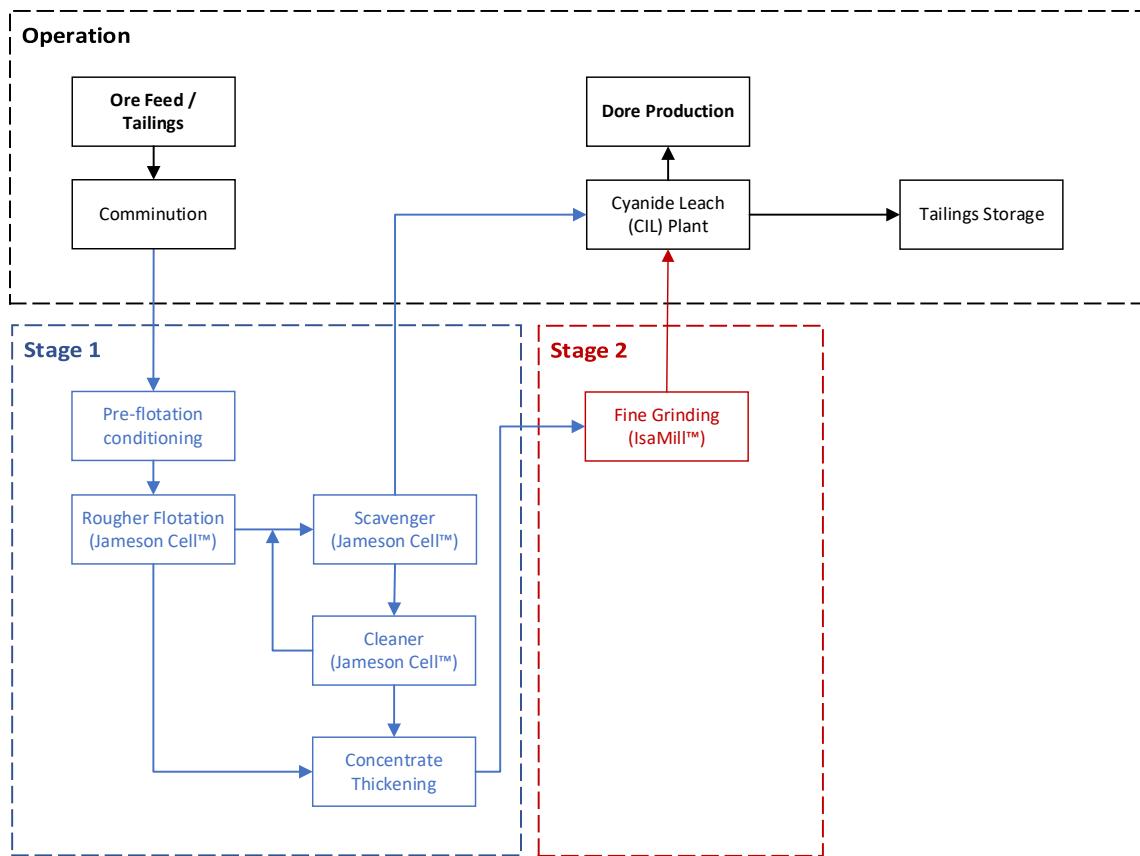


Figura 3: Etapa 2 Trituración ultrafina y modificaciones a la concentradora Jameson

Mientras la operación progresaba de vender concentrados a producir todo el oro como doré en el sitio, la introducción de una etapa de trituración fina puede proporcionar una solución económica en el ínterin (Figura 3). Para algunos proyectos, la trituración fina por sí sola puede producir la suficiente liberación de oro para su recuperación en los procesos tradicionales aguas abajo (Ejemplo 2). Muchas trituradoras convencionales son ineficientes para producir trituración fina debido a los tiempos de trituración prolongados, lo que provoca volúmenes de producción bajos y alto consumo de energía. Las trituradoras de trituración ultrafina (UFG) como la IsaMill™ superan las limitaciones de las trituradoras convencionales al usar agitadores giratorios dentro de un armazón de trituración estacionario, lo que ofrece medios ahorradores de energía para lograr tamaños de trituración ultrafina. Estos tamaños logran una mejor liberación del oro encapsulado dentro de la matriz de sulfuros.

La IsaMill™ es una trituradora de trituración fina de alta eficiencia y comprobada capaz de lograr una distribución de tamaño concentrada para mejorar el ritmo de las reacciones químicas aguas abajo. Este parámetro clave se vigila en la prueba al medir el índice de tamaño grueso (CSI) que abarca un rango de p98 a p80. Esto se logra mediante un diseño de flujo de pistón que incorpora muchas cámaras de trituración.

Ejemplo 2: Uso de la trituración ultrafina (UFG) con la IsaMill como un reemplazo del calcinado – beneficios ambientales y económicos.

Una operación de procesamiento de oro refractario estuvo investigando oportunidades para eliminar su calcinador existente. Se investigaron la oxidación a presión, la oxidación biológica y la trituración ultrafina como procesos alternativos potenciales. El análisis económico indicó que la UFG tuvo el valor de retorno actual neto más alto entre las opciones alternativas de procesamiento. La inclusión de una IsaMill™ para la UFG del concentrado de oro refractario a 10µm antes de la cianuración produjo un aumento de la recuperación del 75% al 92%. El reemplazo del calcinado con la UFG mediante una IsaMill™ también eliminó las emisiones peligrosas a la atmósfera conservando el ritmo de producción.

Mientras el eje central gira, los discos de trituración y el material triturado se agitan, provocando que la mezcla se centrifuge a lo largo del disco hacia el revestimiento del armazón. El material entonces se redirige de vuelta hacia el eje de la trituradora. El lodo alimentado hacia la trituradora pasa a través de cada cámara de trituración antes de salir y no puede bloquear la trituradora. El lodo se descarga a través de un separador de producto con una separación más corta entre los discos del rotor y finales para centrifugar partículas más bajas hacia el armazón, en dicho punto el rotor dirige el material de regreso a las zonas de trituración (Figura 4).

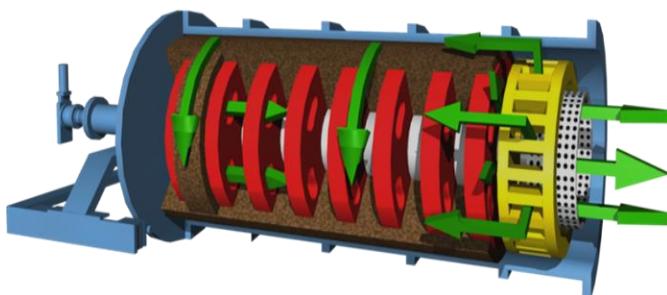


Figura 4: El lodo y los materiales fluyen a través de la IsaMill™

El diseño de la IsaMill permite una trituración, un flujo de partículas y una retención del material triturado más eficientes y minimiza el potencial de bloqueos por partículas. Esto produce la concentración de tamaño necesaria para una oxidación eficiente y altas recuperaciones de oro en la lixiviación con cianuro aguas abajo. Además, el diseño horizontal de la IsaMill™ permite un sencillo diseño de un solo piso y ofrece una mayor potencia en comparación con las opciones de trituración fina alternativas. GT ha acreditado laboratorios para que desarrollen las pruebas diseñadas para la IsaMill™ con cada muestra del cliente para generar un gráfico de firma IsaMill™ para energía de trituración específica. Las pruebas se ejecutan en un modo continuo para replicar el desempeño a escala total, lo que resulta en una escala directa 1:1 entre la prueba y la escala total.

2.3 Etapa 3: Albion Process y procesos aguas abajo

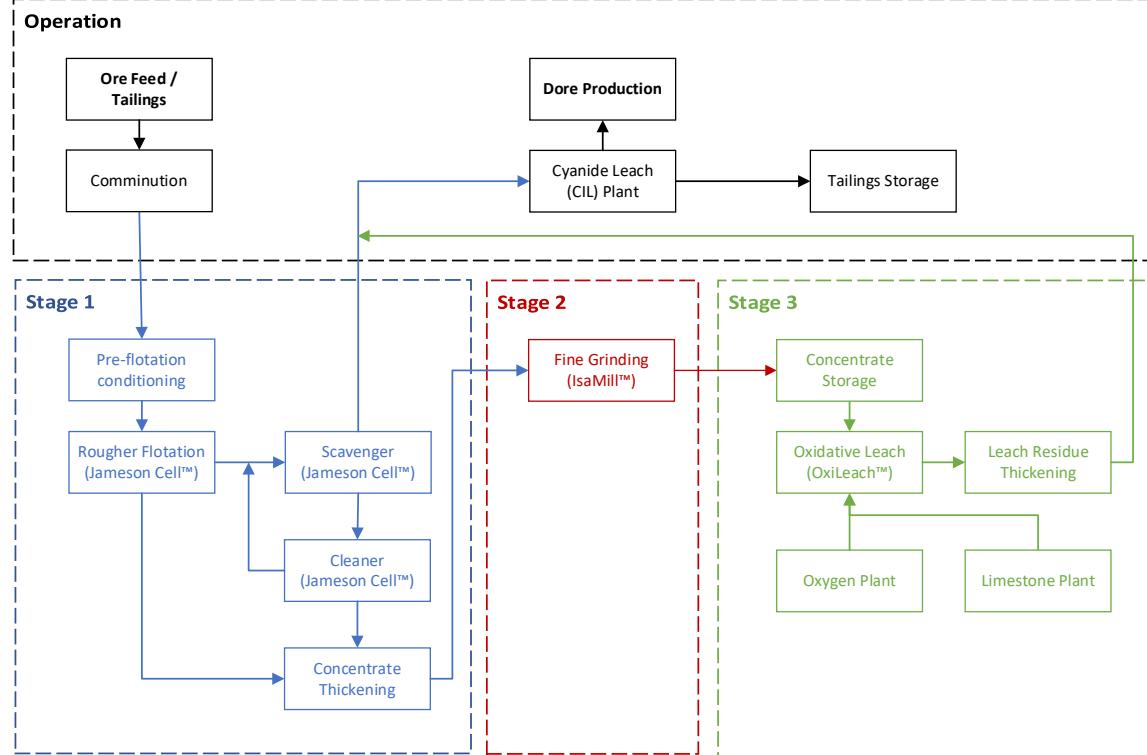


Figura 5: Etapa 3 Implementación completa del Albion Process

Si el oro es extremadamente refractario y no es susceptible de extracción después de solo una UFG, se puede requerir un tratamiento oxidativo. El Albion Process es una tecnología de patente mundial desarrollada por Glencore Technology en 1994. Consta de dos etapas: (i) trituración ultrafina en la IsaMill™ y (ii) lixiviación oxidativa. Por lo tanto, se puede agregar una etapa de lixiviación oxidativa después de la UFG en un proyecto que requiere de implementación por etapas.

Durante la primera etapa, el material de alimentación se somete a UFG en una IsaMill™ para aumentar la superficie y minimizar la pasivación potencial de la superficie del mineral durante la lixiviación. El alto grado de deformación remanente en la estructura cristalina junto con la superficie aumentada produce una alta densidad de defectos en los granos individuales de mineral y aumenta la reactividad de los minerales para la oxidación. Por lo tanto, se requieren menos condiciones extremas para oxidar efectivamente los minerales de sulfuro, permitiendo que la lixiviación ocurra a presión atmosférica. Esto vuelve innecesarias las autoclaves, llevando a una planta con mayor eficiencia energética, más segura y sencilla.

Durante la segunda etapa ocurre la lixiviación oxidativa en el sistema de reactor OxiLeach™. Este sistema utiliza el sistema HyperSparge™ patentado por Glencore Technology para inyectar oxígeno a velocidades supersónicas. El alto nivel de corte y el aumento del contacto de las partículas logrados mediante Hypersparge™ ofrece una transferencia de masa de oxígeno más eficiente en la solución y maximiza el uso del oxígeno, asegurando de esta forma que la difusión de masa del oxígeno no limite el proceso. El Hypersparge logra un aprovechamiento del oxígeno de 80% o mayor, en comparación con el 50% mostrado por otros sistemas de aspersión (Voigt, Mallah y Hourn, 2017).



Figura 7: Reactor OxiLeach™

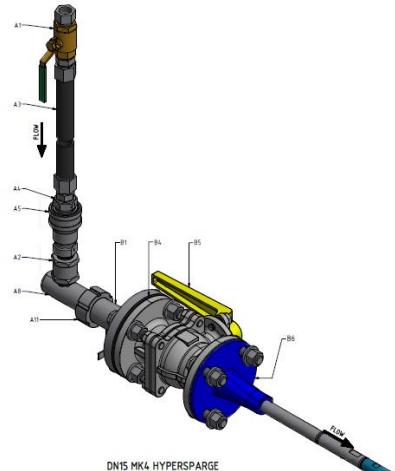


Figura 6: Inyección supersónica de oxígeno HyperSparger™

El proceso de lixiviación es autotérmico a presión atmosférica (con el sulfuro de alimentación objetivo arriba de 10 % w/w) y, en el caso de la mayoría de los concentrados con oro, bajo condiciones ácidas moderadas (aproximadamente pH 5.5). Paradójicamente, a pesar del término «lixiviación», los metales preciosos permanecen en el residuo sólido que pasará a la cianuración o un proceso de extracción de oro equivalente, mientras que la lejía se usa para el tratamiento/gangas.

El Albion Process™ ha sido comercializado para su uso en metales preciosos y de baja ley, con siete plantas construidas y explicadas con detalle (Hourn & Turner, 2010; Hourn & Turner, 2012; Voigt, Hourn, & Mallah, 2016; Senshenko, Aksenoza, Vasiliev, & Seredkin, 2016). Comparado con otros procesos de lixiviación oxidativa, es de bajo costo, tecnológicamente sencillo, efectivo y seguro. Elimina la necesidad de una fuerza de trabajo técnico grande y, debido a su configuración sencilla y condiciones atmosféricas, evita la gran cantidad de problemas de procesos y medidas de seguridad asociadas con otros enfoques. El Albion Process™ también ha demostrado tener costos de operación hasta un tercio menores en comparación con otros procesos de lixiviación en parte debido al menor consumo de piedra caliza y oxígeno (24 % menos), agua (58 % menos) y energía (50 % menos) en comparación con métodos de oxidación tradicionales (McNeice, Marzoughi, Kim, & Ghahreman, 2021; Aylmore, 2012).

Ejemplo 3: Efectividad y beneficios en ESG del Albion Process™ para el tratamiento de minerales de oro refractario.

La planta de procesamiento Ararat, propiedad de GeoPro Mining (GPM) en Armenia es la operación insignia de procesamiento de oro de Glencore Technology. Esta planta fue puesta en funcionamiento en 2014 y produce 120,000 oz de oro al año. La planta de procesamiento Albion consta de una IsaMill™ M3000 y nueve reactores de lixiviación OxiLeach. La introducción de la planta Albion en el diagrama de flujo de Ararat, aumentó la recuperación de oro a un 92 %.

La planta es muy fuerte, capaz de operar con una alta variabilidad en la alimentación con contenido de sulfuros y aún así lograr altas recuperaciones de oro, de hasta 95 %. Esto tiene particular importancia debido a la necesidad de la planta para tratar materiales de siete distintos cuerpos de minerales, incluyendo tres con alto contenido de arsénico. Durante el proceso, el arsénico se lixivia en la solución en bruto. La adición de piedra caliza (para controlar el pH a 5.5 dentro del rango para una oxidación óptima de la pirita) permite la precipitación simultánea del hierro y el arsénico, que forman un ferroarsenato estable (predominantemente escorodita). Las pruebas subsecuentes de las instalaciones de almacenamiento de gangas de Ararat, han confirmado la estabilidad de los compuestos de arsénico.

4. Implementación por etapas en el mundo real

La siguiente sección proporciona un ejemplo de una implementación por etapas propuesta con tecnología de GT para una operación de oro existente. El sitio tiene menos de dos años procesando los remanentes del cuerpo de minerales de óxido actuales. El depósito de sulfuros subyacente consiste en pirita que contiene oro, con una significativa ganga sin sulfuros presente como silicatos y carbonatos. Debido a que requiere poco tiempo para empezar a procesar mineral de sulfuros, la implementación por etapas verá la puesta en funcionamiento de un circuito de flotación de depurador de desbaste Jameson para la generación inicial de un concentrado comercializable.

4.1 Etapa 1: Flotación (Concentradora Jameson)

La alimentación hacia el circuito de flotación Jameson se caracteriza por lo siguiente:

Rendimiento	tmpa	1.0
	tph	125
P₈₀	μm	150
Grado de oro	g/t	1.9
Grado de azufre	%	0.8

El circuito subsecuente para tratar este material consistirá en una célula de debastador Jameson y una célula de barrido que representan un gasto de capital de 12 millones de USD y 0.9 millones de USD de gastos de operación al año.

El concentrado comercializable producido por el circuito de flotación Jameson alcanzará recuperaciones de oro de 85 % con una masa flotada de 6 %, lo que produce un grado de concentración de oro de ~35 g/t. Considerando un precio actual del oro de 65 dólares por gramo, vender este concentrado con 75 % de valor contenido pagable proporcionará ingresos de 79 millones de dólares al año, además del procesamiento de los óxidos remanentes, logrando ingresos adicionales en tanto el diseño faltante, la instalación y la puesta en funcionamiento se completan en las Etapas 2 y 3.

4.2 Etapa 2: Trituración ultrafina (IsaMill™)

La trituración ultrafina en una sola etapa se logrará mediante la implementación de una IsaMill™ M7,500 con una potencia motriz instalada de 2,200 kW. El material se triturará a 12 μm, con la potencia disponible ofreciendo flexibilidad para manejar la variabilidad de los minerales y los requerimientos futuros. Esta etapa equivale a un gasto de operación anual de 2.5 millones de dólares y una inversión de capital de 13.5 millones de dólares. Mientras que la trituración sola proporciona un 20% de aumento en la recuperación de oro (de 20 a 39 % después de una trituración fina), a diferencia del Ejemplo 2 anterior, los beneficios económicos de una etapa de trituración fina separada antes de la puesta en funcionamiento de un circuito de lixiviación oxidativa no se reconocen para este proyecto en particular, por lo que la Etapa 2 y la Etapa 3 se implementarán al mismo tiempo.

4.3 Stage 3: Lixiviación oxidativa (Albion Process™)

Tras la puesta en funcionamiento de las Etapas 2 y 3, las configuraciones del circuito de flotación se establecerán para maximizar la recuperación en lugar del grado. La flotación alcanzará una recuperación de oro del 95 % con una masa flotada de 10%, proporcionando una alimentación al circuito Albion como se indica enseguida:

Rendimiento	tpa	100,000
	tph	12,5
P₈₀	μm	12
Grado de oro	g/t	18
Grado de azufre	%	9

El grado de concentrado de azufre de 9 % se ha modelado y permitirá una operación autotérmica del circuito de lixiviación, sin necesidad de un calentamiento externo. El tiempo de permanencia en lixiviación será de aproximadamente 48 horas, durante las cuales se dosificarán a los reactores 2.8 toneladas por hora de piedra caliza y 1.5 toneladas por hora de oxígeno. La inversión de capital para el circuito de lixiviación Albion Process™ será de 22.2 millones de dólares con un costo de operación de 3.8 millones de dólares. Despues de la lixiviación oxidativa, aproximadamente el 96 % del oro será recuperable mediante la lixiviación con cianuro para elevar la recuperación de oro al 76 % (absoluto) atribuible al Albion Process™ y resultando en ingresos anuales de 112 millones de dólares.

El costo total combinado para facilitar el tratamiento del mineral de sulfuros es de 36.5 millones de dólares, con un costo de operación anual de 6.8 millones de dólares. Con un enfoque de implementación por etapas los costos se distribuirán a lo largo del tiempo, con un costo de capital consistente de: etapa 1, 25%, etapa 2, 28% y etapa 3, 47% y costos de operación de: etapa 1, 12%, etapa 2, 36% y etapa 3, 56%. Estos datos destacados son la ventaja clave de un enfoque de implementación por etapas, que empieza con poco capital y tecnologías con costos de operación bajos para acelerar los ingresos mientras que al mismo tiempo se escalonan los gastos para mejorar el flujo de capital y completar las etapas subsecuentes con el fin de alcanzar altas recuperaciones de oro y un robusto proceso para la producción futura (Figura 6).



Figura 6: Implementación por etapas de las etapas de tratamiento de sulfuros

5. Conclusiones

Un enfoque de implementación por etapas permite que los proyectos elegibles extiendan la vida útil de su operación al proporcionar la oportunidad de tratar materiales de sulfuros refractarios. Este enfoque asegura que la generación de ingresos pueda comenzar mediante la producción de un concentrado comercializable mientras que los procesos aguas abajo que en última instancia tratarán este concentrado en el sitio refinan su diseño y se ponen en funcionamiento. La evaluación y comparación de diferentes etapas de implementación se enfocará en comparar la relación costo-beneficio o NPV en lugar de enfocarse solo en las metas de recuperación establecidas. Esto puede entonces apoyarse mediante un buen modelo financiero para asegurar que se identifique el caso con mayores beneficios económicos.

GT proporciona muchos procesos y tecnologías probados en la industria que se complementan entre sí y facilitan un enfoque de implementación por etapas. Todas estas tecnologías tienen una operación sencilla y flexible para cumplir este enfoque de implementación. Aplicar esto a una situación en el mundo real para tratar 1.0 mtpa de minerales mediante una concentradora Jameson para producir 100 mil ton de concentrados con el Albion Process, el costo total del proyecto es de 36.5 millones de dólares con un costo de operación anual de 6.8 millones de dólares. Con un enfoque de implementación por etapas, los costos se distribuirán a lo largo del tiempo, con un costo de capital consistente de: etapa 1, 25%, etapa 2, 28% y etapa 3, 47% y costos de operación de: etapa 1, 12%, etapa 2, 36% y etapa 3, 56%. De este modo, para el 25 % de gastos de capital y 12 % de costos de operación, es posible iniciar la implementación de la etapa de flotación y generar un concentrado comercializable. Esto genera ~70% de los ingresos por oro disponible para la operación y configura el proyecto para completar las etapas finales y alcanzar altas recuperaciones de oro y producción en el sitio con una planta sólida para la producción futura.