



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS PARA CALENTAR REFINO DE UNA PILA DE BIOLIXIVIACIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL QUÍMICO

MATÍAS ARTURO ORTEGA SILVA

PROFESOR GUÍA:
TOMÁS VARGAS VALERO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
FRANCISCO GRACIA CAROCA
RAÚL GUZMÁN GUTIÉRREZ

SANTIAGO DE CHILE
OCTUBRE 2012

*To Eva, the moon of my life
and Gaspar, my sun-and-stars.*

Índice de contenidos

Índice de contenidos	iii
Índice de tablas	v
Índice de figuras.....	v
1. Resumen.....	vii
2. Introducción	1
2.1. Antecedentes generales.....	1
2.2. Motivación.....	5
2.3. Descripción del proyecto	6
2.4. Calderas	8
2.5. Calentadores eléctricos.....	10
2.6. Colectores cilindro-parabólicos	11
2.7. Modelamiento de la pila	13
3. Objetivos	17
3.1. Generales	17
3.2. Específicos.....	17
4. Metodología	18
4.1. Definición de caso base	18
4.2. Aporte de calor.....	18
4.3. Tamaño de tecnologías.....	18
4.4. Evaluación técnica	18
4.5. Evaluación económica	19
5. Resultados	20
5.1. Evaluaciones técnicas.....	20
5.2. Evaluaciones económicas.....	34
6. Conclusiones	39
7. Acciones de continuidad	41
8. Referencias.....	42
9. Anexos.....	46

9.1.	Explicación de un modelo de biolixiviación.....	46
9.2.	Análisis de relación entre días de operación y extracción total.....	52
9.3.	Modelo de Bird.....	53
9.4.	Cálculo del ángulo de incidencia	54
9.5.	Eficiencia de colectores cilindro-parabólicos	56
9.6.	Potencia térmica	57
9.7.	Flujo de caja para colectores cilindro-parabólicos en el caso +10 °C	58

Índice de tablas

Tabla 1: Antecedentes de la pila en estudio	20
Tabla 2: Antecedentes climáticos de la zona.....	20
Tabla 3: Características del refino	21
Tabla 4: Tamaño de las instalaciones para calentar en +5 y +10 °C	21
Tabla 5: Características del fluido intermedio.....	24
Tabla 6: Características del fluido térmico.....	24
Tabla 7: Resumen de resultados de evaluación económica al calentar el refino en 5 °C	34
Tabla 8: Resumen de resultados de evaluación económica en caso +10 °C	34
Tabla 9: Resumen de inversiones para +5 y +10 °C en las distintas tecnologías de calentamiento	36
Tabla 10: Unidades y valores para un modelo estándar de biolixiviación	51
Tabla 11: Eficiencia según ángulo de incidencia	56

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de una pila de biolixiviación que muestra la aireación, riego de refino y recolección, distribución y recirculación de PLS.....	2
Figura 2: Esquema del flujo de cobre entre lixiviación y electro obtención [4]	3
Figura 3: Esquema de crecimiento de pila a partir del plan de carga	3
Figura 4: esquema de lo que sucede a nivel microscópico en la pila [5]	4
Figura 5: Leyes de cobre total y soluble de la minera entre los años 2011 y 2026.....	5
Figura 6: gráfico que muestra una tendencia creciente entre la temperatura del riego y la recuperación de cobre [8]	6
Figura 7: esquema de calentamiento con circuito intermedio	7
Figura 8: esquema de una caldera pirotubular	8
Figura 9: Caldera CBEX Premium marca Cleaver-Brooks [9]	9
Figura 10: Caldera eléctrica Cleaver-Brooks [14]	10
Figura 11: Diagrama de partes y concentración solar en colectores cilindro-parabólicos [17] ...	12
Figura 12: esquema de ángulo de incidencia del Sol	12
Figura 13: fotografía de Andasol 1 en construcción con nieve [23].....	13
Figura 14: Concentraciones de Cu ²⁺ en PLS y refino según registros y según modelo [31]	14
Figura 15: esquema de calentamiento de refino	15
Figura 16: extracción de cobre para distintos períodos en el caso base	16
Figura 17: esquema de metodología a seguir para el desarrollo de la ingeniería conceptual	18
Figura 18: esquema de dimensiones de un colector cilindro-parabólico [28].....	22
Figura 19: diagrama de largo y ancho de un lazo de colectores donde la flecha representa el sentido del flujo	23

Figura 20: aumento de temperatura en el refino para cuatro días representativos, correspondientes a +5 °C.....	25
Figura 21: aumento de temperatura en el refino para cuatro días representativos, correspondientes a +10 °C.....	26
Figura 22: aporte de temperatura en promedio diario durante el año para +5 y +10 °C.....	26
Figura 23: esquema de riego, recirculación y restricciones en la biolixiviación de pilas ROM [24]	27
Figura 24: área disponible, diferencia de cotas y crecimiento de la pila	28
Figura 25: ejemplo de layout en área cercana a las pilas [29]	29
Figura 26: Se aprecia una tendencia creciente en la temperatura del refino	29
Figura 27: temperatura de refino entre 2006 y 2025 (eje horizontal: mes-año) para +5 °C donde la fecha está en formato mes-año [30]	30
Figura 28: temperatura de refino entre 2006 y 2025 (eje horizontal: mes-año) para +10 °C donde la fecha está en formato mes-año [30]	30
Figura 29: eficiencia de SX dependiendo de la concentración de Cu^{2+} en el PLS.....	31
Figura 30: extracción promedio para el período de evaluación de 15 años [30].....	32
Figura 31: caudal de riego y de PLS que pasa a SX.....	33
Figura 32: toneladas de cobre que SX le entrega a EW cada año durante el periodo de evaluación [31]	35
Figura 33: ingresos por cobre adicional que se extrae por el aumento de temperatura en +5 y +10 °C	36
Figura 34: esquema de fenómenos considerados en el modelamiento de la pila con Q^{EV} , Q^{ON} y Q^{OFF} , los calores de evaporación, entrada y salida [24]	46
Figura 35: La extracción promedio es 37,43%. Período comprendido entre marzo de 2006 y septiembre de 2009. Cada punto representa una franja	52
Figura 36: Ejemplo de resultados que entrega el modelo de Bird.....	53
Figura 37: Diagrama de ángulo de incidencia con respecto al vector normal al plano de apertura del colector [35].....	54
Figura 38: Diagrama que facilita el entendimiento del cálculo del ángulo de incidencia [35]	55
Figura 39: curva que describe la eficiencia en función del ángulo de incidencia	56

1. Resumen

La biolixiviación de cobre en pilas es un método en crecimiento para la extracción de minerales sulfurados. Es sabido que a medida que aumenta la temperatura, aumenta la extracción de cobre, ya que se activa la acción de microorganismos que pueden lixiviar la calcopirita.

El presente trabajo de título es una evaluación técnica y económica, a nivel de pre factibilidad, realizada en JHG Ingeniería, sobre distintas tecnologías para calentar el refino que se riega a las pilas de biolixiviación ROM de una compañía minera. En particular, se analizan tecnologías de tres fuentes energéticas: fósil (calderas), eléctrica (calentadores) y solar (colectores cilindro-parabólicos). Estas tecnologías se dimensionaron para aumentar la temperatura del refino en 5 y 10 °C cada vez que pase por el sistema de calentamiento, considerando un flujo de refino de 16.500 m³/h.

La información del efecto del aumento de temperatura sobre la extracción de cobre fue provista por una empresa externa, tomando en cuenta la influencia de distintos factores como el flujo de riego, la mineralogía, el plan de carga de la pila, la cinética y la termodinámica de las reacciones de lixiviación, el balance de masa y de energía y por supuesto la variación de la temperatura del refino. Todas estas variables fueron dadas por las condiciones de operación de la minera en estudio, bajo acuerdo de confidencialidad. Los resultados de esta modelación indican que existe aumento en la extracción de cobre al aumentar la temperatura del refino en 5 y 10 °C en 18.000 y 41.000 ton anuales respectivamente con respecto a la extracción base de 208.000 ton/año.

La evaluación económica al calentar el refino en 5 y 10 °C revela que la inversión es respectivamente de MUS\$ 16,8 y 29,8 para las calderas, MUS\$ 35,9 y 68,5 para los calentadores eléctricos y MUS\$ 284,0 y 568,0 para los colectores cilindro-parabólicos. Esta última, a pesar de ser la tecnología de mayor inversión, es la que entrega el VAN más alto para el periodo de evaluación de 15 años; MUS\$ 442,8 y 1.068,3.

2. Introducción

2.1. Antecedentes generales

2.1.1. La minería del cobre en Chile

El cobre se extrae por dos vías generales: la pirometalurgia y la hidrometalurgia. A grandes rasgos, la pirometalurgia trata los sulfuros de cobre, mientras que la hidrometalurgia puede tratar tanto sulfuros como óxidos. En este último caso, para el tratamiento de óxidos, el mineral de cobre se chanca, aglomera, dispone en pilas que pueden ser móviles y se riega con solución de ácido sulfúrico. En el tratamiento de sulfuros es posible no chancar el mineral, que se dispone tal como se extrajo de la mina.

Chile es el principal productor de cobre, participando del 34,9% de la producción mundial en los últimos 10 años (2001-2010), con un total de 5.418.900 toneladas el año 2010 [1]. Este amplio liderazgo es consecuencia de grandes cambios en la minería del país, que comenzaron en 1966 con la “chilenización del cobre”. Una de sus consecuencias fue que el Estado tendría el 51 por ciento de la propiedad de los yacimientos, lo que trajo consigo importantes inversiones tanto nacionales como internacionales [2]. En los años 80' se aplicó por primera vez en Chile la tecnología de extracción por solvente y electroobtención (SX/EW). En el 2010, la producción por esta vía alcanzó las 2.088.500 toneladas, lo que corresponde al 66,3% del total mundial [1].

Por lo mencionado, resulta importante para el desarrollo del país conocer y optimizar los procesos hidrometalúrgicos, más aún cuando se proyecta como la vía preferida de extracción a largo plazo por sus ventajas económicas y menores índices de contaminación [3].

2.1.2. La Hidrometalurgia del Cobre

Como se mencionó, tanto minerales oxidados como sulfurados se pueden recuperar por hidrometalurgia. Cuando se trata de minerales oxidados, el mineral se obtiene por lixiviación ácida, que consiste en la extracción de solutos por medio de un solvente. En el caso de los minerales sulfurados, es necesario recurrir a la biolixiviación, que es similar a la lixiviación pero que además incluye la acción de microorganismos para facilitar o permitir esta extracción. Esta memoria se centra en la biolixiviación como método de extracción.

En la biolixiviación es posible procesar minerales de leyes altas y bajas. Entre los de alta ley se cuentan sulfuros secundarios como covelina (CuS), calcosina (Cu_2S) y bornita (Cu_5FeS_4). A la hora de procesar minerales de baja ley, la mayoría de ellos se encuentra en minerales ROM o en botaderos. También es posible disponer de pilas ROM, como el caso de evaluación de esta memoria.

Existen distintos tipos de pilas. Las hay dinámicas, donde el mineral se carga y remueve continuamente. Hay pilas que una vez lixiviadas, quedan como botaderos. También se pueden distinguir por los procesos de conminución a los que se someten. En las pilas donde el mineral es chancado se emplea también un proceso de

aglomerado, donde se mezcla el previamente el mineral con la solución y los microorganismos para aumentar la superficie de contacto. A su vez, hay pilas que se construyen con el mineral tal como se extrajo de la mina, que son las mencionadas pilas ROM [3].

La duración de la lixiviación puede ser de meses o incluso años, dependiendo de la cantidad de mineral y de su ley.

Lo que se busca en estas pilas de lixiviación o biolixiviación es extraer el cobre por medio de una solución ácida que se riega en la parte superior. Al escurrir por la pila, la solución disuelve el cobre del mineral y al salir por la parte inferior, se recupera una solución rica en cobre y otros compuestos. A la solución ácida de riego, pobre en cobre, se le llama refino. A la solución de salida, cargada de cobre, se le llama PLS (*pregnant leach solution*, o solución de lixiviación impregnada). En la Figura 1 se puede ver un esquema de la lixiviación.

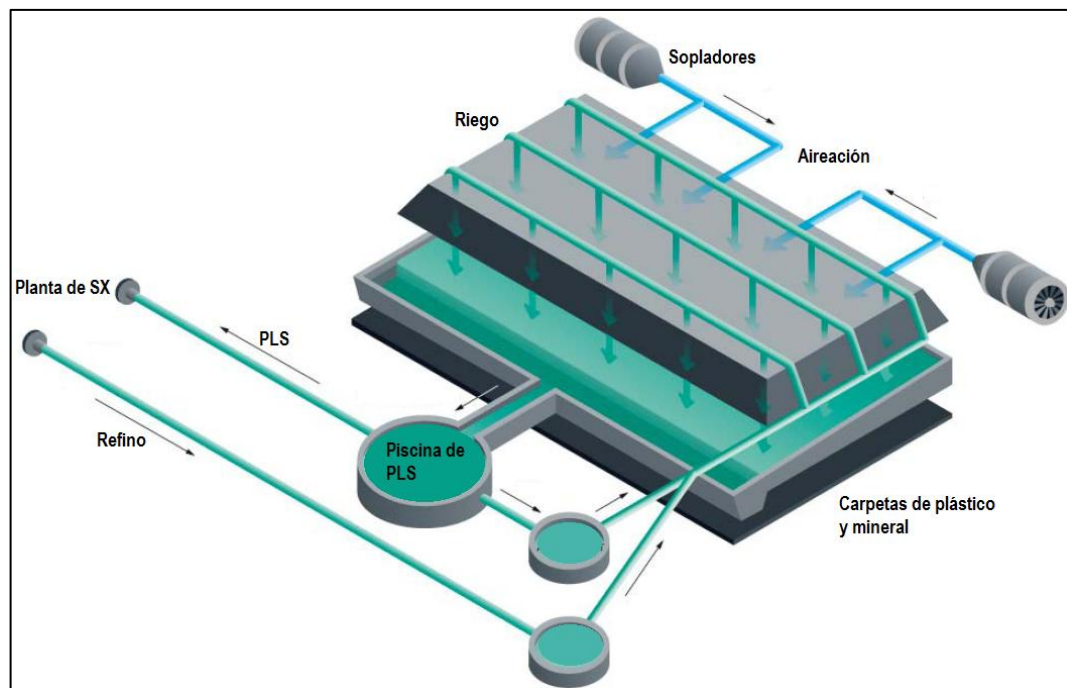


Figura 1: Esquema de una pila de biolixiviación que muestra la aireación, riego de refino y recolección, distribución y recirculación de PLS

Una vez que se obtiene el PLS, este se envía a extracción por solventes (SX) donde se remueve el cobre y vuelve a obtenerse refino, como se puede ver en la Figura 2:

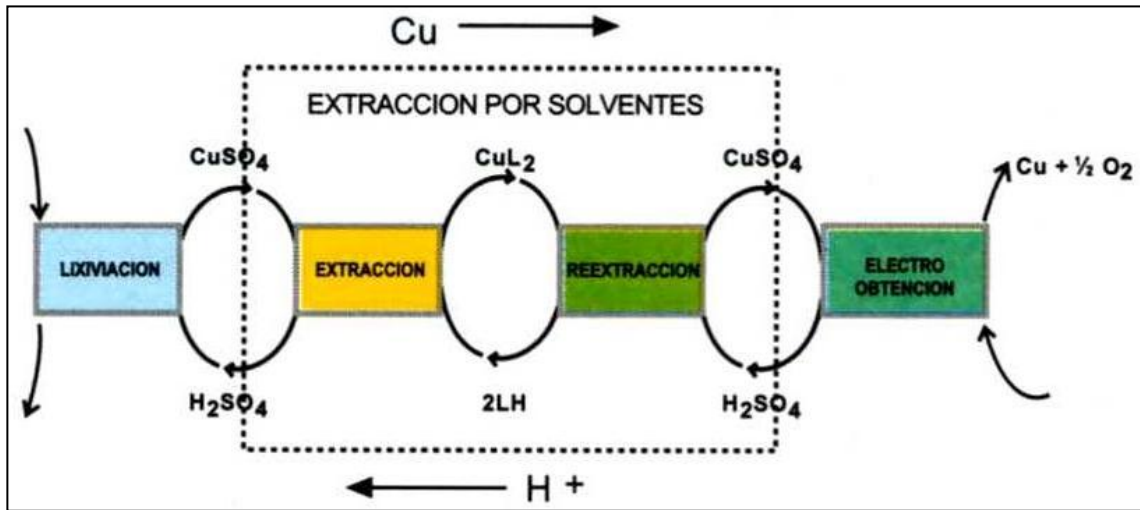


Figura 2: Esquema del flujo de cobre entre lixiviación y electro obtención [4]

Las ventajas de tratar el mineral en pilas ROM, como es el caso de estudio de esta memoria, pueden verse a continuación:

- Aprovechamiento de minerales de baja ley, que antiguamente se descartaban en botaderos
- Bajo costo de producción, incluyendo SX/EW: 0,5 \$US/lb
- Bajas emisiones de contaminantes
- Al finalizar la operación, la pila queda como botadero

La construcción de pilas ROM en la minera estudiada involucra el apilamiento del mineral en franjas de dos kilómetros de largo, 125 metros de ancho y 18 metros de altura. Una vez que se cumple el ciclo de lixiviación de 350 días, el riego se detiene. Durante este tiempo, otras franjas de iguales características han entrado en operación en el mismo piso. Eventualmente, se construyen nuevas franjas sobre las primeras. De esta forma, los pisos inferiores se riegan tantas veces como nuevos pisos se construyan, lo que aumenta la extracción total. Al finalizar el ciclo de vida, la misma pila agotada se convierte en el botadero [3].

En la Figura 3 se puede ver el esquema de crecimiento de la pila en estudio. En gris se aprecian las franjas en riego al año 2011 y en rojo las franjas futuras. Los cuadros de la izquierda son parte de la pila actual, mientras que los de la derecha pertenecen a una pila futura contigua.

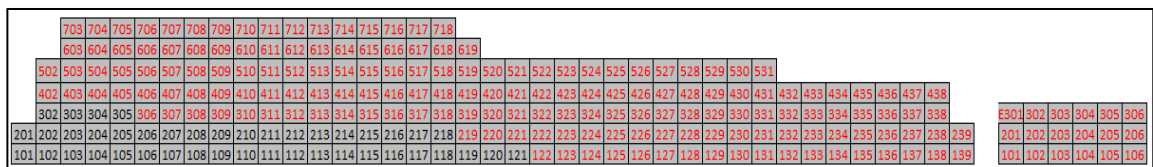
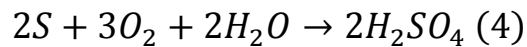
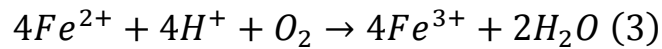
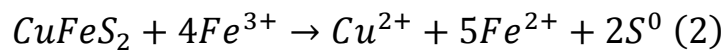
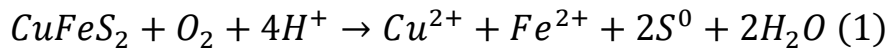


Figura 3: Esquema de crecimiento de pila a partir del plan de carga

Para la biolixiviación, dado que las bacterias consumen oxígeno, la pila debe contar con sopladores, que inyectan el aire en la base de la pila (ver Figura 1). Además existen sistemas de riego, recolección de PLS y piscinas. Es posible que parte del PLS se recircule a la pila y se mezcle con el refino antes de ser regado nuevamente debido a restricciones de flujo en la planta de SX.

Las reacciones que ocurren en la biolixiviación, de manera simplificada, son las siguientes [6]:



En las reacciones (1) y (2), la calcopirita se disuelve en presencia de oxígeno y férrico, lo que lleva el cobre a la solución en forma de ión cúprico y genera ferroso (ver Imagen 2). La reacción (3) está catalizada por bacterias, que en presencia de oxígeno consumen el ferroso y lo transforman en férrico, el que se vuelve a utilizar en la reacción (2). La reacción (4) es la formación de ácido sulfúrico, catalizada también por bacterias. El oxígeno llega a la pila gracias a sopladores que impulsan el aire desde la base. La Figura 4 muestra lo que sucede a nivel microscópico en la pila.

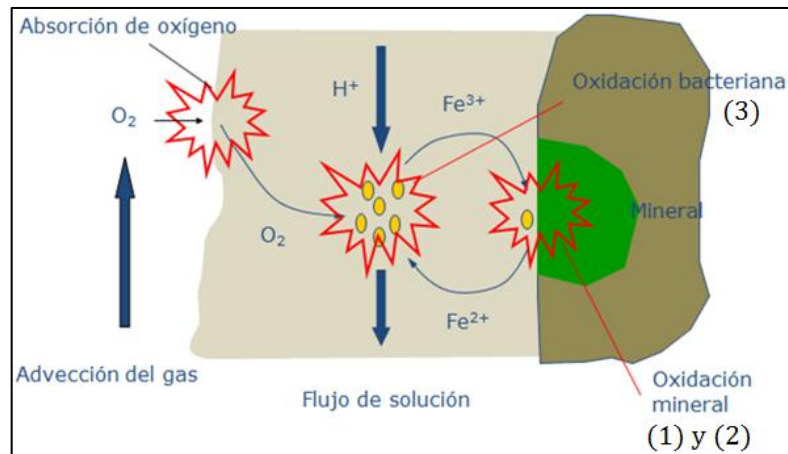


Figura 4: esquema de lo que sucede a nivel microscópico en la pila [5]

2.2. Motivación

La minera en estudio cuenta con mediciones mineralógicas que muestran que en los próximos años va a disminuir la ley de cobre soluble en ácido (ver Figura 5), a pesar de que se mantienen las leyes de cobre total. Esto se debe a una mayor presencia de calcopirita. Para mantener o aumentar los niveles de producción, la minera se ve obligada a tomar medidas que permitan lixiviar este mineral.

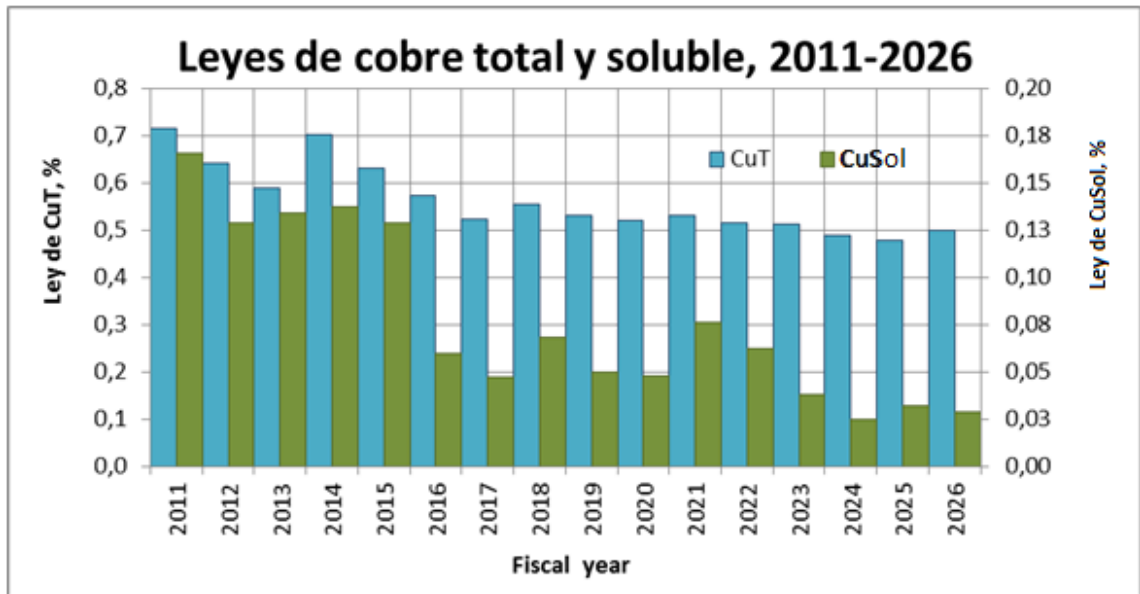


Figura 5: Leyes de cobre total y soluble de la minera entre los años 2011 y 2026

Existe información de que la lixiviación de calcopirita se acelera al aumentar la temperatura de la pila [7, 36, 37] (ver Figura 6). Con este fin se han investigado distintas tecnologías, como se puede ver en la sección Estado del arte (p. 6). En esta memoria interesa conocer y evaluar tecnologías que permitan aumentar la temperatura del seno de la pila por medio de calentar el refino que se riega. Por este motivo se hizo una evaluación técnico-económica a nivel de prefactibilidad en JHG Ingeniería sobre distintas tecnologías para calentar el refino que se riega a pilas ROM.

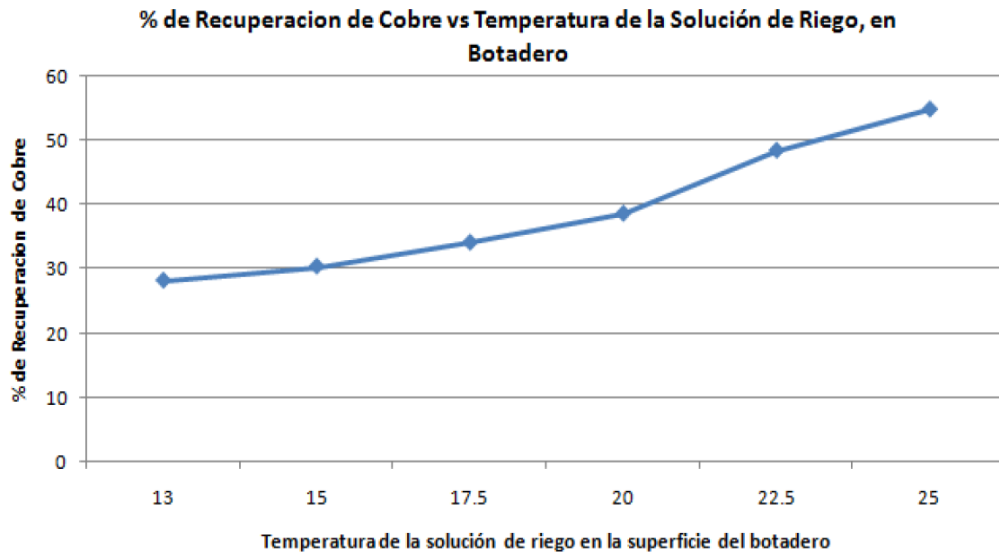


Figura 6: gráfico que muestra una tendencia creciente entre la temperatura del riego y la recuperación de cobre [8]

Por motivos de comparación, se evalúan tres tecnologías de distintas fuentes energéticas: solar, fósil y eléctrica, que corresponden a un campo de colectores cilindro-parabólicos, una caldera diesel y un sistema de calentadores eléctricos.

2.3. Descripción del proyecto

Se elige calentar el refino en 5 y 10 °C en cada pasada por la planta térmica para calentar la pila ya que otras formas de calentamiento podrían requerir serias modificaciones a la construcción de la misma. Calentar refino no representa mayor dificultad que calentar un flujo cualquiera, salvo que se trata de una solución ácida. A lo largo de esta memoria se le llama +5 y +10 °C al calentamiento de refino en 5 y 10 °C cada vez que pasa por la planta térmica.

2.3.1. Estado del arte

2.3.1.1. Inproheat calentamiento directo de refino

En 1995, la Compañía Minera Cerro Colorado implementó un sistema de calentamiento de refino por combustión directa y sumergida, que calienta el refino de 15 a 35 °C. El sistema tiene una potencia de 10 MBtu/h^a y debido a su éxito se encargó un segundo calentador de las mismas características [38].

^a M representa 10⁶

2.3.1.2. Calentamiento con vapor

Al inyectar vapor saturado junto con el aire de los sopladores sería factible calentar la pila. Una desventaja de este sistema es la cantidad de agua que se requiere para generar el vapor [36, 39].

2.3.2. Calentamiento por medio del refino

Mientras mayor sea la temperatura del refino, se genera más evaporación y mayor disipación de calor hacia el medioambiente. Para contrarrestar estos efectos, el caso en estudio considera que el riego se hace bajo la superficie de la pila y que además la pila se cubre con *termofilm*, que es un polímero aislante. El modelo de aumento de temperatura y de extracción considera pérdidas de calor en la pila.

El intercambio de calor no será directo. La planta térmica le entrega calor a un fluido térmico (en este caso, agua con glicol al 30%, ver propiedades en Tabla 6, p. 24), que a su vez calienta un circuito intermedio de agua (ver propiedades en Tabla 5, p. 24). Este fluido intermedio es el que le entrega calor al refino, con el objetivo de evitar cualquier mezcla de fluido térmico con refino para no perjudicar la pila ni el sistema de calentamiento.

Dicho sistema se puede ver en la Figura 7:

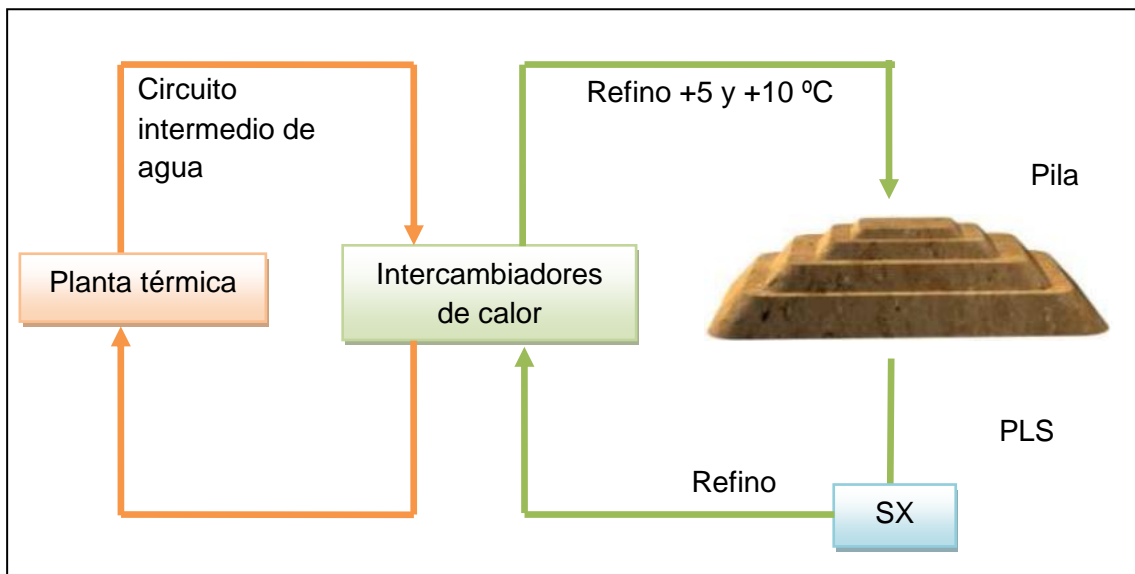


Figura 7: esquema de calentamiento con circuito intermedio

Entre los sistemas de intercambio de calor siempre debe existir una diferencia de temperatura que haga posible la transferencia.

El refino, al calentarse en 5 ó 10 °C por cada pasada, aumenta gradualmente su temperatura. Para garantizar que se mantenga el aumento en 5 ó 10 °C, es posible vincular la temperatura del refino con la temperatura del fluido de la planta térmica. Por

lo tanto, una de las condiciones de diseño es que a medida que aumente la temperatura del refino, también debe aumentar la temperatura del fluido de la planta térmica. Un ejemplo de esta situación se puede ver en la sección *Temperatura del fluido térmico relacionada con la temperatura del refino*, p. 32.

Cabe destacar que se trata de una pila creciente de 2.500 metros de largo, 2.000 metros de ancho y llegando en algunos casos hasta siete pisos de 18 metros de altura cada uno al final del periodo de evaluación, cuya producción al año 2010 superó las 200.000 toneladas de cobre.

2.4. Calderas

Las calderas son equipos de calentamiento tradicionales que queman petróleo para calentar agua y obtener, en la mayoría de los casos, vapor saturado.

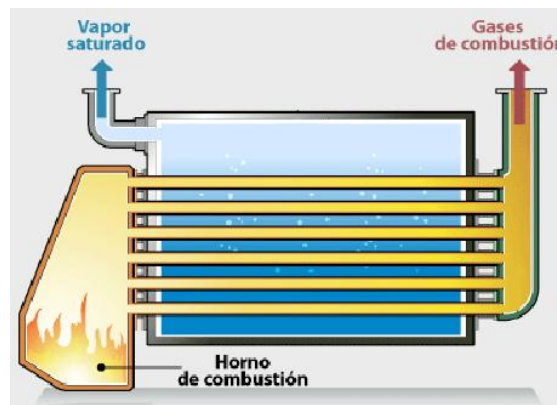


Figura 8: esquema de una caldera piro-tubular

El combustible se quema en un horno de combustión, generando gases calientes. Estos gases pasan por tubos al interior de un contenedor de agua cerrado. Por conducción, el calor de los gases se transfiere hacia el agua, calentándola. El agua caliente es impulsada hacia donde se desea utilizar su calor. En este caso, hacia los intercambiadores de calor del circuito intermedio de agua, como se aprecia en la Figura 8.

El tamaño de las calderas depende del requerimiento térmico del proceso y de las calderas que existan en el mercado. Una de las calderas de agua caliente más grandes es producida por Cleaver-Brooks. Con 1200 bhp (40 MBtu/h), el modelo CBEX Premium incluye un quemador totalmente integrado, posee alta eficiencia, puede lograr emisiones de NO_x menores a 9 ppm y es más pequeña que calderas similares [9]. Una imagen de esta caldera se puede ver en la Figura 9.



Figura 9: Caldera CBEX Premium marca Cleaver-Brooks [9]

Para el correcto funcionamiento de una caldera, esta no puede operar simplemente con agua de proceso. Afortunadamente, dado que se trata de un circuito cerrado, la cantidad de agua que hay que reponer es mínima y el agua tratada podría llegar en camiones, haciendo falta solamente un tratamiento de desgasificación.

La corrosión en calderas ocurre básicamente por la presencia de oxígeno y CO_2 en el agua. Otros factores como el esfuerzo del material, condiciones ácidas y sustancias químicas corrosivas también influyen y producen distintos tipos de corrosión.

Prevenir la corrosión depende del mecanismo de corrosión que se desee atacar. Mantener un pH apropiado ($\text{pH} > 8$), desairear y remover durezas son acciones que se deben tomar en este sentido [10].

Idealmente, un sistema cerrado de agua caliente está completamente sellado, incluyendo el piping, el intercambio de calor y los estanques de expansión. Estos estanques mantienen la proporción apropiada de aire y agua y otorgan un espacio para la expansión del líquido durante los ciclos de calentamiento. Si este sistema está inicialmente limpio, acondicionado apropiadamente y con mantenimientos periódicos para prevenir filtraciones, entregará un servicio eficiente y duradero.

El agua del sistema nunca debería ser drenada a menos que reparaciones, cambios en el sistema o el ensuciamiento de la misma lo hagan necesario. Cambiar el agua o agregar agua sin tratar alteran el balance de aire y agua.

Al llenar el sistema de agua caliente por primera vez, se debe lavar apropiadamente para limpiar impurezas de la instalación de cañerías, aceites de corte, residuos de soldadura, inhibidores de corrosión o simplemente suciedad en cañerías y fittings. Frecuentemente existe suficiente cantidad de estas impurezas como para degradarse y causar formación de gases y ácidos en el sistema de agua. Una vez que el sistema se contamina, el deterioro continúa, aparecen las filtraciones y aumenta el riesgo de que ocurran daños mayores [11].

El uso de una caldera de combustible implica un flujo constante de camiones de combustible, ya que la operación se encuentra en un lugar aislado. El combustible debe almacenarse en estanques que cumplan con todas las normas de seguridad.

Es común que las calderas se utilicen para generar vapor saturado. Sin embargo, este aspecto depende de los requerimientos térmicos del proceso. Típicamente, si se desea lograr temperaturas de entre 50 y 105 °C, se utilizan calderas de agua caliente. La presión de operación en estos casos puede estar entre 30 y 125 psig.

Las calderas de vapor, por otro lado, pueden alcanzar presiones entre 15 y 1.000 psig. La mayoría de ellas generan vapor saturado^b para aprovechar el calor latente o de condensación. El vapor sobresaturado^c se utiliza en aplicaciones donde no puede haber humedad, como en una turbina. Las aspas de esta podrían dañarse con las pequeñas gotas de agua [12].

2.5. Calentadores eléctricos

Los calentadores eléctricos pueden ser de distintos tipos. Entre los más comunes, están los de inmersión, los de circulación y las calderas eléctricas. Los de inmersión son resistencias sumergidas en el líquido que se desea calentar. La principal desventaja está en que si no se cuenta con agitación, el calor tarda en llegar a todo el líquido y si éste se encuentra a la intemperie, gran parte del calor se disipa hacia el ambiente.

Los calentadores eléctricos de circulación se acoplan a la corriente que se desea calentar y el líquido pasa por la resistencia. Esto soluciona las desventajas del calentador de inmersión [13].



Figura 10: Caldera eléctrica Cleaver-Brooks [14]

^b Temperatura y presión en el punto de ebullición.

^c Temperatura y presión por sobre el punto de ebullición.

Las calderas eléctricas, por su parte, pueden considerarse como estanques cerrados con resistencias eléctricas por los que pasa agua (ver Figura 10). Las resistencias, al estar calientes, transmiten el calor al agua, que sube de temperatura.

Una ventaja de los calentadores eléctricos es que la temperatura se puede controlar con gran precisión, no hay procesos de combustión directamente involucrados y prácticamente la totalidad de la energía eléctrica se transforma en energía térmica útil para el proceso [15].

Dentro de las desventajas de este sistema se cuenta su alto consumo eléctrico. Generalmente, la energía eléctrica es más cara que la energía térmica. En una termoeléctrica, por ejemplo, solamente el 30% de la energía térmica producida por la combustión se transforma en energía eléctrica [15]. Luego, podría decirse que calentar utilizando electricidad es tres veces más costoso que calentar utilizando combustibles. Sin embargo, una caldera moderna llega a un 88% de eficiencia y podría ser más fácil contar con la energía eléctrica que contar con el combustible, por lo que también se debe evaluar esta alternativa de calentamiento.

2.6. Colectores cilindro-parabólicos

La tecnología elegida para concentrar la energía solar es la de Colectores Cilindro-Parabólicos, debido a su alta eficiencia y a que existen una serie de plantas en operación, con experiencias exitosas [16].

Se trata de espejos cóncavos que dirigen los rayos de sol hacia un tubo que está en el foco de los espejos, por cuyo interior pasa un fluido térmico que absorbe la energía solar (ver Figura 11). En este caso de estudio, el fluido térmico será una solución de agua-etilenglicol al 30% (de aquí en adelante “agua-glicol”, ver propiedades en Tabla 6, p. 24). A diferencia de las centrales termosolares donde se usa un aceite térmico, el campo considerado no se mantendrá caliente ni fluyendo en las horas que no haya Sol, por lo que si el fluido fuera aceite, se congelaría. Además, las temperaturas de operación son menores; entre 100 y 170 °C en vez de entre 400 y 600 °C.



Figura 11: Diagrama de partes y concentración solar en colectores cilindro-parabólicos [17]

Estos espejos poseen un sistema de seguimiento automático del Sol y generalmente están orientados en el eje Norte-Sur, ya que de esta forma pueden “mirar” directamente al Sol desde el amanecer hasta el atardecer. Este tipo de seguimiento le da mayor eficiencia en comparación con otras tecnologías solares fijas [18], ya que el ángulo de incidencia (ver Figura 12) se minimiza en todo momento (ver Anexo Cálculo del ángulo de incidencia, p. 54).

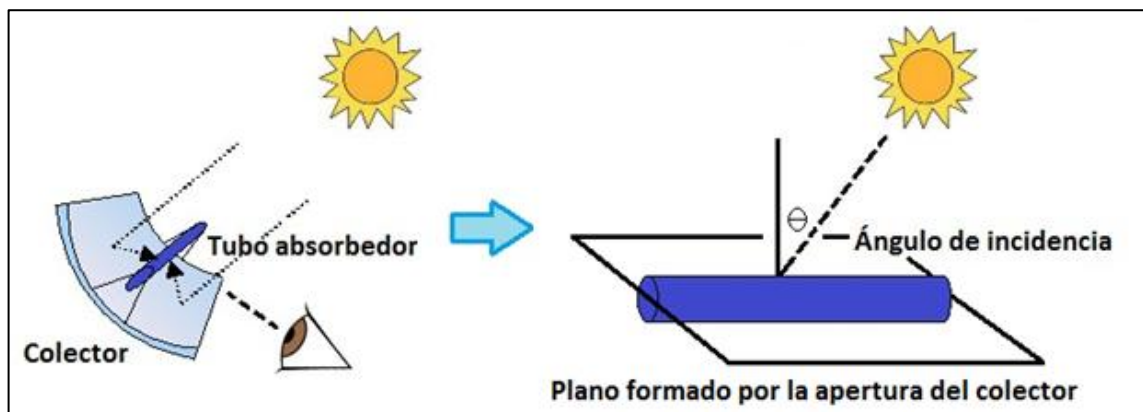


Figura 12: esquema de ángulo de incidencia del Sol

En la actualidad, esta tecnología se utiliza para generar energía eléctrica. En ocasiones, se trata de procesos híbridos de gas natural y energía solar. Comúnmente, estas plantas poseen un sistema de almacenamiento de calor con sales fundidas, para continuar operando durante la noche. A nivel mundial, al año 2010 hay más de 500 MW eléctricos instalados y se estima que para el año 2020 habrá al menos 20.000 MW [19].

Al usar los colectores por su energía térmica, la energía que se aprovecha llega a 6,83 kWh/m²/día, considerando una radiación directa normal^d en el Desierto de Atacama de 9,36 kWh/m²/día en promedio anual [20]. A modo de referencia, en España existen más de veinte centrales termosolares de 50 MW cada una en sectores donde la radiación directa normal es de 8,87 kWh/m²/día. Este valor no considera que llueva más de 50 días al año, con un promedio de precipitaciones anuales de 700 mm [21] (ver Figura 13). En el Desierto de Atacama, las precipitaciones no superan los 15 mm anuales y hay lugares donde no ha llovido en más de 400 años [22].



Figura 13: fotografía de Andasol 1 en construcción con nieve [23]

A diferencia de las centrales termosolares de energía que existen actualmente, los colectores solares de esta evaluación no van a considerar almacenamiento de calor.

2.7. Modelamiento de la pila

Para tener una noción del comportamiento de la pila, especialmente en cuanto a la temperatura que alcanza y a la extracción de cobre, se utiliza el modelo de De Re Metallica (DRM), llamado DRM.BIOLEACH [24].

Este modelo recibe como input las propiedades del mineral y la solución de riego, variables operacionales, características de las franjas, leyes y mineralogía. Como resultado entrega variables como la concentración de Cu²⁺, H⁺, Fe³⁺ y Fe²⁺, la extracción de cobre y la temperatura a la que el PLS sale de la pila, por el período que el usuario defina.

El modelo de DRM está basado en datos históricos de la minera en estudio y se calibra con estos datos. A la hora de obtener resultados, los datos modelados son prácticamente iguales a los datos históricos. En efecto, la minera en estudio utiliza los resultados de este modelo para hacer sus planificaciones de explotación y de producción. Por ejemplo, en la Figura 14 se pueden ver en celeste los datos históricos de Cu²⁺ en el PLS y refino y su similitud con los datos modelados.

^d Radiación en un plano normal a los rayos del Sol

En el Anexo 9.1 se pueden ver las ecuaciones que rigen un modelo de biolixiviación en pilas similar al de DRM.

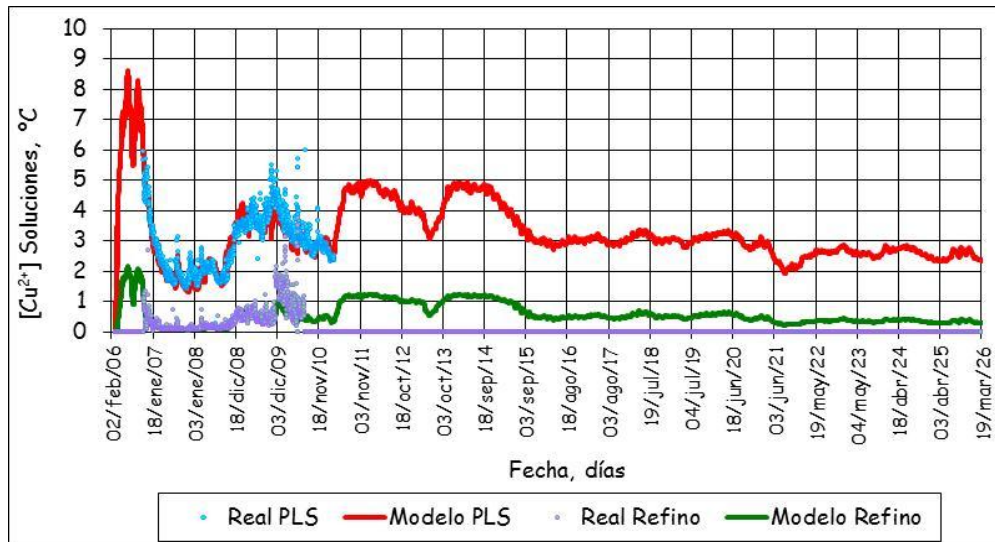
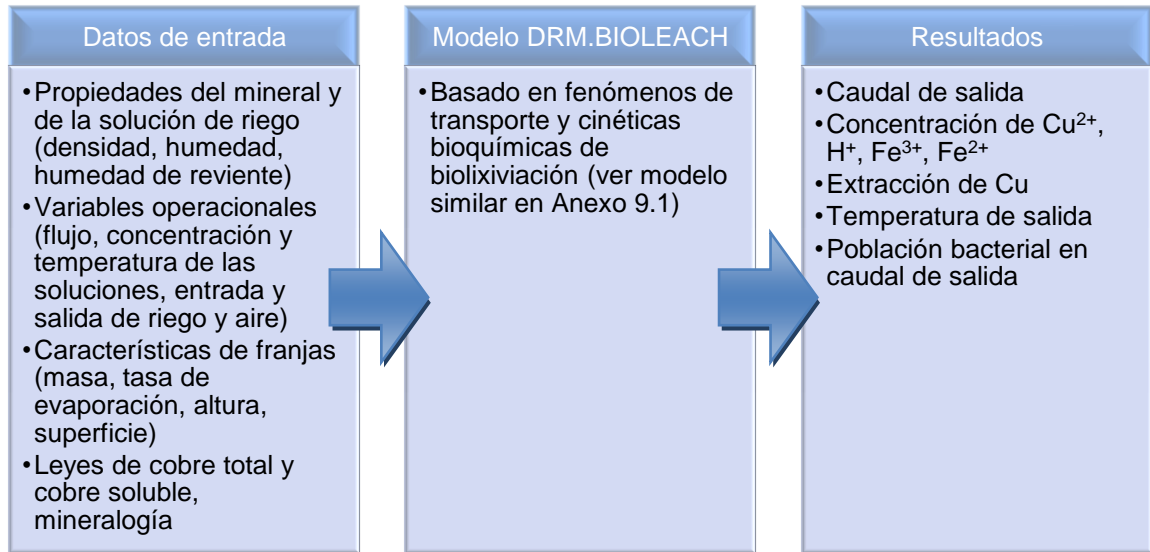


Figura 14: Concentraciones de Cu^{2+} en PLS y refino según registros y según modelo [31]

2.7.1. Pasos de la modelación



El modelo se ejecuta tres veces: caso base, +5 °C y +10 °C. Por ejemplo, para el caso +5 °C, cada vez que el modelo resuelve la temperatura de riego (T_i) para el tiempo siguiente (T_{i+1}), le suma 5 °C en el punto ΔT . La Figura 15 es una referencia para entender en qué parte del cálculo se incorpora el aumento de temperatura.

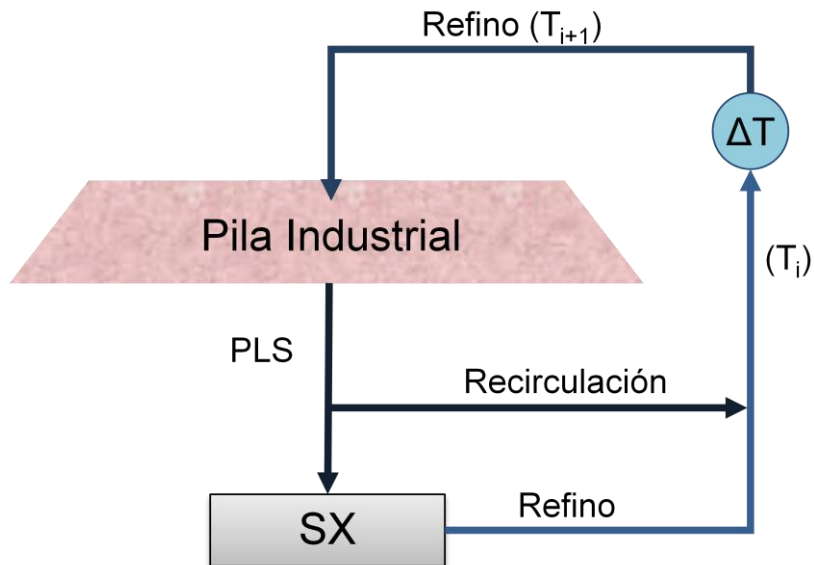


Figura 15: esquema de calentamiento de refino

2.7.2. Cálculo de extracción

El modelo considera que cada franja de la pila se riega por 350 días. La cantidad inicial de cobre en cada franja (Cu_{pila} , [ton]) está dada por la masa de la pila (M_{pila} , [ton]) multiplicada por la ley de cobre (ley_{Cu} , [ton]):

$$Cu_{pila} = M_{pila} \times ley_{Cu}$$

La cantidad de cobre extraído (Cu_{ext} , [ton]) para el día i está dado por:

$$Cu_{ext,i} = F_{PLS} \times Cu_{PLS} - F_{refino} \times Cu_{refino}$$

Con F_{PLS} el flujo de PLS diario en m^3 , Cu_{PLS} la concentración de cobre en el PLS de ese día en ton/m^3 , F_{refino} el flujo de refino diario en m^3 y Cu_{refino} la concentración de cobre en el refino de ese día en ton/m^3 .

Luego, la extracción para cada franja está dada por:

$$\frac{\sum_{i=0}^n Cu_{ext,i}}{Cu_{pila}} \times 100 = \% \text{ extracción}$$

Se puede obtener la extracción para cada día del período de riego, cambiando el valor de n entre 1 y 350.

Para la extracción total en el período de evaluación se promedian las extracciones diarias de cada franja. Con esto, se obtienen resultados como el de la Figura 16, donde FY12-14 representa la extracción promedio en los años fiscales 2012, 2013 y 2014.

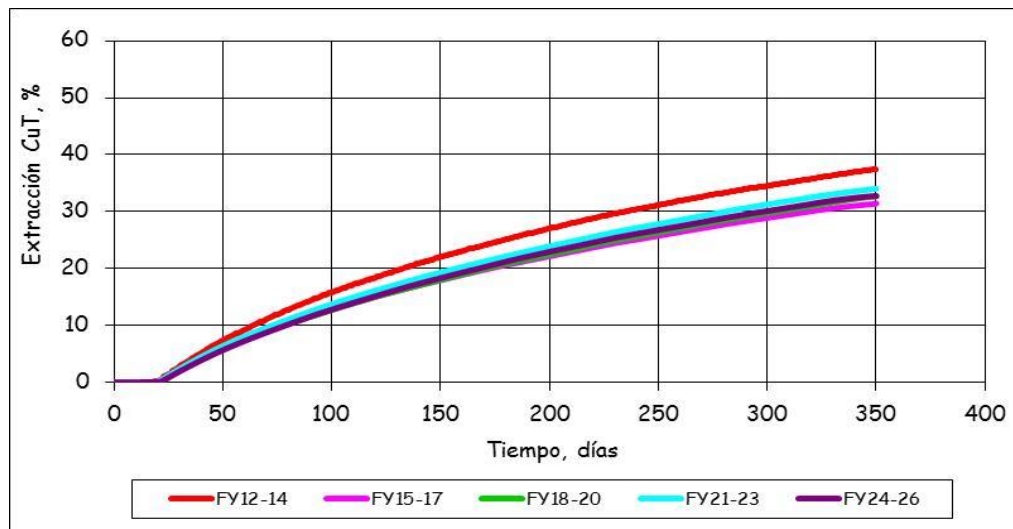


Figura 16: extracción de cobre para distintos períodos en el caso base

3. Objetivos

3.1. Generales

- Evaluar la rentabilidad de distintas tecnologías para aumentar la recuperación de cobre en una pila ROM mediante el aumento de la temperatura del refino

3.2. Específicos

- Evaluar el calentamiento de refino mediante calderas, calentadores eléctricos o colectores solares cilindro-parabólicos
- Definir la alternativa de calentamiento más conveniente
- Desarrollar una evaluación técnico-económica a nivel de prefactibilidad que sea útil para la toma de decisiones sobre las siguientes etapas que debería seguir un proyecto

4. Metodología

La metodología para llegar a la evaluación técnico-económica se describe a continuación (ver Figura 17). Es una metodología tradicional de un proyecto de ingeniería conceptual.



Figura 17: esquema de metodología a seguir para el desarrollo de la ingeniería conceptual

4.1. Definición de caso base

De acuerdo a las condiciones de operación de la minera y su pila ROM de biolixiviación, las condiciones son un flujo de refino de 16.500 m³/h que al año 2010 se encuentra a 28,7 °C. El resto de las condiciones de operación se pueden ver en la sección Caracterización de situación base, p. 20.

4.2. Aporte de calor

Dado el objetivo de aumentar la recuperación de cobre, se decide aumentar la temperatura del refino en 5 ó 10 °C cada vez que este pasa por la planta térmica. Al relacionar este aumento de temperatura con el flujo de refino y su calor específico, se conoce la cantidad de calor o energía térmica que va a ser necesario entregarle al líquido. El aporte de calor se considera continuo, a pesar de que el calentamiento solar es solo diurno, ya que se toma un promedio diario. La temperatura del refino aumenta en 10 °C, por ejemplo, cada vez que el fluido pasa por el sistema de calentamiento. A medida que la temperatura del fluido térmico aumenta a lo largo del tiempo, también lo hace la temperatura del refino (explicado en sección 5.1.8. Temperatura del fluido térmico relacionada con la temperatura del refino, p. 32).

4.3. Tamaño de tecnologías

Conocida la energía térmica necesaria, se dimensionan las distintas tecnologías que se desea evaluar.

En primer lugar, en el mercado se buscan distintos tamaños de calderas, calentadores o campos termosolares. Conocidos los tamaños existentes en unidades de energía, basta dividir la energía térmica por estos valores. El resultado, por ejemplo, es que se requieren 9 calderas de 1200 bhp (40 MBtu/h) para el caso +5 °C.

4.4. Evaluación técnica

La evaluación técnica consiste en todos los análisis que deben hacerse para implementar cada tecnología de calentamiento de acuerdo a la demanda térmica. Por ejemplo, para los colectores cilindro-parabólicos, se determina que para +5 °C

requieren un área de 337.000 m² y la evaluación técnica determina que considerando espacios entre colectores, esta área llega a 965.000 m².

El modelamiento de la pila también es parte de la evaluación técnica. El modelo de DRM calcula la recuperación de cobre por cada franja de la pila, para 15 periodos de 350 días, para 3 casos: sin aumento de temperatura (caso base), aumentando la temperatura en 5 °C en cada pasada por la planta térmica (+5 °C) y aumentando la temperatura en 10 °C en cada pasada por la planta térmica (+10 °C). Para efectos del modelo, a la variable “temperatura de refinó” se le suman +5 ó +10 °C en cada iteración. Para cada caso y cada periodo de 350 días, el modelo entrega la concentración de cobre en el PLS. Al comparar el cobre total que había inicialmente en la pila con el cobre que se extrajo en cada periodo de 350 días, se obtiene la extracción. Por ejemplo, la extracción promedio para los 15 períodos de 350 días en el caso +5 °C fue de 37,9%.

4.5. Evaluación económica

Con los resultados de la evaluación técnica se estiman las inversiones y costos operacionales, lo que se incorpora a un flujo de caja. Los principales resultados de esta etapa son los indicadores económicos como el VAN, IVAN, TIR, o *Payback*, que permitirán tomar decisiones sobre qué alternativas son más convenientes.

5. Resultados

A continuación se describen los principales resultados, incluyendo las evaluaciones técnicas que se hicieron de las tecnologías y las evaluaciones económicas.

5.1. Evaluaciones técnicas

5.1.1. Caracterización de situación base

La primera parte de este trabajo fue definir y fijar los parámetros técnicos de evaluación (ver Tablas 1, 2 y 3), lo que a su vez genera el caso base, es decir, la situación contra la cual se comparan las posibles mejoras o variaciones operacionales. En esta memoria, el parámetro que varía es la temperatura del refino.

5.1.1.1. Parámetros técnicos de evaluación

Largo de pilas	2.000 m
Ancho de pilas	2.625 m
Ancho de franjas	125 m
Altura de franjas	18 m
Franjas en el primer piso (en riego)	21 (2)
Franjas en el segundo piso (en riego)	17 (8)
Franjas en el tercer piso (en riego)	2 (3)
Cantidad de mineral por franja	7x10 ⁶ ton
Granulometría del mineral	ROM
Flujo promedio de irrigación	5,16 L / h m ²
Flujo de refino máximo	16.500 m ³ /h
Flujo de PLS máximo a SX	10.000 m ³ /h
Ventiladores	50 x 25.000 Am ³ /h
Piscinas de refino	4 x 27.000 m ³
Piscinas de PLS	4 x 54.000 m ³
Piscinas de emergencia	400.000 m ³

Elevación	3082 msnm
Radiación global	7,02 kWh/m ² /día
Radiación directa normal	9,36 kWh/m ² /día
Temperatura promedio	10 °C
Presión atmosférica	704 mB
Humedad relativa	22,7%
Velocidad del viento	4,2 m/s

Tabla 3: Características del refino

Flujo	16.500 m ³ /h
Temperatura inicial	28,7 °C
Calor específico	3,8 kJ/kg/K
Densidad	1.100 kg/m ³

- Eficiencia térmica de colectores cilindros parabólicos de tubo al vacío: 80% (ver Anexo 9.5: Eficiencia de colectores cilindro-parabólicos, p. 56)
- Colectores absorben y entregan calor durante el día
- Circuito primario de colectores utiliza agua con etilenglicol al 30%
- El flujo responde a la capacidad instalada de las bombas, que se relaciona con la tasa de riego que se desea y a la superficie de las franjas en riego
- Ciclo de riego de 350 días (ver Anexo Relación entre días de operación y extracción total, p. 52)

5.1.2. Determinación del tamaño de la instalación considerando aporte de calor constante

Se desea calentar 16.500 m³/h en 5 ó 10 °C en cada paso por la planta térmica. La energía que hay que entregar viene dada por:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

El flujo másico y las propiedades del refino se conocen, entonces resulta que se requieren 96 MWt para calentar el refino en 5 °C y 192 MWt para calentarlo en 10 °C.

A continuación se muestra la Tabla 4 que resume los resultados de esta parte. Posteriormente se describe cómo se obtuvieron estos resultados.

Tabla 4: Tamaño de las instalaciones para calentar en +5 y +10 °C

Aumento de temperatura en refino [°C]	5	10
N° de calderas de 11,8 MW	9	17
N° de calentadores de 3.360 kW	29	58
N° de colectores de 5,77 x 12 m ²	4.870	9.740
Área efectiva de colectores [m ²]	337.000	674.000
Área zona de colectores [m ²]	965.000	1.930.000

5.1.2.1. Calderas

Se considera que una caldera de petróleo liviano tiene una eficiencia térmica de 83%. En el mercado, una de las calderas de agua caliente más grandes es de 1200 bhp (40 MBtu/h), marca Cleaver-Brooks [26]. Se requieren 9 de ellas para llegar a 96 MWt y 17 para 192 MWt.

Se sabe que el poder calorífico inferior del petróleo liviano es 140.000 Btu/gal (39 MJ/L) [26]. Dado que la eficiencia de la caldera es 83%, se deben utilizar 345,7 gal/h para alcanzar los 48,4 MBtu/h que requiere cada caldera. Para 9 calderas, el consumo de combustible es de 10,7 m³/h y para 17, es de 21,3 m³/h.

5.1.2.2. Calentadores eléctricos

Como se vio anteriormente, la eficiencia de un calentador eléctrico puede considerarse 100%. Se encontraron calentadores de 3.360 kW [27]. Se requieren 29 de estos calentadores para llegar a 96 MWt y 57 de ellos para 192 MWt.

Dado que la eficiencia es 100%, el consumo de estos equipos es 96 y 192 MWe respectivamente.

5.1.2.3. Colectores solares

El dimensionamiento de los colectores solares depende de la superficie necesaria para generar la energía requerida. En primer lugar, al hablar de superficie de colectores, se le llama *área efectiva* A al área que ocupa la apertura del colector. En la Figura 18, $A = \text{Apertura} \times \text{Largo}$. Se le llama *área total* al área que ocupa el campo considerando las distancias de separación necesarias.

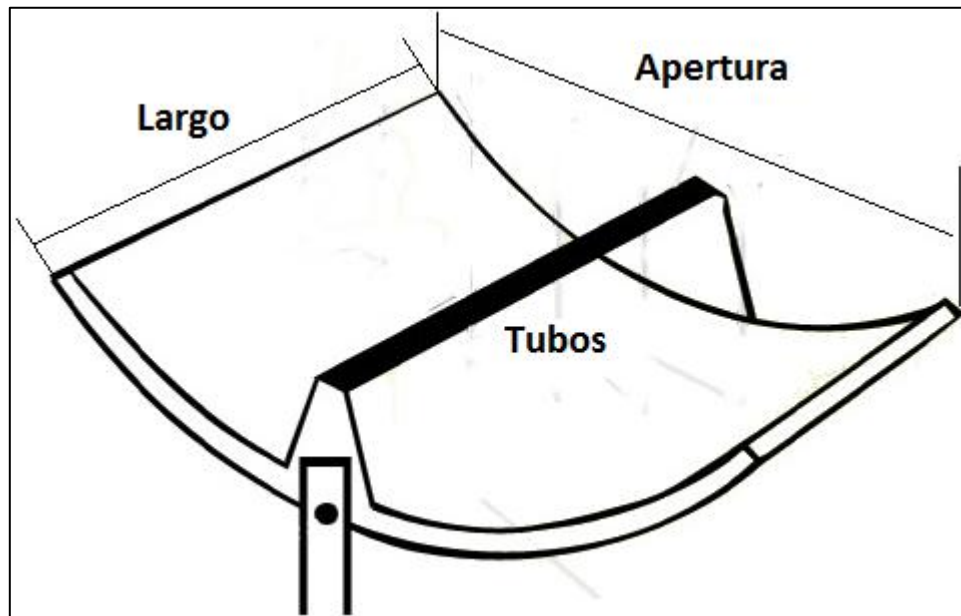


Figura 18: esquema de dimensiones de un colector cilindro-parabólico [28]

Entonces, el área efectiva que se necesita estará dada por A en la siguiente ecuación:

$$Q = I(h) \cdot A \cdot \eta(\theta)$$

Donde la radiación directa normal I [W/m^2] tiene un valor para cada hora h del año y la eficiencia depende del ángulo de incidencia θ que a su vez también depende de la hora del año (Ver Anexos Modelo de Bird, Cálculo del ángulo de incidencia y Potencia térmica, p. 52, 53 y 57, respectivamente). En el promedio anual,

$I(h) \cdot \eta(\theta) = 285 \frac{W}{m^2}$. Dada la energía que se desea obtener, el área efectiva de colectores es de 337.000 m^2 para el caso de aumentar la temperatura del refino en 5 °C y 674.000 m^2 para aumentar en 10 °C.

Los colectores tienen 5,77 m de apertura y 12 m de largo [25]. Entonces, el área de cada colector es de 69,2 m^2 . Por lo tanto, se necesitan 4870 colectores para el caso de +5 °C y 9740 para +10 °C.

Por recomendación del fabricante [25], SENER, los colectores se disponen en lazos compuestos de 24 de ellos en una dirección y 24 en la dirección contraria, con una separación de 16,5 m entre el centro de cada grupo de colectores. En la Figura 19 se puede ver esta disposición donde la flecha representa el paso de fluido térmico por un lazo de colectores:

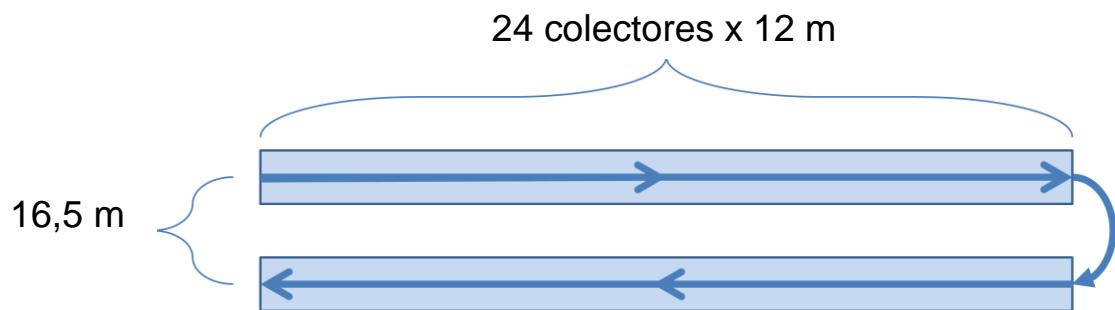


Figura 19: diagrama de largo y ancho de un lazo de colectores donde la flecha representa el sentido del flujo

Cada lazo tiene un área efectiva de:

$$(24 \times 12 \text{ m}) \times (2 \times 5,77 \text{ m}) = 3.325 \text{ m}^2$$

Considerando las áreas totales requeridas, el campo se compone de 102 lazos para el caso +5 °C y 204 para el caso +10 °C.

Cada lazo tiene un área total de:

$$(24 \times 12 \text{ m}) \times (2 \times 16,5 \text{ m}) = 9.504 \text{ m}^2$$

Esto produce áreas de campo totales de 965.000 y 1.930.000 m^2 para +5 y +10 °C, respectivamente.

Las características del fluido intermedio y del fluido térmico se pueden ver en las Tablas 5 y 6, respectivamente.

Tabla 5: Características del fluido intermedio

Flujo	10.600 m ³ /h
Conductividad térmica	0,7 W/(mh°C)
Calor específico	4,2 kJ/kg/K
Densidad	950 kg/m ³

Tabla 6: Características del fluido térmico

Flujo	5.600 m ³ /h
Temperatura inicial	0,6 W/(mh°C)
Calor específico	3,9 kJ/kg/K
Densidad	980 kg/m ³

5.1.3. Aporte de calor al refino según variaciones climáticas

Al calentar el refino con tecnologías tradicionales como calderas de combustible o eléctrica, el consumo de combustible o energía no tiene grandes variaciones durante el año. Sin embargo, el uso de colectores cilindro-parabólicos está directamente relacionado con la época del año. Debido a la inclinación de la tierra y a su traslación, el ángulo con que recibimos los rayos de sol varía durante el año. Por lo tanto, como los colectores cilindro parabólicos siguen al Sol en el eje Norte-Sur, estos entregarán menos potencia dependiendo del ángulo con que lleguen los rayos del Sol. A este ángulo se le llama ángulo de incidencia.

La eficiencia del campo de colectores depende del ángulo de incidencia, según información entregada por proveedores de colectores cilindro-parabólicos [25]. El ángulo de incidencia se puede calcular para cada hora del año (ver Anexo Cálculo del ángulo de incidencia, p. 54). Por lo tanto, conociendo la radiación y la eficiencia, se conoce la potencia real que entrega el campo solar. Al tener la potencia, es posible calcular el aumento de temperatura que genera.

Por ejemplo, veamos el caso del 1 de enero a las 8 AM (ver Anexo 9.6 Potencia térmica). La columna DNI entrega la radiación directa normal según el Modelo de Bird. La radiación que aprovecha un colector cilindro-parabólico es siempre menor o igual a este valor, ya que el plano de apertura no está siempre perpendicular a los rayos del sol. La radiación que los colectores aprovechan es la componente perpendicular de los rayos de sol, que está dada por el coseno del ángulo de incidencia (ver Anexo Cálculo del ángulo de incidencia, p. 54). La columna Pot. Teo (MW térmicos o MWt) del Anexo 9.6 tiene la potencia teórica del campo, que está dada por:

$$Pot. Teo = DNI \times \cos \theta \times apertura$$

Con DNI en W/m² y la apertura del campo en m². Se divide por 1.000.000 para tener la potencia en MWt. En este caso:

$$Pot. Teo = \frac{895 \frac{W}{m^2} \times 0,98 \times 674.438 m^2}{1.000.000} = 594,6 MW$$

Luego, el ángulo de incidencia (en este caso, 10°) nos permite calcular la eficiencia del campo (ver Anexo 9.5 Eficiencia de colectores cilindro-parabólicos):

$$\eta = 1,1033 \cdot 10^{-4} \theta^2 - 8,0978 \cdot 10^{-4} \theta + 7,6955 \cdot 10^{-1}$$

$$\eta = 75,7\%$$

Posteriormente, la potencia real (columna Pot. Real) es:

$$Pot. Real = Pot. Teo \times \eta = 594,63 MW \times 75,7\% = 450,2 MW$$

Finalmente, el aumento de temperatura para esa hora es:

$$\Delta T = \frac{Q}{m_{refino} c_p} = \frac{450,2 MW}{1,8 \times 10^7 \frac{kg}{h} \times 3,8 \frac{kJ}{kg K}} \times 3600 \frac{s}{h} \times 1000 \frac{kW}{MW} = 23,5 ^\circ C$$

En promedio anual, estos aumentos de temperatura provocan +5 y +10 °C en el refino cada vez que este pasa por el sistema de calentamiento. En realidad, el campo solar solamente entrega calor durante las horas de sol, lo que se traduce en que los aumentos de temperatura deben ser mayores que +5 y +10 °C durante las horas de Sol para compensar por el calor no suministrado en la noche. Esta información de aumento de temperatura horaria es importante para modelar correctamente el aumento de recuperación de cobre.

A continuación se pueden ver las Figuras 20 y 21 que muestran este efecto.

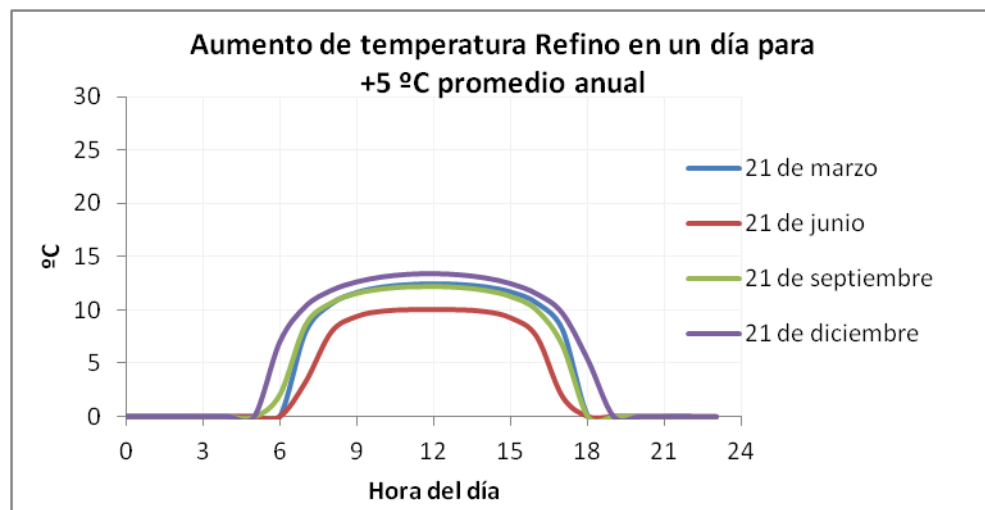


Figura 20: aumento de temperatura en el refino para cuatro días representativos, correspondientes a +5 °C

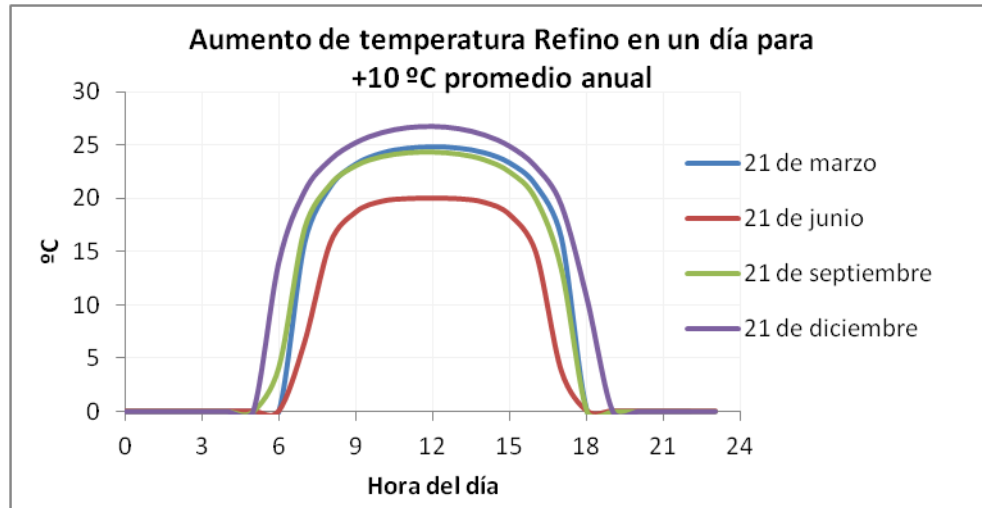


Figura 21: aumento de temperatura en el refino para cuatro días representativos, correspondientes a +10 °C

En invierno, el ángulo de incidencia es mayor que en verano. Esto se refleja claramente en que el aumento de temperatura que se logra en invierno es hasta 7 °C menor que aquel que se logra en verano a la misma hora. También se puede apreciar que en invierno hay alrededor de 12 horas de sol, mientras que en verano se llega a 14 horas de sol. Finalmente, se puede apreciar que la temperatura sube más rápido en verano que en invierno.

Para incorporar estos aumentos de temperatura a la modelación, es necesario llevarlos a promedios diarios para cada día del año. Los aumentos de temperatura en promedio diario se pueden ver en la Figura 22.

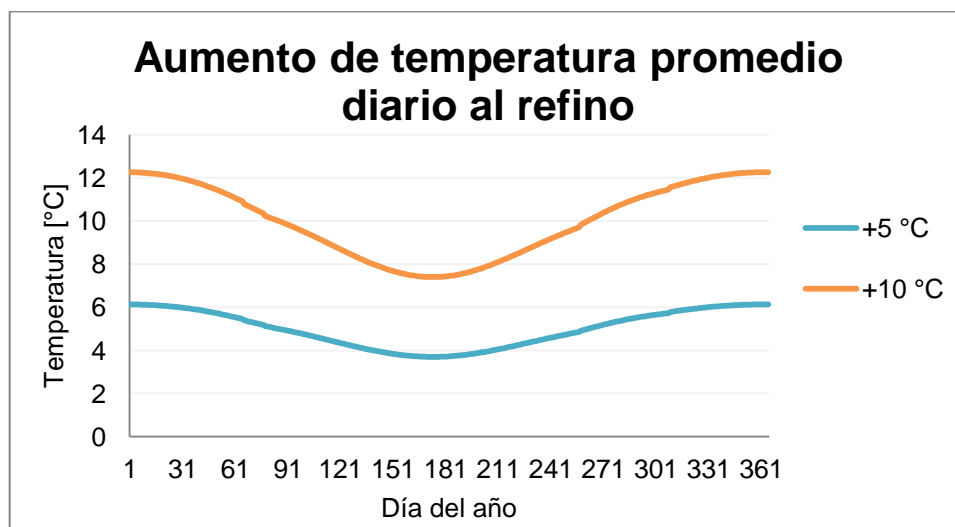


Figura 22: aporte de temperatura en promedio diario durante el año para +5 y +10 °C

Puede verse que en los días de verano, al finalizar y comenzar del año, la temperatura del refino para +10 °C llega a aumentar en 12 °C. En invierno, a mediados de año, el aumento llega solamente a 8 °C para la misma situación. Nuevamente se puede apreciar con claridad el efecto que tienen las estaciones del año y específicamente el ángulo de incidencia de los rayos del Sol en el aumento de temperatura que se logra con la tecnología de colectores cilindro-parabólicos.

5.1.4. Parámetros de modelación con aporte de calor variable

La modelación realizada considera las siguientes condiciones.

- 3 escenarios: caso base, +5 °C y +10 °C
- Plan mina, riego y carguío a partir de la programación de la minera en estudio.
- Tasa de riego de 6 L/h/m². Caudal de riego total no superior a 16.500 m³/h
- Caudal máximo de PLS a SX de 10.000 m³/h, dado por capacidad de SX.
- Temperatura y concentraciones en el caudal de riego de Cu²⁺, H⁺, Fe²⁺, Fe³⁺ variables en el tiempo y en función de la recirculación dada por el caudal máximo de PLS a SX. En la Figura 23 se aprecia un esquema de la recirculación del caudal de drenaje de las franjas.
- Ciclo térmico (temperatura aire ambiente) deducido de la data histórica para el mismo período de tiempo.
- Altura de apilamiento de 18 m y tiempo de lixiviación máximo de 350 días.

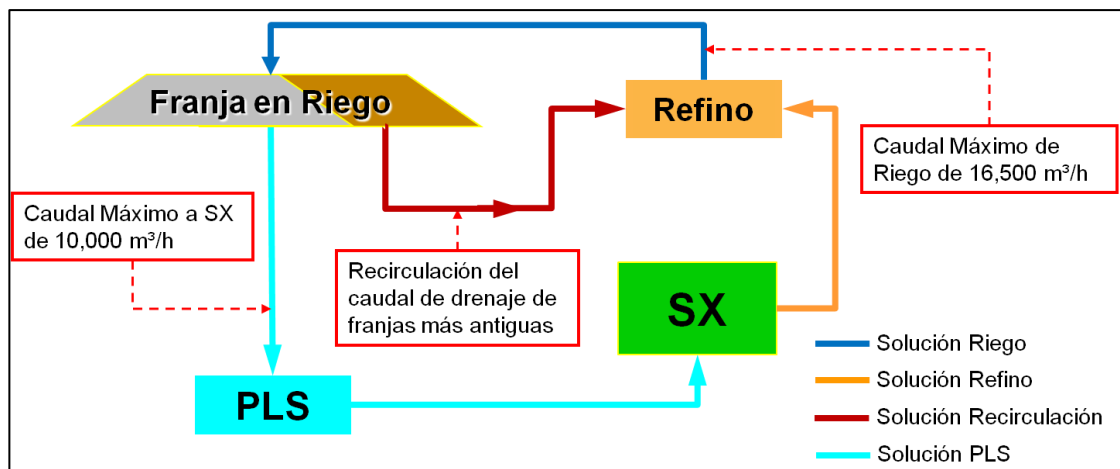


Figura 23: esquema de riego, recirculación y restricciones en la biolixiviación de pilas ROM [24]

5.1.5. Estudio de superficie disponible y layout

Es conveniente ubicar la tecnología de calentamiento cerca del riego de refino. De acuerdo a fotos satelitales de terreno, la Figura 24 muestra un área disponible cercana a la pila ROM de biolixiviación, delimitada por el rectángulo azul.

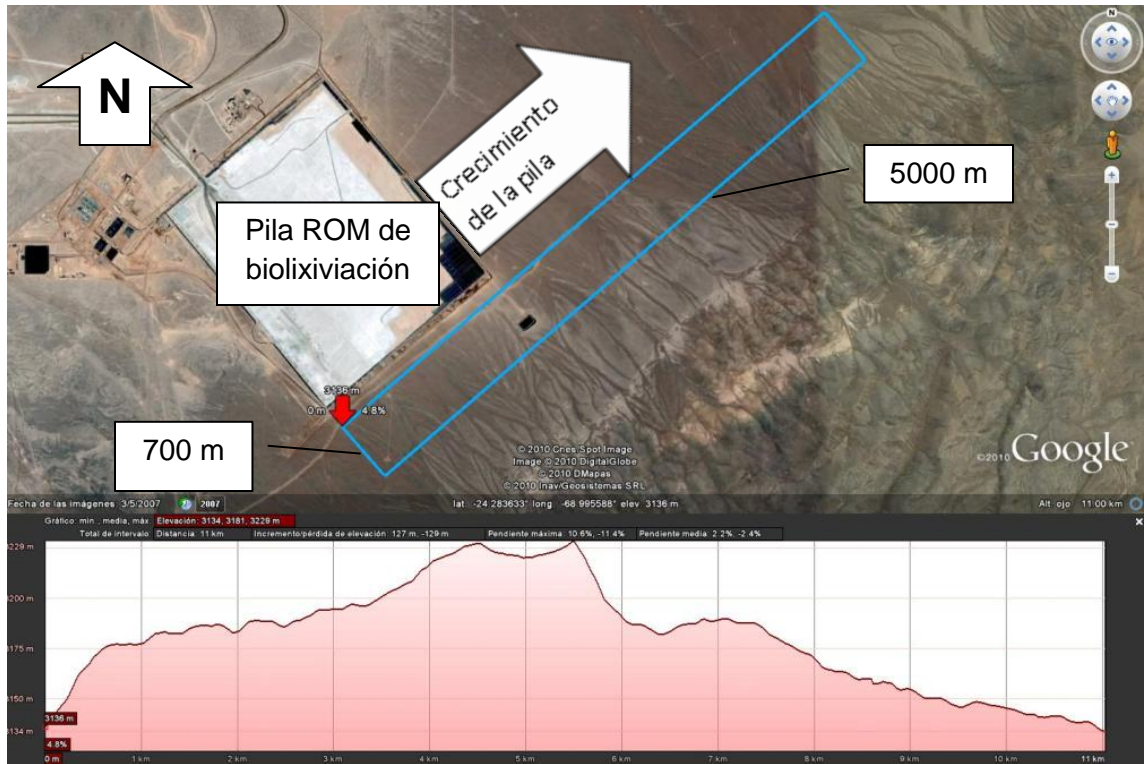


Figura 24: área disponible, diferencia de cotas y crecimiento de la pila

Esta área es parte de un cerro de inclinación leve. El gráfico rosado muestra la diferencia de alturas desde la flecha roja. La cota mayor llega a 92 m. Según los antecedentes topográficos y mineralógicos, no habría inconvenientes con ocupar esta zona desde el punto de vista de yacimientos o explotaciones futuras. La superficie disponible entonces llega a 3.500.000 m². Recordando que para +10 °C se requieren 1.930.000 m², la superficie disponible es más que suficiente.

Existen varios motivos para la elección de la superficie disponible:

- Cercanía a pilas ROM de biolixiviación
- Dirección Nordeste del cerro y del crecimiento de la pila
- Protección del cerro contra el viento
- Disponibilidad por no existir yacimientos, explotaciones ni otro tipo de expansiones futuras

Los colectores deben ubicarse en grupos, típicamente de entre 35 y 40 lazos, por lo que se elige una configuración del tipo trapecoide, como se ejemplifica en la Figura 25.

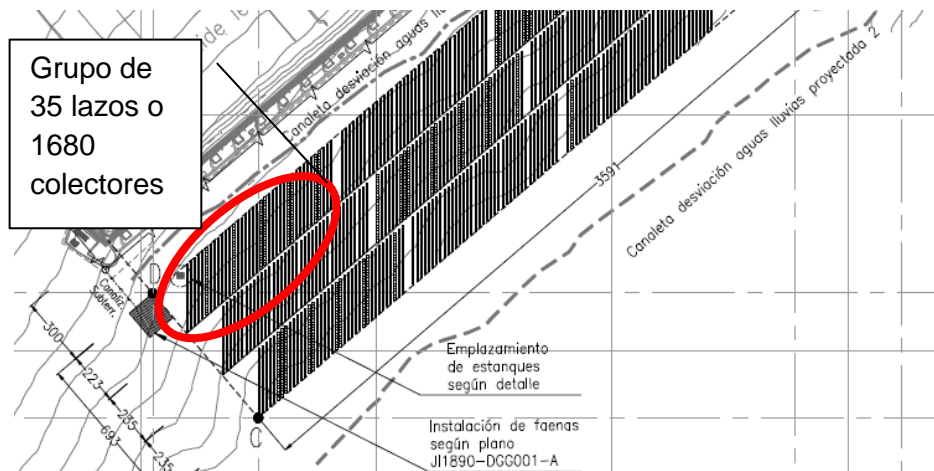


Figura 25: ejemplo de layout en área cercana a las pilas [29]

En el caso de +5 °C, se consideran tres de estos grupos de 35 colectores cada uno, mientras que en +10 °C se utilizarían seis grupos de iguales características.

5.1.6. Aumento de extracción de cobre

La lixiviación de cobre depende de factores como la temperatura, la aireación, la tasa de riego, la ley del mineral, la granulometría, el transporte de fluidos y las características del refino. Como ya se mencionó, a mayores temperaturas, la extracción de cobre aumenta. La temperatura del refino aumenta cada año de manera natural, debido a las reacciones exotérmicas que ocurren dentro de la pila (ver Figura 26). Sin embargo, para los próximos años se pronostican menores leyes de cobre soluble debido a mayores leyes de calcopirita (ver Figura 5, p. 5). El aumento espontáneo de la temperatura del refino no sería suficiente para obtener extracciones aceptables.

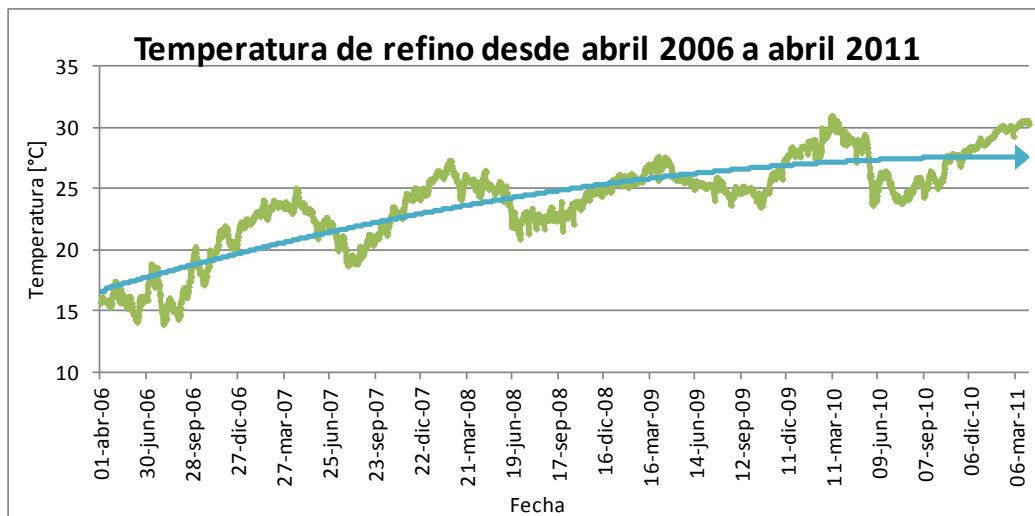


Figura 26: Se aprecia una tendencia creciente en la temperatura del refino

5.1.7. Resultados de la modelación

En las Figuras 27 y 28 se puede ver el aumento de temperatura en el refino y en el PLS debido al aporte de calor y a las reacciones exotérmicas de la pila, para el periodo de evaluación de 15 años a partir del año 2011.

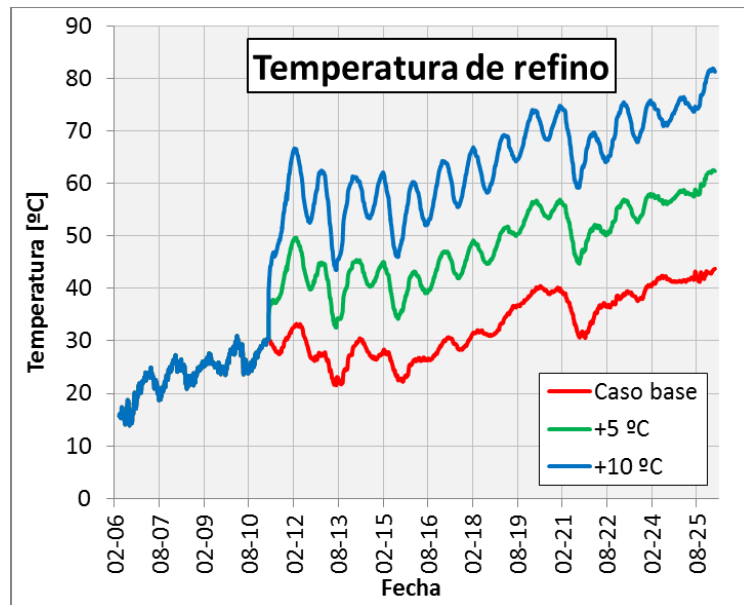


Figura 27: temperatura de refino entre 2006 y 2025 (eje horizontal: mes-año) para +5 °C donde la fecha está en formato mes-año [30]

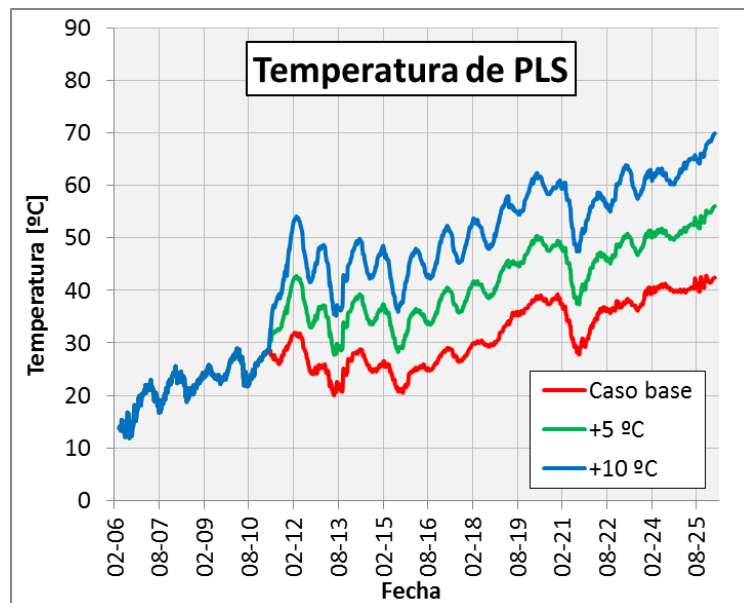


Figura 28: temperatura de refino entre 2006 y 2025 (eje horizontal: mes-año) para +10 °C donde la fecha está en formato mes-año [30]

Se aprecia que el aumento de temperatura se realiza a partir del año 2011. El caso base, sin aumento de temperatura, se puede ver en rojo. Los casos +5 °C y +10 °C se ven en verde y azul, respectivamente. La diferencia de temperatura entre el refino y el PLS varía muy levemente en el caso base. El PLS se ve entre 1 y 2 °C más frío. Por otro lado, cuando aumenta la temperatura del refino como en los casos +5 °C y +10 °C, se ven diferencias mayores entre la temperatura del refino y aquella del PLS. Por ejemplo en el caso +5 °C, la temperatura del refino llega a más de 55 °C en febrero del 2021, pero el PLS no supera los 50 °C. Para la misma fecha en el caso +10 °C, la temperatura del refino estaría alcanzando los 75 °C, mientras que el PLS llega solamente a los 60 °C. Esto se explica porque mientras mayor es la diferencia de temperatura con el ambiente, mayor es la pérdida de calor de la pila.

Las oscilaciones se deben a las distintas condiciones climáticas entre invierno y verano. El efecto que tiene este aumento de temperatura en la extracción de cobre se puede ver en la Figura 30.

La extracción se calcula a partir del modelo. La eficiencia de SX^e se conoce por los datos de planta y se puede ver en Figura 29. La eficiencia de SX interesa porque no todo el cobre que se extrae de la pila pasa a EW.

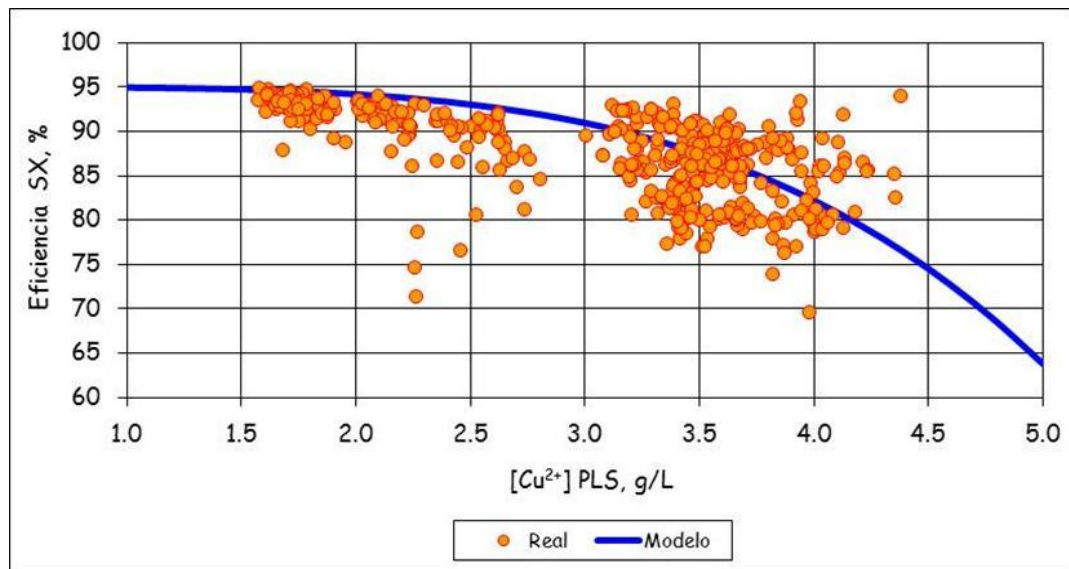


Figura 29: eficiencia de SX dependiendo de la concentración de Cu²⁺ en el PLS

El modelo entrega la concentración de cobre en el PLS. Sabiendo la eficiencia de SX se sabe cuánto cobre se transfiere a esta etapa. Por lo tanto, comparando el cobre contenido en la pila con el cobre que pasa a SX es posible conocer el porcentaje de extracción para un periodo de 350 días.

^e Cobre que pasa desde el PLS a SX comparado con cobre que originalmente había en el PLS

Dado que se consideran ciclos de riego de 350 días para cada nueva franja de mineral, interesa conocer la extracción de cobre que se logra en esos periodos de tiempo. El promedio de las extracciones para cada período de 350 días a lo largo de los 15 años de evaluación se muestra en la Figura 30.

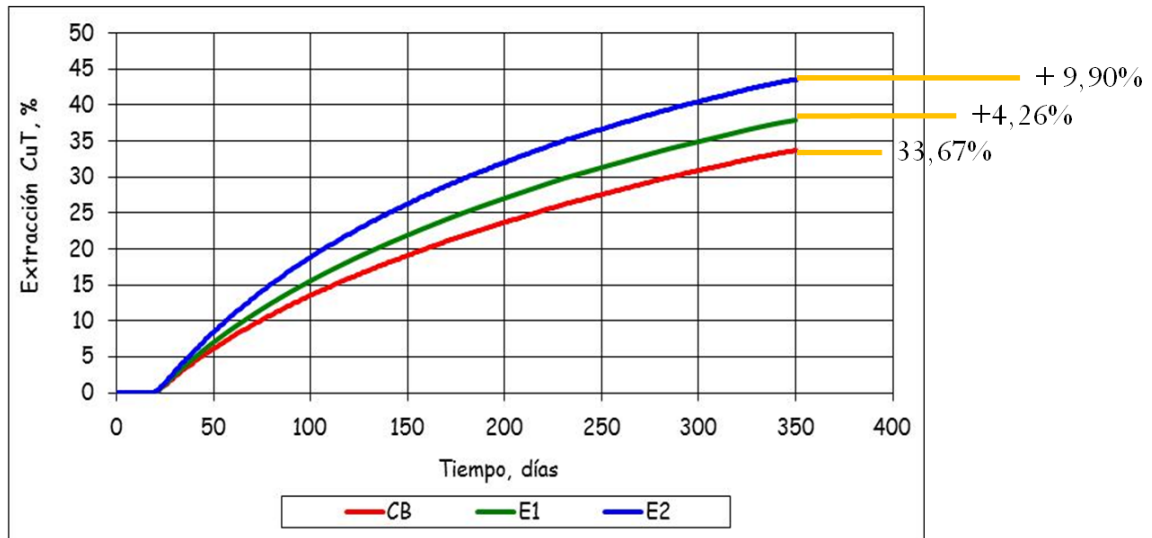


Figura 30: extracción promedio para el período de evaluación de 15 años [30]

El gráfico muestra el promedio de extracción de los 15 años de evaluación para periodos de 350 días de operación. Es decir, en promedio, cada ciclo de riego la extracción del caso base llega a 33,67%, a 37,93% para el caso +5 °C y a 43,57% para +10 °C.

5.1.8. Temperatura del fluido térmico relacionada con la temperatura del refino

Dado que la temperatura del refino aumenta gradualmente, es necesario aumentar también la temperatura del fluido térmico. Por experiencia de la empresa donde el alumno hizo la memoria, se define que en el caso +5 °C entre la temperatura deseada del refino y el fluido intermedio debe haber 25 °C de diferencia. Por su parte, entre la temperatura deseada del fluido intermedio y la temperatura del fluido térmico, debe haber 30 °C de diferencia. En el caso +10 °C aumentan estas diferencias para compensar pérdidas de calor: 30 °C entre refino y circuito intermedio y 50 °C entre este y el fluido térmico.

Para aumentar la temperatura del fluido térmico es necesario destinar parte del flujo a este fin, mientras que la mayor parte del fluido térmico intercambia calor con el fluido intermedio. Por ejemplo, se definió que el calor que el campo solar entrega para el caso +5 °C viene dado por:

$$Q = I(h) \cdot A \cdot \eta(\theta) = 96 \text{ MW}$$

El modelo revela que en realidad se calentaron, en promedio, 15.000 m³/h de refino (ver Figura 31). Esto se debe a que dentro de las condiciones del modelo se establece el flujo en 6 L/(hm²) y los m² dependen de las franjas en riego, que a su vez están definidas por el plan de carga, el cual dice en qué fechas entran y salen de funcionamiento las franjas, junto con su tonelaje. Linealmente, se obtiene que el refino necesita solamente 87,1 de esos 96 MW, es decir, hay 8,9 MW disponibles. La planta térmica entonces está utilizando 5.000 de los 5.600 m³/h para los que se dimensionó. Para este ejemplo, se supone una temperatura inicial de fluido térmico de 80 °C. Luego,

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$8,9 \text{ MW} = \frac{\left[600 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3,9 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (T_+ - 80^\circ\text{C}) \right]}{3600\text{s} \cdot 1000}$$

$$T_+ = 94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Al mezclar estos 600 m³/h a 94 °C con los 5000 m³/h a 80 °C, la temperatura llega a 80,4 °C, lo que provoca el aumento gradual de la temperatura.

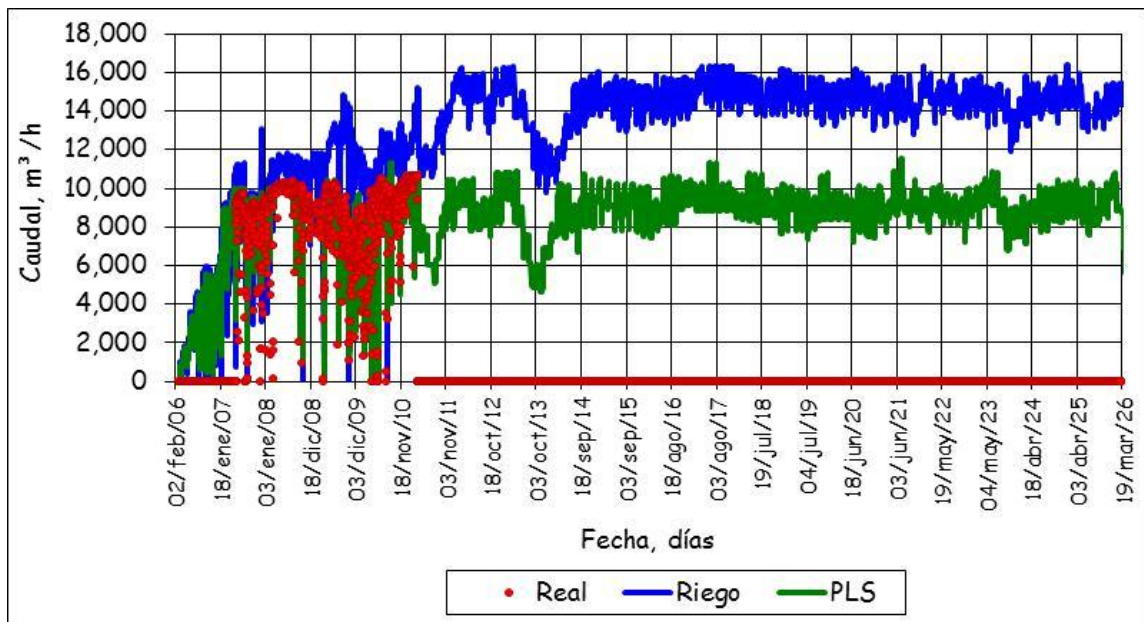


Figura 31: caudal de riego y de PLS que pasa a SX

5.2. Evaluaciones económicas

5.2.1. Parámetros económicos de evaluación

- Precio unitario de colectores: 200 US\$/m² [31]
- Precio unitario calderas de petróleo liviano: 32.675 US\$/MWt [32]
- Precio petróleo liviano: 820 US\$/m³
- Precio unitario calentadores eléctricos: 52.083 US\$/MWt [33]
- Precio de energía eléctrica: 0,15 US\$/kWh
- Periodo de evaluación: 15 años
- Tasa anual de actualización: 10%
- Depreciación lineal, valor residual cero
- Costos operacionales: 3%
- Precio venta cobre: 3 US\$/lb
- Costo producción de cobre: 0,5 US\$/lb
- Producción anual año fiscal 2011 (Agosto 2010 - Julio 2011) de Lix: 202.000 toneladas
- Eficiencia de obtención de cobre desde PLS a Cátodos : 97%
- Provisión en contingencias: 25% del costo de capital para las alternativas evaluadas

A continuación se resumen los resultados de la evaluación económica (ver Tablas 7 y 8) y posteriormente se describe cómo se obtuvieron estos resultados (ver Anexo Flujo de caja para colectores cilindro-parabólicos en el caso +10 °C).

Tabla 7: Resumen de resultados de evaluación económica al calentar el refino en 5 °C

	Inversión (MUS\$)	Operación y Mantenimiento (MUS\$)	VAN (MUS\$)	TIR	Payback (años)	IVAN
Calderas	16,8	79,0	125,8	0,8	0,7	7,5
Calentadores eléctricos	34,3	128,5	-268,2	-	-	-
Colectores	284,0	2,2	442,8	0,3	2,8	1,6

Tabla 8: Resumen de resultados de evaluación económica en caso +10 °C

	Inversión (MUS\$)	Operación y Mantenimiento (MUS\$)	VAN (MUS\$)	TIR	Payback (años)	IVAN
Calderas	33,6	158,1	434,5	1,4	0,5	12,9
Calentadores eléctricos	68,6	257,1	-353,5	-	-	-
Colectores	568,0	4,5	1068,3	0,4	2,5	1,9

5.2.2. Estimación de ingresos

Para saber cuánto cobre se extrae basta multiplicar la masa de mineral tratado por la ley y luego por la extracción. Estos datos se pueden ver en la Figura 32.

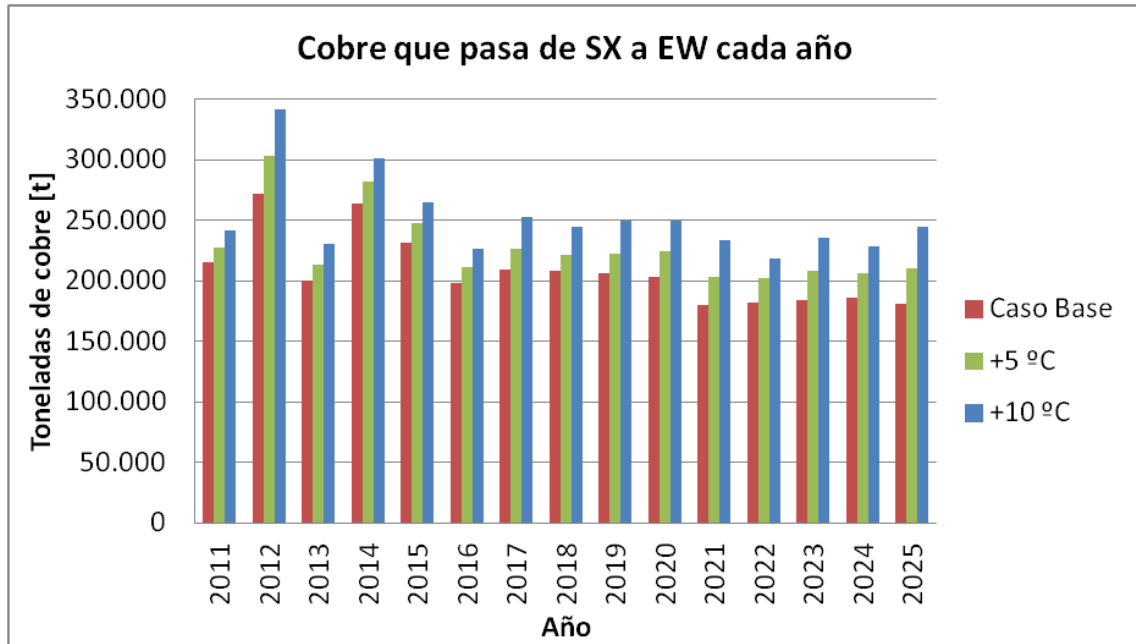


Figura 32: toneladas de cobre que SX le entrega a EW cada año durante el periodo de evaluación [31]

La mayor extracción de cobre significa mayores ingresos. Cada año, en promedio, se extraen más de 18.000 toneladas de cobre adicionales en el caso +5 °C y más de 41.000 para el caso +10 °C. Cabe destacar que el aumento de extracción no es lineal con respecto al aumento de temperatura en el refino, lo que se puede explicar porque a mayores temperaturas es mayor la extracción de calcopirita. Los ingresos adicionales que el calentamiento de refino genera pueden verse en la Figura 33, considerando que EW tiene una eficiencia del 97% y que se ganan 2,5 US\$/lb de cobre (ver Parámetros Económicos de Evaluación).

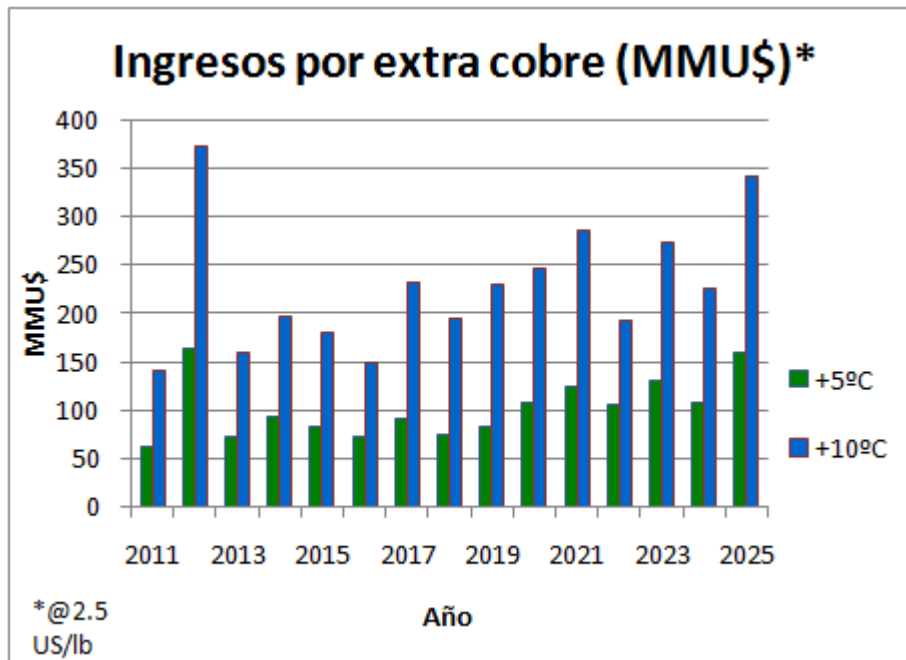


Figura 33: ingresos por cobre adicional que se extrae por el aumento de temperatura en +5 y +10 °C

En promedio, los ingresos superan los MUS\$ 100 y 225 por calentar el refino en +5 y +10 °C respectivamente. Cabe destacar que en el 2012 se encuentra el máximo de extracción y de ingresos para los casos en estudio. Recordando que la pila presenta un crecimiento por pisos, esto puede deberse a que se logra extraer mineral de pisos inferiores que no habían sido agotados.

5.2.3. Estimación de inversiones

En la Tabla 9 se resumen los resultados de esta parte:

Aumento de temperatura en refino [°C]	5	10
Inversión en calderas [MUS\$]	16,8	33,6
Inversión en calentadores [MUS\$]	34,3	68,6
Inversión en colectores solares [MUS\$]	284,0	568,0

5.2.3.1. Calderas

Las calderas cotizadas para este proyecto tienen un costo de US\$ 385.000 cada una. Se trata de calderas Cleaver-Brooks de agua caliente con un 83% de eficiencia que utilizan petróleo liviano como combustible. Su potencia es de 1200 bhp (40 MBtu/h). Por lo tanto, como se desean utilizar 9 calderas para el caso +5 °C y 20

para el caso +10 °C, la inversión por este concepto alcanza los MUS\$ 3,5. Al considerar las bombas, equipos auxiliares y costos de montaje, la inversión llega a MUS\$ 16,8 y 33,6.

5.2.3.2. Calentadores eléctricos

Los calentadores elegidos tienen un costo de US\$ 612.000 cada uno. Igualmente se trata de calentadores Cleaver-Brooks con eficiencia cercana al 100%. Su potencia es de 3.360 kW. Se necesitan 29 de ellos para el caso +5 °C y 58 para el caso +10 °C, por lo tanto la inversión alcanza los MUS\$ 17,8 y 35,6 respectivamente. Al considerar las bombas adicionales, equipos auxiliares y costos de montaje, la inversión llega a MUS\$ 34,3 y 68,6.

5.2.3.3. Colectores cilindro-parabólicos

Los colectores son marca SENERtrough. SENER es empresa española con varias experiencias exitosas en termoeléctricas que utilizan el mismo tipo de colectores cilindro-parabólicos [36]. SENER valida el precio unitario de colectores de 200 US\$/m². Al tratarse de campos de 96 y 192 MWt para los casos +5 y +10 °C respectivamente, la inversión alcanza los MUS\$ 67,3 y 134,6 solo por concepto de colectores. Al considerar bombas, movimientos de tierra, cañerías y montaje, la inversión asciende a MUS\$ 284,0 y 568,0.

5.2.3.4. Intercambiadores de calor

Se utilizará un circuito intermedio de intercambiadores de calor de placas para las calderas y los colectores solares. Los calentadores eléctricos no requieren un circuito intermedio ya que es posible calentar directamente el refino. Se solicitó una cotización de intercambiadores marca Paul Mueller Co. a la empresa Foresta [34]. Dadas las condiciones de operación y de intercambio de calor, el precio que ellos entregaron es de MUS\$ 2,3 y 4,6 para +5 y +10 °C respectivamente. Las bombas de este sistema y el montaje aumentan la inversión a MUS\$ 3,1 y 6,2.

5.2.4. Estimación de costos de operación

5.2.4.1. Calderas

El principal costo de operación es el combustible que consume la caldera. Como se vio en la Determinación del tamaño de la instalación – Calderas, las calderas consumen 10,7 m³/h de petróleo liviano para el caso +5 °C y 21,3 m³/h para el caso +10 °C. Con el precio del petróleo, ponderado por un factor de traslado, los costos de operación anuales solo por este concepto llegan a MUS\$ 76,6.

5.2.4.2. Calentadores

El principal costo de operación de los calentadores es el consumo eléctrico. Utilizando el precio que tiene la energía eléctrica en terreno de 0,15 US\$/kWh, se llega a que el costo de operación es MUS\$ 84 para el caso +5 °C y MUS\$ 168 para +10 °C.

5.2.4.3. Colectores cilindro-parabólicos

Los colectores no tienen un consumo tan grande como las dos tecnologías anteriores, ya que transmiten energía solar. Entre los costos de operación se cuenta el consumo de las bombas del circuito, la reposición de agua y el agua de lavado de los espejos. Todo esto puede ascender a MUS\$ 2,2.

6. Conclusiones

Se concluye que calentar la pila por medio del calentamiento de refino es una iniciativa tecnológica y económicamente atractiva.

En primer lugar, se requieren 96 y 192 MWt para calentar el refino en +5 °C y +10 °C. Vale la pena recordar que este calentamiento es instantáneo y acumulativo. Es decir, cada vez que el flujo de refino pasa por los intercambiadores de calor, su temperatura aumenta en 5 ó 10 °C. Por supuesto, la temperatura de esta solución no sube rápidamente, ya que se usa para calentar una pila cuyas franjas en riego superan fácilmente las 500 ha de superficie, llegarán hasta siete pisos de 18 m de altura al finalizar el periodo de evaluación y tienen una masa de mineral de 7 MTON cada una.

Los tipos de tecnologías elegidas para lograr este calentamiento otorgan un espectro amplio de respuestas, ya que podrían considerarse como la base para otras tecnologías. Es decir, por su simplicidad, crean una buena referencia para el estudio del calentamiento de una pila. También son el punto de partida para posibles combinaciones de tecnologías; por ejemplo, calentar por medio de calderas durante la noche y con colectores durante el día.

Las calderas son industrialmente muy conocidas y utilizadas. Bajo condiciones de operación y mantención apropiadas, entregan una fuente confiable y duradera de calor. El espacio que ocupan es mínimo en comparación con los colectores cilindro-parabólicos, lo que facilita el control, la operación y la mantención. Se encontró que la inversión requerida, considerando equipos auxiliares y montaje, llega a MUS\$ 16,8 y 33,6 para +5 y +10 °C.

Dentro de las desventajas de las calderas, sin embargo, se cuenta el consumo de combustible. Esto no solo aumenta la huella de carbono de la planta, sino que representa un gasto operacional constante e importante. Los costos de mantención y operacionales en el caso +5 °C, considerando sueldos del personal y otros gastos, llegan a MUS\$ 79,0. El 97% de esta cifra corresponde solamente al consumo de combustible.

Se concluye que el uso de calderas es altamente susceptible al precio del combustible. A pesar de que el VAN es superior a MUS\$ 125 y 430 para +5 y +10 °C respectivamente y el proyecto se pagaría en menos de nueve meses, este análisis no considera variaciones en el precio del petróleo liviano, que se fija en 820 US\$/m³ (3,1 US\$/gal ó 130 US\$/barril). Se trata de un recurso natural no renovable que se vuelve más costoso cada día.

Al mirar los resultados de la tecnología de calentadores eléctricos, se encuentra que no es rentable bajo las condiciones actuales. En este caso, la tecnología se ve claramente perjudicada por el precio de la energía eléctrica. A 0,15 US\$/kWh, el VAN del proyecto es MUS\$ -268,2 y -353,5 respectivamente para +5 y +10 °C. Si el precio de la energía eléctrica baja a 0,10 US\$/kWh, el VAN queda en MUS\$ 51,7 y 286,2.

Los colectores cilindro-parabólicos, por su parte, no dependen de combustibles, ni del precio de estos, ni de la energía eléctrica. Al utilizar el Sol como su fuente de

energía, dependen únicamente de la estación del año y de la posición del Sol; dos factores que no varían enormemente en el Norte de nuestro país. A pesar de que el área que requieren es muy grande (hasta 1,9 km² para calentar el refino en 10 °C), no son superficies inviables para este tipo de tecnología. En efecto, decenas de plantas termosolares en España tienen una superficie de 2,0 km².

Si bien la inversión de los colectores es la más alta de las tecnologías evaluadas (MUS\$ 284,0 y 568,0), el VAN de los colectores es también el más alto: MUS\$ 442,8 y 1068,3 para +5 y +10 °C.

Cabe destacar que al calentar el refino en 10 °C se extrae más del doble de cobre que si se calienta el refino en 5 °C. Puesto en cifras, la extracción es comparativamente un 17% mejor.

Finalmente, dada la factibilidad técnica y económica de este proyecto, se recomienda continuar con la ingeniería básica para reforzar los resultados de esta ingeniería conceptual. Específicamente, se recomienda realizar pruebas de laboratorio y en gaviones para respaldar los resultados de la modelación al calentar el refino en 10 °C, ya que es el caso más conveniente.

7. Acciones de continuidad

Todas las evaluaciones que no son parte de esta memoria pero que podrían influir en los resultados son objeto de estudio en las siguientes etapas de la ingeniería o pueden ser temas de otras memorias.

- Evaluación del *shock* térmico al que podrían estar sometiéndose las bacterias de la pila al utilizar colectores cilindro-parabólicos. Los colectores deben entregar, en promedio +5 y +10 °C pero no pueden entregar calor durante la noche. Por esto, durante el día se alcanzan aumentos de temperatura mayores que +5 y +10 °C. El efecto de calentar solamente durante el día pero no durante la noche queda pendiente para las etapas futuras de este proyecto.
- Enfriamiento del PLS antes de SX. El PLS que sale de la etapa de biolixiviación se mezcla con un extractante orgánico para poder recuperar Cu^{2+} . Debido a las propiedades del extractante, solo puede alcanzar temperaturas de hasta 50 °C. A mayores temperaturas, comienza a degradarse y también se vuelve peligroso porque el diluyente que utiliza es parafina.
- Evaluar combinaciones de tecnologías. Por ejemplo, podría resultar atractivo combinar colectores cilindro-parabólicos con calderas, haciendo funcionar estas últimas de noche. De esta forma, se reduciría el tamaño del campo de colectores.
- Validar resultados del modelo de extracción. Deben realizarse pruebas de laboratorio y en gaviones para respaldar los resultados del modelo de extracción de cobre.
- Instalar estación de medición meteorológica en la zona. El tamaño del campo de colectores depende principalmente de la radiación directa normal que entrega el Modelo de Bird. Es necesario contar con datos precisos medidos en terreno para validar esta tecnología termosolar
- Analizar la factibilidad de extender este calentamiento a operaciones de lixiviación en botaderos, que podrían contener leyes no despreciables de cobre al considerar la mayor extracción que se logra

8. Referencias

- [1] COCHILCO. Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales, 1991-2010. Santiago, Chile. COCHILCO, 2011.
- [2] Codelco. Historia de Codelco. [en línea]
<http://www.codelco.com/la_corporacion/historia.asp> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [3] COCHILCO. Biolixiviación: desarrollo actual y sus expectativas. Santiago, Chile. COCHILCO, 2009.
- [4] Cytec Industries Inc. Solvent Extraction Manual. Woodland Park, NJ, EEUU. Cytec Industries Inc., 2006.
- [5] Copper 2003 Short Course (5th, 2003, Santiago, Chile). Introduction to heap leach practice and theory. University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 2003.
- [6] Vilcáez J., Suto K., Inoue C. Bioleaching of chalcopyrite with thermophiles: Temperature–pH–ORP dependence. Int. J. Miner. Process 88: 37-44, 2008.
- [7] Van Staden P. Progress at Mintek in Heap Bioleaching. En: HydroCopper 2007: IV International Copper Hydrometallurgy Workshop (IV, 2007, Viña del Mar, Chile). South Africa. Mintek, 2007.
- [8] Valerio González, Óscar Enrique. Evaluación energética de la biolixiviación de sulfuros de baja ley en Anglo American Sur, División Los Bronces. Memoria (Ingeniero Civil Químico e Ingeniero Civil en Biotecnología). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2008.
- [9] Cleaver-Brooks. CBEX Premium. [en línea]
<<http://www.cleaverbrooks.com/Products-and-Solutions/Boilers/Firetube/CBEX-Premium/Index.aspx>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [10] Lenntech. Corrosion in boilers. [en línea]
<<http://www.lenntech.com/applications/process/boiler/corrosion.htm>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [11] Parker Boiler. Cleaning & Water Treatment Instructions Closed Hot Water Boiler Heating Systems. [en línea]
<<http://www.parkerboiler.com/pdf/bulletins/201%20Series/201-cwt.pdf>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [12] Cleaver-Brooks. Steam or Hot Water. [en línea]
<<http://www.cleaverbrooks.com/Reference-Center/Boiler-Basics/Steam-or-Hot-Water.aspx>> [consulta: 25 de agosto, 2012].

- [13] Chromalox. Circulation Heaters. [en línea]
<<http://www.chromalox.com/resource-center/design-guide-pages/dg-circulation-heater.aspx>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [14] Cleaver-Brooks. Electric Boiler – WB. [en línea]
<<http://www.cleaverbrooks.com/Products-and-Solutions/Boilers/Electric/Model-WB/Index.aspx>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [15] U.S. Department of Energy. Electric Resistance Heating. [en línea]
<http://www.energysavers.gov/your_home/space_heating_cooling/index.cfm/mytopic=12520> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [16] Wikipedia. Concentrated solar power. [en línea]
<http://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [17] TecnoBlogSanMartin. Aprovechamiento de la energía solar. [fotografía, en línea] <<http://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/2012/02/28/aprovechamiento-de-la-energia-solar-centrales-solares/>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [18] Wikipedia. Conversion rates from solar energy to electrical energy. [en línea]
<http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_energy#Conversion_rates_from_solar_energy_to_electrical_energy> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [19] Solar Millenium. The parabolic trough power plants Andasol 1 to 3. D-91052 Erlangen, Germany. Solar Millenium, 2008.
- [20] Bird R., Hulstrom R. A Simplified Clear Sky model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. SERI Technical Report SERI/TR-642-761. 1991.
- [21] Estrabón. Mapas y cuadros. [en línea]
<<http://estrabon.wordpress.com/mapas/>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [22] Museo Virtual de la Región de Atacama. Lluvia en el desierto. [en línea]
<<http://www.geovirtual2.cl/Clima/Lluvia01esp.htm>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [23] Brave New Climate. Scaling up Andasol 1 to baseload. [en línea]
<<http://bravenewclimate.com/2009/12/06/tcase7/>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [24] De Re Metallica Ingeniería. Metodología de cálculo modelo DRM Bioleach. En: Reunión de presentación de metodología de cálculo (marzo 2011, oficinas de DRM, Santiago, Chile).
- [25] SENER. SENERtrough, concentrating solar power. En: Reunión de presentación de colectores cilindro-parabólicos (marzo 2011, oficinas de SENER, España).

- [26] Cleaver-Brooks. CBEX Premium Boilers Dimensions and Ratings. [en línea] <<http://www.cleaver-brooks.com/Products-and-Solutions/Boilers/Firetube/CBEX-Premium/CBEX-Premium-900-1200-DnR.aspx>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [27] Cleaver-Brooks. Electric Resistance Hot Water Boilers Dimensions and Ratings. [en línea] <<http://www.cleaver-brooks.com/Products-and-Solutions/Boilers/Electric/Model-WB/Electric-Dimension-and-Ratings---Hot-Water.aspx>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [28] Huayan New Energy. Solar trough system. [fotografía, en línea] <<http://www.hyne.cn/english/product/trough.asp>> [consulta: 25 de agosto, 2012].
- [29] Layout Calentamiento de Refino Colectores cilindro parabólicos con almacenamiento para +10 °C promedio anual. JHG Ingeniería. Santiago, Chile, JHG Ingeniería 2011.
- [30] De Re Metallica Ingeniería. Evaluación efecto del aumento variable de temperatura de riego en operación de minera en estudio. En: Reunión de entrega de resultados (mayo 2011, oficinas de DRM, Santiago, Chile).
- [31] NREL. Parabolic Trough Reference Plant for Cost Modeling with the Solar Advisor Model (SAM). Technical Report, NREL/TP-550-47605. 2010.
- [32] Heat Transfer. Oferta para fabricación de calentadores de agua. En: correo electrónico <mlopez@heattransfer.com> [consulta: 12 de abril, 2011].
- [33] EXHEAT. Electric Water Boilers Quotation. En: correo electrónico <rmeyers@exheat.com> [consulta: 3 de mayo, 2011].
- [34] Foresta. Propuesta técnica económica suministro intercambiadores de calor de placas. En: correo electrónico <pesepulveva@foresta.com> [consulta: 24 de abril, 2011].
- [35] Power from the Sun. Collecting Solar Energy. [en línea] <<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter04/chapter04.html>> [consulta: 25 de agosto, 2012]
- [36] Schaming, James. An Investigation of Leaching Chalcopyrite Ore. Thesis (Master of Applied Science). Kingston, Ontario, Canada. Queen's University, 2011
- [37] Amend J., Shock E., Energetics of overall metabolic reactions of thermophilic and hyperthermophilic Archaea and Bacteria. FEMS Microbiology Reviews 25: 175-243, 2001.

- [38] Inproheat, Raffinate Solution Heater For Compania Minera Cerro Colorado Copper Mine Iquique, Chile. [en línea] <<http://inproheat.com/raffinate-solution-heater-compania-minera-cerro-colorado-copper-mine-iquique-chile>> [consulta: 25 de agosto, 2012]
- [39] Monardes, Jorge. Pre-estudio técnico-económico de la aplicación de energía solar para pilas de biolixiviación. Memoria (Ingeniero Civil Químico). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2011.
- [40] Wu A., Liu J., Yin S., Wang H., Analysis of coupled flow-reaction with heat transfer in heap bioleaching processes. Appl. Math. Mech. -Engl. Ed. 31(12):1473–1480. 2010.

9. Anexos

9.1. Explicación de un modelo de biolixiviación

El modelo está basado en fenómenos de transporte y cinéticas bioquímicas de biolixiviación (ver Figura 34). Incorpora variables operacionales y de proceso involucradas en la biolixiviación. Permite modelar y simular el comportamiento biohidrometalúrgico de una pila en particular.

Los fenómenos de transporte considerados por el modelo son:

- ✓ Transporte de Solutos, tales como: Cu^{2+} , H^+ , Fe^{2+} , Fe^{3+} , O_2
- ✓ Transporte de Aire
- ✓ Transporte de Soluciones
- ✓ Transporte de Bacterias
- ✓ Transporte de Energía

Las cinéticas de biolixiviación consideradas por el modelo involucran las siguientes especies sulfuradas: Calcocita (Cc), Covelita (Cv), Calcopirita (Cpy), Bornita (Bor) y Pirita (Py). Además se considera la lixiviación ácida de especies oxidadas tales como Brochantita (Br). Debido que el modelo es un producto confidencial de DRM y a que no hubo suficiente información al respecto, a continuación se describe un modelo estándar para una pila de biolixiviación [40]. Los valores y unidades de las constantes se pueden ver en la Tabla 10, p. 51.

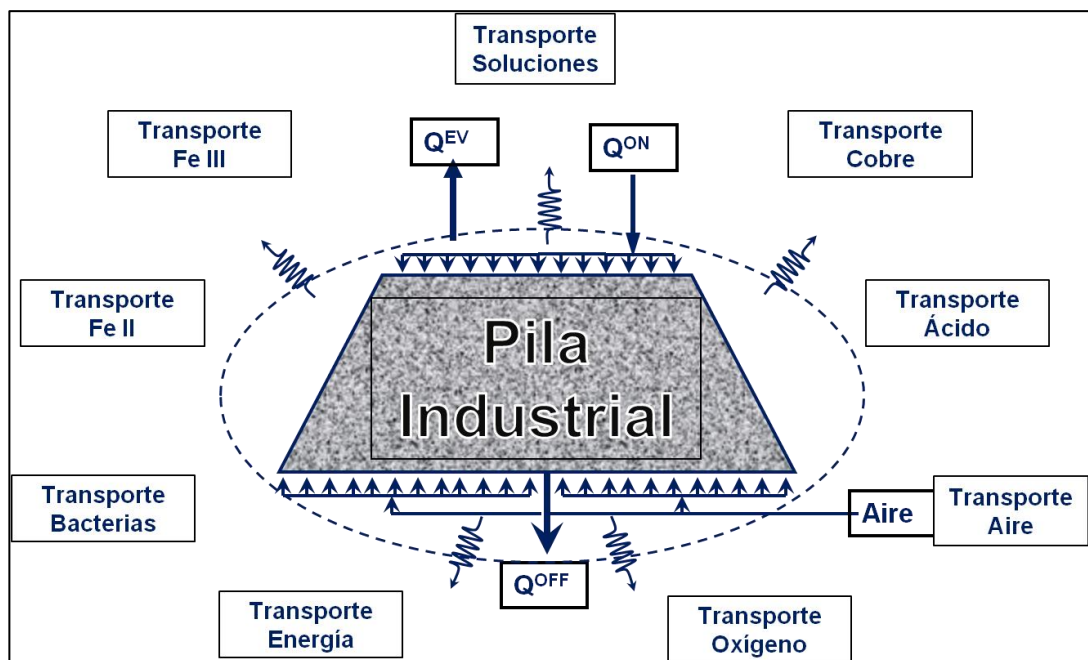


Figura 34: esquema de fenómenos considerados en el modelamiento de la pila con Q^{EV} , Q^{ON} y Q^{OFF} , los calores de evaporación, entrada y salida [24]

9.1.1. Modelo dinámico de flujo de aire

El flujo de aire dentro de la pila se describe por la ecuación de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \nu_g) + \varepsilon_g \rho_g \nabla \cdot \nu_g = -\varepsilon_g \nabla p + \varepsilon_g \rho_g \Delta \nu_g - \frac{\varepsilon_g^2 \mu_g}{K} \nu_g$$

Donde ν_g es la velocidad del gas, ε_g es la fracción volumétrica de aire, ρ_g es la densidad del aire, p es la presión del aire, μ_g es la viscosidad del aire y K es la permeabilidad del lecho.

9.1.2. Transferencia de masa en el líquido

9.1.2.1. Modelo matemático

Comúnmente el transporte de especies en procesos de lixiviación en pilas se describe por ecuaciones de difusión-advección: oxígeno disuelto C_L (g/L), bacterias C_ϕ (células por litro), iones ferrosos $C_{Fe^{2+}}$ (g/L), iones férricos $C_{Fe^{3+}}$ (g/L) e iones de cobre $C_{Cu^{2+}}$ (g/L). Las ecuaciones de conservación de masa para el transporte de soluto son las siguientes:

$$\varepsilon_l \frac{\partial(C_i)}{\partial t} = D_l \varepsilon_l \Delta C_i - q_l \cdot \nabla C_i + R_i$$

Donde C_i es la concentración de la especie i , ε_l es la fracción volumétrica de líquido, q_l es la velocidad líquida de Darcy, con $q_l = \varepsilon_l v_l$, v_l es el vector de velocidad superficial, R_i es la fuente/sumidero de la especie i , D_l es el coeficiente de difusión de oxígeno en el líquido, e y es la distancia desde el fondo de la pila.

Al suponer que el líquido fluye únicamente en el eje vertical (y) hacia abajo, la ecuación anterior se simplifica a

$$\varepsilon_l \frac{\partial C_i}{\partial t} = D_l \varepsilon_l \Delta C_i - q_l \frac{\partial C_i}{\partial y} + R_i$$

Si la densidad de bacterias adheridas se denota por ψ (células por kg), entonces el término de fuente se puede escribir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_{ore} \psi) = R_\psi$$

Donde $\varepsilon_{ore} = \rho_b \varepsilon_0$ es la densidad de la pila, ρ_b es la densidad del mineral y ε_0 es la fracción volumétrica de sólidos. Naturalmente, $\varepsilon_l + \varepsilon_g + \varepsilon_0 = 1$

9.1.2.2. Términos de fuente/sumidero

El término de fuente de oxígeno en la fase líquida es

$$R_{C_L} = -\mu \frac{0.25M_{O_2}}{M_{Fe^{2+}} + Y} (\varepsilon_{ore}\psi + \varepsilon_1\phi) - k_L(C_L - He \cdot C_g)$$

Donde M es el peso molecular e Y es el coeficiente de producción de bacterias. μ es la tasa de crecimiento de bacterias y está dada por la doble ecuación de cinética de Monod.

$$\mu = \mu_{max} \left(\frac{C_1}{K_{M,O} + C_1} \right) \left(\frac{C_{Fe^{2+}}}{K_{M,Fe^{2+}} + C_{Fe^{2+}}} \right)$$

Con $K_{M,O}$ (g/L) y $K_{M,Fe^{2+}}$ (g/L) denotan las constantes de tasa de aumento de iones de oxígeno y hierro, respectivamente. μ_{max} es el coeficiente máximo de tasa de crecimiento.

El término de generación para las bacterias en solución es

$$R_\phi = (\mu - k_{death})\varepsilon_1\phi - k_1\varepsilon_1\phi \left(1 - \frac{\psi}{\psi_{max}} \right) + k_2\varepsilon_{ore}\psi$$

De manera similar, el término fuente para las bacterias adheridas al mineral es

$$R_\psi = (\mu - k_{death})\varepsilon_{ore}\psi + k_1\varepsilon_1\phi \left(1 - \frac{\psi}{\psi_{max}} \right) - k_2\varepsilon_{ore}\psi$$

Donde k_{death} es la tasa de muerte de las bacterias. k_1 y k_2 son las tasas de adherencia y desprendimiento, respectivamente. ψ_{max} es la máxima densidad de bacterias adheridas a la superficie del mineral.

En estas últimas dos ecuaciones, el segundo término corresponde a la transferencia de bacterias desde la fase líquida a la superficie del mineral y el tercer término corresponde al desprendimiento de bacterias al líquido.

Finalmente, los términos fuente para los iones ferrosos, férricos y de cobre:

$$R_{\text{Cu}^{2+}} = \frac{2M_{\text{Cu}}}{M_{\text{cps}}} R_{\text{cps}},$$

$$R_{\text{Fe}^{2+}} = -\frac{\mu}{Y}(\varepsilon_{\text{ore}}\psi + \varepsilon_1\phi) + \left(-\frac{4M_{\text{Fe}}}{M_{\text{cps}}} - \frac{15M_{\text{Fe}}}{M_{\text{PY}}} F_{\text{PY}}\right) R_{\text{cps}},$$

$$R_{\text{Fe}^{3+}} = \frac{\mu}{Y}(\varepsilon_{\text{ore}}\psi + \varepsilon_1\phi) + \left(\frac{4M_{\text{Fe}}}{M_{\text{cps}}} + \frac{14M_{\text{Fe}}}{M_{\text{PY}}} F_{\text{PY}}\right) R_{\text{cps}},$$

Donde $R_{\text{cps}} = -\varepsilon_{\text{ore}} G \frac{d\alpha}{dt}$ es la tasa de lixiviación de sulfuros de cobre, G es la ley del mineral, α es la fracción de cobre que queda en el mineral de acuerdo a la ecuación del núcleo sin reaccionar:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{3(1-\alpha)^{\frac{2}{3}} C_{\text{Fe}^{3+}}}{\tau_c + 6\tau_d(1-\alpha)^{\frac{1}{3}}(1-(1-\alpha)^{\frac{1}{3}})}$$

En este caso,

$$\tau_c = \frac{\delta\varphi\rho_b M_{\text{Fe}}}{\beta M_{\text{ore}}}, \quad \tau_d = \frac{\delta^2\sigma G\varphi\rho_b M_{\text{Fe}}}{D_{\text{eff}} M_{\text{ore}}}$$

Donde φ es el factor de forma de la partícula, β es el coeficiente dinámico de reacción, σ es el coeficiente estequiométrico y D_{eff} es el coeficiente de difusión efectiva.

9.1.3. Transporte de energía

A pesar de que se desconoce exactamente el modelo de transporte de energía utilizado por la empresa externa, a continuación se explica un modelo genérico. Este considera el flujo de refino desde la superficie (verticalmente), flujo de aire con evaporación de agua y el calor producido por las reacciones de lixiviación.

Asumiendo que cualquier sección de la pila está en equilibrio, entonces la ecuación de conservación de calor para una unidad de pila es:

$$C_{p,B}\rho_B \frac{\partial T}{\partial t} = k_B \Delta T - \frac{\partial H_L}{\partial y} - \left(\frac{\partial H_g}{\partial x} + \frac{\partial H_g}{\partial y}\right) + (-\Delta H_R) R_{ch}$$

Donde el signo negativo denota que se libera calor, $C_{p,B}$ es la capacidad térmica promedio, k_B es la conductividad térmica, H_L y H_g son la entalpía del líquido y del gas por unidad de área, ΔH_R es el calor de reacción promedio y R_{ch} es la constante de reacción química. A su vez:

$$\Delta H_R = \Delta H_{cPY} + F_{PY} \Delta H_{PY}$$

Con ΔH_{cpy} el calor de reacción por unidad de calcopirita disuelta, ΔH_{py} es el calor de reacción por unidad de pirita disuelta.

$$H_L = -q_L \rho_L C_{p,L} (T - T_r) \text{ y } H_g = G [-\lambda H_{\text{air}} + (C_{p,g} + C_{p,v} H_{\text{air}}) (T - T_r)]$$

Donde ρ_L es la densidad del líquido, q_L es la velocidad volumétrica por unidad de área, $C_{p,L}$, $C_{p,g}$ y $C_{p,v}$ son los calores específicos del líquido, el aire y el vapor de agua. λ es el calor de vaporización del agua, G es la velocidad másica del aire seco por unidad de área, T_r es la temperatura superficial de la pila y H_{air} es la humedad del aire:

$$H_{\text{air}} = \frac{(M_W / M_{\text{air}}) P_{\text{sat}}}{P - P_{\text{sat}}}$$

Con P la presión atmosférica, M_W y M_{air} las masas molares del agua y aire respectivamente y P_{sat} la presión del vapor de agua.

$$\log P_{\text{sat}} = 8,07 - 1.730(T - 39,75)$$

Tabla 10: Unidades y valores para un modelo estándar de biolixiviación

Parámetro	Valor	Unidades
ρ_B	1.770	kg/m ³
ρ_L	1.100	kg/m ³
ρ_g	1,16	kg/m ³
D_l	1,5x10 ⁻⁵ (f)	m ² /s
μ_g		kg/(ms)
ΔH_{cpy}	-15.700 [42]	kJ/kg
ΔH_{PY}	-12.600	kJ/kg
$C_{p,g}$	1,0	kJ/(kgK)
$C_{p,l}$	4,17	kJ/(kgK)
$C_{p,g}$	0,84	kJ/(kgK)
$C_{p,v}$	1,86	kJ/(kgK)
λ	583	kJ/kg
k_B	2,1x10 ⁻³ (e)	kJ/(mKs)
ϵ_g	0,2 (*)	
ϵ_l	0,2 (*)	
Y	2,2x10 ¹⁴ (e)	
μ_{max}	2,82x10 ⁻⁵ (e)	s ⁻¹
k_{death}	2,5x10 ⁻⁶ (e)	s ⁻¹
k_1	3,47x10 ⁻⁵ (e)	s ⁻¹
k_2	2,0x10 ⁻⁷ (e)	s ⁻¹
$K_{M,O}$	7,6x10 ⁻³ (e)	g/L
$K_{M,Fe^{2+}}$	5,58x10 ⁻³ (e)	g/L
F_{PY}	2,7	
v_g	1,26x10 ⁻⁴	m/s
v_l	1,67x10 ⁻⁶	m/s
δ	0,01 (e)	m
G	0,7%	
β	1,3x10 ⁻⁷ (e)	m/s
ϕ	0,65 (e)	
σ	4	
D_{eff}	9,5x10 ⁻¹¹ (e)	m ² /s
Ψ_{max}	7,8x10 ¹² (e)	células por kg
k_L	6,94x10 ⁻² (e)	s ⁻¹
T_r	28,7	°C
$O_{2,g}$	0,26 (e)	kg/m ³
T	298	K
P	7,04x10 ⁴	Pa

^f Valor del modelo estándar. Se desconoce el valor usado por DRM.

9.2. Análisis de relación entre días de operación y extracción total

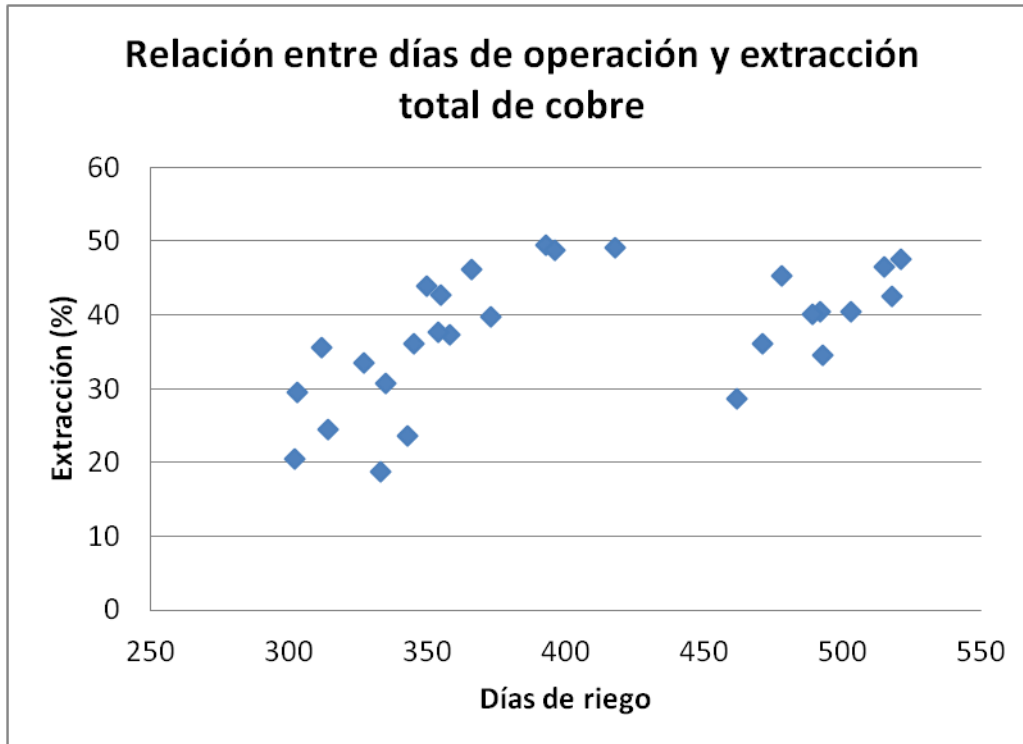


Figura 35: La extracción promedio es 37,43%. Período comprendido entre marzo de 2006 y septiembre de 2009. Cada punto representa una franja

Se comparan los días de operación con la extracción de cobre (Figura 35). Es posible observar una tendencia de que en menos días de operación, hay una menor extracción de cobre (franjas con menos de 350 días de riego). Sin embargo, cuando la operación se realiza por más de 400 días, no se ven grandes diferencias de extracción en comparación con extracciones cercanas a 350 días. Este análisis no es concluyente por sí solo, debido a que la mineralogía entre franjas varía.

9.3. Modelo de Bird

El Clear Sky Model de Bird es un modelo de radiación solar que se basa en comparaciones con resultados empíricos. Se compone de expresiones algebraicas simples y recibe 10 datos entregados por el usuario para calcular la radiación solar normal, directa y global de cada hora del año. Los resultados difieren en un +/- 10% con los valores reales. Un gráfico de resultados para cada día del año se puede ver en la Figura 36.

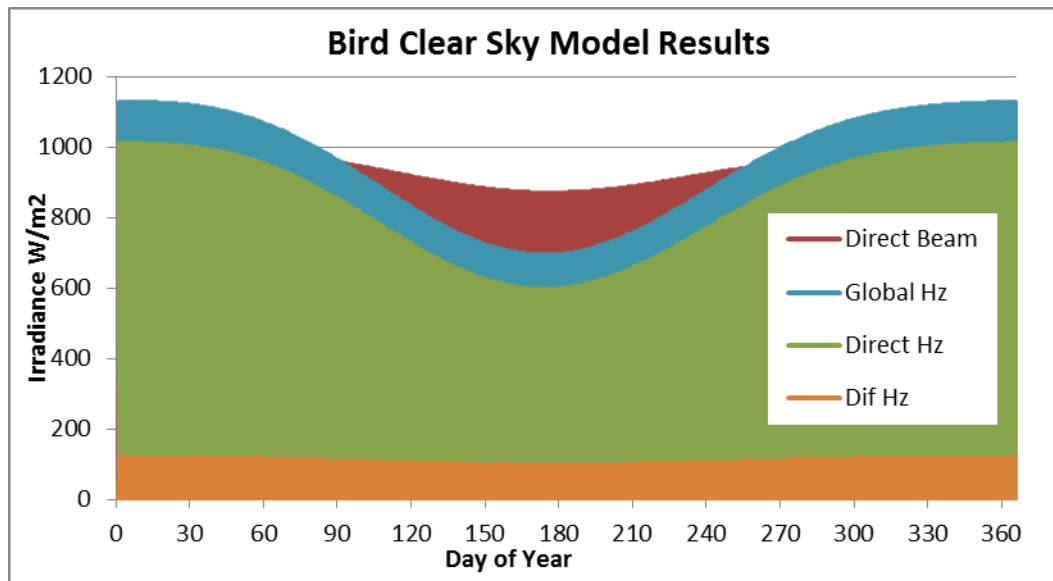


Figura 36: Ejemplo de resultados que entrega el modelo de Bird

Con estos resultados, es posible calcular la superficie de colectores requerida para lograr el aporte de calor necesario (ver ejemplo de cifras en Anexo Potencia Térmica).

9.4. Cálculo del ángulo de incidencia

Las columnas de Radiación directa, global y DNI (Direct Normal Irradiance: Radiación directa normal) las entrega el modelo de Bird de acuerdo a las características del sitio. H es el ángulo de elevación del Sol para cada hora [39].

$$H = 90 - Z$$

Z es el cénit, también entregado por el modelo de Bird. El Azimuth (A) es el ángulo de apertura del Sol medido entre el Sur y su proyección en el suelo.

$$\sin(A) = \frac{\cos(d) \times \sin(h)}{\cos(H)}$$

Donde d es el ángulo de declinación (Bird) y h es el ángulo horario (Bird).

Finalmente, se calcula el ángulo de incidencia θ :

$$\cos(\theta) = \sqrt{1 - \cos^2(H) \times \cos^2(A)}$$

Las figuras 37 y 38 pueden ayudar a un mejor entendimiento de estos ángulos.

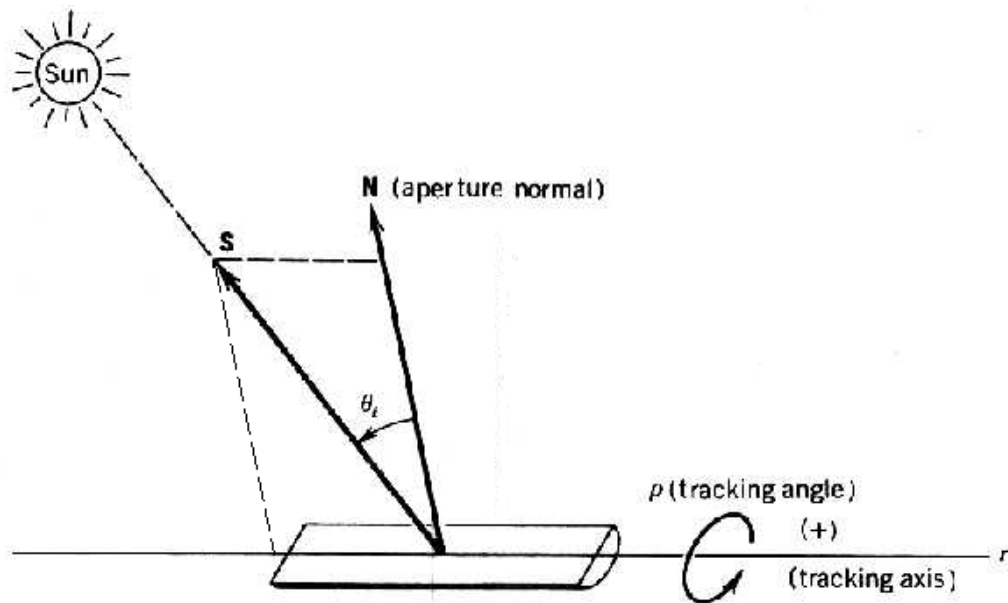


Figura 37: Diagrama de ángulo de incidencia con respecto al vector normal al plano de apertura del colector [35]

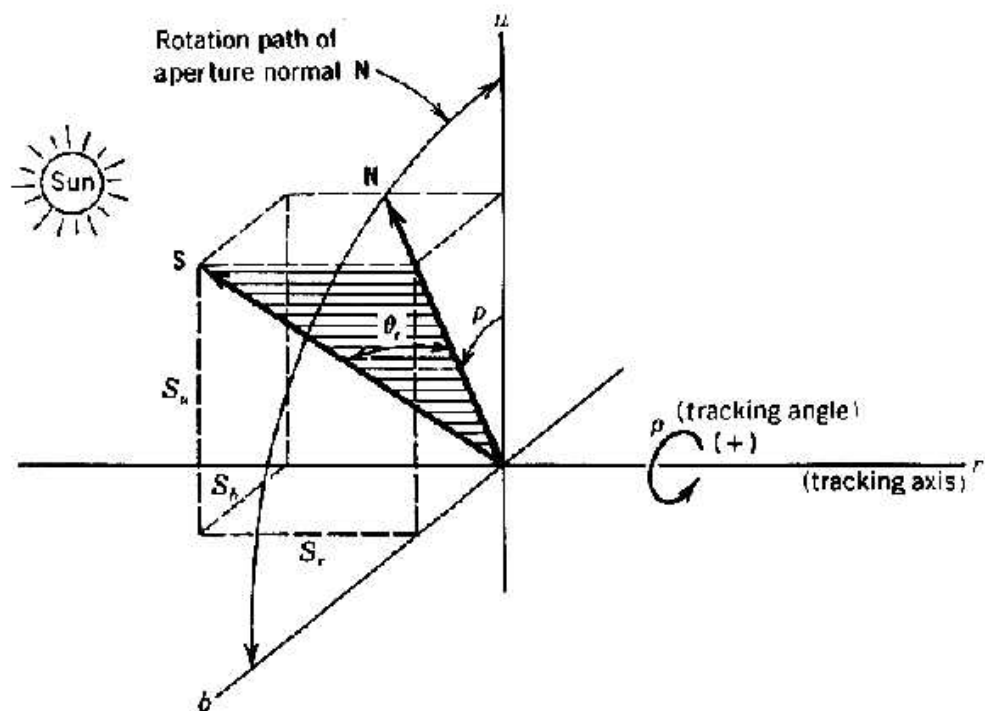


Figura 38: Diagrama que facilita el entendimiento del cálculo del ángulo de incidencia [35]

9.5. Eficiencia de colectores cilindro-parabólicos

En la Tabla 11 se ven datos de Potencia efectiva [25] de un campo de colectores en función del ángulo de incidencia del Sol suponiendo 1050 W/m^2 de Radiación Directa Normal. En la columna Potencia teórica se encuentra la potencia según el Modelo de Bird. La eficiencia se calcula como la razón entre la potencia efectiva y la potencia teórica.

Potencia efectiva (MWt)	Potencia teórica (MWt)	Ángulo de incidencia θ (°)	Eficiencia
198	258	0	0,77
197	257	5	0,77
196	254	10	0,77
195	249	15	0,78
193	242	20	0,80
191	233	25	0,82
188	223	30	0,84
185	211	35	0,88
180	197	40	0,91
174	182	45	0,96
170	172	48	0,99

Graficando (ver Figura 39), se obtiene una línea de tendencia polinómica (η). En promedio anual, para la latitud de la pila en estudio, el ángulo de incidencia es cercano a 19° , lo que se traduce en que la eficiencia promedio es cercana a 80%.

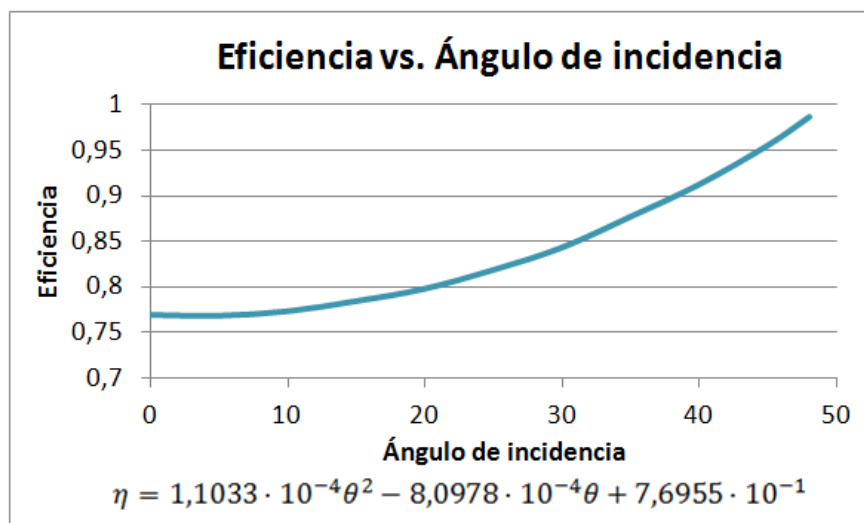


Figura 39: Curva que describe la eficiencia en función del ángulo de incidencia

Refino
 Flujo: 16500 m³/h
 Densid: 1100 kg/m³
 Masa: 18150000 kg/h
 cp: 3,8 kJ/kg K

Colectores
 Apertura: 674438 m²
 Factor ltr: 0,98

Aumento de temperatura prom. anual
 10,02 °C

Potencia promedio anual
 192 MWt

Día	Hora	W/m ²		DNI	H	Azimuth	cos theta	theta	theta'	Rend.	MWt		Aum. T [°C]
		Rad. directa	Rad. global								Pot. Teo	Pot. Real	
1	0	0	0	0	0	0,00	0	0,00	0	0	0,0	0,0	0
1	1	0	0	0	-41,19	-19,47	0,70	45,20	90,00	0,0%	0,0	0,0	0,0
1	2	0	0	0	-34,83	-35,05	0,74	42,22	90,00	0,0%	0,0	0,0	0,0
1	3	0	0	0	-25,74	-47,10	0,79	37,82	90,00	0,0%	0,0	0,0	0,0
1	4	0	0	0	-14,91	-56,24	0,84	32,48	90,00	0,0%	0,0	0,0	0,0
1	5	0	0	0	-3,00	-63,29	0,89	26,67	90,00	0,0%	0,0	0,0	0,0
1	6	84	134	504	9,60	-68,92	0,94	20,77	20,77	78,4%	318,1	249,5	13,0
1	7	300	383	780	22,65	-73,59	0,97	15,11	15,11	76,7%	507,7	389,3	20,3
1	8	526	624	895	36,00	-77,61	0,98	10,00	10,00	75,7%	594,6	450,2	23,5
1	9	727	835	955	49,55	-81,21	1,00	5,69	5,69	75,3%	641,2	482,9	25,2
1	10	883	996	989	63,22	-84,59	1,00	2,43	2,43	75,3%	666,3	501,7	26,2
1	11	980	1097	1006	76,97	-88,12	1,00	0,42	0,42	75,4%	678,4	511,4	26,7
1	12	1011	1129	1011	89,22	-74,50	1,00	0,21	0,21	75,4%	681,7	514,0	26,8
1	13	973	1089	1005	75,46	87,69	1,00	0,58	0,58	75,4%	677,6	510,7	26,7
1	14	868	982	986	61,72	84,23	1,00	2,73	2,73	75,3%	664,3	500,1	26,1
1	15	707	814	950	48,06	80,83	0,99	6,11	6,11	75,3%	637,4	480,2	25,1
1	16	502	599	886	34,53	77,19	0,98	10,52	10,52	75,8%	587,6	445,3	23,2
1	17	275	355	761	21,21	73,12	0,96	15,71	15,71	76,8%	494,0	379,6	19,8
1	18	64	108	452	8,20	68,36	0,93	21,41	21,41	78,7%	283,5	223,0	11,6
1	19	0	0	0	-4,34	62,60	0,89	27,32	27,32	80,0%	0,0	0,0	0,0
1	20	0	0	0	-16,16	55,35	0,84	33,10	33,10	80,0%	0,0	0,0	0,0
1	21	0	0	0	-26,84	45,94	0,78	38,35	38,35	80,0%	0,0	0,0	0,0
1	22	0	0	0	-35,68	33,52	0,74	42,62	42,62	80,0%	0,0	0,0	0,0
1	23	0	0	0	-41,66	17,56	0,70	45,42	45,42	80,0%	0,0	0,0	0,0

9.6. Potencia térmica

9.7. Flujo de caja para colectores cilindro-parabólicos en el caso +10 °C

FLUJO DE CASH	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ingresos (+)																
Ahorro compra de energía y potencia (+)	US\$	141.777.983	372.925.942	159.490.867	196.022.593	179.375.994	150.047.649	232.909.596	194.577.257	229.197.404	245.845.132	284.994.768	193.146.419	272.862.217	225.728.897	341.023.938
Ingreso por bonos de carbono (+)	US\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ahorro pago de multa (+)	US\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Ingreso Operacional (+)	US\$	141.777.983	372.925.942	159.490.867	196.022.593	179.375.994	150.047.649	232.909.596	194.577.257	229.197.404	245.845.132	284.994.768	193.146.419	272.862.217	225.728.897	341.023.938
Costos (-)																
Operación & Mantenimiento (-)	US\$	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720	4.494.720
Gasto Financiero (-)	US\$	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771	42.362.771
Ganancia de Capital (+)	US\$	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051
Depreciación Legal (-)	US\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pérdidas Electrico Ambiental (-)	US\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidad antes de Impuesto	US\$	0	99.415.192	330.563.171	117.128.096	153.659.812	137.013.192	107.694.878	190.546.825	152.214.495	186.534.633	203.482.361	242.631.997	150.783.646	230.499.446	182.766.126
Impuesto	US\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidad después de Impuesto	US\$	0	99.415.192	330.563.171	117.128.096	153.659.812	137.013.192	107.694.878	190.546.825	152.214.495	186.534.633	203.482.361	242.631.997	150.783.646	230.499.446	182.766.126
Ganancia de Capital (-)	US\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Legal (+)	US\$	0	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051	37.868.051
Pérdidas Electrico Ambiental (+)	US\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Operaciones	US\$	0	137.283.243	368.431.222	154.996.147	191.527.863	174.861.244	145.552.929	228.414.876	190.062.537	224.702.694	241.350.412	290.500.048	188.651.699	268.367.497	220.634.177
Ingeniería de xx (-)	US\$															
Inversión por Planta solar (-)	US\$			598.020.767												
Inversión por contingencias (-)	US\$															
Valor Residual (+)	US\$															
Capital de Trabajo (-)	US\$															
Recuperación Capital de Trabajo (+)	US\$															
Prestamo (+)	US\$															
Amortizaciones (-)	US\$															
Flujo de Caja	US\$	-598.020.767	137.283.243	368.431.222	154.996.147	191.527.863	174.861.244	145.552.929	228.414.876	190.062.537	224.702.694	241.350.412	290.500.048	188.651.699	268.367.497	220.634.177

Parametros Generales Relevantes	
Tasa de Descuento	10%
Impuesto a Empresas (%)	0%
Vida útil Planta (años)	15
Meses Operación 2010	0

VAN	US\$	1.068.343.488
TIR	%	36,3%
RECUPERACIÓN	Años	2,54

