

## Primera Comercialización de Albion Process™ para Cobre

Paul Voigt<sup>1\*</sup>, Glenn Stieper<sup>1\*</sup>, Mike Hourn<sup>1</sup> Glencore Technology, Australia

### RESUMEN

Sable Zinc Kabwe Limited ("Sable") es una planta procesadora de metales base ubicada a dos kilómetros al sur de la ciudad de Kabwe en la Provincia Central de Zambia. La región es dueña de una rica historia en la extracción y producción de minerales y, desde los años 1900 hasta mediados de la década de los 90, Sable fue un gran productor de plomo y zinc. En 2006, en lo que solía ser la planta de procesamiento de Sable, se construyó una planta de cobre para tratar concentrados y óxidos de cobre y cobalto pertenecientes a terceros. La planta de lixiviación de óxidos incluía los procesos de lixiviación de mineral entero, extracción por solvente y la producción de 8.000 tpa de cátodo de cobre LME Grado A. En 2014, la planta fue puesta en fase de cuidado y mantenimiento y, armada con un presupuesto mínimo, Glencore Plc ("Glencore") aprovechó la oportunidad de convertir la instalación en una planta Albion Process™ para tratar concentrados locales de cobre refractario que eran inadecuados o antieconómicos de llevar a fundición.

La planta Albion Process™ está formada por un IsaMill™ M100 que opera en condiciones ácidas de modo que el refino proveniente del proceso aguas abajo es recirculado para convertir en pulpa el concentrado enviado a la planta; de esta forma, se maximiza el tenor del cobre en solución y se reduce el consumo de agua. El concentrado finamente molido alimenta una planta de lixiviación oxidativa utilizando los entonces existentes reactores de acero inoxidable para lixiviación de óxidos y convertidos a Albion Process™, equipándolos con inyectores de oxígeno supersónico HyperSparge™ y con agitadores dispersores de gas. Luego, la pulpa lixiviada es enviada al equipo existente de separación de sólidos/líquidos mientras que la PLS es enviada a la planta SX/EW existente. La planta también permite recuperar cobalto del refino.

El diseño de la planta se efectuó en base a pruebas realizadas con concentrados de cobre de la región. Dado su objetivo de procesar distintos concentrados, su diseño fue flexible. Teniendo la flexibilidad como una de sus principales ventajas, la planta Albion Process™ ofrecía las condiciones ideales para procesar concentrados de la región.

Tanto la puesta en marcha como el *ramp-up* fueron concluidos en seis semanas utilizando concentrado de cobre zambiano de baja ley. La planta produjo, exclusivamente, cobre LME, Grado A con una recuperación por lixiviación superior a 99% en el circuito Albion.

### INTRODUCCIÓN

La planta de procesos Sable Zinc Kabwe Limited ("Sable") está ubicada a 2km al sur de la ciudad de Kabwe y 140km al norte de Lusaka en la Provincia Central de Zambia. En 1902 se descubrieron ricos depósitos de zinc y plomo y, hasta mediados de la década de los 90, estuvieron en operación minas y plantas de procesamiento en la ciudad y sus alrededores. En el año 2000, los tranques de relaves de la mina Kabwe fueron vendidos a Sable, una empresa de reciente creación, como parte de un contrato de compra de otros predios e instalaciones. Hasta 2004, Sable produjo cátodos de zinc en una planta SX/EW donde trataba material de relaves de la planta de lavado. Ese mismo año, Sable fue adquirida por la empresa minera sudafricana Metorex Limited ("Metorex") y, en 2006, se construyó una planta SX/EW de cobre/cobalto para producir cátodos de cobre a partir de malaquita proveniente de la República Democrática del Congo. En 2011, Jinchuan Group International Resources Co. Ltd compró Metorex y, a la vez, Sable fue vendida a una subsidiaria de Glencore Plc ("Glencore").

En noviembre de 2014, Glencore puso a Sable en cuidado y mantenimiento producto de una baja en el precio de los *commodities* sumado a las dificultades logísticas que presentaba la región de Zambia/RDC en el suministro de óxidos.

En 2015, Glencore evaluó la instalación de Albion Process<sup>TM</sup> para procesar concentrados de leyes variables que otras fundiciones de la región no eran capaces de tratar por la baja ley del cobre, bajos contenidos de combustible por el cobre no sulfurado, altos contenidos de cobalto y alto nivel de impurezas como sílice o alúmina. Esta evaluación se efectuó como parte de una estrategia de largo plazo para el desarrollo de importantes existencias de sulfuros que poseía Glencore en la región.

En 2015 se aplicó un programa de ensayos donde una serie de estos concentrados de la zona de Zambia y de la RDC fueron sometidos a prueba. En ese momento se diseñó una planta Albion Process<sup>TM</sup> con la flexibilidad suficiente para procesar una serie de estos concentrados, con una producción objetivo de 8.000 tpa de cobre. El diseño de la planta Albion Process<sup>TM</sup> consideró la capacidad de manejar importantes cambios en la composición del material de alimentación. Dada la notable ventaja que ofrece Albion Process<sup>TM</sup> por su capacidad de procesar una amplísima variedad de especificaciones en el concentrado de alimentación, se consideró que el enfoque de especificaciones de alimentación “asumidas” del diseño era un riesgo aceptable.

Habiendo comprendido los atractivos beneficios de seguir adelante con la conversión de la planta, tanto en la expansión de la tecnología como en la habilitación de las opciones de procesamiento dentro de la región, se tomó la decisión de convertir la planta Sable de óxidos de cobre/cobalto a una planta Albion Process<sup>TM</sup>. La base del diseño estuvo enfocada en el tratamiento de concentrados de cobre/cobalto consistentes en de óxidos y minerales refractarios, como calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), bornita (Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>) y carrollita (CuCo<sub>2</sub>S<sub>4</sub>). En el proceso de conversión se utilizó la infraestructura existente, como los estanques de lixiviación de óxidos de acero inoxidable, el circuito de recuperación de cobalto y la planta SX/EW de cobre. En ese momento, la capacidad nominal de la planta de lixiviación de óxidos era de 16.000 toneladas anuales de cátodo LME Grado A. El base de diseño para la conversión a Albion Process<sup>TM</sup> era de 8.000 toneladas anuales de cátodo. El cobalto, de existir, sería recuperado a través del proceso de precipitación de carbonato, tratando los refinos de la planta SX.

Albion Process<sup>TM</sup> es un proceso de lixiviación atmosférica para la oxidación de oro refractario y concentrado de metales base finamente molidos en un sistema de sulfato férrico/ferroso para recuperar, aguas abajo, los metales valiosos. Esta tecnología es distribuida por Glencore Technology ("GT"), a nivel mundial. Albion Process<sup>TM</sup> consta de dos etapas. La primera de ellas consiste en una molienda ultrafina que tiene lugar en un IsaMill<sup>TM</sup> donde el concentrado de mineral se reduce a un tamaño tal que los reactivos en la fase de oxidación no logren pasivar la superficie del mineral e impidan la lixiviación. El segundo paso es la oxidación del concentrado ultrafino a través de la inyección ultrasónica de oxígeno con los HyperSparge<sup>TM</sup> de GT. El proceso funciona a presión atmosférica, autotérmicamente y en condiciones ligeramente ácidas.

En el caso de metales base, como el cobre, los metales solubilizados son recuperados de una solución mediante SX/EW. En el caso del oro refractario, la pulpa oxidada es sometida a cianuración o a un proceso equivalente para la recuperación de oro y plata.

Albion Process<sup>TM</sup> ha sido comercializado para el procesamiento de zinc y oro en cinco plantas donde se encuentra operativo con abundante información de su desempeño (Hourn & Turner, 2010; Hourn & Turner, 2012; Hourn et al., 2014; Voigt et al., 2015; Senshenko et al., 2016). El Albion Process<sup>TM</sup> instalado en Sable fue la primera unidad comercializada para la lixiviación de concentrados de sulfuro de cobalto y cobre refractario.

Este documento describe la ingeniería de procesos aplicada, el concentrado real recibido en la operación y los resultados de desempeño. Por otra parte, los bajos montos de capital final y el circuito resultante se analizan y se presentan gráficamente, destacando la robusta pero sencilla operación de Albion Process<sup>TM</sup>.

## PROGRAMA DE DESARROLLO

Previo a determinar si un programa de desarrollo asociado a Albion Process<sup>TM</sup> debe o no avanzar a la siguiente etapa se deben evaluar aspectos técnico y económicos de un potencial proyecto. A medida que avanzaba, GT hacía progresivas estimaciones de costos para el proyecto, de acuerdo con la práctica recomendada No. 18R-97 de la Asociación Internacional para el Avance de la Ingeniería de Costos (AACEI) (Christensen & Dysert, 2005) que se resume en la Tabla 1.

Tabla 1 – Etapas del desarrollo de proyectos AACEI

Clase de estudio	Objetivo	Precisión NI (%)	Precisión NS (%)	Avance del proyecto (%)	Pruebas
Clase 5	Va / No Va	-50 a -20	+30 a +100	0 - 2	Banco x 1
Clase 4	Prefactibilidad	-30 a -15	+20 a +50	1 - 15	Banco x 5
Clase 3	Factibilidad	-20 a -10	+10 a +30	10 - 40	Banco x 10
Clase 2	Prep. oferta fija	-15 a -5	+5 a +20	30 - 70	Piloto / Demo
Clase 1	Ejecución	-10 a -3	+3 a +15	50 - 100	-

Cada una de las clases de estimación representa un nivel de estudio de ingeniería más detallado y el correspondiente nivel de pruebas que respalda el estudio de ingeniería.

La evaluación inicial del proyecto fue efectuada al nivel de estudio Clase 5 donde la idoneidad de Albion Process™ para la probable composición mineralógica y elemental del material de alimentación fue calificada como favorable. GT cuenta con una amplia base de datos de pruebas efectuadas con otros concentrados de sulfuros de cobre, la cual se utilizó para preparar la base de diseño para el estudio Clase 5. Posteriormente, se completó el estudio Clase 4 con el apoyo de un programa de pruebas que testeó diversos concentrados de sulfuro de cobalto/cobre refractario de la región de Zambia/RDC y que se llevó a cabo en un laboratorio de pruebas certificado de Albion Process™. El estudio nivel Clase 4 aportó una evaluación tipo Va/No Va del proyecto y confirmó datos esenciales del diseño, como el dimensionamiento preliminar de la planta, el nivel de oxidación y la recuperación de metales.

La planta fue diseñada con un alto nivel de flexibilidad ya que, de acuerdo a lo esperado, la alimentación que recibiría sería muy variada, de acuerdo al material disponible en la zona. Dada la capacidad de Albion Process™ de procesar una amplísima variedad de calidades y cantidades de material y los reducidos gastos de capital por tratarse de una aplicación de reacondicionamiento para pequeños tonelajes, este enfoque fue considerado aceptable en estas circunstancias.

#### Especificaciones para la Alimentación de Diseño

Los ensayos practicados con concentrados regionales, y probable suministro, fueron utilizados para diseñar la composición del material que alimentaría la planta, dentro de un rango de diseño de + 20 %. GT modeló la planta en base a esta especificación y preparó un detalle de dimensionamientos de equipos recomendados con algunos datos adicionales tomados de la base de datos de pruebas de GT (analizado en la sección Diseño de Ingeniería). Los siguientes fueron los dos principales parámetros de diseño:

- La demanda de energía específica para moler los concentrados de sulfuro a 80 % pasante de 12 micrones o más finos.
- La constante de velocidad de oxidación de sulfuros específica que permitiera un modelamiento CSTR del tiempo de residencia de la lixiviación oxidativa.

Ambos parámetros fueron tomados del programa de pruebas y pasaron a formar parte de la base de diseño. Antes de que la planta de lixiviación de óxidos de Sable fuera convertida a Albion Process™ no se requirieron pruebas piloto continuas ya que la información adicional obtenida en la etapa de pilotaje fue considerada innecesaria dado los costos del pilotaje y el retraso en el programa.

Con el fin de evaluar diversos concentrados teóricos, se desarrolló un balance de masa y energía en base al probable suministro de muestras en la región, datos de proveedores y parámetros de la planta existente en Sable. A su vez, este balance fue utilizado para desarrollar un detallado set de Criterios de Diseño de Procesos que, más tarde, se empleó para confeccionar el listado de equipos y el listado de cargas eléctricas. La Tabla 2 y la Tabla 3 indican las especificaciones de alimentación utilizadas.

**Tabla 2 –Especificaciones para minerales en concentrado de diseño**

MUESTRA	MINERALES EN CONCENTRADO				
	Calcopirita %	Calcocita %	Malaquita %	Feldespato ortoclasa %	Sílice %
Concentrado de sulfuros	14,5	11,3	20,0	24,2	30,0
Concentrado de óxidos	-	-	44,1	-	55,9

**Tabla 3 – Especificaciones para elementos en concentrado de diseño**

MUESTRA	ELEMENTOS EN CONCENTRADO					
	Cu %	Fe %	S %	Mg %	Al %	Si %
Concentrado de sulfuros	25,5	4,4	7,3	1,2	4,1	18,3
Concentrado de óxidos	24,9	-	-	-	-	25,7

#### Diagrama de Flujo para Alimentación de Diseño

Como se aprecia en la Figura 1, se desarrolló un diagrama de flujo en base a las especificaciones para la alimentación de diseño que incluyera los componentes para los óxidos y los sulfuros de cobre.

Considerando que la planta fue diseñada para tratar óxidos y sulfuros refractarios, ésta fue habilitada con sistemas de alimentación de óxidos y sulfuros independientes. De esta forma, el concentrado de óxidos, sin azufre ni poder calorífico sobre el proceso, fue agregado a los dos últimos estanques del tren de lixiviación oxidativa para facilitar que en los primeros estanques se generaran las condiciones adecuadas para el Albion Process™. Lo anterior era importante para establecer y mantener los niveles de fierro en la solución y para maximizar el calentamiento autotérmico de la pulpa de la lixiviación por parte de los minerales sulfurados.

La naturaleza autotérmica de las reacciones durante la oxidación de sulfuros significa que la lixiviación oxidativa de Albion Process™ operará entre 94-98°C, lo que dará como resultado rápidas cinéticas de oxidación de sulfuros.

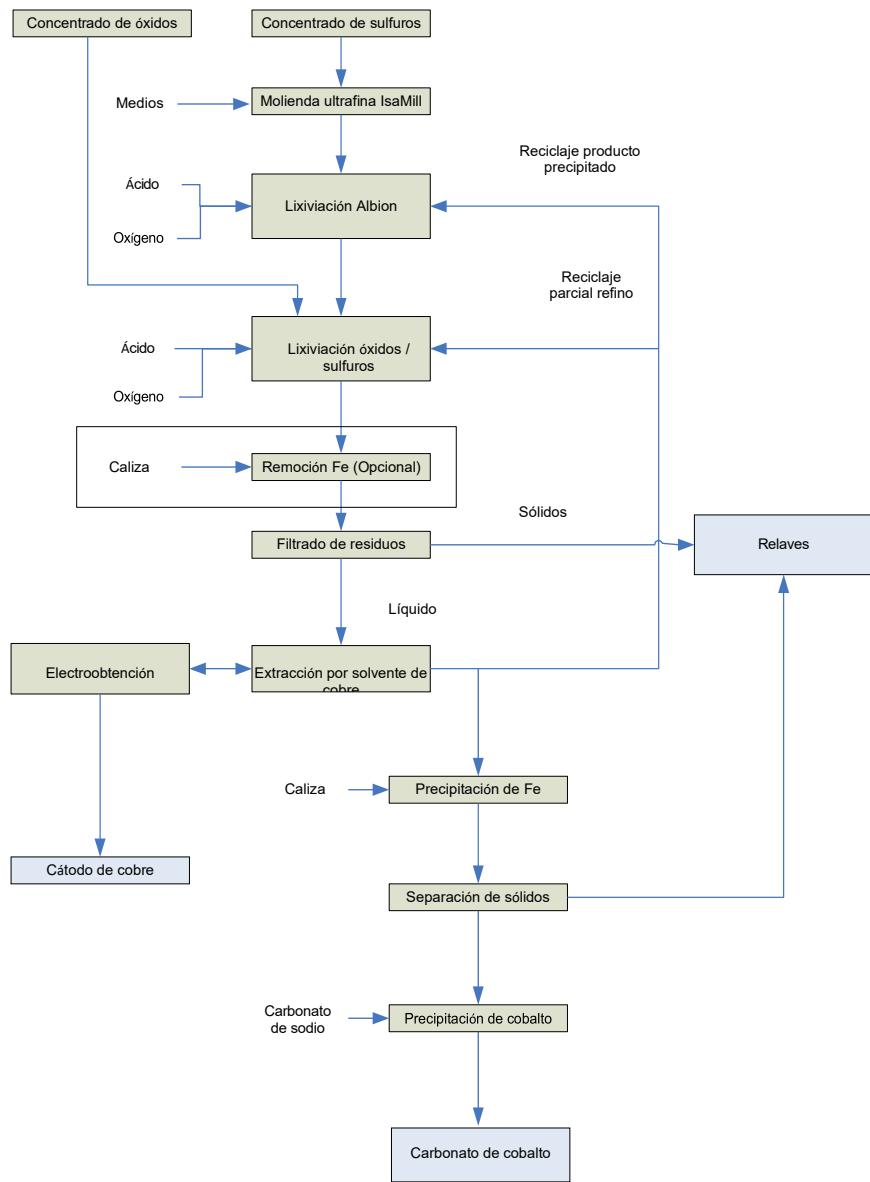
El material de óxidos de cobre no refractario debía tener la flexibilidad suficiente para ingresar al proceso en el estanque tres o en el estanque cuatro que, dada la alta temperatura y niveles de ácido emanando del componente sulfurado del tren de lixiviación, otorgarían el tiempo de residencia remanente suficiente para lograr una alta recuperación.

El concentrado de sulfuro es enviado a la planta como una torta de filtro de baja humedad. El concentrado es convertido en pulpa en el refino y agua de la planta SX en un estanque de agitación de acero inoxidable. El estanque se utiliza para reprocesar el concentrado y es alimentado mediante una tolva y una correa transportadora en base a lotes, dependiendo del nivel. Durante el proceso de reconversión, parte del cobre soluble en ácido escapa del concentrado hacia la solución.

El IsaMill™ M100 es alimentado en forma continua por una pequeña bomba de manguera desde el estanque de material reprocesado. A través de la molienda, el IsaMill™ reduce el tamaño del concentrado hasta un p80 en el rango de los 12µm a 14µm, dependiendo del tipo de alimentación y mineralogía de los sulfuros. La carcasa del IsaMill™ está fabricada de acero inoxidable 316L y todas las partes húmedas fueron fabricadas con materiales seleccionados para asegurar el desempeño en las condiciones de acidez.

El IsaMill™ descarga directamente en el primero de los cinco reactores de lixiviación oxidativa de acero inoxidable. Los reactores de lixiviación están cubiertos con tapas de acero inoxidable para mantener una atmósfera de oxígeno sobre la pulpa de lixiviación y están equipados con una tubería de escape por donde descargan los gases y el vapor a la atmósfera. Los estanques de lixiviación oxidativa cuentan con agitadores hidrodinámicos de doble paleta para la dispersión de gases y tareas de suspensión de la pulpa. Los inyectores de gas supersónico HyperSparge™ de GT se encargan de inocular oxígeno en la base de cada uno de los reactores de lixiviación. La pulpa fluye por gravedad a los reactores aguas abajo con un sistema de canaletas que, en caso de mantenimiento, permiten una ruta alternativa.

**Figura 1 –Diagrama de flujo de diseño Sable**



La adición de óxidos de cobre de rápida lixiviación en los estanques tres o cuatro se efectúa mediante una tolva y correa transportadora de óxidos de cobre independiente. En este caso, se evita convertir el material oxidado en pulpa para manejar el balance de agua en todo el proceso de lixiviación oxidativa y se apunta a obtener un nivel de cobre final en PLS de 20 – 25 g/l. El modelamiento indicó la necesidad de agregar ácido complementario y refino adicional en diversos puntos a lo largo del tren de lixiviación. Este último se realiza a través de un sistema de dosificación de refino que permite agregarlo a todos los estanques. Por lo general, la demanda de ácido adicional por parte del sistema es baja, ya que las reacciones de la oxidación de sulfuros generan ácido in situ y el excedente de ácido del refino.

Ya se esperaba que los niveles de fierro en los concentrados regionales presentaran variaciones significativas, dependiendo del nivel de calcopirita en el concentrado. En el caso de concentrados con altos contenidos de calcopirita se aplicó una fase de fierro opcional utilizando dos estanques de agitación de acero inoxidable adicionales. El fierro soluble es oxidado en forma férrica utilizando los inyectores HyperSparge™ y, luego, es precipitado mediante un ajuste de pH utilizando pulpa de caliza. Los niveles de fierro fueron reducidos a 8 – 10 g/l en la etapa de precipitación de fierro.

Posterior a la precipitación de fierro, la pulpa se dirige a un espesador existente cuya descarga es bombeada hacia un filtro de correa horizontal. El filtrado es transferido de vuelta al pozo de alimentación del espesador. Los residuos del filtrado se eliminan en las instalaciones de almacenamiento de relaves. La solución rica en cobre es bombeada desde el estanque de descarga del espesador a la planta de extracción de cobre por solvente. La mayor parte del refino es reciclado a la lixiviación oxidativa. Luego, el refino se purga para recuperar cobalto en la planta de precipitación de cobalto existente.

Primeramente, la solución de purga de refino es neutralizada con caliza para remover los residuos de fierro. La solución de purga -ahora conteniendo más que nada cobalto- es enviada a un proceso de precipitación en base a carbonato de sodio para recuperar el carbonato de cobalto. La pulpa de carbonato de cobalto es filtrada y, luego, la torta de filtro se lleva al mercado.

El electrolito rico obtenido de la extracción por solvente es dirigido a la planta de electroobtención para recuperar cátodo de cobre LME Grado A.

Como se observa en la Tabla 7, casi todos los equipos requeridos por Albion Process™ ya existían en las instalaciones de Sable. Las nuevas unidades requeridas por la planta eran tres estanques de lixiviación oxidativa de acero inoxidable, un IsaMill™ M100 y una pequeña planta de oxígeno que fueron adquiridos en 2016.

La Tabla 4 resume los principales criterios de diseño para el proyecto.

**Tabla 4 – Criterios de diseño para Albion Process™ Sable**

Criterios	Unidades	Nominal	Mínimo	Diseño
<b>Producción sulfuros</b>	tph	1,5	1,0	1,8
<b>Producción óxidos</b>	tph	1,7	1,3	2,2
<b>Producción total</b>	tpa	25.792	7.738	29.661
<b>Ley de cobre</b>	%	25%	15%	35%
<b>% alimentación como sulfuros</b>	%	50%	50%	50%
<b>Total unidades de cobre</b>	tpa	6.448	1.161	10.381
<b>Energía específica para molienda fina*</b>	kWh/t	25	18	35
<b>Tiempo residencia lixiviación oxidativa - sulfuros</b>	h	36	24	48
<b>Tenor Cu terminal</b>	gpl	35	35	35
<b>Tenor refino Cu</b>	gpl	4	4	4

\* Tabla 5. Para rangos de energía específica se utilizaron datos del gráfico de firmas regionales.

## DISEÑO DE PLANTA

El diseño de la planta fue preparado en base a una especificación para concentrado de diseño nominal facilitada por Glencore, de acuerdo al material de alimentación existente al momento de preparar el diseño. Se efectuaron pruebas con varias de estas potenciales alimentaciones las cuales fueron complementadas con la base de datos de prueba de GT.

Los resultados de estos ensayos fueron utilizados para determinar a probabilidad de recuperaciones de cobre y cobalto y, además, la energía específica requerida por IsaMill™ para la molienda. A diferencia de una estimación hecha por un estudio de ingeniería *greenfield*, el foco del diseño estuvo centrado en la conversión de las instalaciones existentes en la operación Sable y en presentar recomendaciones para los nuevos equipos que sería

necesario instalar. La Tabla 4 contiene los principales equipos y dimensiones, señalando los casos en que ya existían equipos utilizables en la planta Sable.

Las siguientes son importantes consideraciones tomadas del modelo del balance de masa y calor que guiaron el diseño:

- Probable grado de oxidación de sulfuros – la planta de oxígeno fue dimensionada para asegurar la oxidación objetivo de sulfuros en los materiales de alimentación con la razón azufre:cobre más alta posible.
- Tiempo de residencia en lixiviación – para mantener la suficiente capacidad de lixiviación para los distintos materiales tratados y asegurar altas recuperaciones de cobre y cobalto. La *Tabla 6* se utilizó como guía de desempeño. La calcopirita fue el más lento de los minerales presente en los concentrados regionales y se modeló el tiempo de residencia para la lixiviación oxidativa de un CSTR de 5 trenes aplicando la constante de velocidad química específica promedio para la calcopirita a partir de las muestras testeadas.
- Tamaño de molienda y tamaño IsaMill™ – la planta procesará concentrados variables con características de molienda desconocidas; por lo tanto, el IsaMill™ debía ser flexible en su respuesta a estas variaciones. GT cuenta con una amplia base de datos para distintas leyes de concentrado de sulfuro de cobre, la cual se utilizó en los datos de molienda de alimentaciones regionales. Para la base de diseño se seleccionó una muestra de materiales conservadora. La *Tabla 5* muestra el gráfico de firmas para este concentrado. Estos datos fueron utilizados para definir la energía específica para el IsaMill™.
- Balance de aguas – la configuración del IsaMill™ fue pensada para moler en refino y poder manejar el balance de aguas de todo el circuito y el tenor del cobre. Dado que la lixiviación oxidativa fue diseñada tanto para materiales sulfurados como oxidados, la gestión del balance aguas fue un importante aspecto de diseño a considerar.
- Cobre soluble en ácido – se creía que los probables concentrados de alimentación podían contener hasta 50% de cobre soluble en agua y debían ser considerados en el perfil de lixiviación y en los materiales de construcción del IsaMill™, ya que se esperaba encontrar un importante volumen de sulfato de cobre en el IsaMill™ y también en los estanques de almacenamiento de concentrado.
- Alimentación variable – la planta procesará diversas leyes de concentrados, entre 8% y 32% de cobre que, si no es programado y debidamente mezclado, podría incidir en el desempeño de la planta. También se consideró que la mezcla de materiales de alimentación debía asegurar la presencia de suficiente combustible sulfurado en el concentrado para mantener las temperaturas deseadas para la lixiviación oxidativa.
- Contenidos de sulfuros variables – la planta procesa concentrados que contienen diversos niveles de sulfuros y óxidos de cobre. Los óxidos no requieren de molienda ultrafina y, a veces, no pasan por el IsaMill™. Los óxidos también contienen el combustible mínimo para mantener las temperaturas de lixiviación y pueden afectar la temperatura de operación de la lixiviación oxidativa.

Tabla 5 –Gráfico de firmas históricas regionales de IsaMill™

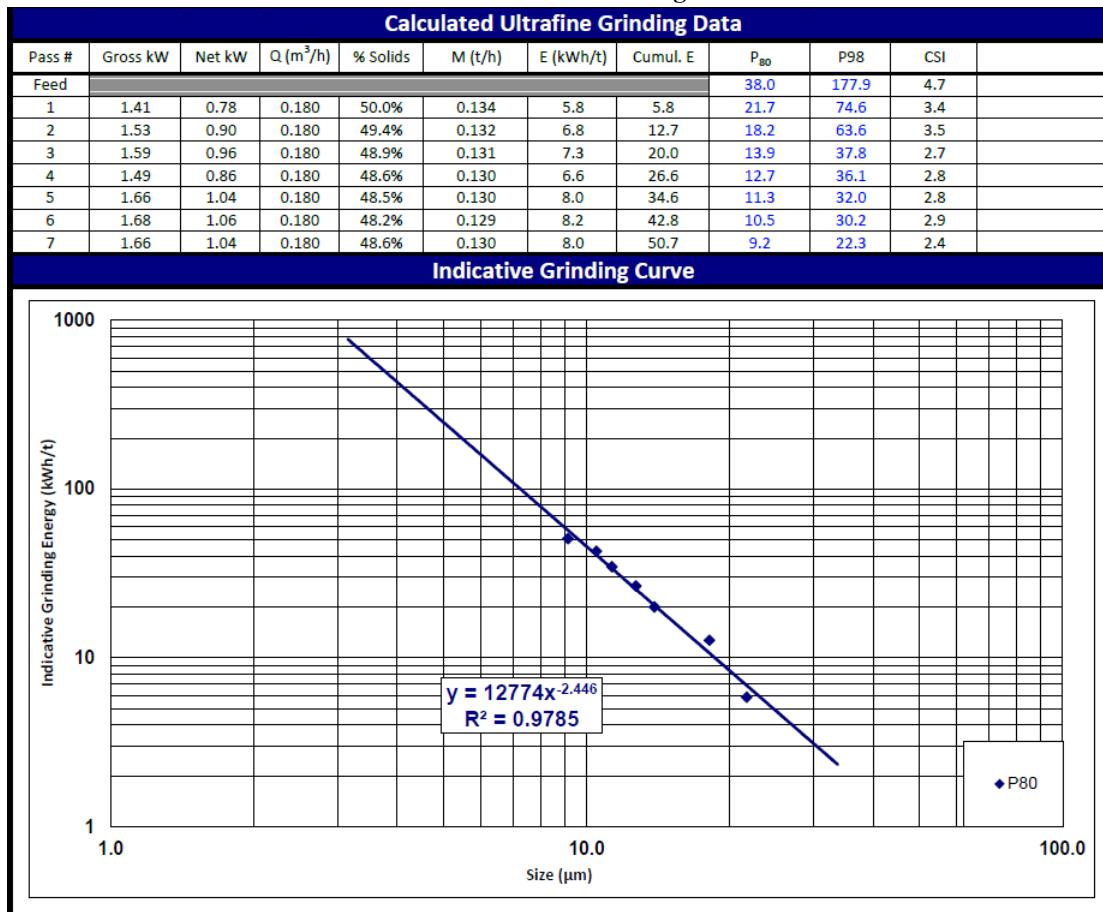


Tabla 6 –Resultados históricos regionales de pruebas Albion Process™

Prueba	Concentrado	Ley Cu %	P80, μm	Ext Cu, %	Ext Co, %	Consumo neto ácido, kg/t
1	Sulfuro baja ley	12,6	9,8	99,4	99,3	390
2	Comp. 2 (80/20) baja ley	13,4	8,5	98,8	98,8	170
3	Muestra #4 alta ley	39,3	9,5	98,8	98,5	161
4	Sulfuro alta ley	23,0	9,9	99,7	99,0	197
5	Muestra #2 baja ley	10,6	9,8	97,1	88,7	184
6	Comp. 1 (70/30) baja ley	13,9	9,1	97,4	90,9	140

**Tabla 7 – Listado de principales equipos**

Nombre equipo	Número	Tamaño	Tarea	¿Existía?
<b>Estanque reconversión de concentrado en pulpa</b>	1	Vol - 10m <sup>3</sup>	Concentrado sulfuro de pulpa	Sí
<b>IsaMill</b>	1	M100	Cons. molienda fina de sulfuros en condiciones ácidas	No
<b>Estanques acero inoxidable de lixiviación oxidativa</b>	5	Vol - 100m <sup>3</sup>	Concentrados óxidos y sulfuros de lixiviación	Sí - 2 de 5
<b>Inyectores de oxígeno HyperSparge<sup>TM</sup></b>	5	Boquilla - 4mm	Inyección supersónica de oxígeno	No
<b>Generador de oxígeno</b>	1	10 tpd	Generar oxígeno para el proceso de lixiviación	No
<b>Espesador</b>	1	24m diámetro	Espesar residuos para filtrado	Sí
<b>Filtro de correa horizontal</b>	2	Área filtr. - 44m <sup>2</sup>	Separación sólidos/líquidos	Sí
<b>Instalaciones de almacenamiento relaves</b>	1	-	Almacenamiento de sólidos	Sí
<b>Planta cobre SX/EW</b>	2	1500 tpm ea	Recuperación de cobre LME Grado A	Sí
<b>Planta precipitación de cobalto</b>	1	50 tpm	Recuperación de concentrado de cobalto	Sí

Especificaciones de alimentación – PUESTA EN MARCHA

En el momento de la puesta en marcha, se recogió una gran cantidad de mineral en exceso y material de concentrado de baja especificación desde la planta de fundición Mopani el cual fue sometido a flotación para producir concentrado de cobre de alta ley con una composición de alimentación variable. Finalmente, se produjeron cerca de 600 toneladas de concentrado que fueron transportadas a Sable para ser procesadas en la planta Albion Process<sup>TM</sup>.

Se tomó una muestra de típica del concentrado de Mopani y se envió al departamento de mineralogía Alfred H. Knight para su análisis (Reporte No. MIN70668). La Tabla 8 presenta el análisis secuencial general del concentrado de cobre. La Tabla 9 exhibe los detalles minerales del componente sulfuro del concentrado.

La Tabla 10 analiza aspectos del componente ganga. Cerca del 93% del cobre total se encontraba presente en la forma de sulfuros; por lo tanto, no soluble en ácido y 7% era soluble en ácido. Los principales minerales sulfurados fueron la calcopirita y la bornita.

**Tabla 8 –Resultados del análisis químico del concentrado**

Muestra	% T Cu	% AS Cu	% T S	% Insol.
<b>Sulfuro de cobre</b>	31,34	2,14	19,02	20,67

**Tabla 9 –Datos concentrado de sulfuros**

MINERALES	CONCENTRADO DE SULFURO				
	Peso %	% T Cu	% AS Cu	% TS	F:L
<b>Calcopirita</b>	22,3	7,69	-	7,80	91:9
<b>Bornita</b>	29,6	18,74	0,38	7,58	88:12
<b>Calcocita</b>	4,0	3,19	0,05	0,81	83:17
<b>Covelita</b>	0,1	0,07	-	0,03	100:0
<b>Pirita</b>	2,9	-	-	1,55	86:14
<b>Pirrotita</b>	0,2	-	-	0,08	42:58
<b>Malaquita</b>	2,8	1,61	1,61	-	95:5
<b>Seudomalaquita</b>	0,1	0,06	0,06	-	100:0
<b>Ganga</b>	38,0	-	-	-	-
<b>Total</b>	100,0	31,36	2,10	17,85	-
<b>Ensayos de AHKZ</b>	-	31,34	2,14	19,02	-

**Tabla 10 - Datos concentrado de ganga**

MINERALES	CONCENTRADO DE SULFURO	
	%AR	Peso%
<b>Cuarzo/Feldespatos</b>	37 – 42	~15
<b>Carbonatos</b>	3 – 5	~2
<b>Micas</b>	29 – 34	~12
<b>Argilita</b>	15 – 16	~6
<b>Pizarra carbonosa</b>	4 – 6	~2
<b>Óxido de fierro</b>	2 – 4	~1
<b>Accesorios</b>	~1	<<1
<b>TOTAL</b>	100	~38

%AR = Abundancia relativa

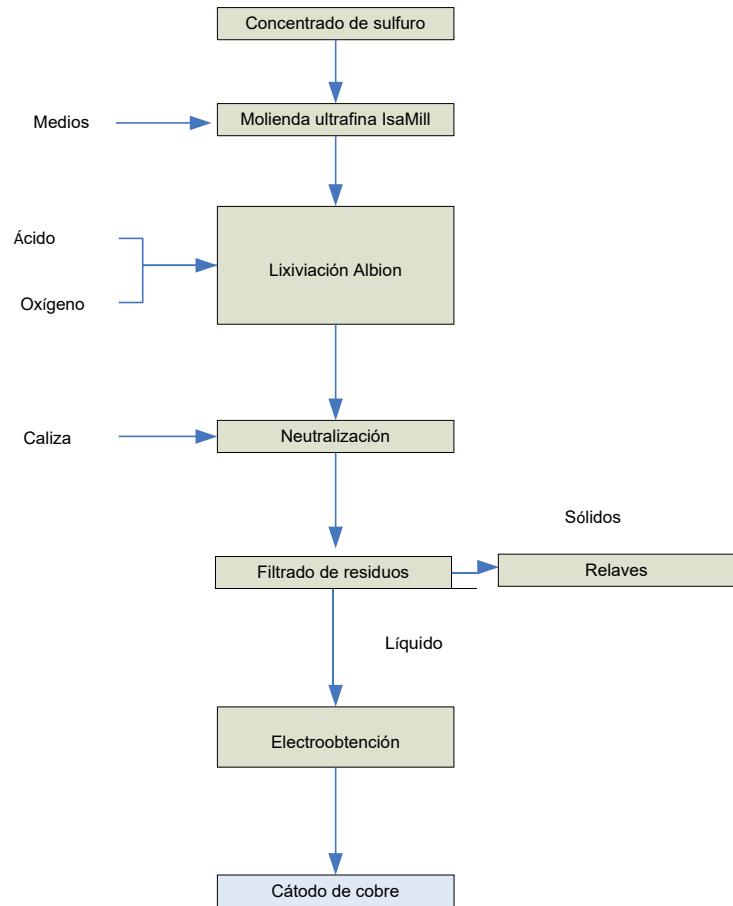
#### Diagrama de Flujo PUESTA EN MARCHA

El concentrado utilizado para la puesta en marcha presentaba una ley de azufre sulfurado de ~19% que correspondía al extremo superior de la base de diseño utilizada en el dimensionamiento de la planta de oxígeno. Esto significó que la planta de oxígeno fuera el cuello de botella durante la puesta en marcha. Dado que el sulfuro fue la muestra predominante en la puesta en marcha, todo el concentrado debió pasar por el IsaMill™ para ser molido a un 80 % pasante de 12 micrones.

El tonelaje hacia la lixiviación oxidativa fue de 0,6 tph secas de concentrado, en base a la capacidad de la planta de oxígeno. Esto significó un largo tiempo de residencia en la lixiviación oxidativa, ya que la lixiviación estaba diseñada para un rango de alimentación entre ~3,2tph y ~0,6tph. Dado que las pruebas de Albion Process™, indicaban que la oxidación de la calcopirita sólo requería de 36-48 horas de oxidación para obtener una recuperación superior al 98%, sólo se inyectó oxígeno a los dos primeros reactores de lixiviación oxidativa mientras que los estanques restantes fueron utilizados para almacenar pulpa antes del espesador.

La Figura 2 muestra el diagrama de flujo de la puesta en marcha de Sable.

**Figura 2 –Diagrama de flujo de puesta en marcha de Sable**



Cada reactor de lixiviación oxidativa tenía 5 m de alto x 5 m de diámetro con un volumen vivo de ~80 m<sup>3</sup>. Los cinco reactores de lixiviación se muestran en la Figura 3. Los reactores existentes de acero inoxidable para lixiviación oxidativa habían sido fabricados de aleación dúplex 2304 que es adecuado para operaciones de lixiviación férrica oxidativa y fue el mismo material que se usó para los dos estanques nuevos. Para ser consecuentes, los nuevos estanques de lixiviación se fabricaron de las mismas dimensiones de los tres estanques anteriores para lixiviación de óxidos. Durante la puesta en marcha, la densidad objetivo de la pulpa era cercana a 20-25% de sólidos con una producción volumétrica de ~1,5 m<sup>3</sup>/hr. La tasa de alimentación relativamente baja observada en la fase de puesta en marcha de la planta significó que el tiempo de residencia por reactor individual fuera de ~50 horas. Este tiempo de residencia fue relativamente largo ya que la extracción de calcopirita suele tardar menos de 48 horas.

La relación de aspecto relativamente cuadrado de los estanques de lixiviación oxidativa no era lo ideal, en términos de la utilización de oxígeno, ya que la altura hidrostática era sólo de 4 metros. Sin embargo, en la práctica se lograron excelentes utilizaciones de oxígeno.

Por otra parte, los estanques tampoco contaban con aislación durante la puesta en marcha y, en un comienzo, perdieron mucho calor. La aislación se les agregó más tarde para retener el calor y mejorar la cinética de la oxidación de sulfuros.



*Figura 3 –Reactores de lixiviación Albion Process™ en Sable*

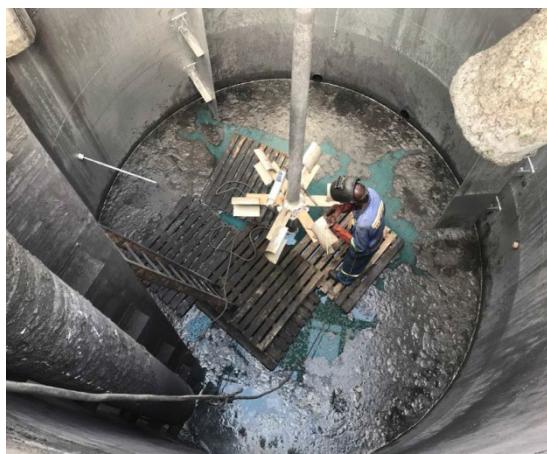
El IsaMill™ M100 utilizado en la planta fue modificado para que operara con refinos y los materiales húmedos fueron reemplazados por aceros dúplex resistentes al ácido. Las piezas de desgaste trabajaban con los componentes de goma existentes ya que las pruebas habían demostrado que éstos eran adecuados para moler en refino. La capacidad de moler en refino otorga gran flexibilidad operacional puesto que facilita el manejo del balance de aguas de la planta, reduce el requerimiento total de purga y aumenta el volumen de ácido del refino que se puede utilizar.

Dada las limitantes presupuestarias para el proyecto de refacción, en lugar de adquirir paletas de agitación especialmente diseñadas para máxima dispersión de gas, los caldereros de la planta diseñaron y fabricaron paletas de dispersión de gas para turbinas Smith, como se ve en la Figura 4.

El largo de las paletas fue rebajado para adecuarlo al consumo de potencia máximo disponible de 30kW de los motores.

La transferencia de masa de oxígeno se alcanzó con la ayuda de los HyperSparge™, el sistema de inyección supersónica de gas de propiedad de GT.

Entre las principales ventajas de HyperSparge™ se encuentran: hasta 90% de utilización de oxígeno y fáciles de extraer desde el estanque en vivo por un único operador, en caso de inspección y mantenimiento. Los dos primeros reactores de lixiviación fueron equipados con dos unidades de HyperSparge™ cada uno. La imagen de la Figura 5 muestra un inyector instalado.



*Figura 5 – Instalación agitador de dispersión de gas*



*Figura 4 –HyprSparge™ de GT instalado*

Con el fin de retener el máximo calor posible dentro de las naves, los caldereros de la planta construyeron e instalaron tapas en los reactores y, más tarde, material aislante en las paredes externas. La Figura 6 muestra una imagen de la parte superior del reactor de lixiviación oxidativa 1.



*Figura 6 – Reactor de lixiviación 1 Albion Process™*

#### Desempeño de Sable

La puesta en marcha del circuito tuvo lugar a mediados de noviembre de 2017 y fue terminada entre 4-6 semanas. Como se mencionó en la sección anterior, este período se diseñaron y fabricaron los estanques y agitadores. Al concluir este período se había logrado una extracción de cobre superior al 99% con los reactores de lixiviación Albion Process™.

En la Tabla 11 se aprecia un resumen de los resultados obtenidos en extracción de cobre. Las recuperaciones están expresadas como recuperación a través de la etapa de lixiviación Albion Process™ más que como recuperaciones generales de la planta. Por lo general, las pérdidas de cobre hacia finales del circuito fluctúan entre 2-3%, con pérdidas para el circuito de purga de refino de cobalto.

*Tabla 11 – Resultados de lixiviación en Sable*

Ítem	Unidad	Valor
Cabeza Cu	% Cu	29 -31
Cabeza Cu	% Sólidos	44 - 46
Residuo Cu	% Cu	0,4 – 0,6
Residuo Cu	% Sólidos	5 - 7
Recuperación Cu	%	99 – 99,5

El fierro total de la descarga de lixiviación se redujo a 5 g/L, aproximadamente, después de la precipitación de fierro. Durante la puesta en marcha, el bajo nivel de fierro en la PLS final permitió al equipo de la planta baipasear la planta de extracción por solvente y electroobtener el cobre directamente desde la PLS. El circuito de electroobtención tenía capacidad más que suficiente y pudo funcionar a menor amperaje y a menor densidad de corriente lo cual permitió operar sin el circuito SX. La fase de puesta en marcha de la planta produjo 120 toneladas de cátodo LME Grado A, a partir de 600 toneladas de alimentación de concentrado. La Figura 7 muestra la primera producción de cobre.



**Figura 7 – Cátodo de cobre LME Grado A producido en Sable**

## CONCLUSIONES

La planta Albion Process<sup>TM</sup> de Sable logró su primer objetivo que era probar el sistema Albion Process<sup>TM</sup>, desde el punto de vista comercial, y demostrar la capacidad de la tecnología para procesar, exitosamente, una gama de especificaciones de concentrados. El material recibido se encontraba en el extremo más refractario de la base de diseño de la planta y, aún así, la planta fue capaz de producir a una tasa de extracción de cobre superior al 99%.

El presupuesto para la modernización de Albion Process<sup>TM</sup> era bajo y, pese a contar con recursos y tiempo limitados, el resultado fue exitoso. Las conversiones de bajo capital de plantas de óxido existentes, similar a lo que se logró en Sable, serían muy convenientes de aplicar en actuales operaciones de lixiviación de óxidos que transitan a depósitos transitorios y de sulfuros o para la conversión de procesos configurados como circuitos de lixiviación bacterial a Albion Process<sup>TM</sup>. Sable es un claro ejemplo de esa transición.

Con la primera instalación comercial para la lixiviación de concentrado de cobre altamente refractario Albion Process<sup>TM</sup> entra a un promisorio nuevo período. Dentro del Grupo Glencore, esta confirmación de que se trata de una tecnología de bajo costo, flexible, robusta y críticamente segura ha abierto oportunidades de expansión.

## REFERENCIAS

Christensen, P.C. y Dysert, L.R, 2005, Recommended Practice No. 18R-97 Cost Estimate Classification System – As Applied in Engineering, Procurement and Construction for the Process Industries, Asociación Internacional para el Avance de la Ingeniería de Costos (AACEI).

Hourn M. y Turner D.W., 2010, Albion Process for treatment of refractory ores, Actas de Conferencia ALTA, Perth, Australia, Junio, 2010.

Hourn M. y Turner D.W., 2012, Commercialisation of the Albion Process, Actas de Conferencia ALTA, Perth, Australia, Junio, 2012.

Hourn M., Voigt, P. y Turner D.W., 2014, Development of the Albion Process plant to treat refractory concentrates from the GPM Gold Project, Conferencia de Hidroprocesos, Viña del Mar, Chile, Julio, 2014.

Senshenko A.Y., Aksenov A.V., Vasiliev A.A. y Seredkin, Y.G., 2016, Technology for processing of refractory gold-containing concentrates based on ultrafine grinding and atmospheric oxidation, Actas de Conferencia IMPC (no publicado aún), Montreal, Canadá, Septiembre, 2016.

Voigt, P., Hourn, M., Mallah, D. y Turner, W., 2015, Commissioning and ramp up of the Albion Process at the GPM Gold Project, Actas de Conferencia World Gold, Johannesburg, Sudáfrica, Octubre 2015.

Voigt, P., Hourn, M. y Mallah, D., 2016, Treatment of low grade materials, Actas de Conferencia MINEX, Moscú, Federación Rusia, Noviembre 2016.