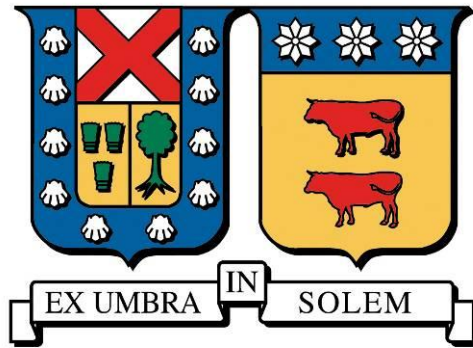




UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

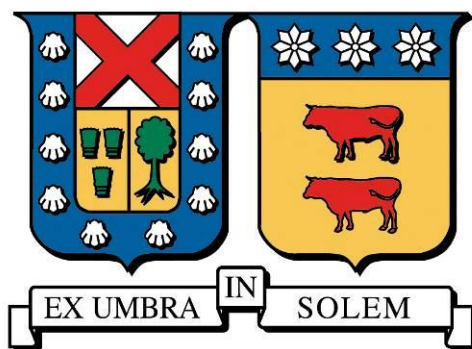
**Evaluación Técnico Económica para reemplazo de suministro
térmico convencional por sistema Termosolar en proceso de
refinación del cobre**

“Experiencia en el norte de Chile”

Juan Manuel Arévalo Aedo

MAGISTER EN ECONOMIA ENERGETICA

2016



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Evaluación Técnico económica para reemplazo de suministro
térmico convencional por sistema Termosolar en proceso de
refinación del cobre**

“Experiencia en el norte de Chile”

Tesina de grado presentada por

Juan Manuel Arévalo Aedo

Como requisito parcial para optar al grado de

Magister en Economía Energética

Profesor Guía

Dr. Ing. Alejandro Sáez Carreño

Profesor Correferente

MBA, Ing. Gerardo Muñoz Chacón

Julio 2016

TITULO DE LA TESIS:

**Evaluación Técnico Económica para reemplazo de suministro
térmico convencional por sistema Termosolar en proceso de
refinación del cobre**
“Experiencia en el norte de Chile”

AUTOR:

Juan Manuel Arévalo Aedo

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de Magíster en Economía Energética del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Ing. Alejandro Sáez Carreño.....

MBA, Ing. Gerardo Muñoz.....

Santiago, Chile. Julio de 2016

DEDICATORIA

A mi amada esposa Roxana

A mis hijas Josefa Trinidad y Maite Ignacia

Por su amor y apoyo incondicional para realizar este MEE

RESUMEN

El potencial energético solar de la zona norte del país es uno de los más importantes a nivel mundial, el aprovechamiento de este recurso como fuente de energía para las operaciones mineras de esta zona de Chile, haciéndolas más sustentables, se ha tornado en los últimos años un desafío técnico económico para las compañías mineras con más renombre en el país.

La tecnología termosolar ha presentado un camino atractivo para cubrir la demanda del recurso térmico en procesos mineros, intensivos en consumo de combustibles fósil como aporte de calor convencional, estas tecnologías ya aplicadas en proyectos que se encuentran actualmente en operación en faenas mineras especialmente para procesos de SX y EW nos entregan mediante la investigación de la presente tesina conceptos importantes a tener en cuenta ante la evaluación de una inversión para este tipo de proyectos, sus ventajas ambientales y de cuidado con la comunidad como también sus limitantes técnicas que también pueden involucrar las características geofísicas de la zona norte del país, pudiesen llegar a afectar el VAN de este tipo de proyectos., toda esta información y datos recopilados permitirán establecer mediante un análisis criterios a considerar para el desarrollo de esta tecnología en el mundo de la minería.

Finalmente se presentara un caso de evaluación correspondiente al reemplazo del aporte de calor (energía térmica) convencional por el desarrollo de un proyecto termosolar para el proceso de electrorrefinación del cobre, de este caso se obtendrán los aspectos más importantes que influyen en la rentabilidad del proyecto y se aplicara modelación estocástica para evaluar en qué medida afectan en VAN del proyecto principalmente el precio de los combustibles y la inversión del proyecto y el volumen de combustible desplazado.

ABSTRACT

The solar energy potential of the northern part of the country is one of the most important worldwide, the use of this resource as a source of energy for mining operations in this part of Chile, making them more sustainable, it has become in recent years an economic technical challenge for mining companies most renowned in the country.

Solar thermal technology has presented an attractive way to meet the demand of the thermal resource in mining, intensive processes consumption of fossil fuels as a contribution conventional heat, these technologies already implemented on projects that are currently in operation in mining especially for processes SX and EW deliver us by researching this thesis important concepts to consider before evaluating an investment in such projects, its environmental benefits and care with the community as well as their technical limitations which may also involve the characteristics geophysics in the northern part of the country, they could eventually affect the profitability of such projects., all this information and data collected by analyzing possible to establish criteria to be considered for the development of this technology in the world of mining.

Finally, a case for the replacement of the supply of heat (thermal energy) standard for the development of a solar thermal project for the process of electrorefining of copper, this case evaluation will present the most important aspects that influence the profitability of the project will be obtained and stochastic modeling were applied to assess the extent to which the project VAN affect mainly the price of fuel and the project investment and the volume of fuel displaced.

GLOSARIO

GEI:	Gases de efecto invernadero
ERNC:	Energías renovables no convencionales
COCHILCO:	Comisión Chilena del Cobre.
CODELCO:	Corporación Nacional del Cobre.
GNL:	Gas natural Licuado.
INE:	Instituto nacional de estadística.
LX:	Lixiviación
SX:	Extracción por solventes
EW:	Electro obtención
tmf:	Toneladas métricas de cobre fino.
tonCO₂eq:	Toneladas de emisión de CO ₂ equivalente.
USA:	Estados Unidos de Norteamérica.
US\$:	Dólar de Estados Unidos de Norteamérica.
ESCO:	Empresa de servicios energéticos.

INDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
GLOSARIO.....	5
INDICE.....	7
DEDICATORIA	2
1 INTRODUCCIÓN.....	8
2 OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo general:	10
2.2 Objetivos específicos:	10
3 METODOLOGIA.....	11
3.1 Demanda de calor en procesos mineros.....	11
3.2 Estado del arte tecnología Termosolar; Dos casos en Minería del Cobre	11
3.3 Análisis de casos experiencia en la minería; ventajas y oportunidades	12
3.4 Estudio de caso a implementar en proceso de refinación del Cobre	12
3.5 Evaluación Técnico – Económica	12
3.6 Conclusiones.....	13
4. DEMANDA TERMICA EN LA MINERÍA	14
4.1 POTENCIAL SOLAR EN EL NORTE DE CHILE	23
4.2 DESCRIPCIÓN TECNOLOGIA TERMOSOLAR PARA PROCESOS INDUSTRIALES.	26
4.3 TIPOS DE TECNOLOGIAS COLECTORES	30
5 ESTADO DEL ARTE TECNOLOGIA TERMOSOLAR EN MINERIA DE COBRE	33
5.1 PLANTA TERMOSOLAR EN DIVISIÓN GABRIELA MISTRAL.....	33
5.1.1 Beneficios operacionales de la planta Termosolar	34
5.1.2 Aspectos técnicos del proyecto	35
5.2 PLANTA TERMOSOLAR EN MINERA EL TESORO	38
5.2.1 ETAPAS DEL PROYECTO TERMOSLAR EN EL TESORO.....	42
5.2.2 CARACTERISTICAS TECNICAS PLANTA TERMOSOLAR MINERA EL TESORO.....	42

6 ANÁLISIS DE CASOS EXPERIENCIA EN LA MINERÍA; VENTAJAS Y OPORTUNIDADES	44
6.1 COSTOS ASOCIADOS A LA TECNOLOGÍA TERMOSOLAR.	44
6.2 Caso inversión planta Termosolar minera El Tesoro	45
6.3 CASO PLANTA TERMOSOLAR PAMPA ELVIRA MINERA GABY	49
7. ANALISIS DE LAS DOS EXPERIENCIAS TERMOSOLARES EN MINERIA	54
8. ESTUDIO DE CASO A IMPLEMENTAR EN PROCESO DE REFINACIÓN DEL COBRE.....	58
8.1 Aporte de calor convencional al Proceso.....	58
8.2 Costos asociados proceso vapor	61
8.3 Demanda de calor requerida para electrorefinación.	62
9. EVALUACIÓN TECNICO ECONOMICA	64
9.1 SENSIBILIZACIÓN DE VARIABLES.....	66
9.2 PROYECCIÓN DE PRECIO DE COMBUSTIBLES	68
10. ANALISIS ESTOCASTICO DEL PROYECTO	70
11. CONCLUSIONES	73
12. BIBLIOGRAFIA.....	78

1 INTRODUCCIÓN

La energía se ha convertido en uno de los insumos más críticos para la competitividad de la minería chilena. Las empresas socias del consejo minero vienen incorporando desde hace tiempo la eficiencia energética en su gestión productiva y en el diseño de sus nuevos proyectos, y ahora se han comprometido aún más con este objetivo.

El 20% de los costos operacionales de las empresas mineras está constituido por la energía eléctrica y, al mismo tiempo, Chile tiene evidentes desventajas con respecto a otros países mineros, ya que debe pagar hasta el doble por este insumo.

A la vez, en la medida en que caen las leyes de mineral y se debe procesar mayor cantidad de roca para obtener la misma cantidad de mineral, que se encuentran rocas más duras que requieren mayores esfuerzos de chancado y molienda, y que hay una necesidad creciente de recurrir a agua de mar que debe ser impulsada a la faenas, todo esto deriva en un mayor uso de energía eléctrica, no obstante los esfuerzos de eficiencia de las empresas mineras. Así, no es de extrañar que el consumo de energía eléctrica en la minería del cobre haya vuelto a subir en 2014, alcanzando 23.128 GWh. En cualquier caso, en términos de participación en el consumo eléctrico del país, no ha variado el 33% observado en los últimos años.

Si bien esta participación de 33% se ha mantenido constante, consumir un tercio de la electricidad del país sigue siendo relevante, ya que por su disponibilidad, costos y medios de suministro, la energía eléctrica y su sustentabilidad económica y ambiental se han convertido en un tema de debate

nacional. Así, no es de extrañar que a la gran minería se le plantee el desafío de contribuir a dicha sustentabilidad, por la vía de mayor eficiencia e impulso a inversiones en generación tanto con energías convencionales como energías renovables no convencionales (ERNC).

En el tema de energía y cambio climático, es pertinente referirse a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la minería. Por una parte, están las emisiones indirectas que derivan del consumo de electricidad. Bajo el esquema vigente, en que las emisiones de los sistemas eléctricos son atribuibles a todos sus usuarios, con independencia de los contratos de suministro que cada uno tenga, es discutible hablar de emisiones “de responsabilidad” de la minería. Así, sólo se sabe que la minería consume en torno a un tercio de la electricidad del país y, por tanto, se podría pensar en atribuirle un tercio de las emisiones de los sistemas eléctricos. Así también, cuando se debate sobre los esfuerzos que deben hacer los distintos sectores para contribuir a reducir las emisiones provenientes del sector eléctrico, la conclusión habitual es que todos los sectores deben ser más eficientes en el consumo eléctrico. En este sentido, y tal como se mencionó en párrafos previos, la minería está comprometida con la eficiencia energética.

Más claramente, la minería es responsable de sus emisiones directas, provenientes del consumo de combustibles fósiles. En términos gruesos, las emisiones directas aumentaron en 4,7% entre 2013 y 2014, según reportes de Cochilco.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general:

Desarrollar análisis de evaluación técnico-económico para el cambio de tecnología convencional de suministrar calor por un sistema Termosolar, para el proceso de electrolisis del cobre.

2.2 Objetivos específicos:

- ❖ Realizar un levantamiento de la demanda de energía en los procesos mineros determinados y sus costos asociados al uso de combustible.
- ❖ Realizar análisis técnico del reemplazo de combustible por tecnología Termosolar sus limitantes y condiciones.
- ❖ Verificar estado del arte con respecto a esta tecnología para dos casos en la gran minería del cobre.
- ❖ Realizar análisis del impacto económico que generaría el proyecto de cambio en la matriz energética.

3 METODOLOGIA.

La metodología que se empleará en el desarrollo de esta tesina es la que se explica a continuación y se indica esquemáticamente en Fig. 3.1.

Se debe tener claridad que la metodología desarrollada esta específicamente orientada a poder cumplir con los objetivos indicados en el capítulo 2.

3.1 Demanda de calor en procesos mineros

En este capítulo se presentará la información recopilada de diversas fuentes del rubro energético minero, sobre la demanda de calor en la gran minería para procesos productivos del cobre en diferentes compañías mineras. Al igual que la recopilación bibliográfica desde sitios de internet (Cochilco, www.codelco.cl, www.antofagastaminerals.cl, ETC.) y publicaciones de especialistas en materia de energía termosolar.

3.2 Estado del arte tecnología Termosolar; Dos casos en Minería del Cobre

En este capítulo se presentará la información recopilada de primera fuente con Profesionales del rubro energético minero sobre los casos de dos plantas termosolares que aportan calor a procesos productivos del cobre en diferentes compañías mineras además se presentará información de los proyectos desarrollados en los dos modelos de plantas a estudiar.

3.3 Análisis de casos experiencia en la minería; ventajas y oportunidades

En este capítulo, en base a lo señalado en las Opciones Técnicas, se establecerán cuáles son los beneficios directos e indirectos que puede generar la aplicación de cada tecnología presentada y de sus respectivos modelos de negocios asociados a la operación de estas plantas termosolares

3.4 Estudio de caso a implementar en proceso de refinación del Cobre

En este capítulo primeramente se dará a conocer en que consiste en proceso de electrorefinación del cobre y su necesidad de energía calórica para la producción de cobre fino, se determinará la demanda real base de calor para el proceso de electrorefinación del cobre para definir las condiciones de borde del proyecto Termosolar a estudiar

3.5 Evaluación Técnico – Económica

En este capítulo, a partir de lo establecido en el análisis de beneficios técnicos directos e indirectos, se realizará una evaluación económica de la utilización de cada modelo de negocio como inversión propia de la compañía o contrato de entrega de calor con tarifa

3.6 Conclusiones

En base a todos los capítulos desarrollados se realizarán las conclusiones del presente trabajo de Tesis, para establecer la conveniencia o no de la aplicación de la tecnología Termosolar y cuáles serían las principales variables a considerar cuando se deba realizar un análisis de posible Modelo de negocio a escoger.



Fig. 3.1: Metodología de Trabajo para el desarrollo de la Tesis.

4. DEMANDA TERMICA EN LA MINERÍA

La industria minera basa su desarrollo en tres elementos básicos: energía, agua y recursos humanos. De estos hay dos en los cuales la energía solar puede jugar un rol importante; energía y agua.

Una gran oportunidad para el uso de la energía solar en procesos productivos está en el calentamiento de soluciones de procesos de lixiviación. La minería del cobre emplea principalmente dos procesos: el proceso de sulfuros y el de óxidos. En el proceso de sulfuros resaltan dos aplicaciones para el calor de proceso de origen termosolar: el secado y la fundición del concentrado. En esta última sería posible aplicar la termosolar de concentración, permitiendo separar el cobre de los otros materiales. En el proceso de óxidos destacan otras tres aplicaciones del calor de origen termosolar: el calentamiento de soluciones tanto en las pilas de lixiviación como en el proceso de electro-obtención y finalmente el lavado de ánodos.

La demanda de calor para procesos de óxidos, asociada a la actividad minera fue aproximadamente 1,670 GWh/año para el 2011. Se considera por lo tanto que es éste el potencial actual de uso de la energía termosolar en este segmento. Los procesos de secado y fundición aún no se encuentran evaluados. Habrá de considerarse sin embargo, la aplicación para el calor de proceso (calor de alta, media o baja temperatura) para conocer la tecnología de energía termosolar potencialmente requerida. Asimismo, se ha realizado una proyección de demanda de calor para el proceso de óxidos, el cual ascendería a 1,515 GWh/año al 2020. Por lo tanto, la oportunidad de uso de energía termosolar para los próximos 8 años estará en torno a los 1,600 GWh/año.

La industria minera en Chile es conocida por su elevado consumo energético, del cual una buena parte es en forma de electricidad. Sin embargo, los consumos no eléctricos también son significativos, aunque gran parte de éstos corresponden a consumo de transporte y no necesariamente a consumos térmicos, que son menores en proporción frente al total.

Para entender mejor los procesos de la minería donde existe consumo de energía es importante entender los grandes procesos de la minería del cobre según tipo de mineral.

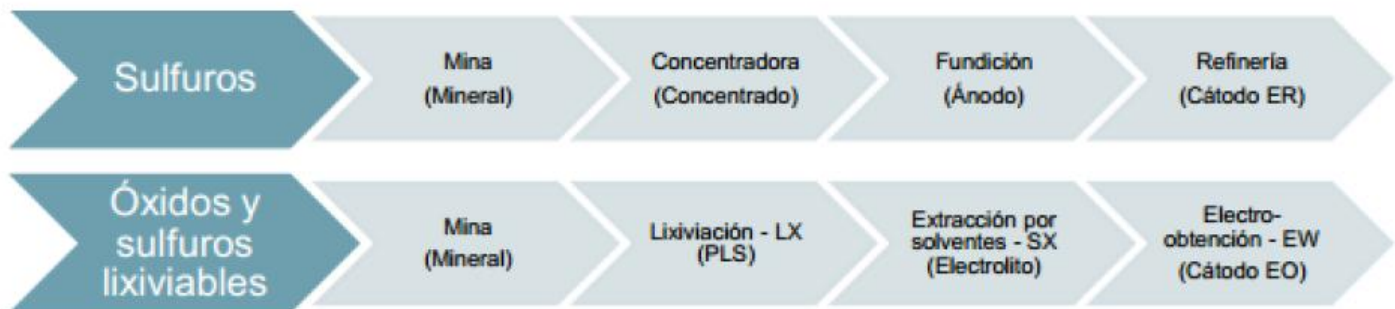
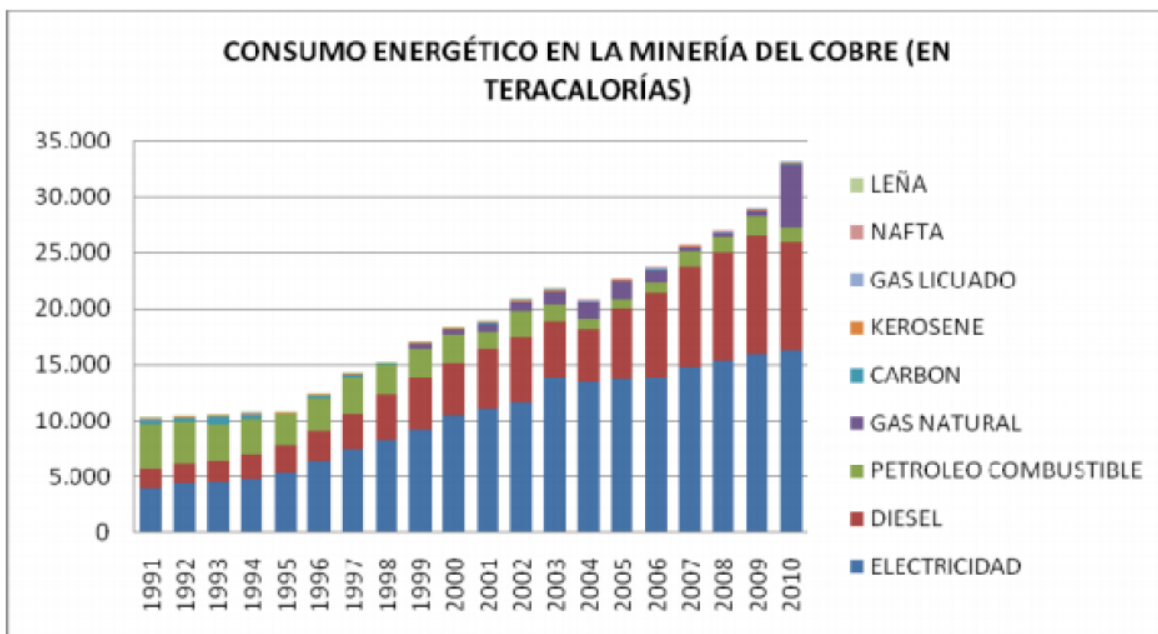


Figura N°4.1 Procesos mineros según tipo de mineral

Fuente: Cochilco

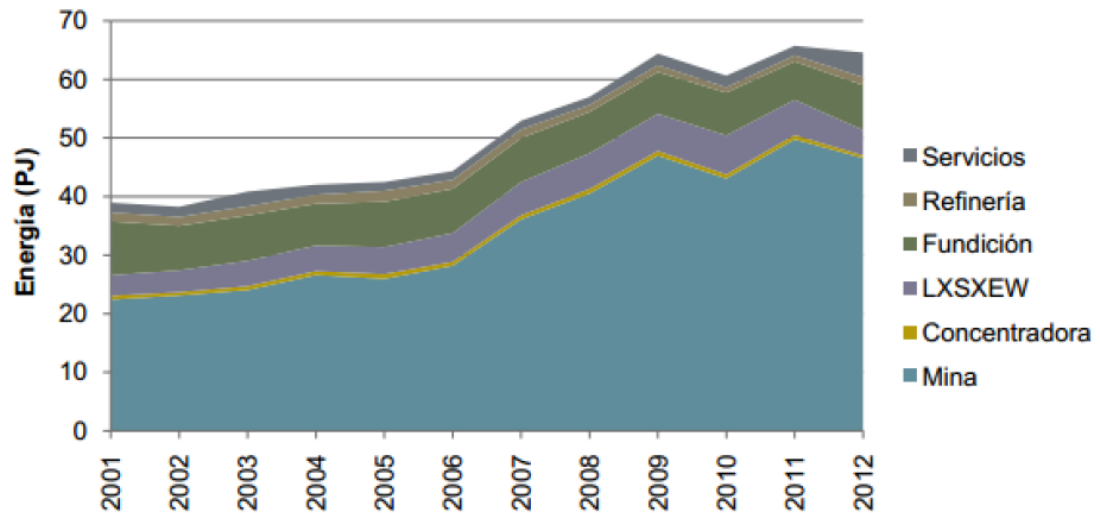
Por otra parte, el gráfico de la Ilustración 17 muestra la evolución del uso de fuentes de energía por la minería del cobre, donde se aprecia con claridad el uso eléctrico, diésel (principalmente para el movimiento de camiones) y de otros como el petróleo combustible y el gas natural a partir de 2010, cambio que se debe a la puesta en marcha del terminal GNL de Mejillones, que ha permitido reducir en parte el consumo de diésel.



Grafica N°4.1 Consumo energético en la minería del cobre según fuente de energía (Fuente: INE)

De acuerdo a informes de la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco 2013), los procesos que más consumen energía (electricidad + combustibles) corresponden principalmente a la explotación minera en sí (37%), la concentradora (28%) y el proceso LXSXEW (18%). Este último, proceso que incluye a la lixiviación (LX), extracción por solventes (SX) y electro-obtención (EW), es ya conocido por su importante uso de energía térmica en el calentamiento de soluciones y donde aplicaciones ya se encuentran en marcha de energía solar térmica, en Minera El Tesoro y Minera Gaby.

Si de esto consideramos solo el consumo de combustibles, la evolución por uso final de energía se puede apreciar en la siguiente gráfica.



Grafica N°4.2 Consumo de combustibles por tipo de proceso en la minería del cobre (Fuente: Cochilco 2013)

Aquí se aprecia que la mina es la mayor demandadora de combustible, principalmente asociada a movimiento de material y maquinaria. Así el proceso LXSXEW muestra un porcentaje del 7% del total, que aunque es menor que lo visto anteriormente, es significativo desde el punto de vista térmico¹⁶.

Aunque en la minería existen consumos de combustible diversos en cada uno de los procesos, para el desarrollo del presente proyecto se ha trabajado solo en tres operaciones, descartando por supuesto todos los consumos de transporte, maquinaria y térmicos de alta temperatura como el caso de los hornos de fundición. Así también se ha descartado el consumo en el área de servicios por tratarse de usos estrictamente de Agua Caliente Sanitaria y calefacción que no son procesos industriales propiamente tales.

Así, las operaciones contempladas dentro de la caracterización de la industria minera se han centrado en las de Electro-obtención, Electro-refinación y Biolixiviación.

Electroobtención (EW)

El proceso de electroobtención del cobre consiste en la transformación electroquímica del cobre disuelto en un electrolito acuoso, que contiene CuSO_4 y H_2SO_4 disueltos, en cobre metálico de alta pureza depositado en un cátodo, utilizando energía eléctrica desde una fuente externa.

La temperatura óptima de operación de EW se encuentra entre los 45 y 55°C rango en el cual se optimiza la conductividad del electrolito.

Posteriormente, el cátodo obtenido es lavado con agua a presión a una temperatura de 80°C con el fin de evitar sulfataciones y para asegurar el retiro de restos de electrolito de la superficie antes de que el cátodo sea despegado.

Electrorrefinación (ER)

La electrorrefinación es una operación utilizada para producir cátodos de cobre de alta calidad a partir de ánodos de cobre con impurezas moldeados en la etapa de fundición.

Los cátodos y ánodos intercalados son sumergidos en una solución electrolítica que contiene ácido sulfúrico y sulfato de cobre principalmente, a una temperatura de 65°C aproximadamente y sometidos a una corriente eléctrica para generar la migración de los iones de cobre.

Existen numerosas faenas mineras de cobre en el país distribuidas principalmente entre la primera y sexta región. Todas zonas con excelentes atributos de radiación solar, en especial en el norte del país.

La siguiente es una lista de las operaciones mineras en funcionamiento o en última etapa para entrada en operación. Se indica su región de operación, si posee o no proceso de electro-obtención (EW) o electro-refinación (ER) para la producción de cátodos de cobre y sus respectivas producciones de cátodos y demanda de energía. Las mineras en rojo aún no están en funcionamiento y las en azul son no-identificadas, pero existentes de acuerdo a producción agregada por región.

Mina	Operador	REGION	EW-ER	Producción Cátodos (TMF)	Demanda Energía (MWh)
Collahuasi	Collahuasi	1	Sí	60,0	41.219
Cerro Colorado	BHP Billiton	1	Sí	90,9	62.419
Quebrada Blanca	Teck	1	Sí	77,0	52.870
Zaldívar	Barrick	2	Sí	135,7	93.195
Codelco Chuquicamata	Codelco	2	Sí	442,6	304.056
Codelco Radomiro Tomic	Codelco	2	Sí	371,9	255.460
Codelco Gaby	Codelco	2	Sí	116,8	80.212
Escondida	BHP Billiton	2	Sí	181,5	124.702
Mantos Blancos	Anglo American	2	Sí	25,1	17.214
El Tesoro	Antofagasta Minerals	2	Sí	95,7	65.730

Mina	Operador	REGION	EW-ER	Producción Cátodos (TMF)	Demanda Energía (MWh)
Michilla	Antofagasta Minerals	2	Sí	41,8	28.688
Spence	BHP Billiton	2	Sí	170,6	117.185
El Abra	Freeport-McMoRan	2	Sí	150,4	103.349
Lomas Bayas	Xtrata	2	Sí	70,2	48.226
Esperanza	Antofagasta Minerals	2	No		0
Franke	KGHM	3	Sí	24,0	16.487
Mantos de la Luna	Minera Mantos de la Luna	2	Sí	10,0	6.870
Santa Margarita	Minera Cerro Dominador	2	Sí	6,0	4.122
Sierra Miranda	Minera Sierra Miranda	2	Sí	80,0	54.958
Antucoya	Antofagasta Minerals	2	Sí	2,4	1.649
Planta Tal Tal	ENAMI	2	Sí	25,0	17.174
Mantoverde	Anglo American	3	Sí	62,2	42.757
Codelco Salvador	Codelco	3	Sí	63,2	43.431
Caserones	Lumina Copper Chile	3	Sí	30,0	20.609
Candelaria	Freeport-McMoRan	3	No		0
Tabaco	International PBX Ventures	3	Sí	10,0	6.870
Planta El Salado	ENAMI	3	Sí	9,6	6.595

Mina	Operador	REGION	EW-ER	Producción Cátodos (TMF)	Demanda Energía (MWh)
Planta Manuel Antonio Matta	ENAMI	3	Sí	7,2	4.946
Planta Vallenar	ENAMI	3	Sí	3,6	2.473
Planta Delta	ENAMI	3	Sí	4,8	3.297
Biocobre	Sociedad Punta del Cobre	3	Sí	9,5	6.526
Los Pelambres	Antofagasta Minerals	4	No		0
Mina No Identificada	No Identificada	4	Sí	20,0	13.740
Carmen de Andacollo	Teck	4	Sí	4,0	2.748
Codelco Andina	Codelco	5	No		0
Mina No Identificada	No Identificada	5	Sí	5,6	3.847
Minera Amalia	Cemin	5	Sí	9,6	6.595
Minera Cobriza	Cerro Negro	5	Sí	5,8	3.957
El Soldado	Anglo American	5	Sí	2,0	1.386
Codelco El Teniente	Codelco	6	Sí	2,0	1.374
Los Bronces	Anglo American	13	Sí	40,7	27.988
Mina No Identificada	No Identificada	13	Sí	7,0	4.809

Tabla N°4.1 Operaciones mineras en Chile. Fuente: datos de Cochilco y Portal Minero.

De acuerdo al estudio Cochilco 201318, el proceso de LX-SX-EW incurre en un consumo unitario de combustible de 3.091,4 MJ/TMF, equivalente a 858,7 kWh/TMF. En consideración, que la lixiviación (LX) y la extracción por solvente (SX) no incurren en gastos de combustible, entonces se puede asumir que todo este consumo se debe al proceso de electro-obtención (EW) intensivo en demanda térmica.

En base a este valor y considerando un rendimiento promedio de las calderas de proceso de un 80% obtenemos las demandas energéticas por región señaladas en la Tabla N°2

Región	Demanda Energética	
I	156.507	MWh
II	1.339.277	MWh
III	137.505	MWh
IV	16.487	MWh
V	15.785	MWh
RM	32.797	MWh
VI	1.374	MWh
TOTAL	1.699.732	MWh

Tabla N°4.2. Demanda energética en la producción de cátodos por región.

4.1 POTENCIAL SOLAR EN EL NORTE DE CHILE

Si bien es cierto que plantas térmicas solares utilizan una porción considerable de terreno, al hacer un balance entre potencia eléctrica de salida versus superficie afectada por la planta, se tiene que estas plantas requieren menores superficies de terreno que plantas hidroeléctricas (incluyendo el área inundada necesaria al construir la represa) o plantas a carbón (incluyendo el área de la minera para la extracción del carbón).

Los factores indispensables para utilizar cualquiera de estas tecnologías son: Alta Radiación Solar y Alta radiación solar directa (para el caso de centrales térmicas que utilizan la tecnología de concentradores solares). Esto último quiere decir que es primordial la presencia de cielos despejados la mayor parte del año.

Chile posee inmejorables condiciones para la instalación de centrales solares, tanto para centrales solares térmicas como para grandes centrales fotovoltaicas. La Figura 3 muestra la compatibilidad perfecta entre los grandes consumos energéticos del norte del país y el recurso solar presente en la zona. Los valores de radiación global en el norte de Chile son superiores a los observados en plantas existentes en España, y solo son comparables con la radiación presente en el Norte de África y algunos sectores de Australia.

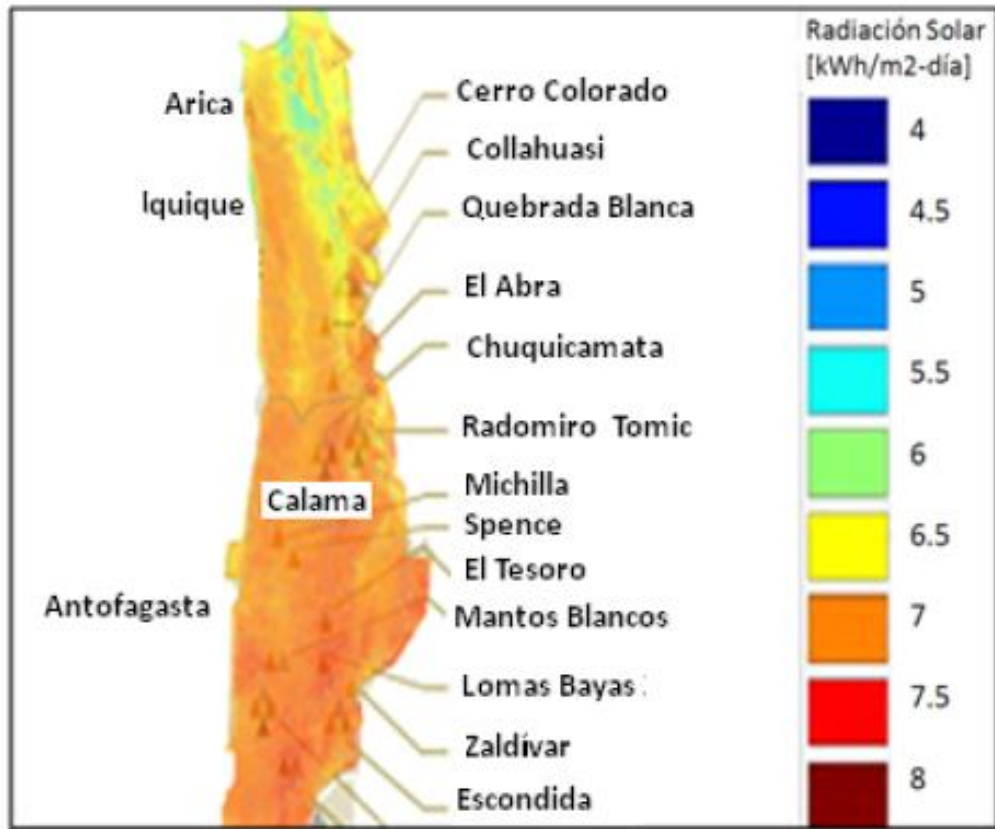


Figura N°4.1.1: Mapa de radiación solar. Fuente: DGF Universidad de Chile.

Para ilustrar el hecho de la transparencia solar del Norte de Chile, se muestra en la figura N°4.1.2, donde se observa la radiación extraterrestre para Calama y la radiación superficial horizontal. Se puede notar que la difusividad, propia del traspaso de los rayos a través de la atmosfera, es mínima con respecto a los valores comunes vistos en países con potencial energético solar, lo que indica que los cielos están predominantemente despejados la mayor parte del año.

Un buen indicador de la cantidad de radiación es la transparencia atmosférica (K_T).

Esta se calcula como:

$$K_T = \frac{H}{H_0}$$

A continuación se muestra en la figura 4 el nivel de radiación de la ciudad de Calama a modo de ver el potencial solar que posee el Norte Grande de Chile. Se clasificaron los días del año en 3 grupos:

Rango	Estado
$K_T < 0,6$	Día nublado
$0,6 < K_T < 0,7$	Día parcialmente despejado
$0,7 < K_T$	Día claro (despejado)

Tabla 4.1.1. Clasificación de días por transparencia

En el siguiente gráfico se muestra el porcentaje del total de días correspondiente a cada nivel de transparencia atmosférica para la ciudad de Calama. Dicho índice marca una diferencia con el resto de las ciudades chilenas y ejemplifica el potencial de aprovechamiento del recurso solar en esa localidad.

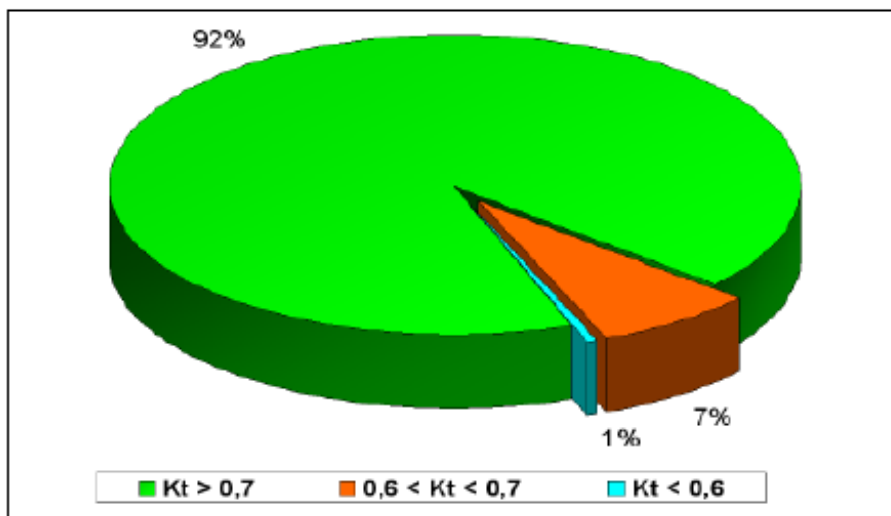


Figura N°4.1.2: Datos de transparencia atmosférica diaria KT de la ciudad de Calama.

4.2 DESCRIPCIÓN TECNOLOGIA TERMOSOLAR PARA PROCESOS INDUSTRIALES.

La tecnología de los captadores solares de mediana temperatura (CSMT) puede facilitar en gran medida los requerimientos de calor de procesos de la industria química, papelería, textil, de alimentos, etc., en procesos como los de secado, esterilizado, limpieza, evaporación, producción de vapor, así como el acondicionamiento (calefacción y refrigeración) de naves industriales evitando el uso de fuentes convencionales de energía y por tanto disminuyendo el impacto ambiental adverso de las actividades antropogénicas. Son claramente inidentificables aquellos numerosos procesos que requieren energía térmica con un nivel de temperatura entre 80 y 250°C. En los últimos años las investigaciones con respecto a este tipo de sistemas se han dirigido al desarrollo de nuevas aplicaciones, metodologías de control, análisis termodinámico y técnico-económico, así como el desarrollo de componentes como estructuras de soporte, materiales reflectores, materiales para el receptor y superficies absorbedoras.

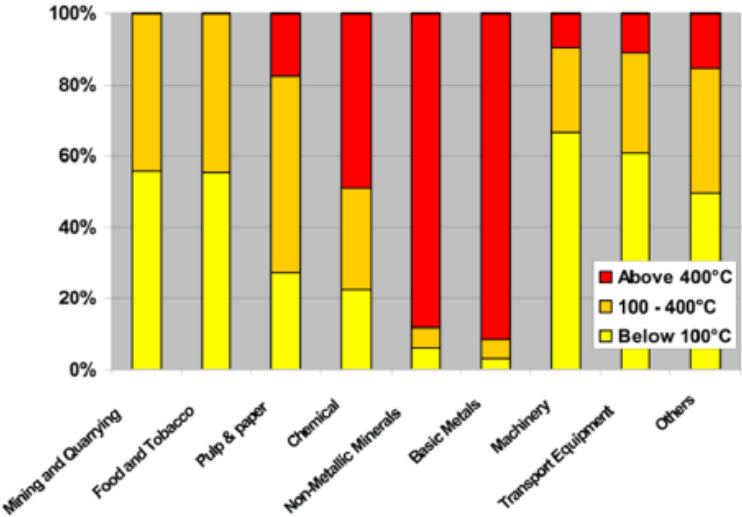
Los captadores solares de energía son un tipo especial de intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar en energía térmica que es transportada mediante un fluido de térmico o caloportador. En los captadores solares, la energía proveniente del Sol llega a un dispositivo receptor donde dicha energía se absorbe en la superficie y se transforma en calor por conducción. Este calor es posteriormente removido por un fluido (normalmente aire, agua, o aceite) que fluye a través del receptor. Así, los captadores solares son capaces de transformar la energía solar en calor útil para diversas aplicaciones.

Más allá de las aplicaciones de baja temperatura, hay varios posibles campos de aplicación de la energía solar térmica a un nivel de temperatura media (80 a 250°C). El más importante de ellos es la producción de calor para procesos industriales, lo que representa una cantidad significativa de calor. Por ejemplo, la demanda de calor industrial representa alrededor del 25% de la demanda global de las necesidades de energía final en los países del sur de Europa y países industrializados.

Con base en una serie de estudios sobre las demandas de calor industriales, se han identificado varios sectores industriales con las condiciones favorables para la aplicación de energía solar como fuente primaria de suministro de calor. Dentro de los procesos industriales más importantes que utilizan calor a un nivel de temperatura media son: esterilización, pasteurización, secado, hidrólisis, destilación y evaporación, lavado y la limpieza, y la polimerización. Algunos de los procesos más importantes y el rango de las temperaturas requeridas para cada una se describen en la Figura 4.

En un sistema solar industrial, la interconexión de los captadores de suministro de energía

Convencional se debe hacer de una manera compatible con el proceso. La forma más sencilla de lograr esto es mediante el uso de almacenamiento de calor, que también puede permitir que el sistema funcione en períodos de baja irradiación y la noche. En la mayoría de las fábricas se utiliza un sistema central de suministro de calor ya sea de agua caliente o vapor a una presión que corresponde a la temperatura más alta que sea necesaria en los diferentes procesos. El agua caliente o vapor a baja presión a temperatura media (<150°C) puede ser utilizado para precalentar otros líquidos que se utiliza para procesos (lavado, teñido, etc). Muchas veces el uso de sistemas de captadores tiene el inconveniente de realizar un suministro centralizado y es conveniente separar los procesos de manera que los requerimientos energéticos sean realizados de manera individual como se muestra en la Figura 4.2.1.



Industrial sector	Process	Temperature level [°C]
Food and beverages	drying	30 - 90
	washing	40 - 80
	pasteurising	80 - 110
	boiling	95 - 105
	sterilising	140 - 150
	heat treatment	40 - 60
Textile industry	washing	40 - 80
	bleaching	60 - 100
	dyeing	100 - 160
Chemical industry	boiling	95 - 105
	distilling	110 - 300
	various chemical processes	120 - 180
All sectors	pre-heating of boiler feed water	30 - 100
	heating of production halls	30 - 80

Figura N° 4.2.1 Demanda de calor por nivel de temperatura y sector industrial.

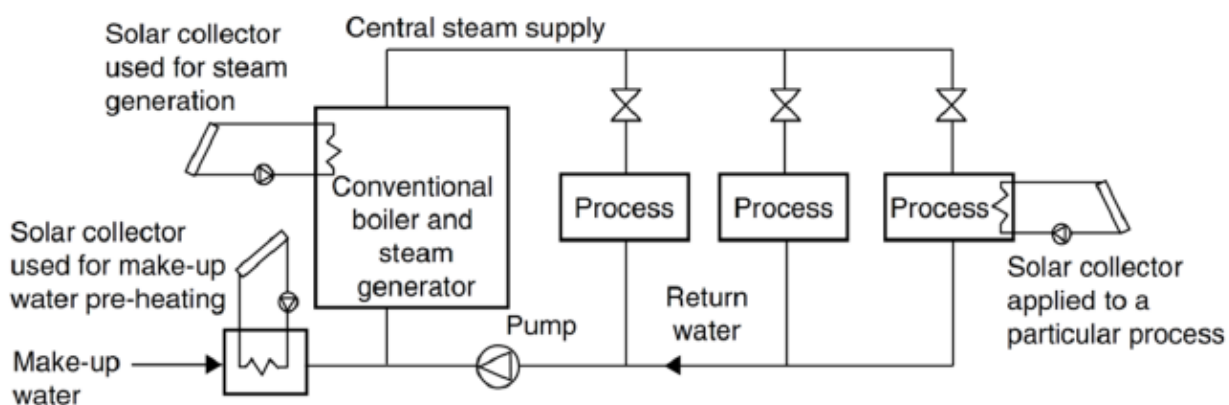


Figura 4.2.2 Posibilidades de combinar sistemas térmicos solares con suministros de calor existentes.

Dependiendo del rango de temperatura del proceso, se pueden utilizar diferentes tipos de CSMT que se pueden clasificar dos categorías dependiendo del tipo de seguimiento del movimiento aparente del Sol. En la Tabla 4 se indican las tecnologías de captadores solares clasificados por su sistema de seguimiento y rango de temperatura.

Movimiento	Tipo de captador solar	Tipo de Absorbedor	Razón de concentración*	Rango de Temperatura
Estacionario	Colector solar plano avanzado	Plano	1	30-80°C
	Colector de tubo evacuado	Plano	1	50-200°C
	Colector parabólico compuesto	Tubular	1-5	60-240°C
Seguimiento en un solo eje	Colector tipo Fresnel	Tubular	10-40	60-250°C
	Colector de canal parabólico	Tubular	14-45	60-350°C

Tabla 4.2.1 Clasificación de los CSMT empleados comúnmente en calor de procesos industriales.

4.3 TIPOS DE TECNOLOGIAS COLECTORES

Colector solar plano avanzado. Es el tipo más usado de captador solar. La radiación pasa a través de una cubierta transparente e incide sobre una superficie plana ennegrecida que cuenta con tubos por los que circula el fluido caloportador. La parte inferior de la placa de absorción y los lados del captador están bien aislados para reducir las pérdidas de calor. Debido a la utilización de materiales selectivos en el ennegrecido de la placa plana se pueden llegar a temperaturas de estancamiento de más de 200°C y una buena eficiencia con temperaturas por debajo de 90°C [1-3]

(Ver Figura 4.3.1.)

Colector de tubo evacuado. Consisten en un tubo receptor dentro de un tubo que de vidrio que se encuentra al vacío. Existen muchas variaciones de este tipo de captador solar. Algunos cuentan con reflectores CPC en el interior del tubo de vidrio o bien con material reflectivo en la parte baja del tubo de vidrio y un sistema de aleta para la captación de radiación solar. La utilización de una superficie selectiva y un adecuado espesor de la envolvente de vidrio resultan en un buen rendimiento a altas temperaturas. Presentan temperaturas más altas que los colectores de placa plana y una mayor eficiencia. Al igual que los colectores de placa plana captan tanto la radiación directa como la difusa. Sin embargo, su eficacia es mayor en los ángulos de incidencia bajos

(Ver Figura 4.3.1)

Colector parabólico compuesto. Son captadores solares de concentración que no forman una imagen definida del Sol en el receptor. Es construido mediante la intersección de dos parábolas encontradas que definen un área de apertura en la parte superior y en la intersección de los dos focos de dichas parábolas es colocado el tubo receptor por donde circula el fluido caloportador. Es común que este tipo de sistema se opere sin seguimiento donde el CPC se

puede orientar con su eje longitudinal a lo largo del eje norte a sur o bien en la dirección este-oeste y su apertura se inclina directamente hacia el ecuador. Cuando es orientado en la dirección norte-sur, el CPC debe seguir al Sol girando su eje a fin de enfrentarlo de forma continua. A medida que el ángulo de aceptación del concentrador a lo largo de su eje mayor se amplía, el ajuste de la inclinación no es necesario (ver Figura 4.3.1)

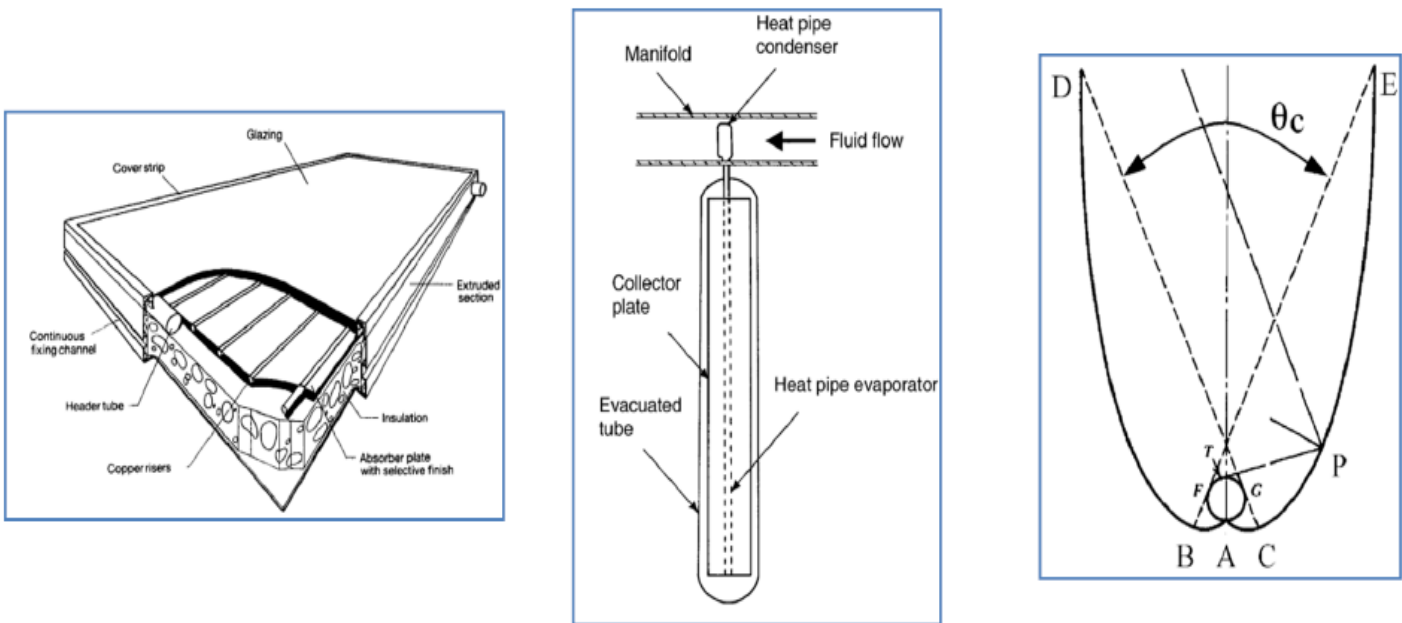


Figura 4.3.1 De Izquierda de Derecha: Colector solar plano avanzado / Colector de tubo evacuado / Colector parabólico compuesto

Colector tipo Fresnel. Este tipo de captador se basa en una serie de tiras de espejo lineales que concentran la luz en un receptor lineal fijo montado en la parte superior. Cada tira o lámina de material reflectivo se mueve de manera independiente para direccionar la luz solar hacia el receptor. El receptor puede ser constituido por un concentrador secundario como un CPC para reconcentrar la luz solar reflejada. La mayor ventaja de este tipo de sistema es que utiliza reflectores planos o curvos que son más baratos de construir en comparación

con los reflectores parabólicos, ya que requieren un menor diseño estructural que los concentradores de canal parabólico o los cilíndricos (ver Figura 4.3.2)

Colector de canal parabólico. Este tipo de captador es la tecnología solar más madura para generar calor a temperaturas por debajo de 400°C. Se construye con una estructura en forma parabólica que sostiene una hoja de material reflectante y un tubo de metal negro que es colocado en la línea focal y es cubierto con un tubo de vidrio para reducir las pérdidas de calor hacia los alrededores. Cuando la parábola se apunta hacia el Sol, los rayos paralelos incidente en el reflector se reflejan en el tubo receptor. Es suficiente utilizar un solo eje de seguimiento del Sol y por lo tanto se pueden operar una larga hilera de colectores al igual que los de tipo Fresnel. El canal parabólico se puede orientar en la dirección este-oeste, siguiendo el Sol de norte a sur, u orientados en una dirección norte-sur y el seguimiento del Sol de este a oeste (ver Figura 4.3.2).

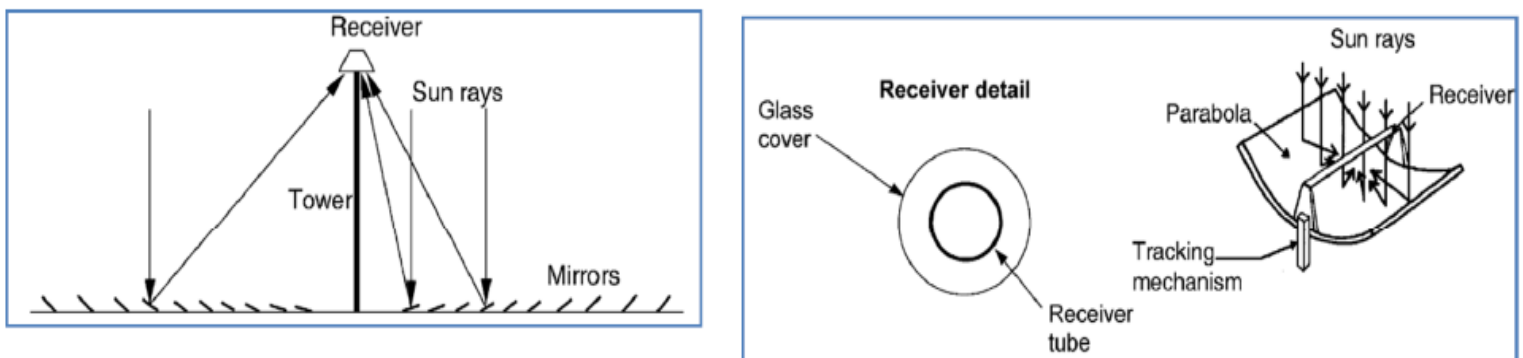


Figura. 4.3.2 De izquierda a derecha: Concentrador Fresnel /Concentrador Parabólico.

5 ESTADO DEL ARTE TECNOLOGIA TERMOSOLAR EN MINERIA DE COBRE

5.1 PLANTA TERMOSOLAR EN DIVISIÓN GABRIELA MISTRAL

Detalles del proyecto de la planta solar en División Gabriela Mistral

División Gabriela Mistral de Codelco con el fin de ser referente en la incorporación de innovación y tecnología dentro de la Compañía, razón por la cual y en el ámbito de uso de energía renovables limpias, ha desarrollado el proyecto de implementación de una Planta Solar, cuyo principio técnico es aprovechar la energía de la radiación solar, transformándola en energía térmica, destinada a maximizar el reemplazo de combustible diesel para la generación de agua caliente en el proceso de electro-obtención de cátodos de Cobre, haciendo uso para ello de las ventajas dadas por:

- ✓ Disponibilidad de espacio físico con excelente radiación solar.
- ✓ Disponibilidad de tecnologías maduras y proveedores con presencia local.

La instalación de la Planta de Energía Térmica Solar se enmarca dentro de la política que optimicen el uso eficiente de energía en pos de la sustentabilidad, seguridad y cuidado del medio ambiente, al incorporar tecnologías que disminuyen la emisión de gases con efecto invernadero, al reemplazar parcialmente el consumo de energía fósil por fuentes alternativas, según lo demandan los requerimientos internacionales.

5.1.1 Beneficios operacionales de la planta Termosolar

El consumo específico de energía en la Planta Electro-obtención se mantiene, sin embargo el uso de energía solar para calentamiento de soluciones, cubrirá alrededor de un 80% de las necesidades de calor de la operación actual de la planta de electro obtención de DGM, evitando la emisión de unas 15 mil t/año de CO₂., entregando al proceso alrededor de 50 GWh/año. Se estima que el contrato permitirá ahorrar a DGM aproximadamente 7 millones de dólares por menor costo de la energía en los 10 años del contrato.

El modelo de negocio establecido para este proyecto para DGM no es una inversión, sino un contrato por el servicio de venta de energía por un período de 10 años por parte del Consorcio Pampa Elvira Solar.

El acuerdo es a 10 años por un valor de USD 60 millones, el que podría prolongarse en el futuro dada la gran vida útil de los equipos.

Beneficios Ambientales para la zona

- ✓ El proyecto no genera emisiones de ningún material, sino al contrario disminuye la intensidad de uso del combustible diesel que es una energía fósil no renovable, según lo demandan los requerimientos internacionales.
- ✓ Contribuye a generar una cultura en la Comunidad respecto al uso de energías limpias, renovables y amigables con el medio ambiente.
- ✓ El uso de energía solar para calentamiento de soluciones, cubrirá alrededor de un 80% de las necesidades de calor de la operación actual de la planta de electro obtención de DGM, evitando la emisión de unas 15 mil t/año de CO₂.
- ✓ Uso eficiente de la energía a través de la incorporación de fuentes alternativas renovables.

- ✓ Asegurar un desempeño de excelencia, y ser productor referente en la industria.
- ✓ Responder a los requerimientos del mercado mundial al entregar productos de calidad empleando tecnologías limpias.
- ✓ Desarrollar como política, una gestión responsable en el uso de recursos no renovables, contribuyendo a la mitigación de los efectos del cambio climático.
- ✓ El proyecto no genera emisiones de ningún material, sino al contrario disminuye la intensidad de uso del combustible diesel
- ✓ La utilización de energías limpias y renovables permite incorporar a la ciudadanía cercana en la educación y cultura sobre este tipo de energías amigables con el medio ambiente.
- ✓ La visibilidad, fragilidad y calidad del área no se verá empeorada con la instalación del sistema de energía solar
- ✓ La Planta Solar significa la promoción por parte de División Gabriela mistral de inversiones ambientalmente amigables

5.1.2 Aspectos técnicos del proyecto

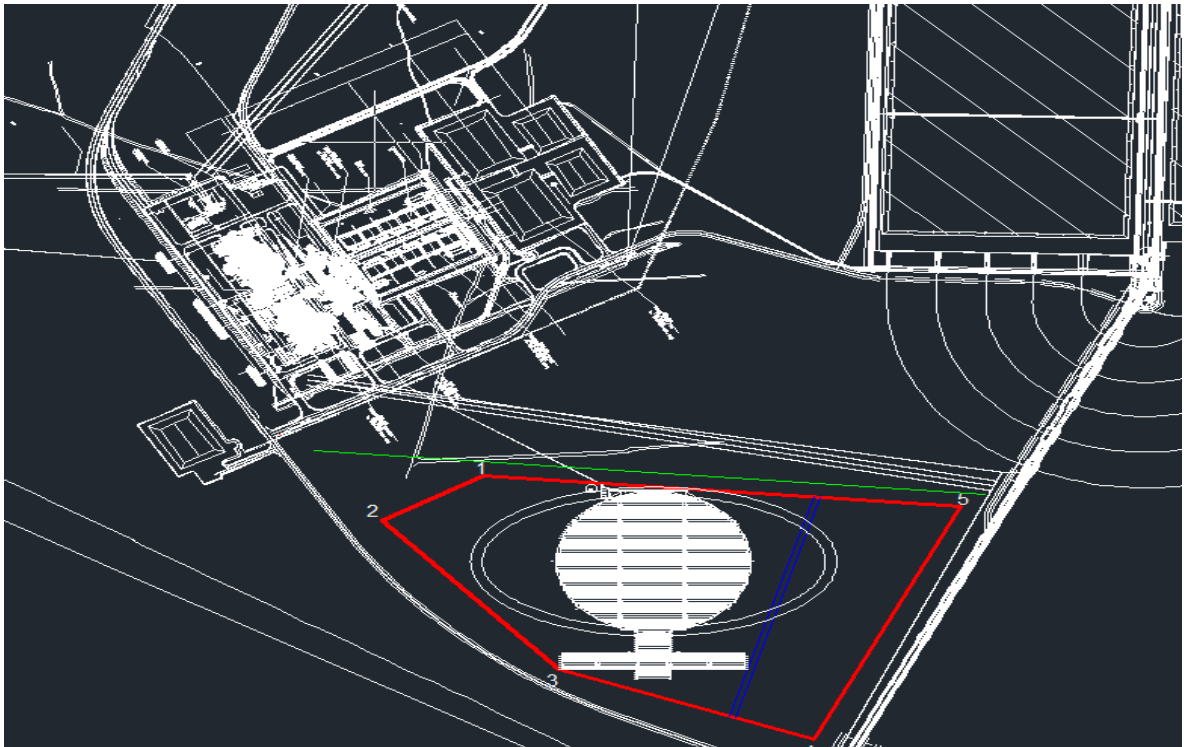
La Planta Termo Solar empleará colectores solares planos 99% reciclables, con una superficie colectora de 39 mil metros cuadrados y un estanque para almacenamiento de agua caliente, de 3.700 metros cúbicos.

La ubicación de la Planta estará próxima a la Nave de Electrobtención, cubriendo una superficie de 13.200 m².

Comienzo de su funcionamiento

La puesta en marcha de la Planta Térmica se realizó en Septiembre del año 2013.

Layout de la Planta



Condiciones Climáticas

El clima incide directamente en la realización de proyectos en altura o en un entorno como el desierto. En ese plano, Pampa Elvira, está diseñada para operar bajo contextos meteorológicos bastantes extremos: una de las mayores radiaciones solares del mundo, severos gradientes de temperatura (entre día y noche puede haber nieve, heladas y luego mucho calor), viento (registrados sobre 120 km/h), muchísimo polvo, lluvias muy concentradas en el tiempo (“invierno altiplánico”), entre otras. “Tan importante como lo anterior es la

ubicación pues, a 120 km de la ciudad más cercana (Calama), para efectos de repuestos y confiabilidad de funcionamiento”, cuenta el experto. En un posible sismo los paneles fueron probados en simuladores. Las uniones entre ellos son flexibles por lo que todo el sistema puede soportar un sismo de gran magnitud sin fallas estructurales. “Es posible que luego de un gran evento deba reorganizarse algunas filas pero no es algo muy complicado. Se debe considerar que no existen mecanismos delicados como los de seguimiento solar, ni conexiones complejas, ni elementos al vacío y ni sales corrosivas”, finaliza. En resumen, Pampa Elvira Solar potencia la creación de una minería que busca ser más limpia y amigable con el medio ambiente.

5.2 PLANTA TERMOSOLAR EN MINERA EL TESORO

Con una inversión propia de US\$15 millones, Minera El Tesoro (MET), compañía del grupo Antofagasta Minerals S.A. (AMSA), inauguró el 29 de noviembre de 2013 en sus faenas ubicadas en la comuna de Sierra Gorda, región de Antofagasta, una planta termosolar con tecnología cilindro-parabólica, aplicada al proceso de producción de cobre de la faena. Una de las más grandes en su tipo, según la compañía.

El origen del proyecto se remonta a 2009, cuando Minera El Tesoro inició los estudios de factibilidad para el uso de energía solar teniendo en cuenta el alto potencial de radiación solar del norte de Chile. A ello, se agregó el permanente interés del grupo Antofagasta Minerals por incrementar la sustentabilidad del proceso minero. Fue así, entonces, como en el 2012 la empresa Abengoa inició la construcción de esta mega planta.

El Proyecto fue diseñado para reducir en más de 8 mil toneladas nuestras emisiones de CO₂, lo que equivale a un 4% de las emisiones totales de la compañía, es decir a que aproximadamente 2.600 vehículos dejen de circular en Antofagasta durante un año; ochenta mil horas de vuelo menos de un avión comercial y a dos mil vueltas al mundo en un avión comercial”.

Asimismo, sustituirá el 55% del diesel utilizado en dos calentadores necesarios para elevar la temperatura de las soluciones en la nave de electro obtención, proceso mediante los cuales se obtienen los cátodos de cobre.

Proyecto

Este proyecto comenzó con el objetivo de gestionar eficientemente los recursos, mitigar los impactos, agregar valor a la gestión ambiental y contribuir a que la minera se convirtiera en un referente mundial en la aplicación de ERNC dentro de la industria. El proyecto comprendió la construcción y operación de una planta termo solar de colectores cilindro-parabólicos, capaz de entregar al menos un 55% del consumo térmico anual necesario para el proceso de extracción por solvente y electro-Obtención (SX-EW) de Minera El Tesoro.

Esta planta, actualmente en operación, está diseñada para producir 24.445 MWht/año a través de 1.280 colectores cilindro-parabólicos agrupados en filas de colectores de 50 m de extensión formadas por 8 módulos. Cada uno de ellos, mide 6,1 m (largo) x 2,1 m (ancho). El espacio entre filas de colectores es de 5,5 m a 6,1 m, entregando una superficie de apertura o de colección solar de 16.742 m², en un área total de 7 hectáreas.

De acuerdo a las proyecciones de la compañía, la planta solar, tendrá una vida útil de 20 años y se caracteriza por poseer una operación mixta, puesto que durante la noche -dadas las bajas temperaturas de la zona- utiliza diesel en menor cantidad. “Esta tecnología que maneja energías renovables consideró además un aporte social, puesto que se encuentra abierta para la investigación, educación y transferencia de buenas prácticas en la industria”, indicó Parada.

Hasta hace algunos meses, Minera El Tesoro utilizaba dos calentadores para aumentar la temperatura del agua que requieren los electrolitos (solución de cobre de alta pureza) y el lavado de cátodos. Sin embargo, ahora, a través de la operación de la planta, la temperatura del agua se elevará entre 80 y 85 grados celsius, para transferir calor a la solución de cobre y así elevarla en unos 5 grados, requerimiento térmico equivalente a un consumo de cerca de 3.700 metros cúbicos de petróleo diesel al año en el circuito de calor. “Con la operación de la planta esperamos ahorrar más de US\$ 2 millones anuales en petróleo. Actualmente, la planta se encuentra en etapa de puesta en marcha y

conectada al proceso de extracción por solventes y electroobtención, área a la que está aportando energía térmica para el calentamiento de soluciones”, afirmó el gerente general de MET. Respecto de la fuerza laboral, el ejecutivo añadió que, la mano de obra requerida fue de aproximadamente 50 personas en la etapa de construcción, no requiriéndose personal adicional para las etapas de operación y cierre.

Tecnología cilindro-parabólica

La tecnología cilindro-parabólica basa su funcionamiento en el seguimiento solar y en la concentración de los rayos solares en tubos receptores de alta eficiencia térmica, localizados en la línea focal de los cilindros. En estos tubos, un fluido transmisor de calor, es calentado a altas temperaturas por los rayos solares concentrados. Dicho fluido es bombeado a través de una serie de intercambiadores de calor para producir agua caliente o vapor sobrecalentado según la necesidad del proceso. Sergio Parada explicó que “el calor presente en este fluido transmisor se puede utilizar como energía térmica en diversos procesos productivos o convertir en energía eléctrica en una turbina de vapor convencional”.

Para el presente proyecto, los colectores cilindro-parabólicos son utilizados para la generación de energía térmica. Adicionalmente, con esta tecnología se puede incorporar el almacenamiento de esta energía aún en condiciones de nubosidad o por la noche. La planta logrará esto gracias al uso de estanques de agua capaces de acumular la energía producida por el sistema, para ser distribuida en otro momento.

Además de la instalación de los colectores cilindro-parabólicos, también se montaron tuberías y tres estanques de agua de 127 m³ para almacenamiento térmico y la conexión al sistema térmico actual. Los estanques de almacenamiento de agua caliente tienen una capacidad de 127 metros cúbicos

y considera un diámetro interior de 3.353 mm, un largo de manto de 13.760 metros, el espesor de manto y cabezales de 22 mm y una presión de trabajo de 14 bares.

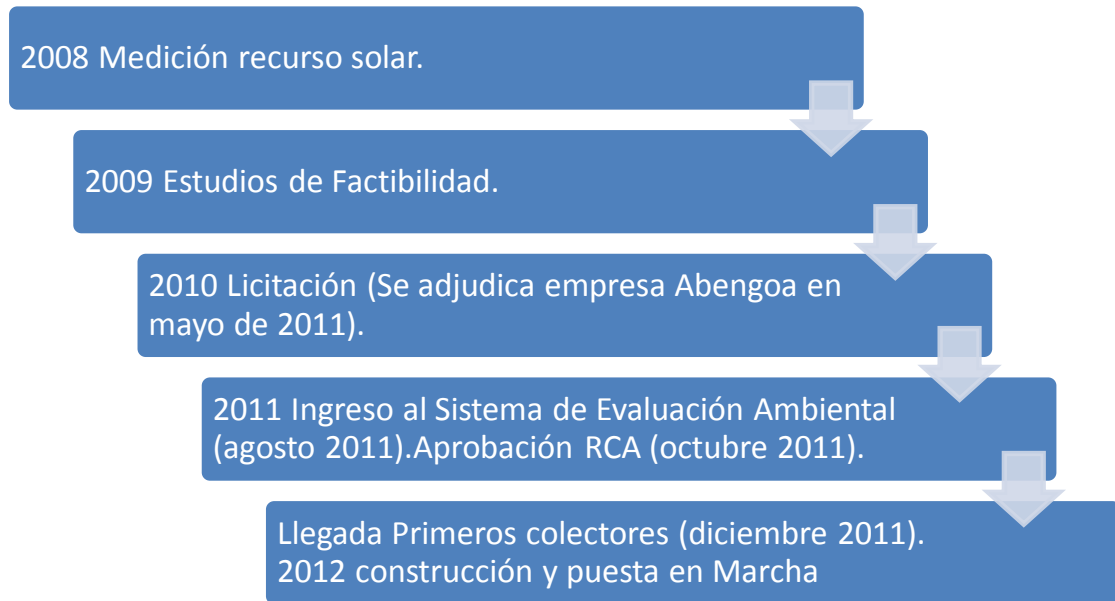
Proceso energético

Como se explicó anteriormente, el reflector o colector cilindro-parabólico tiene como objetivo reflejar y concentrar sobre el tubo absorbente la radiación solar directa que incide sobre la superficie. Los concentradores se denominaron PT-1 y se construyeron siguiendo un diseño que supone el uso de un colector más ligero en cuanto a peso pero extremadamente resistente. Estos fueron elaborados con aluminio y acero, con una superficie reflectante de aluminio acrílico.

El proceso de estos colectores parabólicos, consiste en reflejar en la energía solar en el tubo absorbedor que consta de dos tubos concéntricos separados por una capa de vacío. El ejecutivo de AMSA explicó que el primero trata de un tubo de acero, cubierto por una superficie selectiva cromada negra y envuelto por un cristal destinado a reducir la pérdida de calor. A esto agregó que “este elemento considera una cubierta antirreflectiva de cristal que incrementa la transmisión de luz”. Asimismo, cuenta con un tubo interior que tiene por objetivo circular el fluido que se calentará de acuerdo al proceso explicado anteriormente. Este es metálico y el exterior es de cristal. Por otro lado, el sistema de seguimiento del sol consiste en un dispositivo de control y seguimiento a la posición del sol, que gira los reflectores cilindro-parabólicos del colector alrededor de un eje. Asimismo, este proceso considera una estructura metálica que tiene como misión dar rigidez al conjunto de elementos que lo componen. Este tiene una altura aproximada de dos metros.

Mina el Tesoro, una faena que busca mediante esta planta solar pretende potenciar e integrar elementos sustentables para sus procesos productivos.

5.2.1 ETAPAS DEL PROYECTO TERMOSLAR EN EL TESORO



La extensión de tiempo desde la medición del recurso solar hasta la construcción y puesta en marcha de la planta contemplo cuatro años en total, lo cual nos entrega un indicador valorable en términos de plazos a considerar para la realización de este tipo de proyectos energéticos.

5.2.2 CARACTERISTICAS TECNICAS PLANTA TERMOSOLAR MINERA EL TESORO

Cada proyecto Termosolar ofrece una variabilidad de posibilidades técnicas desde sus captadores hasta su extensión en terreno las características del proyecto de minera el Tesoro son las siguientes:

- Tecnología: Concentradores cilindro parabólicos
- Número de módulos colectores: 1.280 unidades
- Reducción de diesel: 55% (app. 3.700 m3 diesel/año)
- Energía térmica producida: 24.845 MWht/año

- Reducción de emisiones CO2: 8.000 ton CO2/año
- Reducción de transporte de combustible: 125 camiones/año
- Superficie de apertura: 16.742 m²
- Superficie total terreno: 5,5 hectáreas
- Almacenamiento térmico: 300 m³
- Inversión propia: US\$ 15 millones
- Vida útil: Mayor a 20 años Operación;

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En cuanto a la gestión de Operación y mantenimiento (O&M) de este tipo de plantas termosolares cuentan con características tecnológicas que permiten una operación automática y cuyo foco de atención debe ser el control de parámetros tales como ángulo de captación solar y control de alarmas, en el aspecto de mantenimiento la limpieza de los captadores y la condición de aislantes térmicos es de vital importancia, para tener el rendimiento de diseño.

- Operación automática (operador de sala de control SX-EW).
- Frecuencia de lavado de 1 vez al mes (duración total 10 días).
- Inspección semanal de mantenimiento preventivo (2 a 3 horas por campo, 2 técnicos).
- Todo se realiza según la documentación de operación y mantenimiento entregada por Abengoa.

6 ANÁLISIS DE CASOS EXPERIENCIA EN LA MINERÍA; VENTAJAS Y OPORTUNIDADES

6.1 COSTOS ASOCIADOS A LA TECNOLOGÍA TERMOSOLAR.

Para los dos casos de referencia.

Partir por la evaluación

Antes de decidir sobre la planta solar a implementar, se debe partir por evaluar el recurso solar, que en el norte de Chile es uno de los mayores a nivel mundial.

Luego, analizar los procesos de la minería donde se puede utilizar generación solar térmica y/o eléctrica, para finalmente seleccionar el tipo de tecnología”, hoy el sector minero apuesta por contratos tipo PPA solar (acuerdos de compra de energía), “para garantizar una operación segura y producción eficiente de energía, a fin de minimizar el riesgo financiero”.

Actualmente existe un factor importante a considerar al invertir en una planta solar, que dice relación con el alza sostenida del tipo de cambio, es un hecho que se encarece construir una planta solar.

Para mantener el equilibrio y con miras a futuro, las empresas mineras no deberían adquirir sus propias plantas solares, sino externalizar el servicio energético y llevarlo al modelo de compra de energía eléctrica o térmica, mediante los contratos a largo plazo la inversión inicial es cero. Los ahorros son tangibles al corto plazo, reflejados en la disminución del consumo de combustibles, se ve una tendencia a comprar energía eléctrica a plantas solares fotovoltaicas cercanas a las faenas mineras, y hoy ya son tres compañías que cuentan con plantas solares térmicas (Pampa Elvira Solar de Gabriela Mistral, Centinela y Minera Constanza), dos de ellas con contrato de venta de energía, y ya están en fase de proyecto o licitación dos o tres más.

6.2 Caso inversión planta Termosolar minera El Tesoro

En este caso el proyecto fue financiado completamente por la compañía minera pasando a ser dueño de la planta y responsable de su operación y mantenimiento.

Características

- Tecnología : Concentradores cilindro parabólicos
- N° módulos colectores : 1.280 unidades
- % reducción de diesel : 55% (app. 3.700 m³ diesel/año)
- Energía térmica producida: 25 GWht/año
- Reducción de emisiones CO₂ : 8.000 ton CO₂/año
- Reducción de transporte de combustible: 125 camiones/año
- Superficie de apertura : 1,6 hectáreas
- Superficie total terreno : 5,5 hectáreas
- Almacenamiento térmico: 300 m³
- Vida útil : Mayor a 20 años
- Tiempo construcción : 12 meses
- Fecha entrada en operación : 5 de Noviembre de 2012

Cifras económicas

- Inversión propia : 14 MUS\$
 - Ahorros : 2 - 3 MUS\$/año (según precio diesel)
 - VAN (8%, 10 años) : 2 - 3 MUS\$
 - Retorno de la Inversión : 6 - 7 años
-

Flujo de caja estimado del proyecto Termosolar minera el Tesoro

		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INGRESOS												
Ahorro Diesel	M3		2.544	3.444	3.444	3.444	3.444	3.444	3.444	3.444	3.444	3.444
Diesel	US\$/M3		856,7	866,7	876,9	887,1	897,5	908,0	918,6	929,4	940,3	951,3
Sub-total	US\$		2.179.282	2.985.167	3.020.111	3.055.463	3.091.229	3.127.414	3.164.022	3.201.059	3.238.530	3.276.439
EGRESOS												
Lavado	US\$		154.850	344.563	344.563	344.563	344.563	344.563	344.563	344.563	344.563	344.563
Pulido	US\$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mano de Obra	US\$		43.636	43.636	43.636	43.636	43.636	43.636	43.636	43.636	43.636	43.636
Sub-total	US\$		198.486	388.199	388.199	388.199	388.199	388.199	388.199	388.199	388.199	388.199
Depreciación	US\$		-1.400.200	-1.400.200	-1.400.200	-1.400.200	-1.400.200	-1.400.200	-1.400.200	-1.400.200	-1.400.200	-1.400.200
Utilidad Antes de Impuesto			580.596	1.196.768	1.231.711	1.267.064	1.302.830	1.339.015	1.375.623	1.412.660	1.450.130	1.488.040
Impuesto			-98.701	-203.451	-209.391	-215.401	-221.481	-227.632	-233.856	-240.152	-246.522	-252.967
Utilidad Después de Impuesto			481.895	993.317	1.022.320	1.051.663	1.081.349	1.111.382	1.141.767	1.172.508	1.203.608	1.235.073
Depreciación			1.400.200	1.400.200	1.400.200	1.400.200	1.400.200	1.400.200	1.400.200	1.400.200	1.400.200	1.400.200
Valor Residual												2.800.400
INVERSIONES		-14.002.000										
Flujo Caja		-14.002.000	1.882.095	2.393.517	2.422.520	2.451.863	2.481.549	2.511.582	2.541.967	2.572.708	2.603.808	5.435.673
VAN 10 años	\$ 3.483.113											
TIR	12,7%											

Tabla de Datos Proyecto Termosolar minera El Tesoro.

PARÁMETROS				
Dólar	550			
Euro	770			
Impto. Primera	17%			
Tasa Descuento	8%			
Tecnología		Cilindros Parabólicos (PTC)		
Cantidad Cilindros		1280		
M2 Colectores		21690		
M2 Planta		67350		
M3 Almacenamiento		480		
% Sustitución		55,6%		
Consumo Diesel Calentadores M3/año		6.718		
Energía Salida MWh/año (100% diesel)		62.054		
Energía Entrada MWh/año (100% diesel)		73.005		
CAPEX MMUS\$		14,30	afinar detalle \$/US\$	
Tarifa BOT US\$/MWh		89	afinar detalle \$/US\$	
Valor Residual		20%		

Tabla 6.2.1 Datos económicos del proyecto termosolar

El proyecto Termosolar de minera El Tesoro fue evaluado el año 2012 con una inversión propia de 14 millones de dolares, proyectando ingresos por concepto de ahorro en consumo de diesel de 3.700 m3 año, a un precio proyectado año 2012 de 860 US\$/M3 de diesel, y egresos proyectados por concepto de operación y mantenimiento de 388.000 US\$ año. El proyecto fue evaluado con una tasa de descuento de 8% a 10 años obteniendo como resultado un VAN positivo de 3.483.113 US\$ con una TIR de 12,7%.

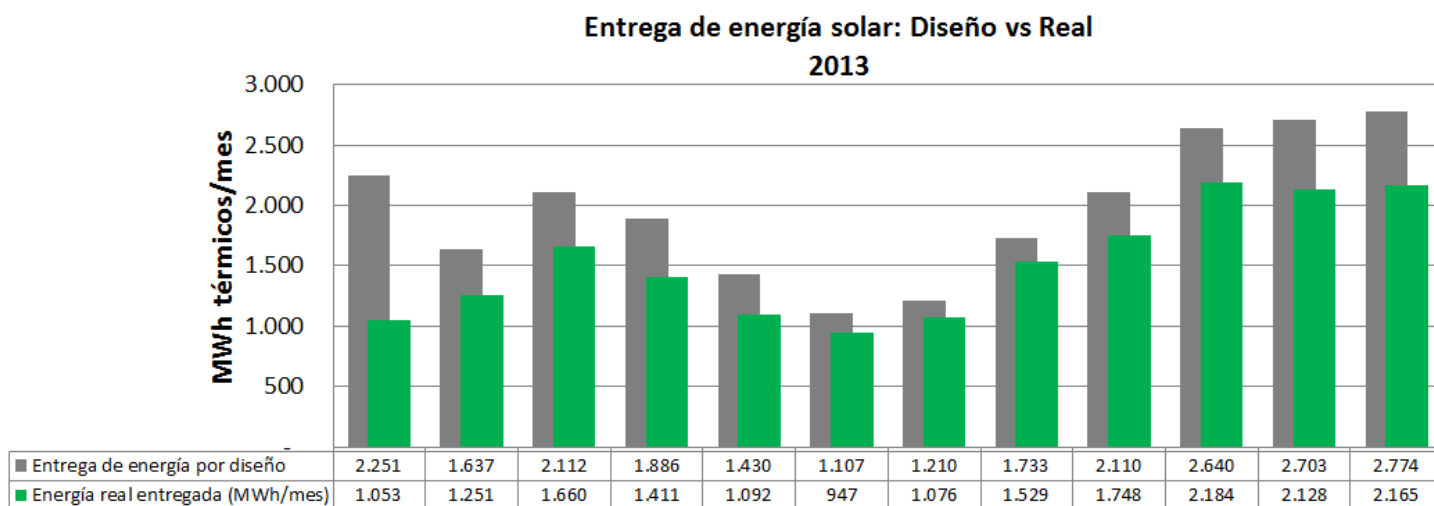
Esta proyección de la mano con una reduccion en emisiones de CO2 de 8.000 ton año hizo ver un proyecto muy interesante para la compañía.

Entregando beneficios economicos y de una cultura sustentable en la operación minera.

Cuadro resumen de producción de energía y ahorros relacionados con PTS

Mes	Entrega de energía por diseño	Energía entregada	Eficiencia promedio calentadores	Ahorro de diesel	Costo mensual promedio del diesel	Ahorro económico	Reducción de emisiones
		MWh/mes	%	m ³ /mes	USD/m ³	KUSD	Ton CO _{2e} /mes
ene-13	2.251	1.053	75%	140	886	124.359	377
feb-13	1.637	1.251	75%	167	937	156.375	448
mar-13	2.112	1.660	75%	221	897	198.467	594
abr-13	1.886	1.411	75%	188	683	128.464	505
may-13	1.430	1.092	75%	146	711	103.471	391
jun-13	1.107	947	75%	126	991	125.224	339
jul-13	1.210	1.076	75%	143	1130	162.103	385
ago-13	1.733	1.529	75%	204	757	154.258	547
sep-13	2.110	1.748	75%	233	916	213.512	626
oct-13	2.640	2.184	75%	291	895	260.513	782
nov-13	2.703	2.128	66%	322	808	260.210	865
dic-13	2.774	2.165	60%	362	808	292.327	972
TOTAL	23.594	18.243	73%	2.544	857	2.179.282	6.831

Tabla 6.2.2 Resumen producción de energía y ahorros



Grafica 6.2 Energía solar diseño vs real

6.3 CASO PLANTA TERMOSOLAR PAMPA ELVIRA MINERA GABY

El modelo del proyecto por el que optó minera Gaby es contrato con PPA (acuerdo de compra de energía)

El modelo de negocio establecido para este proyecto para DGM no es una inversión, sino un contrato por el servicio de venta de energía por un período de 10 años por parte del Consorcio Pampa Elvira Solar.

El acuerdo es a 10 años por un valor de USD 60 millones, el que podría prolongarse en el futuro.

Planta Solar (PS) División Gabriela Mistral, Codelco.

Datos Instalación y performance
• Área colectores : 44.000 m ²
• 2.928 paneles de 15 m cada uno
• Producción anual: 54.000 MWht
• Potencia máxima: 32 MWt
• Fracción reemplazo solar: 85% (promedio 10 años)
• Batería Solar Térmica: 4.000 m ³
Datos Clave
• Ahorro Diesel: 4.800 ton/año + 1 camión Diesel al día.
• Este contrato permitirá a DGM ahorrar cerca de 7 MUS\$ por menor costo de energía
• Reducción CO ₂ e: 15.000 ton/año
• Entrada en operación: Agosto 2013
Entrega calor a Planta de SX-EW

Recibe energía (fracción solar comprometida) a precio fijo.

- Obtiene operación generación térmica y temperatura deseada en proceso (48,5 C°).
- Visualiza operación en línea y reportes de operación

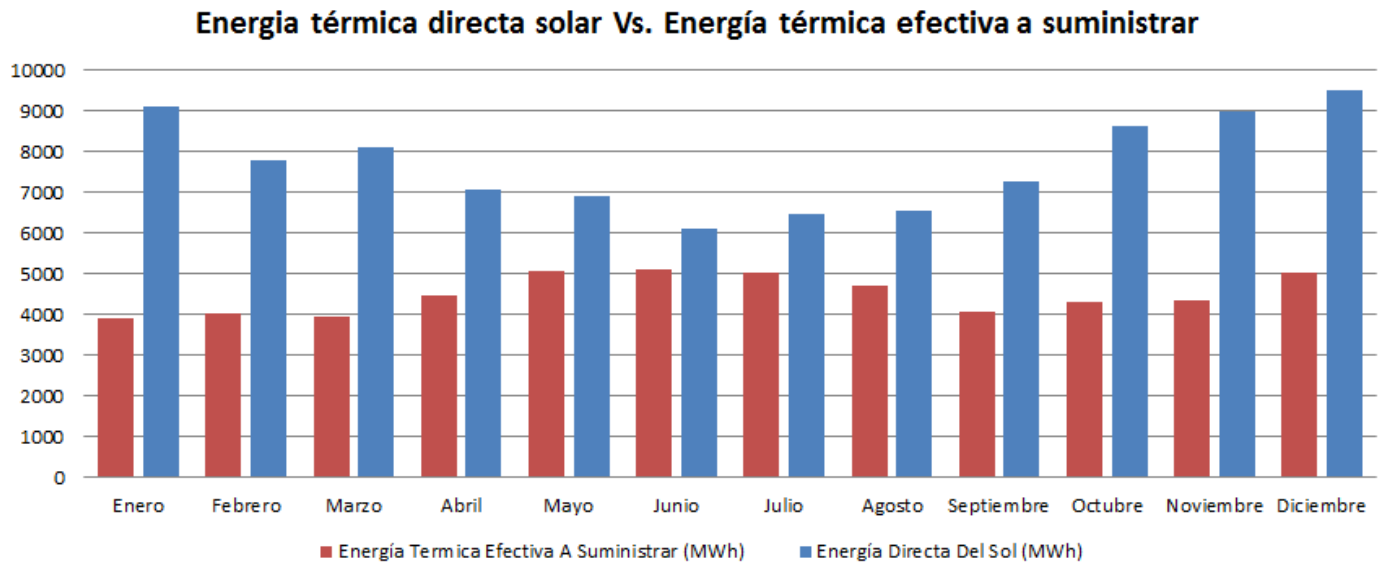
Pampa Elvira Solar:

- Invierte: diseño, construcción, operación y mantenimiento.
- Asume riesgos técnicos, operacionales y radiación solar.
- Responsable operación calentadores backup y sistemas auxiliares.

Demanda de Calor Real Vs. Oferta De Calor Solar

	Potencia <u>peak</u> máxima requerida en el día (MW)	Energía real Requerida (MWh/mes)	Energía ofertada por planta solar (MWh/mes)	Fracción solar (%) (energía ofertada/energía real requerida)	
mar-12	5.9	4458	4000	90%	MWh-t/mes
abr-12	7.2	5340	4050	76%	MWh-t/mes
may-12	12.5	9276	4301	46%	MWh-t/mes
jun-12	11.4	8467	3906	46%	MWh-t/mes
jul-12	14.5	10760	4498	42%	MWh-t/mes
ago-12	13.7	10220	4555	45%	MWh-t/mes
sep-12	13.3	9911	4454	45%	MWh-t/mes
oct-12	6.6	4918	4126	84%	MWh-t/mes
nov-12	6.5	4861	3477	72%	MWh-t/mes
dic-12	7.1	5259	4670	89%	MWh-t/mes
ene-13	9.4	6997	4625	66%	MWh-t/mes
feb-13	9.6	7111	4383	62%	MWh-t/mes
	<i>Total Anual</i>	<i>87,578</i>	<i>51,045</i>	<i>58%</i>	<i>MWh-t/año</i>

Tabla 6.3.1 demanda de calor vs oferta de calor



Grafica 6.3 Energía térmica directa solar vs Energía térmica efectiva

Se puede observar que en las estaciones más frías del año la disponibilidad de energía térmica solar disminuye mientras que la demanda de calor aumenta debido a las de pérdidas de calor que ocurren en los distintos equipos.

Pérdida máxima de energía de la planta solar: 57% → Enero

Pérdida Mínima de energía de la planta solar: 16% → Junio

Pérdida Total de energía planta solar: 42%

Flujo de caja del proyecto

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INGRESOS												
Ahorro Diesel	M3	2.300	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
Diesel	US\$/M3	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840
Sub-total	US\$	1.932.000	5.880.000	5.880.000	5.880.000	5.880.000	5.880.000	5.880.000	5.880.000	5.880.000	5.880.000	5.880.000
EGRESOS												
Tarifa del contrato	90 US\$/MWh	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Energía requerida	MWh año	18.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000
Sub-total	US\$	1.620.000	4.860.000	4.860.000	4.860.000	4.860.000	4.860.000	4.860.000	4.860.000	4.860.000	4.860.000	4.860.000
Utilidad		312.000	1.020.000	1.020.000	1.020.000	1.020.000	1.020.000	1.020.000	1.020.000	1.020.000	1.020.000	1.020.000
VAN 10 años	\$ 6.626.187,99											

Para la evaluación del proyecto termosolar perteneciente a minera Gaby

Si consideramos la muestra de demanda de calor real y la ofertada, podríamos simular un análisis económico, para ello tenemos:

- ✓ Valor Petróleo en tiempo de la muestra: 0.84 (USD\$/Lt.). proyección año 2012.
- ✓ Consumo de petróleo en tiempo de la muestra por parte de los calentadores: 6,934,746 (Lts.).
- ✓ Obteniéndose un costo por consumo de combustible de USD\$ 5,825,187.-

Como en la muestra de estudio se obtuvo que la fracción solar es del 58% y asumiendo que la planta solar hubiera estado operando en dicho periodo, podemos realizar una comparación de costos entre el consumo de combustible para los calentadores sin planta solar en operación y con ejecución de ésta.

Sin planta solar en operación existe tiene un costo por combustible de:USD\$ 5,825,187. Con planta solar en operación existiría un costo por combustible de:USD\$ 2,446,579.

Equivalente a un ahorro de 4,022,152 (Lts) de combustible de un total de 6,934,746 (Lts.).

Todos estas calculos asociados a la proyección de precio combustible diesel tomada el año 2013.

7. ANALISIS DE LAS DOS EXPERIENCIAS TERMOSOLARES EN MINERIA

En ambas plantas Termosolares los rendimientos entre la energía de diseño vs la energía real entregada han presentado diferencias sustantivas en diferentes periodos de operación lo que nos lleva a estimar condiciones claves de la operación que pasan a ser críticas en su control para el buen rendimiento de la planta termosolar, para lo cual es relevante información respecto a los siguientes temas:

- Gestión de Seguimiento de módulos: control para verificación de los seguimientos (tracking) de los módulos en el ángulo de captación solar.
- Frecuencia de Lavado: control de la frecuencia de lavado entre años ha sido modificada
- Disponibilidad de Planta Termosolar: control de KPI relacionado con la disponibilidad de la PTS en base a la información de los lazos de control existentes.
- Características de diseño no aplicables a climas extremos como el norte de Chile con diferencias de temperatura máxima desde 30°C en el día a -15°C de mínima en la noche.
- Ráfagas de viento presentes en casi la totalidad del año, como tormentas de área y viento.

De los dos casos de tecnología termosolares presentados, PTS Pampa Elvira de Minera Gabriela Mistral de Codelco y PTS de Minera el Tesoro ambos en la segunda región del país se han recopilado y agrupado los datos más relevantes de diseño y performance para realizar un análisis de ambas tecnologías aplicadas a los procesos mineros del Cobre.

Se presentan dos cuadros con datos de cada PTS y con parámetros operativos como de diseño.

Cuadro datos PTS PAMPA ELVIRA de Minera Gabriela Mistral CODELCO

DATOS DISEÑO Y PERFORMANCE PAMPA ELVIRA MINERA GABY		
TECNOLOGIA CAPTADORES SOLARES PLANOS		
ITEM	VALOR	UNIDAD
Área de colectores solares	44.000	m2
Numero de colectores	2.920	paneles
Producción de energía térmica anual	54.000	MWh t
Fracción de reemplazo solar 10 años	85%	%
Ahorro Diesel anual	4.800	M3
Reducción de CO2 año	15.000	ton
Inversión	32	MUSD
Potencia instalada	32	MW

Tabla 7.1 Fuente: datos del proyecto elaboración Propia

Cuadro de datos PTS de Minera El Tesoro de Antofagasta Minerals

DATOS DISEÑO Y PERFORMANCE TERMOSOLAR MINERA EL TESORO		
TECNOLOGIA CAPTADORES CILINDRO PARABOLICOS		
ITEM	VALOR	UNIDAD
Área de colectores solares	16.742	m2
Numero de colectores	1.280	paneles
Producción de energía térmica anual	25.000	MWh t
Fracción de reemplazo solar	55%	%
Ahorro Diesel anual	3.700	M3
Reducción de CO2 año	8.000	ton
Inversión	15	MUSD
Potencia instalada	15	MW

Tabla 7.2 Fuente: datos del proyecto elaboración Propia

De ambas tablas se extrajeron datos para cuantificar parametros que se consideraron claves en el analisis de ambos proyectos, y de los cuales se podran sacar estimaciones entre tecnologias e inversiones.

Los parametros claves se presentan en el siguiente cuadro comparativo:

TABLA COMPARATIVA PARAMETROS OPERACIONALES			
ITEM	MINERA GABRIELA MISTRAL	MINERA EL TESORO	UNIDAD
	CAPTADORES PLANOS	CAPTADORES CILINDRO PARABOLICOS	
INVERSIÓN	32	15	MUSD
ENERGIA/M2 CAPTADOR	1,2	1,5	MWht/m2 de Captador
Energía /colector	18	20	MWht/captador
Área captación solar	44.000	16.742	m2
Costo Unitario	10.959	11.719	USD/captador
Costo Energía	90	110	USD/MWh térmico
Ahorro Anual	1,6	1,1	MUSD

Tabla 7.3 Fuente: elaboración Propia datos propios de ambos proyectos.

Si bien el parametro de inversión entre uno y otro proyecto es mas del doble, el analisis no se puede realizar en forma lineal debido a que las producciones de cobre que se relacionan con el aporte de energia termica de cada proyecto no son conocidos.

Un parametro que si nos aporta mucho en el analisis es la energia por m2 de captador solar. Vemos que en el caso de la PTS de minera El Tesoro la energia capturada es de 1,5 MWh termico por m2 de captador solar (cilindro parabolico) levemente mayor en comparación de la PTS PAMPA ELVIRA donde la energia capturada es de 1,2 MWh termico por m2 de captador en este caso plano.

Dado esto la capacidad de captura de energía solar para ser transformada en energía térmica son de un rango muy cercano siendo mayor la de la tecnología Cilindro parabólica que la de captadores planos.

De lo anterior se desprende que para una misma cantidad de energía requerida la tecnología de captadores solares planos es más intensiva en utilización de terreno que para el caso de captadores solares cilindro parabólicos.

De la misma forma si observamos el parámetro energía térmica por unidad de captador solar los rangos son muy estrechos siendo mayor nuevamente el encontrado en la tecnología cilindro parabólica con 20 MWh térmico por captador solar en cambio para la tecnología de captadores planos el valor es de 18 MWh térmico por captador solar.

De estos valores podemos ver que para una misma cantidad requerida de energía térmica se necesitarán más unidades de captadores solares planos que cilindro parabólicos, aunque el rango es muy estrecho nuevamente.

No podemos dejar de mirar el costo unitario por captador solar para cada tecnología siendo 760 USD más costoso el captador cilindro parabólico que el captador solar plano.

En relación al costo de la energía para el modelo económico de PAMPA ELVIRA consta de un contrato por suministro de energía térmica fijo por 10 años tipo ESCO a 90USD/MWh térmico, en cambio el costo de la energía en el modelo de inversión propia realizado por Minera El Tesoro extraído de el flujo de caja del proyecto resulta ser de 110USD/MWh térmico, por lo tanto en relación al precio de la energía por MWh térmico el modelo de contrato de suministro energético es más conveniente que el costo de la energía del modelo aplicado por minera El Tesoro.

8. ESTUDIO DE CASO A IMPLEMENTAR EN PROCESO DE REFINACIÓN DEL COBRE

8.1 Aporte de calor convencional al Proceso

Calentamiento del electrolito

La Central térmica refinería que hoy suministra la energía térmica vapor es una planta que consta de un sistema de generación de agua caldera mediante proceso de planta de osmosis y trenes des mineralizadores, también posee dos calderas compactas tipo D de 20 Ton/hr cada una con alimentación dual tanto en GN como Petróleo Bunker N°5. contanto con un TK de 600 Tons de autonomía y un TK de uso diario de 20 Tons.

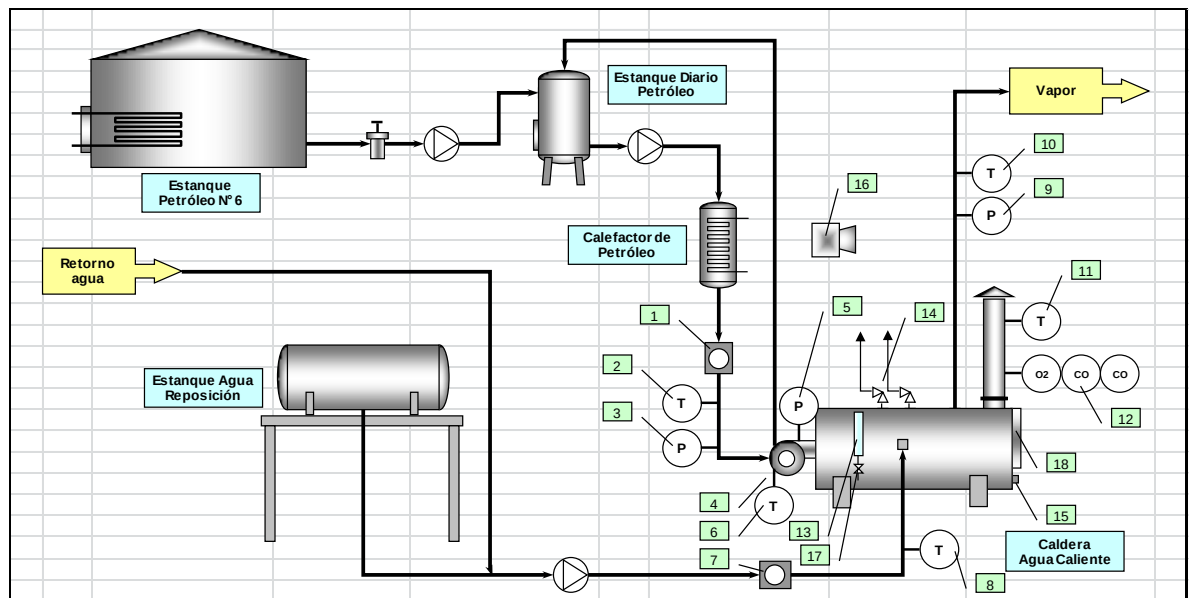


Figura 8.1 Esquema central Térmica Refinería

La energía térmica es enviada a intercambiadores de calor. Los intercambiadores de calor son del tipo de placas, con control de temperatura en el electrolito, interactuando con la válvula de la línea de vapor. El control permite mantener prácticamente constante la temperatura del electrolito. La temperatura definida para el proceso es de 62 °C en el electrolito a la entrada de las celdas. Para la energización de las secciones el electrolito debe estar a 54 °C.

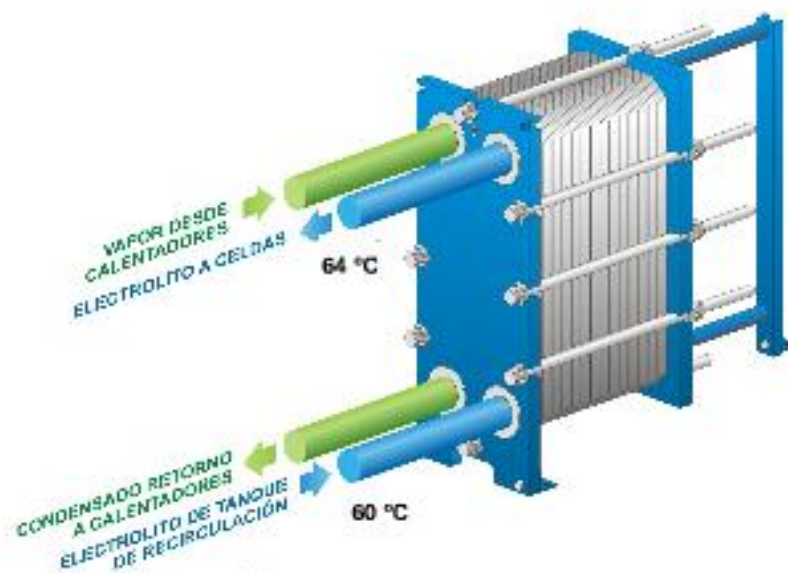


Figura 8.1.1 Intercambiador de calor tuberías de ingreso y salidas

Todos los circuitos tienen un solo intercambiador de calor por circuito. En casos de emergencia, cuando por alguna razón se interrumpa el flujo de electrolito o aumente la presión, se abrirán las válvulas de alivio del intercambiador de calor. En el caso de un pH bajo, se enviará el condensado a la línea matriz hacia el estanque de recirculación.



Figura 8.1.2 Vista General del intercambiador de calor

Es importante indicar que a menor ocupación de las celdas de electrorefinación mayor será el consumo de vapor, dado que el efecto Joule es mucho menor en periodos sin cosecha, es decir, en periodos en las que no se está electro refinando cobre, la utilización de la nave de refinería en baja. En periodos de baja ocupación de acuerdo a los ciclos de cosecha y a la disponibilidad de ánodos en la refinería la demanda de vapor crecerá para operar incluso con las dos calderas.

8.2 Costos asociados proceso vapor

El mayor costo asociado al aporte de calor convencional mediante calderas compactas para la producción de vapor saturado es el de combustible 24 horas siete días a la semana, en este caso todos los cálculos se harán en combustible diesel a un precio promedio de 330 US\$/Nm³

AÑO 2015		
	Producción	Consumo
Mes	Vapor	Combustible
	Ton.	Nm ³
Enero	18.303,84	1.632.313
Febrero	16.207,35	1.154.920
Marzo	17.602,00	1.588.232
Abril	17.352,82	1.452.252
Mayo	18.824,38	1.695.757
Junio	16.769,38	1.575.709
Julio	18.086,51	1.654.650
Agosto	16.269,39	1.523.067
Septiembre	14.056,05	1.395.101
Octubre	14.461,85	1.327.716
Noviembre	13.492,14	1.258.204
Diciembre	13.408,24	1.225.637
	194.833,95	17.483.558

Tabla 8.2.1 Consumo de combustible vs Generación de vapor año 2015

Fuente: base de datos 2015 Central Térmica Refinería Div. Chuquicamata

La Demanda Térmica utilizando la entalpía del vapor saturado a 100PSig es de **149.796 MWht Año** con datos de consumo del 2015, lo que luego compararemos con el cálculo de la demanda térmica real en el proceso de calentamiento del electrolito.

Con los datos anteriores de tabla y el precio de contrato de combustible Diesel tenemos un Costo Anual consumo Combustible **6,3MMUS\$ Año** para el aporte térmico convencional al proceso de electrorrefinación.

8.3 Demanda de calor requerida para electrorrefinación.

El uso de energía requerido por el proceso de electrorrefinación, en la línea productiva del cobre será el tema de estudio, de acuerdo a esto se determinara la línea de demanda base de energía térmica para los circuitos en nave de refinaria.

Se mostrarán tablas con criterios de diseño para consumos de vapor por máquinas que generan consumos tales como: maquina lavadora despegadora de cátodos, sistema de calefacción de electrolito, sistema lavado de scrap.

Criterios de diseño sistema de calefacción del electrolito

(Operaciones refinaria)

ITEM	VALOR	UNIDAD
Flujo de diseño de electrolito	20	l/min*celda
Numero de celdas	1668	celdas
Temperatura de entrada a intercambiador de calor condición nominal	59	°C
Temperatura requerida	62	°C
Densidad del electrolito	1,25	T/m3
Calor especifico del electrolito	850	Kcal/T°C
Calor Latente	530	Kcal /Kg

TABLA 8.3 Parámetros operacionales del proceso electrorrefinación

Flujo de electrolito =

$$1.668 \text{ celdas} * 20 \text{ l/min} * \text{celda} * 60 \text{ min/hr} * 0,001 \text{ m}^3/\text{l} * 1,25 \text{ m}^3/\text{T}$$

Flujo de electrolito =

$$2.502 \text{ T/hr (t/h)}$$

Calor requerido para la condición de diseño =

$$2.502 \text{ t/h} * 850 \text{ Kcal/t } ^\circ\text{C} * (62-59) ^\circ\text{C}$$

$$\text{Calor requerido para la condición de diseño} = 6.380.100 \text{ Kcal/h}$$

$$\begin{aligned} \text{En relación a vapor requerido} &= 6.380.100 \text{ Kcal/h} / (530 \text{ Kcal/kg} * 1.000 \text{ kg/t}) \\ &= 12 \text{ t/h} \end{aligned}$$

$$\text{Flujo térmico} * \text{Delta Entalpia} = \text{Calor requerido}$$

Transformando unidades térmicas de energía tenemos que:

$$6.380.100 \text{ Kcal/h} * 24 \text{ h} * 365 \text{ días} \longrightarrow \mathbf{64.999 \text{ MWh Térmico Año}}$$

(65 GWh térmico Año)

9. EVALUACIÓN TECNICO ECONOMICA

PROYECTO TERMOSOLAR

El proyecto en si consta de una central termosolar que cubra la producción de calor calculada de 65.000 MWh térmico año, para cubrir en requerimiento térmico del proceso de electro refinación del cobre en la división.

Se utilizaran captadores solares planos replicando la tecnología utilizada en planta Termosolar Pampa Elvira de minera Gaby de la misma compañía que comprenderá un espacio de 14.000 m² de terreno, que serán ubicados en el sector de ex área de preparación de ripios cercanos en 400 metros al proceso de refinería

La Planta Termo Solar empleará colectores solares planos 99% reciclables, con una superficie colectora de 39 mil metros cuadrados y un estanque para almacenamiento de agua caliente, de 4.000 metros cúbicos.

La ubicación de la Planta estará próxima a la Nave de Electrorefinación, cubriendo una superficie de 14.000 m².

La inversión comprende un costo total del proyecto de 32 MMUS\$ y un duración del proyecto hasta su puesta en marcha de 12 meses.

Calculo del VAN Proyecto Termosolar

		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INGRESOS												
Ahorro Diesel	NM3		19.253	19.253	19.253	19.253	19.253	19.253	19.253	19.253	19.253	19.253
Diesel	US\$/M3		330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0
Sub-total	US\$		6.353.490	6.353.490	6.353.490	6.353.490	6.353.490	6.353.490	6.353.490	6.353.490	6.353.490	6.353.490
EGRESOS												
Lavado	US\$		344.563	344.563	344.563	344.563	344.563	344.563	344.563	344.563	344.563	344.563
Pulido	US\$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mano de Obra	US\$		43.636	43.636	43.636	43.636	43.636	43.636	43.636	43.636	43.636	43.636
Sub-total	US\$		388.199	388.199	388.199	388.199	388.199	388.199	388.199	388.199	388.199	388.199
Depreciación	US\$		-3.200.000	-3.200.000	-3.200.000	-3.200.000	-3.200.000	-3.200.000	-3.200.000	-3.200.000	-3.200.000	-3.200.000
Utilidad Antes de Impuesto			2.765.291	2.765.291	2.765.291	2.765.291	2.765.291	2.765.291	2.765.291	2.765.291	2.765.291	2.765.291
Impuesto			-691.323	-691.323	-691.323	-691.323	-691.323	-691.323	-691.323	-691.323	-691.323	-691.323
Utilidad Después de Impuesto			2.073.968	2.073.968	2.073.968	2.073.968	2.073.968	2.073.968	2.073.968	2.073.968	2.073.968	2.073.968
Depreciación			3.200.000	3.200.000	3.200.000	3.200.000	3.200.000	3.200.000	3.200.000	3.200.000	3.200.000	3.200.000
Valor Residual												0
INVERSIONES		-32.000.000										
Flujo Caja		-32.000.000	5.273.968	5.273.968	5.273.968	5.273.968	5.273.968	5.273.968	5.273.968	5.273.968	5.273.968	5.273.968
VAN 10 años	\$ 3.388.754											
TIR	10,3%											

La inversión inicial será de 32 MMUSD\$ contemplados por el proyecto con una evaluación a diez años, los ingresos son por concepto de ahorro de combustible Diesel a un precio 2016 promedio de 330 USD\$/m3 proyectado, y los egresos contemplan la limpieza de los captadores solares y mantenimiento de la planta en mano de obra por 388.000 USD\$ año

Podemos ver que el flujo de caja es positivo con una Van de 3,38 MMUSD\$ y una TIR de 10,3%.por lo que nuestro proyecto en la consideraciones asumidas anteriormente es aplicable al proceso.

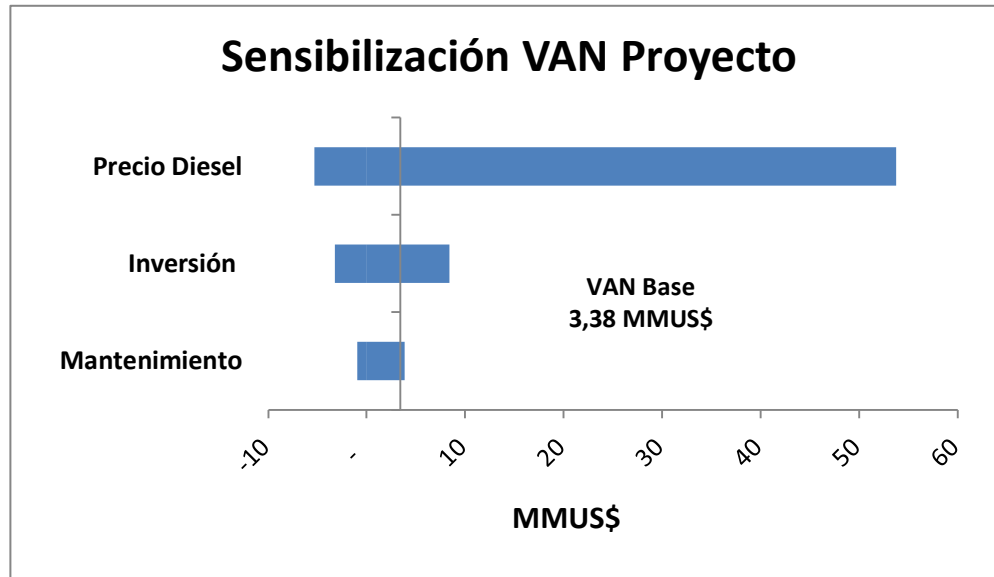
9.1 SENSIBILIZACIÓN DE VARIABLES

Se realizó un sensibilización de las variables que más influyen el VAN del proyecto considerando Precio del combustible, inversión del proyecto y mantenimiento

VARIABLES A CONSIDERAR EN SENSIBILIZACIÓN				
		Actual	Maximo	Minimo
Mantenimiento	US\$	380.000	800.000	300.000
Inversión	MMUS\$	32	40	26
Precio Diesel	US\$/nm3	330	850	240

Tabla 9.1 valores límites para sensibilización del proyecto

Obteniendo los siguientes resultados presentados en la grafica



Gráfica 9.1 Sensibilización de variables que afectan el Van del Proyecto.

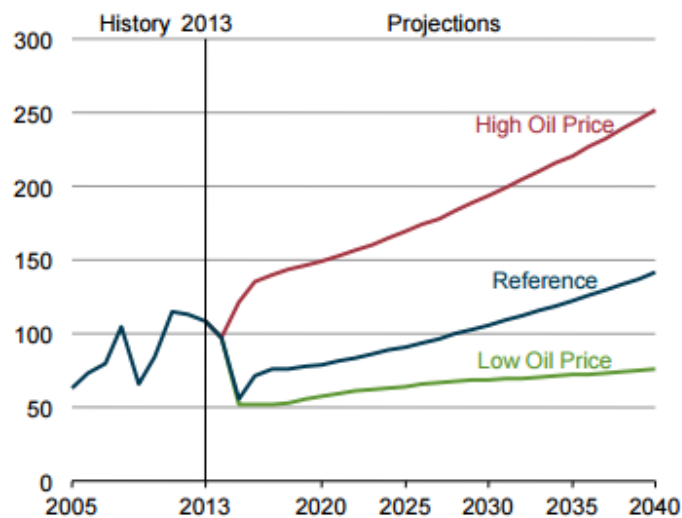
Podemos observar que la variable que más afecta el Van del proyecto en orden descendente es la del precio del Diesel que bajando del límite de los 300 US\$/m³ hace que el Van sea negativo afectando la rentabilidad del proyecto Termosolar, otra variable Clave es la inversión que pasando el límite de 38 MMUS\$ hace que el Van del proyecto sea negativo y finalmente el mantenimiento y mano de obra también ante precios mayores a 600.000 USD año hace el proyecto no sea atractivo económicamente.

9.2 PROYECCIÓN DE PRECIO DE COMBUSTIBLES

Los precios establecidos para los productos derivados del petróleo y otros productos líquidos en los Estados Unidos reflejan el precio que pagan las refinerías para las entradas de crudo de petróleo, así como el funcionamiento, el transporte y los costes de distribución y los márgenes que reciben las refinerías.

Cambios en la gasolina y los precios del petróleo combustible destilado moverse generalmente en la misma dirección que los cambios en el precio mundial del crudo, pero los cambios en los precios también se ven influidas por factores de demanda.

Un aumento del 30% en el precio del crudo Brent del Mar del Norte lugar a partir de 2013 y 2040 en los resultados del caso de referencia en la media ponderada EE.UU. precio de productos derivados del petróleo aumentan en un 15%, pasando de \$ 3.16 / galón de \$ 3.62 / galón (en 2013 dólares).



Grafica 9.2.1: Proyección precios crudo Brent; tres casos 2005 al 2040
USD/barril

Los precios del combustible destilado se elevan en un 23% a través de 2040 en el caso de la referencia, (grafica 9.2.2).

Sin embargo, el consumo de combustible destilado se eleva en un 15%, en comparación con un 20% disminución en el consumo de gasolina motor. En el caso precio del petróleo elevado, una mayor demanda de crudo en países no OECD y una menor oferta de crudo de la OPEP empuje de petróleo los precios mundiales del petróleo crudo para arriba. Como resultado, la media ponderada



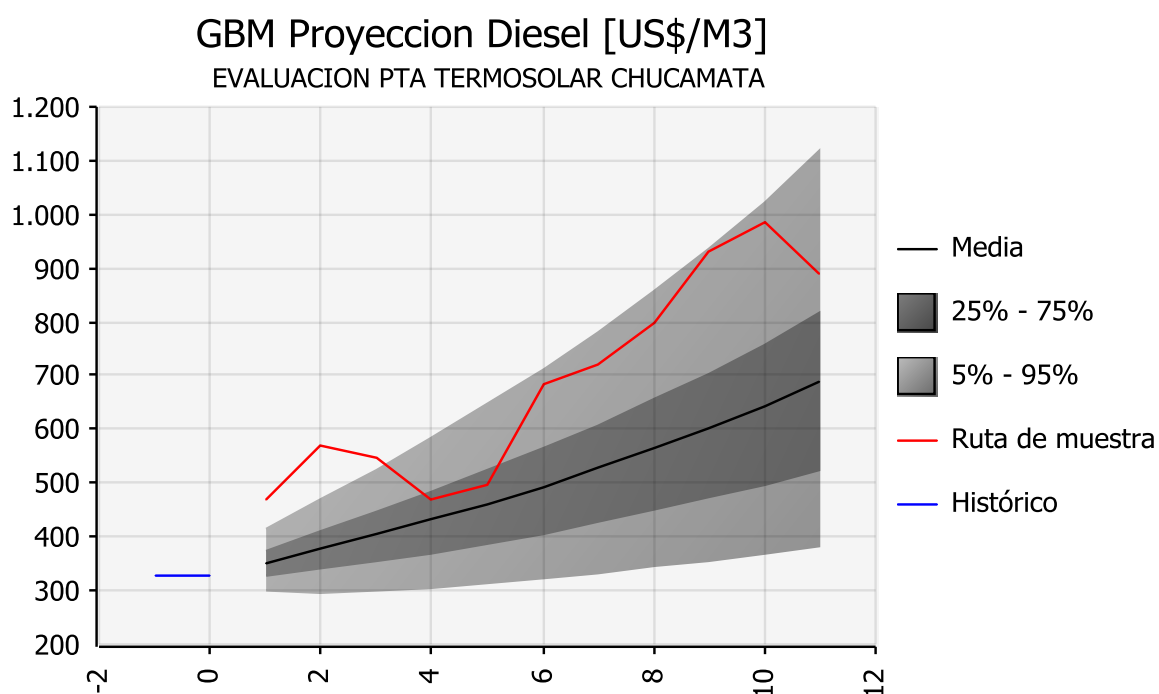
Grafica 9.2.2 Proyección de precios de combustibles destilados del petróleo en tres casos

Fuente: U.S. Energy Information Administration | Annual Energy Outlook 2015

10. ANALISIS ESTOCASTICO DEL PROYECTO

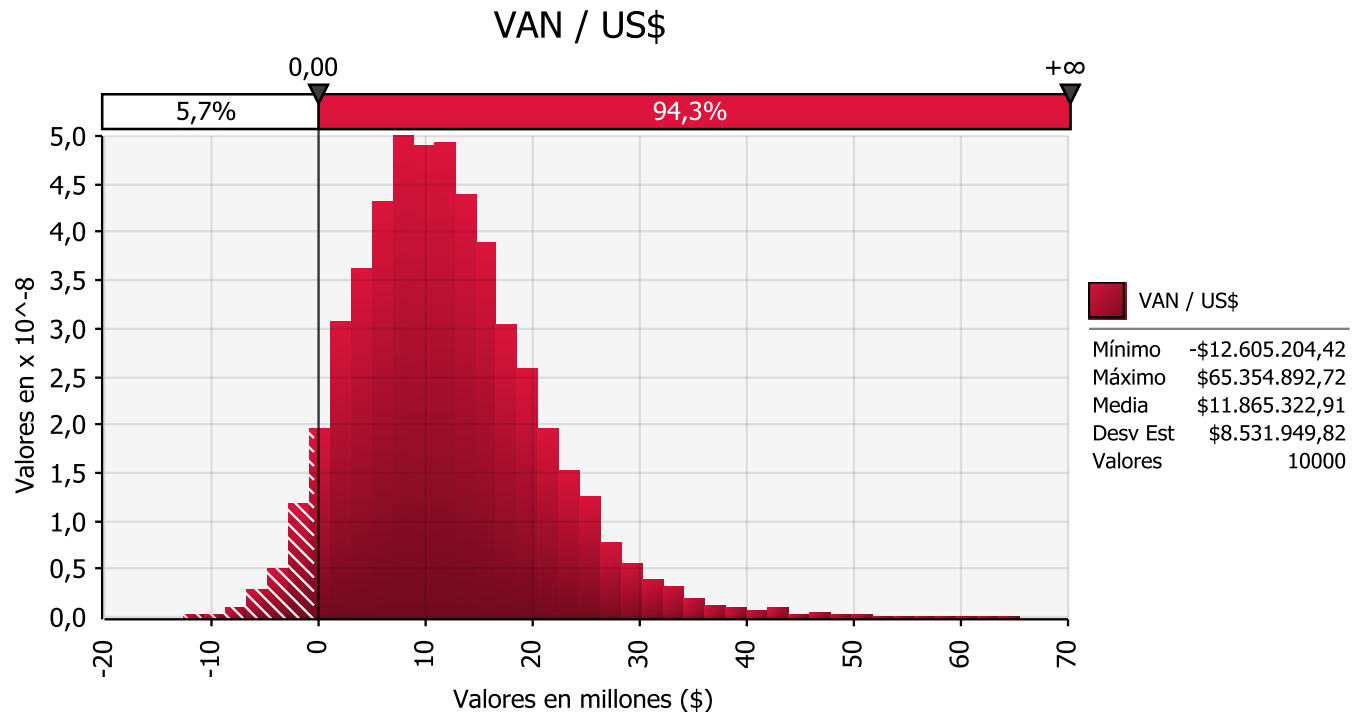
Según lo expuesto en el capítulo anterior la proyección de precios en el reporte Annual Energy Outlook 2015 para combustible será en un alza del orden del 23%, tomando esta referencia internacional del comportamiento esperado en los precios de combustibles, es que se realizó un análisis estocástico tomando una proyección browniano el cual por su características de dispersión de valores representa las proyecciones recogidas en el capítulo anterior.

Aplicando la proyección en el precio del combustible diesel para el proyecto Termosolar en evaluación obtenemos la siguiente grafica en el software arroba Risk



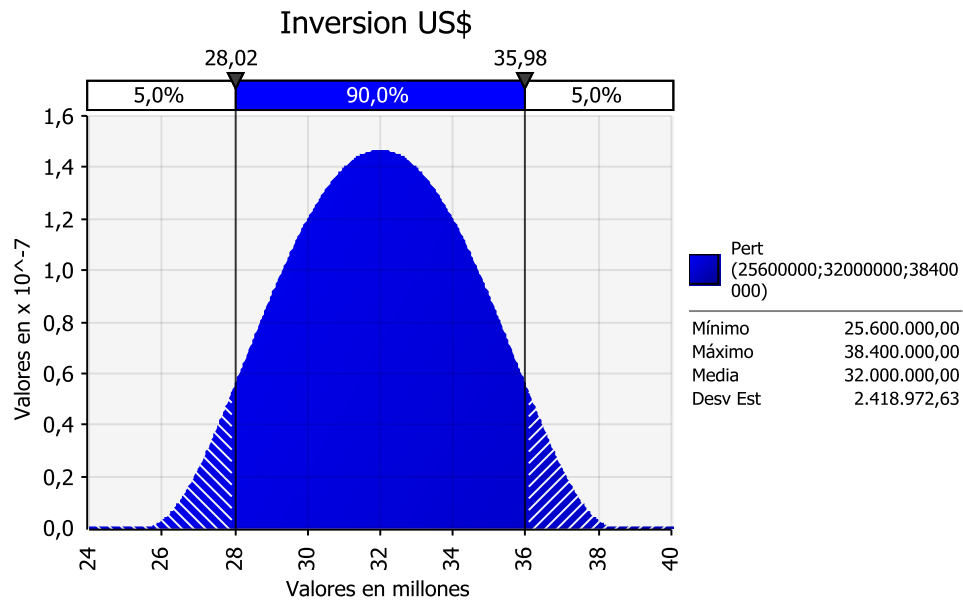
Podemos observar dos bandas de proyección en el mismo sentido que abarcan casi la totalidad de los precios según la proyección del 23% al 2040, esto nos permite evaluar el porcentaje en que el VAN del proyecto Termosolar sea el esperado para hacer viable dicho proyecto.

Ahora se presenta el resultado del comportamiento del VAN del proyecto al ser aplicado en la proyección de precios de combustible antes mencionada

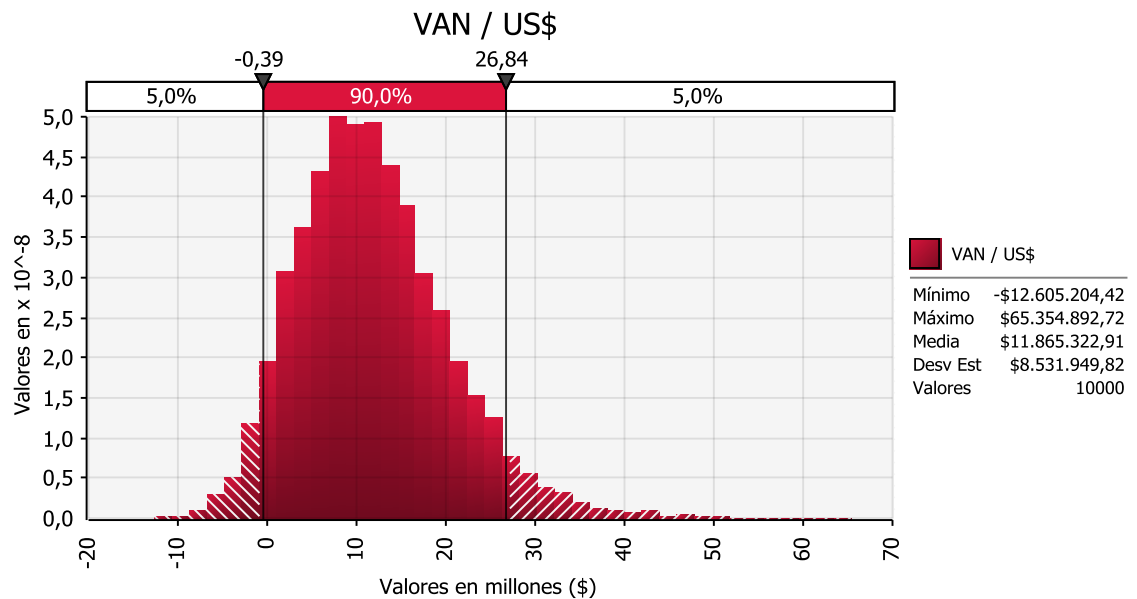


Se puede apreciar que sobre un 90% de las iteraciones, el VAN del proyecto Termosolar es mayor a cero lo que nos indica que el proyecto sea muy atractivo en las condiciones evaluadas.

Otro aspecto importante a considerar dentro del análisis estocástico es la variable inversión del proyecto, nuevamente utilizando el software se consideró de acuerdo a los valores de inversión de los últimos proyectos implementados en minería en el caso una banda de $\pm 20\%$ de la inversión lo que se refleja en la siguiente gráfica.



Considerando este banda posible de variación de precios sobre la inversión considerada en el flujo de caja del proyecto, obtenemos el comportamiento del VAN del proyecto Termosolar.



Se muestra que sobre el 90% de las iteraciones el VAN del proyecto resulta positivo con las consideraciones antes mencionadas.

11.CONCLUSIONES

De acuerdo a la recopilación de antecedentes tanto en los dos casos presentados como estado del arte en minería, como para el caso particular del proyecto termosolar para suministrar calor al proceso de electrorefinación del cobre y al análisis de casos y sus aspectos mas reelevantes podemos concluir:

❖ DE LOS DOS CASOS PRESENTADOS

En relación al costo de la energía para el modelo economico de PAMPA ELVIRA consta de un contrato por suministro de energia termica fijo por 10 años tipo ESCO a 90USD/MWh termico, en cambio el costo de la energía en el modelo de inversión propia realizado por Minera El Tesoro extraido de el flujo de caja del proyecto resulta ser de 110USD/MWh termico, por lo tanto en realcion al precio de la energia por MWH termico el modelo de contrato de suministro energetico es mas conveniente que el costo de la energia del modelo aplicado por minera El Tesoro.

Si comparamos la energia por unidad de area de captador solar. Vemos que en el caso de la PTS de minera El Tesoro la energia capturada es de 1,5 MWh termico por m² de captador solar (cilindro parabolico) levemente mayor en comparación de la PTS PAMPA ELVIRA donde la energia capturada es de 1,2 MWh termico por m² de captador en este caso plano.

Dado esto la capacidad de captura de energia solar para ser transformada en energia termica son de un rango muy cercano siendo mayor la de la tecnologia Cilindro parabolica que la de captadores planos.

De lo anterior se desprende que para una misma cantidad de energia requerida la tecnologia de captadores solares planos es mas intensiva en utilizacion de terreno que para el caso de captadores solares cilindro parabolicos.

De la misma forma si observamos el parametro energía termica por unidad de captador solar los rangos son muy estrechos siendo mayor nuevamente el encontrado en la tecnologia cilindro parabolica con 20 MWh termico por captador solar en cambio para la tecnologia de captadores planos el valor es de 18 MWh termico por captador solar. De estos valores podemos ver que para una misma cantidad requerida de energia termica se necesitaran mas unidades de captadores solares planos que cilindro parabolicos, aunque el rango es muy estrecho nuevamente.

❖ **DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL CLIENTE**

El éxito o fracaso de un contrato de compra y venta de energía térmica simulando un convenio con una empresa ESCO dependerá de las variaciones del precio del combustible desplazado, razón por la cual es relevante incorporar indexadores al precio del MWh térmico convenido para mantener los márgenes y compartir los riesgos de las alzas de precios internacionales de combustibles.

Para ello resulta de suma importancia en la evaluación de inversión de este tipo de proyectos, la realización de simulaciones estocásticas que permitan simular la variabilidad de los precios de los combustibles desplazados y que variables son las que más impactan el futuro del proyecto. En los casos presentados las variables más sensible es el precio del combustible y le sigue el monto de la inversión.

De la experiencia en minería podemos decir que un aspecto de vital relevancia es el rendimiento de la planta ya que si este parámetro esta fuera de su valor de diseño provocará un impacto directo en el volumen de combustible desplazado y en consecuencia en la caja del proyecto.

Finalmente podemos decir que para una empresa que tiene como giro esencial la producción de materia primas como cobre no es conveniente pensar en proyectar inversiones propias que requieren de un capital intensivo en particular con el actual precio del cobre, sino más bien indagar la posibilidad de contratos tipo ESCO que permitan capturar ganancial en el corto y largo plazo, bajo el supuesto de la variación del precio del combustible desplazado.

❖ EN TERMINOS GENERALES

Podemos decir que la factibilidad técnica de un proyecto a partir de energía solar como el caso de estudio, dependerá esencialmente de cuales sean los procesos a alimentar y las necesidades o consumos energéticos de cada uno de ellos. Podemos decir que los criterios que definen factibilidad son:

Viabilidad del proyecto: este punto considera aspectos tan relevantes como la seguridad del emplazamiento propuesto incluyendo características topográficas que podrían afectar la instalación de los equipos, situación de los potenciales impactos ambientales a producirse con la implementación de la tecnología y la disponibilidad del suministro de agua para el proyecto y su respectivo plan de acción para mitigar efectos negativos.

Además considera existencia de barreras legales y económicas que puedan afectar o desincentivar la inversión en tecnología solar.

Madurez de la tecnología: es vital que la tecnología haya sido implementada con anterioridad y que dicho proyecto sea de una potencia instalada igual o mayor capacidad que la tecnología que se quiere implementar, con la finalidad de asegurar cierto grado de confiabilidad. El grado de madurez de la tecnología propuesta para el proyecto incluye aspectos relevantes como por ejemplo:

número de proyectos de la tecnología, capacidad instalada, y periodo de operación comercial de la tecnología ofrecida (vida útil).

Características técnicas de la tecnología: este ítem contempla aspectos propios de la tecnología y que se relaciona con las características de fabricación del equipo; éstas son principalmente producción de energía nominal, capacidad nominal, factor de potencia y mantención.

Disponibilidad del terreno: Debido a la amplia extensión de la central solar, la disponibilidad del terreno suele ser un factor relevante al momento de la selección del sitio.

Podemos afirmar que cada una de las tecnologías requiere distinta superficie para ser implementada. A lo anterior se suma el hecho de considerar aspectos de geometría y ángulos mínimos de incidencia de la luz solar para que la sombra proyectada no interfiera en la captación.

Con el fin de garantizar un adecuado desempeño de cualquier planta, es importante tener en cuenta las operaciones que se deben realizar para mantener el correcto funcionamiento de la misma. Los aspectos más importantes relacionados son:

La operación de mantención más importante en una planta de colectores de espejos es la limpieza de éstos, ya que impurezas en su superficie formadas principalmente por la presencia de material particulado en suspensión, humedad, lluvia, hielo; reducen la reflectividad de éstos, disminuyendo la cantidad de radiación solar reflectada incluso llegando a afectar en VAN del proyecto.

.

En el momento de la instalación de la planta en el sitio escogido, se alinean el sistema de seguimiento solar, la estructura del colector y el receptor. Con el tiempo, esta alineación se puede deteriorar por el movimiento constante de los equipos o por efectos de fuerzas como la del viento o la gravedad, por lo que es necesario reajustarla cada seis meses. De esta manera se asegura la mayor captación de energía radiante posible y cumplimiento de los rendimientos esperados.

En general los espejos presentan alta durabilidad en el tiempo, pero se ha observado que espejos ubicados en los extremos de los colectores sufren roturas en momentos con alta velocidad del viento, a veces sumado a tormentas de arena. Para solucionar este problema, se recomienda utilizar espejos reforzados con resinas de fibra de vidrio en las ubicaciones de mayor riesgo de rompimiento.

Los rendimientos de la energía térmica deben ser monitoreados y controlados según KPI establecidos de manera de asegurar el buen funcionamiento de este tipo de plantas y así trabajar con los rendimientos para los cuales fue evaluado cada proyecto, el no controlar estos aspectos por simples que parezcan conllevar pérdidas en los costos asociados a suplir la energía Termosolar con otra fuente de calor.

Los modelos de negocios tanto de inversión propia con contrato por venta de energía USD/MWh Térmico, deben contemplar primeramente un levantamiento real de la demanda de calor y el análisis de los costos asociados a la generación de calor por procesos convencionales tales como calentadores o calderas a combustible fósil esto permitirá tener un punto de comparación con el futuro proyecto y datos del combustible a desplazar.

12. BIBLIOGRAFIA

1. SOLAR ENERGY PERSPECTIVES / INTERNATIONAL ENERGY AGENCY.
2. INFORMES DE COCHILCO / ESTADÍSTICAS CONSUMO DE ENERGÍA DE LA MINERÍA DEL COBRE AL AÑO 2014.
3. REPORTE ANUAL 2015 DE ANTOFAGASTA MINERALS.
4. CODELCO – MEMORIA ANUAL 2014.
5. ESTADO DEL ARTE. DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS APPSOL.WP4.D01.V1.2
6. [HTTPS://WWW.CODELCOEDUCA.CL/PROCESOS_PRODUCTIVOS/TECNICOS_ELECTRORREFINACION.ASP](https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_electrorrefinacion.asp).
7. INFORME DEL MERCADO INTERNACIONAL DEL COBRE INFORME DE COCHILCO.
8. WP1: APLICACIÓN Y POTENCIAL, DETERMINACIÓN DE ESCENARIOS DE POTENCIAL / APPSOL.WP1.D02.V1.0 POTENCIAL.
9. APPSOL // MANUAL DE DISEÑO DE SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS PARA LA INDUSTRIA CHILENA.
10. ENERGY POLICY REVIEW 2009 // INTERNATIONAL ENERGY AGENCY.

