



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DE ENERGIA SOLAR**  
**EN PROCESOS DE LA GRAN MINERIA DEL COBRE**

*MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE*  
*INGENIERO CIVIL DE MINAS*

**RODRIGO ALBERTO GACITUA RIVERA**

PROFESOR GUIA:  
SR. LEANDRO VOISIN ARAVENA

MIEMBROS DE LA COMISION  
SR. ROBERTO ROMAN LATORRE  
SR. JACQUES WIERTZ

SANTIAGO DE CHILE

DICIEMBRE, 2011



## RESUMEN

Durante los últimos años el precio de la electricidad en Chile ha experimentado fuertes alzas, incidiendo directamente en los costos de producción de la industria minera nacional y afectando su competitividad en el mercado mundial.

Este incremento en los costos de la electricidad, se debe principalmente a la implementación de políticas energéticas que no prosperaron, dentro de las cuales se encuentra la crisis experimentada en la importación de gas natural en la última década, en donde se produjo un efecto combinado entre el reemplazo de gas natural por otros combustibles convencionales de mayor costo y el incremento generalizado del precio de éstos, particularmente en los años 2007 y 2008.

Lo anterior representa un incentivo a estudiar y analizar el desarrollo de una potencial implementación de tecnologías que consideren el uso de energías renovables no convencionales, obteniendo así seguridad en el suministro a precios más competitivos.

Este trabajo consiste en un estudio de factibilidad de la utilización de energía solar para la producción de energía eléctrica necesaria para las operaciones unitarias de las faenas mineras del Norte Grande, focalizando el análisis en identificar las posibles barreras que afectan a este tipo de proyectos: técnicas, de entrada, económicas, políticas, ambientales y socioculturales.

La matriz energética del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) se compone casi en su totalidad de centrales termoeléctricas, las que principalmente consumen carbón y sus derivados para generar electricidad a costos más bajos.

El compromiso y la protección medioambiental mundial fomentan la necesidad de reducir las emisiones contaminantes a través de beneficios e incentivos económicos normados y reconocidos como la huella de carbón.

Dentro de las tecnologías que generan energía a partir de energía solar, una de las que cuenta con mejor disponibilidad y desarrollo es el Concentrador Cilindro Parabólico, el que pese a contar con ventajas comparativas, presenta altos costos que no permiten en el mediano plazo invertir en una implementación de este tipo.

Finalmente se concluye que la ley sobre energías renovables no es suficiente para crear los incentivos necesarios para impulsar inversiones en tecnología limpia por parte de las grandes empresas mineras. Lo que sumado a altos costos de estas tecnologías, relacionados directamente a su desarrollo incipiente y a su falta de desarrollo, no logra dar paso a inversiones de este tipo.

Pero el escenario debe ser evaluado de forma más integral de acuerdo a las tendencias actuales, internalizando otros aspectos como los impactos negativos de seguir explotando sistemas de generación convencionales como las centrales termoeléctricas, referidos principalmente a efectos en la salud y medioambiente. Para ello, establecer mecanismos legales y normativos se muestran como la principal herramienta para poder atenuar o eliminar las barreras de entrada a tecnología solar-térmica de concentración. Con lo anterior se espera que las empresas mineras tengan reales incentivos a rediseñar sus políticas energéticas, invirtiendo en tecnologías de generación no convencionales que en mediano plazo resulten en una disminución de costos de la energía y la actividad sea más competitiva.

## ABSTRACT

In recent years the price of electricity in Chile has experienced strong increases directly affect production costs of the mining industry and affecting its competitiveness in the global market.

This increase in electricity costs is mainly due to the implementation of energy policies that failed within which the crisis is experienced in natural gas imports in the last decade, which saw a combined effect between replacement of natural gas by other conventional fuels more expensive and the general increase in their price, particularly in the years 2007 and 2008.

This represents an incentive to study and analyze the development of a potential implementation of technologies that consider the use of unconventional renewable energy sources, obtaining security of supply at competitive prices.

This work is a feasibility study of using solar energy to produce electrical energy required for unit operations of mining sites in the Norte Grande, focusing the analysis to identify potential barriers that affect these types of projects: technical from the outset, economic, political, environmental and sociocultural.

The energy matrix of the Northern Interconnected System (SING) is composed almost entirely of power plants, which consume mainly coal and its derivatives to generate electricity at lower costs.

The commitment to global environmental protection and promote the need to reduce emissions through economic incentives and benefits standards, and recognition as the carbon footprint.

Among the technologies that generate energy from solar energy, one that has better availability and development is the Trough Concentrator, which despite having comparative advantages, has high costs that are not allowed in the medium term investment a deployment of this type.

Finally we conclude that the renewable energy law is not enough to create the necessary incentives to promote investments in clean technology by the large mining companies. Which together with high costs of these technologies directly related to their early development and lack of development, can not give way to such investments.

But the scenario should be evaluated more comprehensively according to current trends, other aspects such as internalizing the negative impacts of generation systems continue to operate conventional power plants, referring primarily to effects on health and the environment. To do so, legal and regulatory mechanisms are shown as the main tool to alleviate or remove entry barriers to solar-thermal technology concentration. With the above it is expected that mining companies have real incentives to redesign their energy policies, investing in non-conventional generation technologies in the medium term resulting in lower energy costs and more competitive activity.

## AGRADECIMIENTOS

Mis Primeros agradecimientos son para mis padres Luis y Luissis, por su incondicional amor y sacrificio porque yo llegara a este momento. Sin ellos no hubiera sido posible ni empezar ni terminar esta gran tarea que emprendí. Mi hermano Gonzalo por todos sus consejos e incluso retos los cuales rescato a plenitud pues todos ellos me dieron fuerza para despertarme y levantarme cuando estaba abatido y sin ganas de seguir.

Mis profesores de comisión tanto profesor guía Leandro Voisin, profesor co-guía Roberto Román y profesor integrante Jacques Wiertz por su paciencia y dedicación para ayudarme y corregirme cada uno de los errores que cometí, por hablarme más allá de lo formal y lo académico.

Para Claudia un especial reconocimiento por todo el tiempo y esfuerzo puesto en los momentos más difíciles para que yo saliera adelante y para que alcanzara mi título, hoy a la distancia un enorme sentimiento de gratitud hacia ella.

Mis amigos de toda la vida Leo, Pancho, Pablo, Talo, Walo, Jimmy, Mauricio a todos ellos por las largas conversaciones arreglando el mundo y también por tantas jornadas compartiendo y disfrutando con cualquier bebestible.

A tía Suly y tío Basilio por tantos buenos momentos que me hicieron pasar y por tanta compañía que me entregaron cuando más lo necesitaba.

A mis compañeros y amigos de toda la vida Rodrigo Parraguez, Cristián Errázuriz, Cesar Pizarro, Armando Cortés, Jaime Vidal por tantos años de amistad forjada desde la etapa del liceo incluso con algunos de ellos en la universidad con gran compañerismo.

Mis amigos de la Universidad, Pepe, José Barrientos (Adulto), Alejandro Garrido, Ricatti, Mariana, Diego Utreras, Juan Pablo Lagos, Francisco Berríos, Cristián Cámpora, por su amistad y también a mis amigos funcionarios Mariana, Marco, Claudia por tan buenos momentos vividos y conversaciones constructivas y también por sus sabias palabras.

Mi tía Norma por todas las veces que me aconsejó y me orientó haciéndome ver mis errores y que con sus palabras de aliento lograron subirme el ánimo y darme una palabra cuando más lo necesitaba.

A mis tíos queridos Nana y Carlos y toda su familia por el gran apoyo y cariño que siempre recibí de ellos. Sus hijas, mis amigas y hermanas Fabi, Lorena, Jose, Carlita y Vale gracias por todas las veces que subieron el ánimo cuando anduve bajoneado y por cada una de las tardes que me invitaron a compartir con ustedes para arreglar el mundo o tan simple para compartir las penas y alegrías de la vida.

A todos muchas gracias por todo...

# INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>1. INTRODUCCION</b> .....	7
1.1. Introducción .....	7
1.2. Objetivos .....	9
1.2.1. <i>Objetivos Generales</i> .....	9
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	9
1.3. Alcances .....	9
1.4. Metodología .....	9
<b>2. ENERGÍA SOLAR</b> .....	11
2.1. Análisis de Factibilidad técnica.....	11
2.1.1. <i>Potencial Solar en el Norte de Chile</i> .....	12
2.1.2. <i>Descripción Tecnología Solar</i> .....	15
2.1.3. <i>Tecnologías disponibles de energía solar</i> .....	16
2.2. Comparación de tecnologías disponibles de energía solar .....	34
2.3. Factibilidad de tecnologías.....	35
2.3.1. <i>Criterios de Factibilidad</i> .....	35
2.3.2. <i>Factibilidad de la Tecnología</i> .....	36
2.3.3. <i>Análisis de Riesgo (evaluación ambiental fluido de trabajo)</i> .....	37
2.3.4. <i>Disponibilidad del terreno</i> .....	37
2.3.5. <i>Disponibilidad del fluido</i> .....	39
2.3.6. <i>Capacidad de alimentación</i> .....	39
2.3.7. <i>Potencia Nominal -Eficiencia</i> .....	39
2.3.8. <i>Energía a producir-Factor de Capacidad</i> .....	40
2.3.9. <i>Operación y Mantenimiento</i> .....	40
2.4. Análisis de Factibilidad.....	41
2.4.1. <i>Requerimientos energéticos de procesos mineros</i> .....	42
2.4.3. <i>Tratamiento de Minerales Oxidados y Sulfuros de Baja Ley (Hidrometalurgia)</i> .....	48
2.4.4. <i>Tratamiento de Minerales Sulfurados (Concentración y/o Pirometalurgia)</i> .....	48

3. BARRERAS.....	52
3.1. Barreras Técnicas.....	52
3.2. Barreras de Entrada.....	53
3.3. Barreras Económicas.....	54
3.4. Barreras Políticas.....	56
3.5. Barreras Ambientales.....	57
3.5.1. <i>Normativa Ambiental</i> .....	58
3.6. Barreras Socioculturales.....	60
4. EVALUACIÓN TÉCNICA Y APLICACIÓN EN INDUSTRIA MINERA.....	62
4.1. Elección de la tecnología.....	63
4.2. Elección de los procesos.....	64
5. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	68
5.1. Aspectos económicos del proyecto.....	68
5.2. Información para la evaluación económica.....	69
5.3. Análisis caso 1.....	71
5.4. Análisis caso 2.....	72
6. CONCLUSIONES.....	73
7. BIBLIOGRAFIA.....	76



# 1. INTRODUCCION

## 1.1. Introducción

El Sistema Interconectado del Norte Grande de Chile (SING), está constituido por un conjunto de centrales generadoras y líneas de transmisión interconectadas que abastecen los consumos eléctricos ubicados en las regiones I, II y XV del país. Cerca del 90% del consumo del SING está asociado a los grandes consumidores como industriales y minería, siendo éste último el principal demandante de energía; el resto del consumo está concentrado en las empresas de distribución que abastecen a los clientes sometidos a regulación de precios. [1]

El SING cuenta con una capacidad instalada de aproximadamente 4.000 MW. El parque generador es mayoritariamente termoeléctrico, constituido en un 99,63% por centrales termoeléctricas a carbón, diesel fuel, diesel y de ciclo combinado a gas natural, las que debido al corte en el suministro del gas argentino se han “carbonizado” o convertidas a diesel. Sólo existen dos unidades hidroeléctricas, que representan el 0,37% restante de la capacidad instalada. Además, de los 13.945,8 GWh de generación Bruta durante el año 2007, el 90% del consumo fue por parte de las mineras, y de ese total, el 82,2% sólo por parte de la minería del cobre [2].

El principal impacto que tiene la generación térmica actual es la emisión de contaminantes atmosféricos, lo cual depende directamente del combustible que se utilice. Las principales emisiones de un sistema termoeléctrico son: material particulado menor a 10  $\mu\text{m}$  (PM10), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). De manera adicional, las centrales a carbón utilizan grandes volúmenes de agua de mar para enfriar el vapor que sale de las turbinas, el cual retorna con una temperatura mayor a la inicial y genera un impacto en el ecosistema local.

Entre los impactos generados por la producción de energía eléctrica, se debe citar la emisión de gases invernadero y que son la principal causa del proceso de cambio climático que ha experimentado el planeta en las últimas décadas, el que se manifiesta en la recurrencia de huracanes, sequías, copiosas precipitaciones, olas de calor, entre otros.

Por otro lado, el costo de la electricidad en la minería representa un 16% del costo total, siendo uno de los ítems más altos en la industria. La energía eléctrica en Chile ha experimentado un alza en el precio y además las proyecciones apuntan hacia un aumento en el precio de los combustibles, lo que genera incertidumbre en el precio de la energía a futuro y por cierto en la evolución de la competitividad para la industria minera.

Es importante señalar que la creciente demanda de energía por parte de la minería del Norte Grande se debe a varios factores. Entre éstas se cuentan las siguientes:

- Consumo creciente de electricidad debido a la explotación de yacimientos con menor ley y al envejecimiento de las minas. La necesidad de remover mayor cantidad de material para obtener la misma cantidad de cobre fino sumado a la extracción de mineral con mayor dureza son principales razones que justifican dicha demanda.
- Desarrollo de nuevos proyectos y expansión de los mismos hacen necesario un mayor consumo de energía eléctrica para el procesamiento de minerales.
- Demanda de energía ligada al consumo de agua en áreas y procesos. Agua que dada la escasez es necesario desalinizar y posteriormente transportar, proceso que demanda mucha energía debido a la distancia y altura a la que se encuentran los yacimientos.

Por otro lado el norte de Chile presenta una de las mejores condiciones de radiación solar, haciéndolo ideal para el aprovechamiento de energía solar, cuyo desarrollo como fuente renovable día a día logra posicionarse como una alternativa real, no contaminante y económicamente viable.

La oportunidad es clara, integrar el uso de energía solar y su conversión tanto térmica como eléctrica a los procesos mineros, desarrollar políticas regionales que impulsen y promuevan el uso de fuentes renovables de energía ampliando la matriz energética sin restar competitividad a la industria, generar nuevas fuentes de trabajo y capacitando a profesionales en el área, y por último catapultar a la minería como una industria sustentable.

## **1.2. Objetivos**

### *1.2.1. Objetivos Generales*

Estudiar la aplicación de la generación eléctrica solar en operaciones unitarias del proceso minero e identificar las operaciones unitarias que son técnicamente viables de ser alimentadas por electricidad generada a partir de energía solar.

### *1.2.2. Objetivos Específicos*

- Caracterizar y cuantificar el consumo energético de las operaciones unitarias.
- Evaluar y cuantificar la energía solar factible de ser convertida y empleada en los procesos minero-metalúrgicos.
- Identificar posibles barreras legales a la utilización de electricidad generada a partir de energía solar.

## **1.3. Alcances**

- El presente trabajo está referido a la minería del cobre del Norte Grande de Chile.
- Evaluado en el contexto geográfico y jurídico chileno.

## **1.4. Metodología**

El análisis de factibilidad de un proyecto como este debe identificar las barreras de tipo técnicas, económicas e institucionales que impiden y/o dificultan su ejecución.

La identificación de éstas dará los lineamientos generales para seguir con la evaluación del proyecto, y a través de ésta se hará un análisis comparativo de las tecnologías y sus barreras, importando sólo las que sean remediabiles, pues las otras convertirán a las correspondientes tecnologías en proyectos inviables técnicamente.

Se analizarán las leyes y normativas vigentes en Chile que incidan en la evaluación del proyecto. Es necesario ver las exigencias y requisitos que se deben cumplir para conocer a cabalidad la posibilidad real de ejecutar el proyecto.

En caso de existencia de barreras se estudiará y explorará soluciones alternativas con el fin de subsanar las complejidades que afecten al proyecto, y formas de cumplir con las exigencias actuales.

Se analizará la viabilidad principalmente técnica para implementar cada una de las tecnologías que existen actualmente en el mercado; haciendo una tabla comparativa de las ventajas y desventajas de cada una de ellas, y posteriormente evaluar y analizar la implementación de ellas en faenas mineras.

Finalmente se entregarán conclusiones que conducen a la elección de la tecnología a implementar y se determinará las posibles soluciones y acciones correctivas para las barreras a la implementación de dicha tecnología solar y a alimentación de electricidad desde la misma a los procesos mineros viables sin conexión a la red.

## 2. ENERGÍA SOLAR

### 2.1 Análisis de Factibilidad técnica

Se llama energía solar a la energía de radiación producida en el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión, la cual llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones. La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera se llama constante solar, y su valor medio es  $700 \text{ [W/m}^2\text{]}$ , pero debido a la absorción y a la dispersión de la radiación al interactuar los fotones con la atmósfera, determina una intensidad real disponible menor que incide en la superficie terrestre [3].

La dispersión atmosférica que redirecciona los rayos solares es de dos tipos: dispersión de Rayleigh y la dispersión de Mie. En la Figura 1 se puede observar el efecto de las partículas y moléculas que componen la atmósfera en la dirección de la radiación.

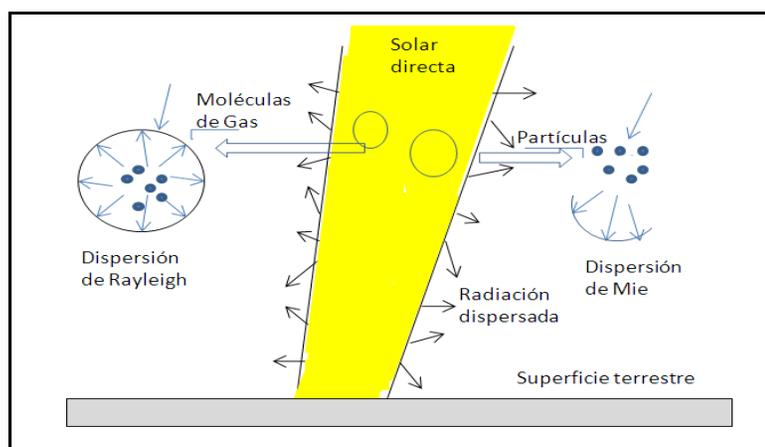


Figura 1: Dispersión de la radiación solar en la atmósfera terrestre. [4]

La dispersión de Rayleigh es producida por las moléculas del gas proporcionando una dispersión casi uniforme de la radiación en todas direcciones mientras que la dispersión de Mie es producida por las partículas de polvo y de aerosol de la atmósfera, y se concentra en direcciones cercanas a la de los rayos incidentes.

La parte de la radiación que penetra la atmósfera sin ser dispersada (o absorbida) está en la dirección del ángulo cenital y se denomina radiación directa. La radiación dispersada incide de todas direcciones, la cual se denomina difusa. La suma de ambas corresponde a la radiación solar total. Lo anterior se aprecia en la Figura 2.

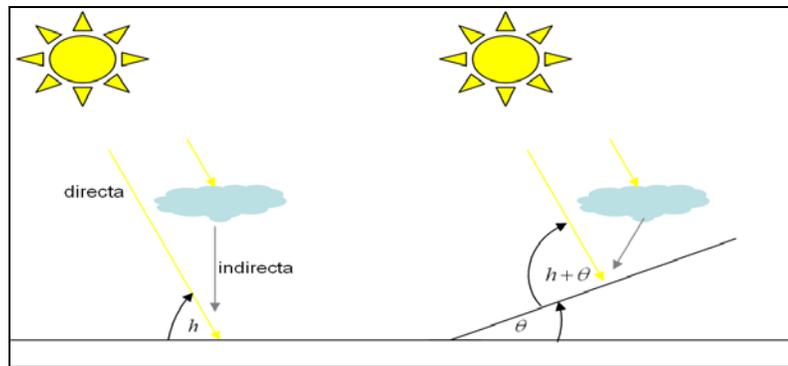


Figura 2: Radiación directa y difusa con respecto a un plano inclinado óptimo. [4]

Las formas de longitud de onda larga de la radiación ambiental incluyen la emisión de la superficie terrestre, la que se puede calcular de manera convencional. Es decir,

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde  $\varepsilon$  es la emisividad , T la temperatura en K

y  $\sigma$  : constante de Stefan-Boltzman (  $4.9 * 10^{-9}$  MJ/ m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>dia )

La emisión atmosférica es en gran parte generada por las moléculas de CO<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>O, y en particular, la radiación de la Tierra debida a la emisión atmosférica se puede expresar en la forma:

$$G_{atm} = \sigma (T_{tierra}^4 - T_{cielo}^4) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

donde T<sub>tierra</sub> : temperatura de la superficie terrestre y T<sub>cielo</sub> : temperatura efectiva del cielo.

Finalmente, se debe recordar que los valores de las propiedades espectrales de una superficie dependen de la longitudes de onda cortas pueden ser diferentes de valores a longitudes de onda grandes.

### 2.1.1. 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.

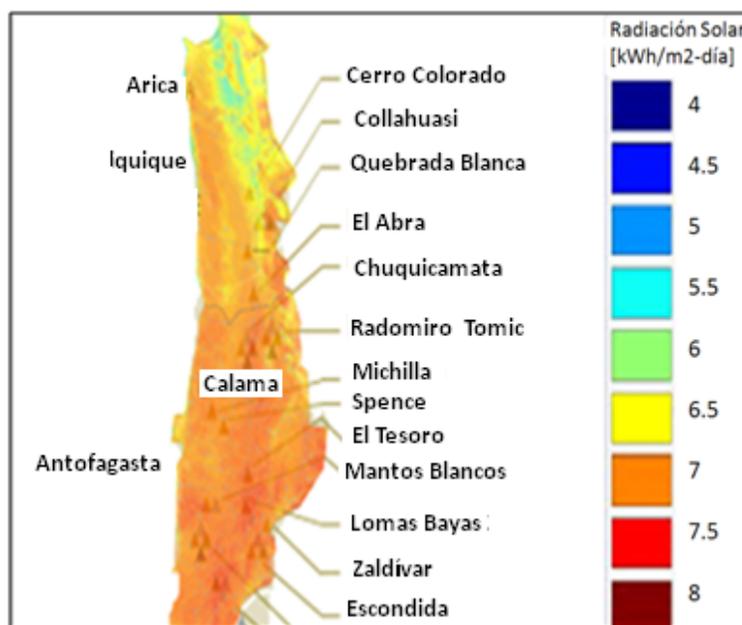


Figura 3: Mapa de radiación solar. Fuente: DGF Universidad de Chile.

Para ilustrar el hecho de la transparencia solar del Norte de Chile, se muestra en la figura 3, 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 atmósfera, 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:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

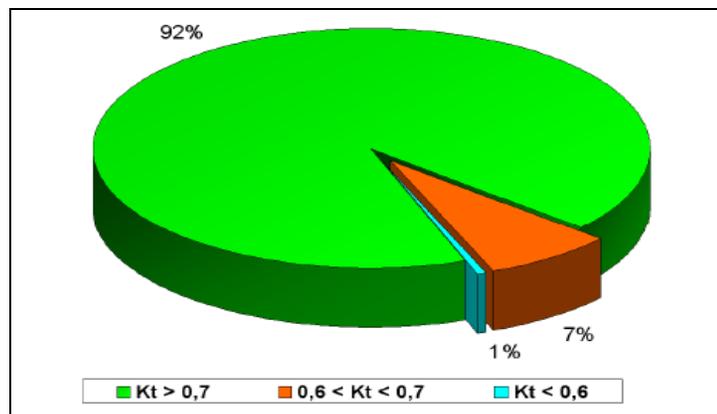
A continuación se muestra en la figura 4 el nivel de radiación de la ciudad de Calama a modo de ver el potencial solar que posee el Norte Grande de Chile.

Se clasificaron los días del año en 3 grupos:

**Tabla 2.1. Clasificación de días por transparencia**

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

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 4: Datos de transparencia atmosférica diaria  $K_T$  de la ciudad de Calama [26].**

### ***2.1.2. Descripción Tecnología Solar.***

A continuación se presentan las principales tecnologías desarrolladas en centrales de conversión de energía solar a electricidad, basada principalmente en dos tipos de conversión: directa y térmica.

Conversión directa: se convierte la energía de los fotones directamente en electricidad. Todos estos sistemas corresponden a sistemas fotovoltaicos (FV). Estas llegan a eficiencias en el rango 13 a 30% dependiendo de la tecnología utilizada. El nivel de desarrollo de ésta es avanzado y con un alto potencial.

Conversión térmica: la radiación solar se convierte en calor, el que podemos usar en una gran cantidad de aplicaciones, que van desde calentar fluidos hasta la generación eléctrica. Para conversión térmica se pueden distinguir: a baja temperatura (desde la temperatura ambiente hasta unos 60 °C sobre ésta), a temperaturas medias (desde 60°C sobre la temperatura ambiente hasta unos 150 °C sobre esta), a temperaturas altas (hasta unos 300 a 400 °C), a temperaturas muy altas (superiores a los 1000 °C).

Al referirnos a conversión térmica, podemos mencionar las siguientes tecnologías de conversión:

- **Colectores solares planos:** esta es la tecnología más conocida. Se mejora al utilizar superficies selectivas. Apropriados para trabajar en el rango de 40 a 50°C sobre la temperatura ambiente. Aunque son capaces de captar hasta el 80% de la energía solar incidente, están sujetos a riesgos de congelamiento y ebullición.
- **Colectores cilindro-parabólicos:** concentran el sol aprovechando su forma parabólica además de seguir el sol en un eje (cilindro). Permiten trabajar hasta 300°C sobre temperatura ambiente. Tienen un costo alto, no obstante, son de alta eficiencia; el nivel de desarrollo de esta tecnología es alto llegando al límite de su potencial.
- **Sistema de Torre Central:** estos sistemas se utilizan en la generación indirecta de electricidad, generando vapor que acciona una turbina. Alcanzan fácilmente temperaturas sobre 1000°C. Pueden obtener eficiencias entre 30% y 35%. Hoy en día este campo está en pleno desarrollo.

- **Colectores del tipo paraboloide:** es una tecnología menos conocida y no desarrollada a nivel industrial. Se ocupan grandes discos parabólicos con el fin de concentrar la luz solar en un foco pequeño. Permiten trabajar entre 400 a 800°C sobre temperatura ambiente. Se puede seguir el desarrollo en los sistemas de conversión a electricidad mediante concentración, para lo cual se utilizan motores Stirling o celdas fotovoltaicas para altas concentraciones de radiación con una eficiencia aproximada del 40%.

### 2.1.3. Tecnologías disponibles de energía solar

#### i. Panel Fotovoltaico

Un panel fotovoltaico funciona utilizando en forma directa la luz solar, la que al incidir en la celda libera los electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico formando una corriente eléctrica. El efecto se produce en las capas de semiconductores, que es donde se crea la corriente de electrones. Estos semiconductores son especialmente tratados para formar dos capas diferentes (tipo p y tipo n) y formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en la otra.

En la Figura 5 se muestra en forma gráfica el principio del funcionamiento de los paneles solares.

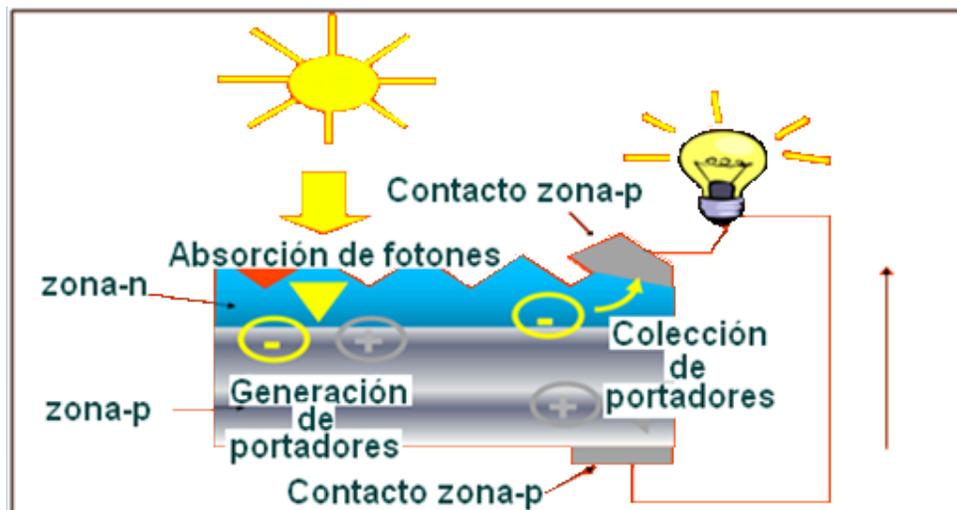


Figura 5: Diagrama principio fotovoltaico. [5]

La característica eléctrica de una celda FV está dada por su curva característica I-V, que muestra la corriente I (en Ampere, [A]) que fluye a través de la celda, en función de la tensión V (en Volt, [V]), que existe entre los bordes de la celda. La curva depende de la intensidad de la radiación incidente [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] y de la temperatura de la celda. [5]

En la Figura 6 se muestra una curva I-V característica.

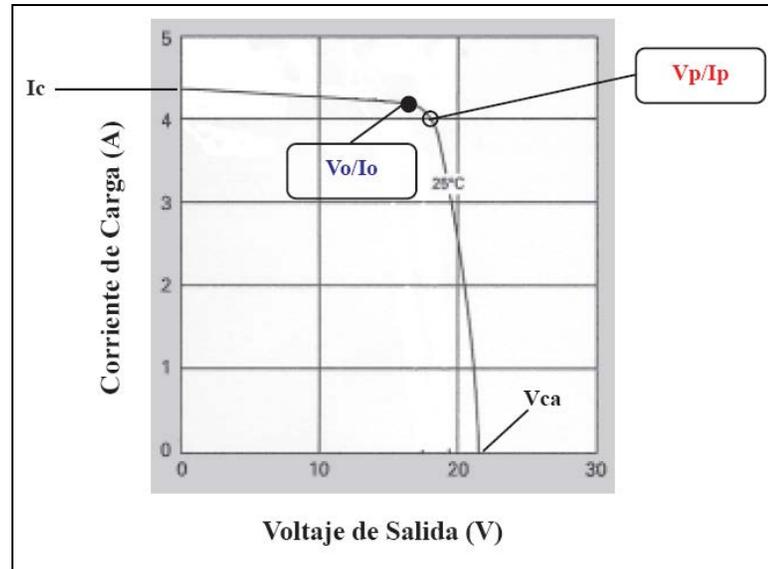


Figura 6: Curva I-V característica de un panel FV comercial. [5]

Esta curva tiene 2 puntos característicos:  $I_c$ , que es la corriente en cortocircuito ( $v=0$ ) y  $V_{ca}$ , que es el voltaje en circuito abierto ( $I=0$ ). En celdas de buena calidad, se tiene que los valores de I y V en el punto de máxima potencia,  $I_m$  y  $V_m$ , son cercanos a los valores de  $I_c$  y  $V_{ca}$ . De esta forma, se define el factor de relleno (capacidad de operar en puntos cercanos a  $I_c$  y  $V_{ca}$ ), la idea es que este valor del cociente  $I_m \cdot V_m / I_c \cdot V_{ca}$  tienda a 1. En celdas comerciales este factor es de 0,7 - 0,8.

La potencia pico se define como la potencia máxima que entrega una celda en condiciones nominales. Las condiciones nominales son radiación incidente de  $1000 [\text{W}/\text{m}^2]$  y  $25 [^\circ\text{C}]$  de temperatura.

La temperatura tiene una gran influencia en el comportamiento de la celda. Al aumentar la temperatura aumenta ligeramente la corriente, pero disminuye en mayor parte la tensión, en promedio la potencia disminuye en un 0,3 - 0,5 % por cada  $^\circ\text{C}$ , esto se puede apreciar en la figura 7.

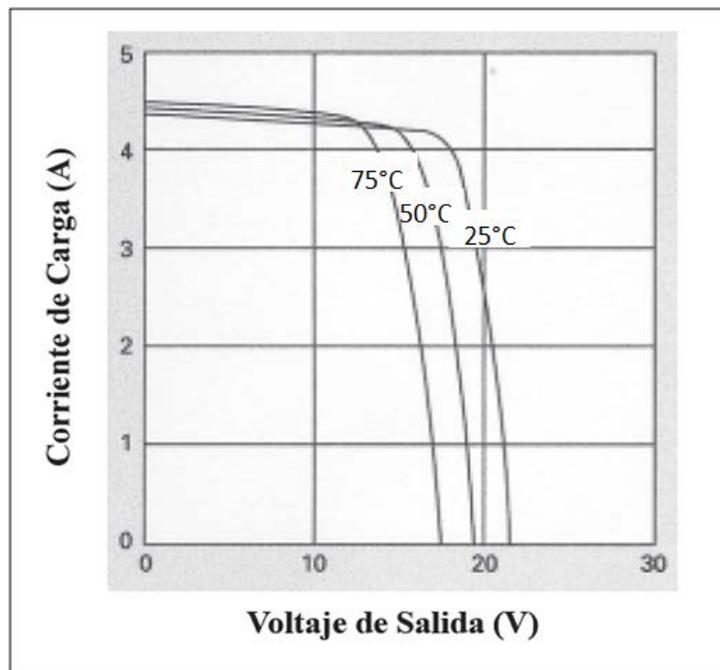


Figura 7: Influencia de temperatura en comportamiento de la celda. [5]

### *Tipos de paneles fotovoltaicos:*

Hoy en día existen varios tipos de paneles fotovoltaicos, y es posible clasificarlos ya sea por el material de construcción o por su proceso de fabricación. [29]

- Celdas monocristalinas de silicio: Están fabricadas de un cristal. Estas celdas son relativamente caras, pero alcanzan eficiencias del orden del 25 %.
- Celdas policristalinas de silicio: Están formadas por varios granos cristalinos unidos de forma aleatoria entre ellos. El proceso para producirla es más simple y se alcanzan eficiencias del orden del 20 %.
- Celdas apiladas: Se pueden apilar varias celdas unas sobre otras, ya sean iguales o diferentes. En el caso de ocupar distintos materiales, se puede captar un mayor rango de frecuencia de la luz emitida por el sol. En el caso de utilizar celdas idénticas, la ventaja es que se puede trabajar con materiales más baratos. La producción industrial a escala no se ha realizado debido a las dificultades para controlar el transporte de electrones desde las capas de silicio de mala calidad a los electrodos.
- Celdas amorfas: Los materiales semiconductores amorfos presentan propiedades de interés para las aplicaciones en energía solar. Una celda monocristalina de silicio abarca

un ancho de banda de 1,1 [eV] del espectro solar, en cambio al tener materiales compuestos, el ancho de banda puede aumentar considerablemente. Por ejemplo, una aleación de Silicio-Flúor-Hidrógeno aumenta el ancho de banda a 1,6 [eV].

- **Otros materiales:** Elementos de los grupos III y V de la tabla periódica, tales como GaAs, CdS y CdTe se han ocupado en la fabricación de celdas, en vez de ocupar Silicio. Esto se realiza con el fin de mejorar propiedades para aplicaciones específicas, como aplicaciones espaciales o en sistemas con concentración solar, donde la celda queda expuesta a altas temperaturas.

El ancho de banda de GaAs es de 1,43 [eV] y añadiendo una capa apilada de GaInP<sub>2</sub>, se ha alcanzado eficiencias sobre el 30 %. En estos momentos las celdas son caras y tienen principalmente aplicaciones espaciales; sin embargo, análogamente al caso de capas finas de Silicio, se han desarrollado celdas de CIS (cobre-indio-diselenoide) a precios menores alcanzando rendimientos del 17 %.

### ***Componentes de una Instalación de Paneles Fotovoltaicos***

Los componentes de una instalación solar con paneles fotovoltaicos varían según su esquema, el cual puede ir desde un par de kW en una instalación residencial hasta decenas de MW en una generación a gran escala. Es posible hacer instalaciones de gran escala aplicables a grandes industrias.

Una instalación de gran escala para aplicaciones industriales requiere de una mayor superficie expuesta a la radiación solar, pudiendo ser de unas pocas a cientos de hectáreas, dependiendo de la magnitud del proyecto. Estas instalaciones se han masificado en el último tiempo y operan como una central de generación, inyectando la energía en las líneas de transmisión o distribución del sistema eléctrico.

Los componentes de la instalación son los siguientes:

- **Panel:** el panel fotovoltaico se forma por la unión eléctrica de varias celdas. Puede estar compuesto de uno o más grupos de celdas conectados en serie o en paralelo, según el voltaje o la intensidad de corriente que se quiere alcanzar. La característica principal del panel fotovoltaico es su curva I-V. Si el panel fotovoltaico se constituye de celdas de

igual curva I-V, todas en buen estado (sin errores de conexión), la curva I-V del panel será proporcionalmente idéntica a la de la celda.

- Control y acondicionador de potencia: la finalidad de este componente es producir un correcto acople entre el panel, la acumulación y la carga (aplicaciones). En general cumple varias funciones:
  - Protege las baterías de los riesgos de sobrecarga y descarga profunda regulando la entrada de corriente proveniente del panel a la batería, y la salida de corriente de la batería a las cargas, evitando que la batería se sobrecargue o que trabaje con voltajes por debajo de lo permitido. Esto lo realiza el controlador de carga y también sirve para impedir el flujo de corriente desde la batería hacia los paneles en períodos sin sol.
  - Si las aplicaciones lo requieren, convierte corriente continua en corriente alterna por medio de un inversor AC/DC. En caso contrario, entrega corriente continua regulada a las aplicaciones, a través de un regulador de voltaje.
  - En sistemas más sofisticados, pone en línea una fuente de respaldo (un generador diesel, por ejemplo), o alimenta selectivamente la carga para maximizar el aprovechamiento de energía.
- Baterías de acumulación: la batería es un dispositivo que tiene como función almacenar la electricidad generada por el panel FV y suministrarla a los equipos de uso cuando ésta sea demandada. Normalmente ocurre que el ciclo de demanda de energía no coincide con la disponibilidad de energía generada por el panel FV, por lo tanto se recurre a la acumulación de energía.

Una ventaja de las baterías es que impone una fuente de voltaje constante entre el panel y la carga, por lo que el panel opera con mayor eficiencia ya que se encuentra trabajando más cerca de los puntos de potencia máxima.

- Arreglo de paneles: los paneles fotovoltaicos se disponen en grupos, cuya configuración depende principalmente del sistema de seguimiento. La configuración del arreglo de paneles fotovoltaicos incide en el tipo de estructura de soporte que se utiliza para la instalación de los paneles fotovoltaicos.
- Sistema de seguimiento en azimut: la instalación no necesariamente debe contar con un sistema de seguimiento (en cuyo caso sería una instalación solar fotovoltaica fija). Para

optimizar la producción de energía durante el año, la estructura de soporte de la instalación suele tener la inclinación equivalente a la latitud de la zona. Esto se aprecia en la Figura 8.



**Figura 8: Instalación solar fija, inclinada en la latitud correspondiente (Almería).**

En el caso que cuenta con un sistema de seguimiento éste puede ser en 1 o 2 ejes.

- Seguimiento en 1 eje horizontal: sistema que orienta una cantidad de filas determinadas de módulos con un solo motor con la finalidad de realizar el seguimiento del sol diario (movimiento este-oeste), su disposición es de forma lineal uno al lado del otro.
- Seguimiento en 1 eje inclinado: igual que el sistema anterior, pero con los módulos inclinados según la latitud del emplazamiento. El seguimiento también se realiza de este a oeste de manera acimutal.
- Seguimiento en 2 ejes: sistema que orienta una cantidad de módulos determinados para seguir constantemente al sol (azimutal y altitudinal, correspondientes al movimiento diario y anual), su disposición puede ser rectilíneo ó matricial y/o tresbolillo o matriz desplazada. La Figura 8 presenta una instalación con seguimiento en 2 ejes.
- Inversor: el inversor cumple la función de transformar la corriente continua producida por los paneles fotovoltaicos a corriente alterna. Este es el primer cambio en el voltaje de la corriente generada, luego se produce un cambio en el transformador, lo cual se detalla a continuación.
- Instalación de enlace: son los componentes que permiten conectarse a la red de distribución o transmisión, con todos los aspectos de seguridad requeridos para cualquier

central de generación y con el contador de energía, de tal forma de llevar el registro de la energía generada por la planta para obtener la respectiva retribución monetaria.

- Transformador: los transformadores permiten cambiar el voltaje de la corriente para poder ser inyectada a la red de distribución o transmisión. El cambio de tensión puede ser a media o alta tensión, según la naturaleza del proyecto.

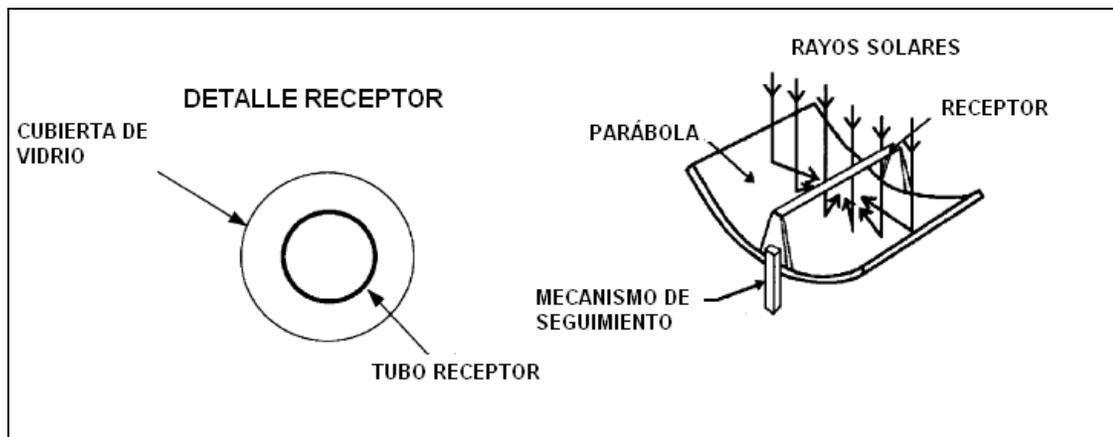
### ***Rango de aplicación en minería***

Para el caso específico de una instalación en una faena minera, se visualiza una mejor inserción de la tecnología en una aplicación de gran escala, considerando los altos consumos eléctricos de la faena y la permanente demanda de éstos.

#### ***ii. Colector Cilindro Parabólico***

#### ***Principio de funcionamiento***

La tecnología de generación termoeléctrica con concentrador cilindro-parabólico es la más desarrollada hasta el momento. Cada colector tiene un reflector de forma parabólica que refleja la radiación directa en el foco de la parábola, donde se encuentra un receptor lineal. Un esquema del concentrador cilindro parabólico (CCP) y del receptor se aprecia en la Figura 9.



**Figura 9: Esquema típico de configuración CCP y receptor. [13]**

Grandes campos de colectores cilindro - parabólicos proveen la energía térmica usada para producir vapor, la cual es utilizada en un ciclo Rankine. La temperatura de salida del fluido puede llegar hasta los 450 °C, pero con los fluidos de trabajo actuales que se utilizan hoy se trabaja sólo hasta temperaturas de 400 °C debido a la degradación que sufren a mayor temperatura.

El campo colector está compuesto de varias columnas de colectores solares conectados en paralelo alineados en un eje horizontal norte-sur (o este-oeste) y con un sistema de seguimiento solar de igual dirección utilizado para proteger a los colectores, por ejemplo, frente a malas condiciones climáticas como viento, polvo y frente a fallas de algún componente, como fuga del fluido térmico.

Los colectores siguen el sol durante el día, de tal manera de asegurar la concentración de la energía solar en el foco de la parábola. Por el interior del receptor circula el fluido térmico, el cual traspasa la energía por medio de intercambiadores de calor al circuito de generación eléctrica, donde la energía es aprovechada para la producción de vapor sobrecalentado a alta presión, expandiéndolo en una turbina de vapor para producir electricidad.

Las plantas han sido diseñadas en un principio para utilizar la energía solar como energía primaria en la producción de electricidad. Las plantas pueden operar a plena carga usando sólo energía solar, durante el verano una planta opera típicamente entre 10 y 12 horas al día generando a plena carga. Sin embargo, la mayoría de las plantas solares han sido híbridas, es decir, ocupan combustibles fósiles como suplemento en los períodos de baja radiación solar o durante la noche. También existe la opción de acumular energía en un acumulador térmico, con lo que se puede generar electricidad en las noches y en períodos de baja radiación incidente. Además existen sistemas de almacenamiento de energía que funcionan principalmente en base a sales fundidas (nitratos), llegando a proporcionar autonomía a la tecnología de generación eléctrica hasta por 12 horas, pudiendo de esta manera funcionar durante la noche.

Actualmente el sistema de almacenamiento más usado por el sistema Cilindro parabólico utiliza 2 estanques con sales fundidas (mezcla eutéctica de nitratos de sodio y potasio). Las sales son calentadas desde 290°C hasta 385°C al pasar desde un estanque frío a otro de mayor temperatura en un intercambiador de calor aceite-sales, donde la energía térmica es absorbida desde el aceite caliente en el campo solar. Cuando es necesario recuperar la energía térmica almacenada las sale

pasan desde el estanque caliente al frío a través del mismo sistema y transfiere el calor almacenado al aceite cuya temperatura aumenta a  $377^{\circ}\text{C}$ .

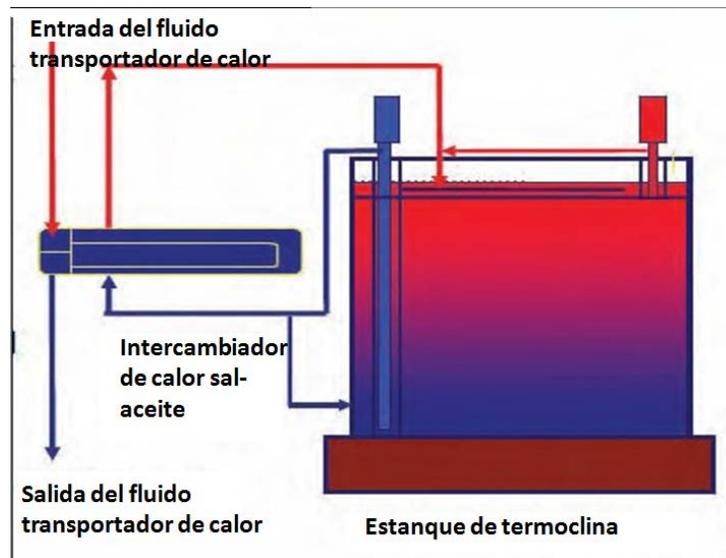


Figura 10: Sistema termoclina de almacenamiento de energía. [24]

Las plantas de colector cilindro parabólico también pueden suministrar calor de procesos. El principio de funcionamiento es el mismo y los componentes principales del sistema solar no varían, pero en este caso no se ocupa el bloque de potencia para la producción de energía eléctrica. [7]

### Componentes

Los distintos componentes de una instalación solar cilindro parabólico se describen a continuación. [8]

Colector: también llamado reflector, cumple la función de concentrar la radiación solar directa en el tubo receptor, el colector es cilíndrico con espejos curvados de forma parabólica. Entre los materiales empleados para la elaboración de superficies tienen:

- Espejos de aluminio anodizado
- Vidrio grueso
- Vidrio delgado
- Espejos de polímeros plateados

Tubo receptor: consiste de 2 tubos concéntricos, un tubo interior por el cual fluye y se calienta el fluido, y un tubo exterior que cumple la función de evitar las pérdidas por convección del tubo metálico y de proteger la superficie selectiva del tubo metálico de las condiciones agresivas del medio.

El tubo exterior debe tener una transmisividad alta ( $> 95 \%$ ), los tubos modernos cuentan con un tratamiento anti-reflejo por ambos lados, de tal forma de incrementar la transmisividad de la energía solar.

El tubo interior tiene una superficie selectiva con alta absorción ( $> 90 \%$ ) y baja emisión ( $< 20 \%$ ) en el espectro infrarrojo, lo cual incide en una alta eficiencia térmica. Cuando se tienen temperaturas de trabajo sobre los  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  se utilizan superficies selectivas producidas por sputtering o por PVD (Physical Vapour Deposition), estas superficies selectivas son inestables al contacto con aire cuando alcanzan altas temperaturas por lo que para prolongar su vida útil se produce vacío entre ambos tubos. Al trabajar con temperaturas bajo los  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  se utilizan capas selectivas de cobalto, cromo o níquel negro, los cuales son estables en aire hasta temperaturas de  $325 \text{ }^\circ\text{C}$  aproximadamente, por lo que no es necesario el vacío entre ambos tubos lo cual incide directamente en los costos de los equipos. Los tubos existentes tienen un largo estándar de 4 m.

Fluido de trabajo: es el encargado del intercambio térmico entre el sistema solar y el circuito secundario. La elección depende de la temperatura de diseño del sistema a utilizar. Para temperaturas bajo los  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  se utiliza etilenglicol o agua destilada, para temperaturas sobre los  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  se utilizan aceites sintéticos. En la elección del fluido de trabajo se debe considerar la temperatura de congelamiento, ya que al congelarse puede romper el tubo receptor.

Sistema de seguimiento: dado que el colector cilindro-parabólico utiliza la radiación directa, se requiere un sistema de seguimiento. En general se utilizan sistemas orientados N-S, de tal forma de tener un seguimiento diario E-O. El sistema puede ser eléctrico o hidráulico, pero dada la precisión que se requiere, los sistemas más utilizados han sido los hidráulicos. Para reducir costos, un mecanismo mueve una serie de colectores (entre 144 y 96 [m] de colector), mientras que el posicionamiento se logra mediante sensores que detectan la posición del sol y realizan el ajuste necesario. Hoy en día se trabaja en sistemas virtuales que funcionan basados en algoritmos matemáticos que predicen la posición del sol y realizan el ajuste considerando la comparación entre los sensores y la posición esperada del sol según dicho algoritmo.

Estructura metálica: le da rigidez al colector y transmite las cargas recibidas a las fundaciones. Hay diferentes conceptos utilizando enrejados, platos conformados, tubos o cajas de torque. La estructura debe estar diseñada no sólo para cargas de viento horizontales sino que también para cargas de vientos que producen esfuerzos de torsión en la estructura.

Un elemento muy importante de la estructura son los brazos metálicos que soportan el colector, ya que le deben dar rigidez y mantener la posición teórica de diseño en todo momento que les permite concentrar correctamente la radiación solar incidente.

Bloque de potencia: es el encargado de transformar la energía térmica del campo de colectores en energía eléctrica. Los principales componentes del bloque de potencia son la turbina, el sistema de condensación y en algunos casos se ocupa un sistema de respaldo con combustible fósil, para mantener un régimen de funcionamiento de la planta constante.

### **Rango de aplicación**

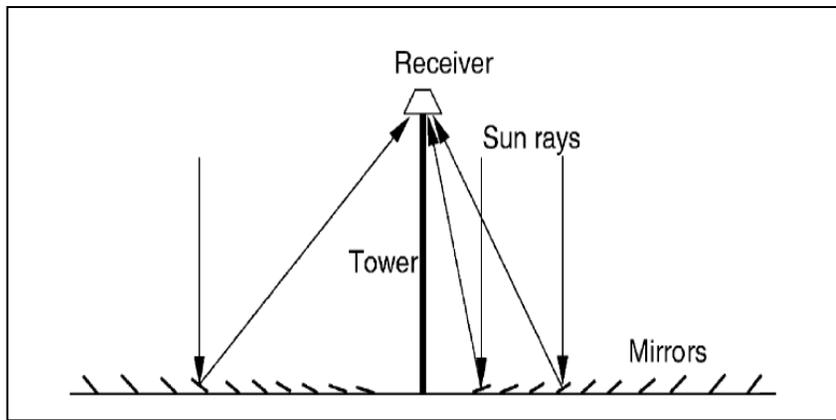
Las plantas con tecnología de cilindro parabólico pueden ser desde un par de MW hasta unos 300 MW. Hoy en día hay un gran desarrollo de plantas de 50 [MW] en España, pero esto está directamente relacionado con una política de beneficios en el caso español. En Estados Unidos la planta de mayor tamaño es de 80 [MW].

La economía de escala es un factor que se debe considerar, sobre todo en las aplicaciones eléctricas, ya que influye fuertemente el tamaño de la turbina y su eventual periodo de recuperación de la inversión. En aplicaciones térmicas existen aplicaciones de cientos de m<sup>2</sup> de colectores.

### ***iii. Colector Fresnel Lineal***

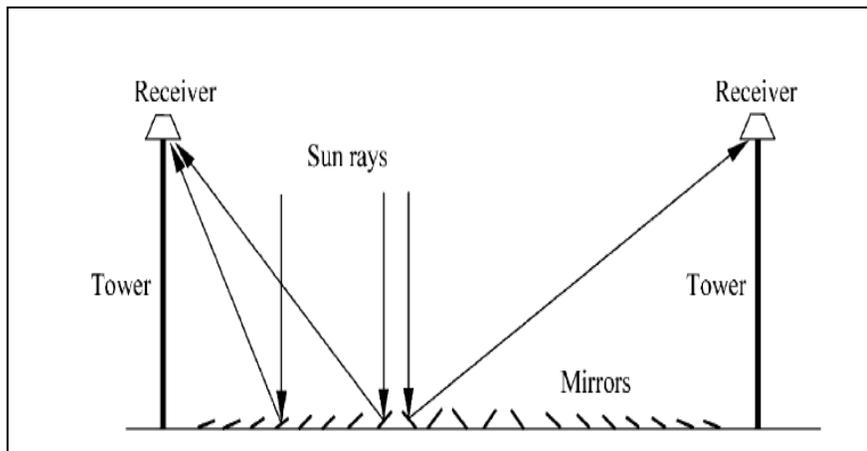
#### **Principio de funcionamiento**

El colector Fresnel Lineal concentra la energía solar utilizando una serie de espejos planos apuntando a un receptor que se encuentra fijo sobre los espejos. Los espejos se encuentran en la parte inferior del sistema y siguen el sol de tal forma de hacer incidir la radiación directa en el tubo absorbedor, por el cual circula un fluido térmico. Un esquema de la configuración se puede ver en la Figura 11.



**Figura 11: Esquema de concentrador lineal Fresnel. [35]**

En un principio el concepto permite que los espejos sólo tengan un tubo absorbedor objetivo, pero en instalaciones de gran escala, se puede asumir que existirán varios tubos absorbedores, por lo que cada espejo puede apuntar a cualquiera de los tubos adyacentes, lo cual disminuye las pérdidas por bloqueo, permite tener sistemas mucho más compactos y las torres de los absorbedores pueden tener menores alturas. Este es el concepto de Reflector Lineal Fresnel Compacto (CLFR por su acrónimo en inglés). El principio de esta configuración se aprecia en la Figura 12.



**Figura 12: Esquema de un concentrador lineal Fresnel compacto. [35]**

### ***Componentes***

Los componentes de un sistema Fresnel son los siguientes:

Reflector Fresnel Lineal: el elemento clave del sistema es el reflector, hecho de cintas delgadas de vidrio reflectante de 1-2 [mm] de espesor, fabricadas por un gran número de fabricantes en el

mundo. En el último tiempo está disponible con vidrio bajo en hierro para mayor eficiencia. La producción del reflectante se realiza en grandes volúmenes a través de procesos automatizados de manufactura y son más livianos que los reflectores de las tecnologías análogas (colector cilindro parabólico).

Absorbedor: el receptor cumple la función de transformar la energía solar en energía térmica a través de un fluido transportador. En el colector Fresnel se ocupan configuraciones de reflector vertical y horizontal.

Fluido de trabajo: usualmente se ha utilizado agua la cual cambia de estado a vapor presurizado.

Estructura: la estructura es ligera, debido a que las cargas de viento son menores y a que los reflectores son más livianos. Como los reflectores se protegen entre ellos del viento y se encuentran muy cerca del suelo, los esfuerzos que debe soportar la estructura por el viento son bajos, esto incide directamente en los costos de fabricación.

Sistema de seguimiento: dada la naturaleza del equipo, se tiene que el sistema de seguimiento solar solamente actúa sobre los reflectores y no sobre el absorbedor, como el caso del colector cilindro-parabólico. En este caso se tienen varias filas de espejos que deben apuntar al absorbedor. Los sistemas más precisos cuentan con un movimiento independiente de cada espejo, lo cual encarece los costos de instalación, otro sistema consiste en que un solo motor mueve todos los espejos, lo cual implica un ajuste muy preciso pero reduce los costos de implementación.

Bloque de potencia: el bloque de potencia es similar al del colector cilindro parabólico.

### ***Rango de aplicación***

El rango de aplicación de los sistemas Fresnel ha sido relativamente bajo, con proyectos que no han superado los 5 MW, sin embargo esto no ha sido por una limitante técnica, sino más bien por el riesgo que significa invertir en tecnologías poco maduras. En teoría se puede tener perfectamente una planta de generación de 50 MW y hasta de 200 MW, pero todavía no han sido implementadas a un nivel comercial.

En cuanto a las aplicaciones térmicas, no hay mayores registros de aplicaciones a gran escala, pero al igual que en el caso del colector cilindro parabólico, se pueden tener aplicaciones desde cientos de m<sup>2</sup> de colectores.

#### *iv. Sistemas de Torre Central*

##### **Principio de funcionamiento**

Los sistemas de torre central consisten en una serie de espejos móviles dirigidos a un punto focal ubicado en la torre central. Los espejos son llamados helióstatos y tienen un sistema de seguimiento solar independiente. Los helióstatos tienen una leve curvatura y el arreglo puede ser circular o semicircular. En el punto focal de la torre se encuentra el receptor, el que en su interior tiene una estructura absorbidora de tal forma de aprovechar la radiación incidente y transformar la energía del sol en energía térmica.

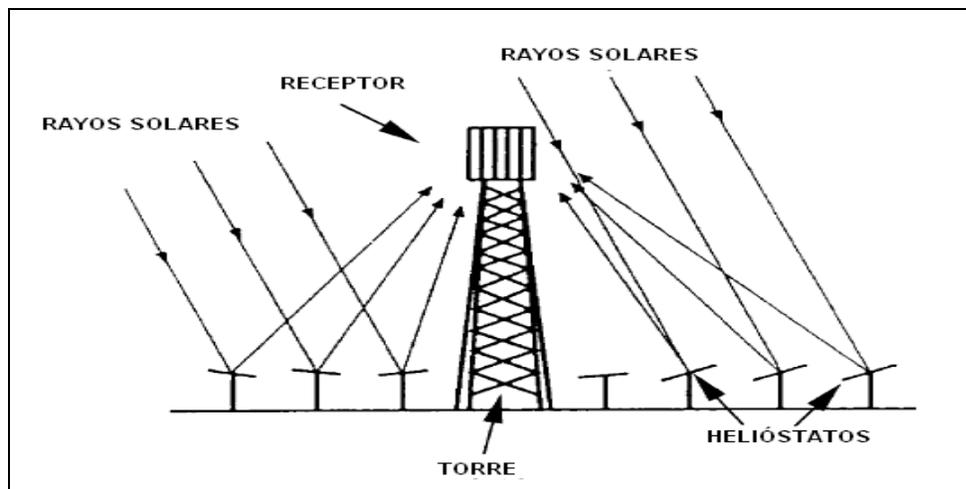


Figura 13: Esquema de funcionamiento torre central. [35]

Las ventajas de este sistema son:

- Concentran la energía solar en un receptor unitario, minimizando las necesidades de transporte térmico de la energía.
- Pueden lograr razones de concentración de 300-1500, por lo que son muy eficientes en la concentración energética y en la generación eléctrica.

- Pueden almacenar convenientemente energía térmica.

Los helióstatos fácilmente pueden tener áreas de superficie reflectora entre 50 y 150 [m<sup>2</sup>]. Cada helióstato concentra la energía en el receptor, el que absorbe la energía y la traspassa a un fluido térmico. El transporte de calor se realiza mediante bombas y tuberías y se realiza la circulación del fluido en un ciclo cerrado entre el receptor, el almacenamiento y la central de generación.

El promedio energético en el receptor tiene valores entre 200 y 1000 [kW/m<sup>2</sup>], por lo que se pueden alcanzar temperaturas sobre los 1500 °C. Actualmente no se trabaja a tan alta temperatura por los límites térmicos de los materiales actualmente utilizados, las plantas existentes trabajan hasta 600 °C. Los sistemas de receptor central pueden ser fácilmente integrados en una planta en base a combustibles fósiles para operar híbridamente, además tienen el potencial de operar más de la mitad de horas del año a la potencia nominal ocupando almacenamiento térmico. [11]

En general las centrales de torre utilizan un ciclo Rankine para la producción de electricidad, pero dadas las altas temperaturas que es posible alcanzar en el receptor se encuentra en I+D la utilización de ciclo Brayton.

### ***Componentes***

Helióstatos: los helióstatos reflejan la radiación solar en un punto fijo de la torre. Cada helióstato tiene un sistema de seguimiento para seguir el movimiento aparente del sol, todos se componen de:

- Superficie reflectante y estructura: usualmente se utiliza una capa delgada de espejo de vidrio bajo en hierro, con características similares a las utilizadas en los cilindro-parabólico. El área total del helióstato se compone de varios paneles de vidrio, los cuales se apoyan en un soporte para tener una superficie reflectante levemente cóncava. El largo focal del arreglo es aproximadamente equivalente a la distancia del helióstato más lejano a la torre. Las primeras plantas ocupan helióstatos de 40-50 m<sup>2</sup> de área, las más actuales bordean los 150 m<sup>2</sup> de área.
- Mecanismo de movimiento y sistema de control: la superficie reflectante se ubica en un pedestal que tiene movimiento en altura y en azimut. El movimiento en cada eje es posible a través de un motor de potencia regulable y una caja de cambio. El motor recibe

señales del sistema de control que posiciona con gran precisión la normal de la superficie reflectora entre el sol y el receptor.

Torre: la torre sirve de soporte para el receptor, el cual debe ubicarse en altura para disminuir las pérdidas por bloqueo y sombras entre helióstatos. Otros componentes como el foco o los sistemas de medición también se ubican en la torre. El límite de la altura de la torre está dada por el costo, sin embargo el diseño está limitado por el peso del receptor y factores climáticos como el viento y consideraciones sísmicas. Las pérdidas relacionadas con la altura son despreciables. Los materiales más comunes para la construcción son el acero y el concreto, análisis de costos han demostrado que las torres de acero son más económicas que las de concreto para alturas menores a 120 [m], para alturas mayores las torres de concreto son más económicas.

Fluido de trabajo: Se han estudiado 5 fluidos de trabajo para esta tecnología. [12]

- HTF (Heat Transfer Fluids): son fluidos sintéticos capaces de transportar calor y tienen el más bajo punto de operación (425 °C) [13]
- Agua: puede ser utilizada a temperatura máxima de 540 °C a una presión de 17,5 bar
- Vapor saturado: opera a 40 [bar] y 250 °C.
- Mezclas de sales de nitratos: tienen una temperatura máxima de operación de 565 °C pero el punto de congelamiento es entre 140 y 220 °C.
- Sodio fundido: tiene una temperatura máxima de operación de 600 °C y un punto de congelamiento de 98 °C. Este concepto se ha descartado por aspectos de seguridad, ya que el sodio reacciona con el agua.
- Sales de litio: tiene una temperatura máxima de operación de 550 °C y un punto de congelamiento de 120 °C.

Las investigaciones no han demostrado superioridad de uno sobre otro, sino que su elección se realiza según parámetros técnicos, económicos y de seguridad.

Receptor: en el receptor se transforma la energía solar en energía térmica, se ubica en la parte alta de la torre en un punto donde los rayos reflejados por los helióstatos puedan ser interceptados eficientemente. El receptor absorbe la energía reflejada y la traspassa al fluido de trabajo. Según el mecanismo de transferencia de calor, el receptor se clasifica en absorción directa o indirecta.

Bloque de potencia: actualmente se utiliza el Ciclo Rankine para la producción de energía, en este caso el bloque de potencia corresponde a la turbina de vapor y al sistema de refrigeración y condensación del vapor. En el caso de ocupar el ciclo Brayton, el bloque de potencia corresponde a la turbina de gas.

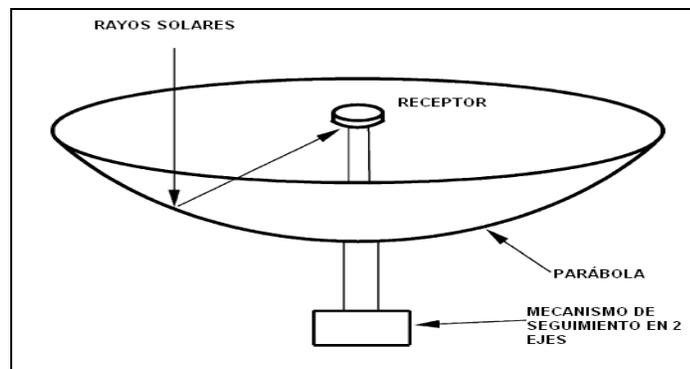
### ***Rango de aplicación***

Los proyectos pilotos con tecnología de torre central van desde 1 MW, hasta los 20 MW de la planta PS20, en Sanlúcar, España. En teoría también se habla de potencias mayores, hasta 80 MW pero no hay plantas en operación o construcción de dicha potencia. No hay registros de aplicaciones térmicas con tecnología de torre central.

## ***v. Sistemas de Disco Parabólico***

### ***Principio de funcionamiento***

Un sistema de discos parabólicos se compone de un concentrador solar parabólico cóncavo, una cavidad receptora y un sistema de transporte de energía térmica o un motor Stirling con un generador o alternador. En el receptor se pueden alcanzar temperaturas sobre los 1500 °C. [14]



**Figura 14: Esquema de un disco parabólico. [35]**

Las ventajas de este sistema son:

- Siempre está apuntado al sol, logrando altas temperaturas, por lo que es el sistema más eficiente.

- Logran razones de concentración en el rango de 600-2000.
- Se forman de colectores modulares y receptores unitarios, por lo que pueden funcionar de manera independiente o como parte de un gran sistema de discos parabólicos.

El sistema funciona de la siguiente manera:

Un sistema de seguimiento solar mueve el concentrador solar en 2 direcciones, de tal manera de mantener el foco del concentrador en la cavidad receptora. La cavidad receptora absorbe la energía solar concentrada y calienta un fluido térmico, el que puede ser transportado mediante tuberías a una típica unidad central de generación con ciclo Rankine o se utiliza en un motor Stirling.

El motor Stirling es un sistema sellado, en su interior se encuentra el gas (típicamente Hidrógeno o Helio), el cual es calentado y enfriado alternadamente. El motor funciona comprimiendo el gas cuando se encuentra frío y expandiendo el gas cuando se encuentra caliente. Esta acción produce altas y bajas presiones en el pistón del motor, luego este movimiento alternado es convertido en potencia mecánica. Hay motores Stirling que se encuentran separados del generador o alternador, mientras que otros lo incorporan directamente en el motor.

### ***Componentes***

**Concentrador:** generalmente los concentradores son platos parabólicos de foco puntual con una superficie reflectante, como vidrio metalizado. Como concentran la energía solar en 2 dimensiones, requieren un sistema de seguimiento solar sobre 2 ejes.

Con la tecnología existente en 1994, para generar 5 [kWe] se requería un concentrador de 5,5 [m] de diámetro, y para generar 25 [kWe] se requería un concentrador de 10 [m] de diámetro, esto en condiciones nominales de radiación de 1000 [W/m<sup>2</sup>].

**Receptor:** las funciones del receptor son absorber la mayor cantidad de la energía solar reflectada por el concentrador y transferir esta energía al fluido térmico.

Los receptores son cavidades con una pequeña apertura por la que pasa la energía solar concentrada. El absorbedor se encuentra ubicado bajo la apertura, de tal manera de reducir la intensidad de la energía concentrada.

**Generador:** el sistema generador puede ser un motor Stirling o una central de generación.

- Motor Stirling: en teoría, el motor Stirling es el artefacto que convierte el calor en trabajo mecánico de la manera más eficiente, sin embargo, requiere de altas temperaturas, lo cual lo hace ideal para el uso complementado con energía solar concentrada. Trabaja en el límite de los materiales ocupados en su construcción, con temperaturas de trabajo de 650 a 800 [°C] se alcanzan eficiencias de conversión de 30 a 40 %.
- Central de generación: varios discos concentran la energía solar en el receptor donde se encuentra un fluido térmico, luego mediante cañerías y bombas (o compresores según el estado termodinámico del fluido), se transporta el fluido a una central de generación donde se genera electricidad en turbinas de vapor. Dadas las altas temperaturas alcanzadas por el fluido térmico, está en estudio el uso de microturbinas que permitan generar energía mediante turbinas de gas [13].

### ***Rango de aplicación***

Los proyectos con tecnología de disco parabólico van desde 5 a 25 kW. El tamaño del disco dependerá de la potencia nominal y la energía generada en un periodo de tiempo para ciertas condiciones de radiación solar.

## **2.2. Comparación de tecnologías disponibles de energía solar**

La Figura 15 muestra un resumen de las distintas tecnologías que refleja y compara en forma gráfica cada una de las alternativas disponibles con la finalidad de generar electricidad. En esta figura es posible comparar tres aspectos relevantes como lo son la temperatura de trabajo, la eficiencia y los requerimientos de superficie para su instalación.

La superficie en el interior de una faena minera es muy escasa debido a la entrada de nuevos proyectos mineros y también al potencial uso de nuevas instalaciones para el procesamiento de los minerales.

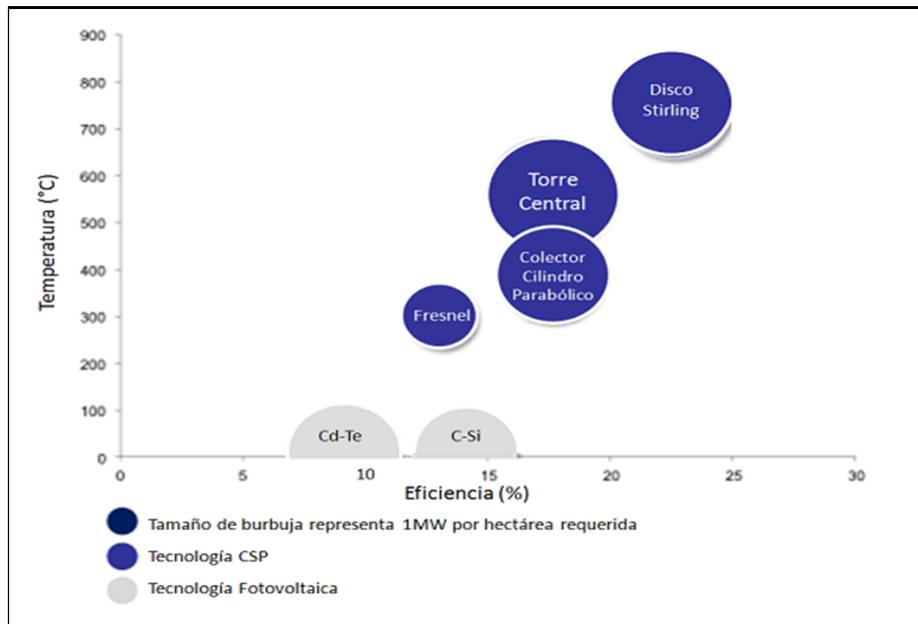


Figura 15: Comparación entre tecnologías de concentración solar y tecnología FV. [36]

### 2.3. Factibilidad de tecnologías

Se definirán los criterios de decisión relevantes que validarán la operatividad del proyecto desde el punto de vista técnico, principalmente, considerando además algunos criterios de tipo económicos. Se abordará además el marco legal y/o normativo que permite y promueve el uso de energía solar en procesos de producción de la minería del cobre.

#### 2.3.1. Criterios de Factibilidad

La factibilidad técnica de un proyecto de generación de electricidad a partir de energía solar como el que se estudiará, dependerá esencialmente de cuales sean los procesos a alimentar y las necesidades o consumos energéticos de cada uno de ellos.

Según las bases de licitación de una “Planta de Concentración Solar” formulada por CORFO en el año 2009, 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 mantenimiento.

### ***2.3.2. Factibilidad de la Tecnología***

En este caso sólo se evaluará la factibilidad de llevar a cabo un proyecto de implementación de energía solar en una minera con la finalidad de reducir el nivel de costos y hacer más competitiva a la industria.

Es necesario determinar la calidad de la tecnología y la cantidad de energía a alimentar a los procesos.

La tecnología debe ser estudiada y asegurar un óptimo nivel de generación para que la industria tenga considere la posibilidad de usar energía solar en sus procesos.

### **2.3.3. Análisis de Riesgo (evaluación ambiental fluido de trabajo)**

La tecnología a implementar debe ser segura tanto en su operación como en el aspecto ambiental.

La posibilidad de potenciales accidentes como lo podría ser el derrame del fluido de trabajo de la tecnología, debe ser considerada en un plan de prevención o control de riesgos.

En el caso particular como el mencionado en el párrafo anterior se debe señalar que la mayoría de las tecnologías de concentración solar utilizan algún fluido de trabajo, el cual debe ser especificado en cuanto a sus características técnicas con la finalidad de cumplir con la norma y reglamento sanitario sobre manejo de sustancias peligrosas (DS148).

### **2.3.4. 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.

De la Tabla 2.2 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. Por lo tanto los datos mostrados en la Tabla 2.2 muchas veces no representan a cabalidad la realidad de la superficie requerida, pues se deben dejar espacios entre cada unidad de tecnología. En general podemos decir que la implementación de tecnología de concentración solar requiere desde 1 a 9 hectáreas por cada Mega-Watt instalado de potencia nominal.

**Tabla 2.2. Requerimiento se superficie para tecnologías solares. [24]**

Tecnología	Campo Solar Unitario (m <sup>2</sup> /MWe)
Panel FV	4.000
CCP	20.000
Torre Central	83.600
Fresnel	1.800
Disco Stirling	36.000

La situación actual de la superficie en la mayoría de las faenas mineras explotadas por método a cielo abierto obliga a replantear y analizar exhaustivamente los proyectos en el mediano y largo plazo, con el fin de proyectar de mejor forma la instalación o futura reubicación de sectores productivos, puesto que reubicar instalaciones de plantas ya construidas involucra altos costos que podrían haberse evitado en caso de ocurrida la situación.

En cuanto a la implementación de tecnología solar es claro que el campo colector aumenta de tamaño a medida que se aumenta la potencia instalada y la capacidad del sistema de almacenamiento. La radiación solar incidente y eficiencia de la central son factores que juegan a favor de un campo colector reducido en tamaño. Esto último, para el caso de concentradores solares, es controlado por temperaturas de operación de la turbina (entrada y salida) y el cuidado adecuado de los espejos en cuanto a la limpieza de estos.

Debido al principio de funcionamiento de las tecnologías estudiadas estas serán analizadas por separado, clasificando estas tecnologías de la siguiente forma: Tecnología Solar Fotovoltaica y Tecnología de Concentración Solar.

#### Tecnología Solar Fotovoltaica

Esta tecnología demanda mayor superficie para la instalación de centrales de gran escala. Considerando que la radiación solar incidente total es la suma de la radiación difusa más la radiación directa, no existe mayor diferencia para la celda la forma en la que llega esta radiación. Por lo que una alta radiación total horizontal existente en la zona sería el factor más influyente a la hora de analizar su factibilidad técnica.

#### Tecnología con Concentración Solar

También requiere grandes superficies para la generación eléctrica pero a diferencia de los requisitos mencionados para el caso de la tecnología solar fotovoltaica, en este tipo de tecnologías es fundamental la cantidad de radiación directa que incide en el campo concentrador. Por lo que ésta es óptima para lugares donde se presenten cielos despejados la mayor parte del año.

### ***2.3.5. Disponibilidad del fluido***

Muchas de las tecnologías que usan vapor como fluido de trabajo para la generación de electricidad, lo hacen a partir del agua. En el caso de estudio, referente al norte chileno, a pesar de la escasez de agua, el impacto ambiental es mínimo al tratarse un fluido utilizado en circuitos cerrados que garantizan su reutilización en el proceso. Por lo que la implementación de esta tecnología de concentración solar no presenta mayores dificultades en cuanto a la disponibilidad de este recurso.

### ***2.3.6. Capacidad de alimentación***

Una tecnología considerada con cierto nivel de consolidación debe serlo en función de las características técnicas y capacidades propias de la tecnología que ya hayan sido probadas.

La capacidad de alimentación tiene relación con la demanda máxima de energía requerida para alimentar cada uno de los procesos de producción determinados de una faena, debido a limitaciones propias de la energía solar en cuanto a ajuste de suministro eléctrico.

### ***2.3.7. Potencia Nominal -Eficiencia***

Saber cuánta radiación recibida por la tecnología será transformada a energía eléctrica es clave para poder evaluar la productividad de dicho equipo.

La eficiencia de la tecnología será entendida como la fracción de radiación solar recibida que efectivamente será convertida a calor. Del total de energía aprovechada se puede obtener la potencia nominal que tendrá la energía solar, por lo tanto indicar cuánta potencia nominal se entregará a los procesos es de suma importancia. Si bien se trabaja con potencia en rangos de holgura bastante seguros y alejados de los consumos peak, es necesario considerar éste parámetro para efectos de dimensionar los equipos y los requerimientos para que pueda funcionar.

En general las eficiencias de las tecnologías de concentración solar varían entre 15 a 40%.

Aunque la eficiencia no sea el único aspecto relevante para definir la energía a generar, es necesaria poder estimar la inversión necesaria en la tecnología con la finalidad de satisfacer los requerimientos energéticos de la faena.

### ***2.3.8. Energía a producir-Factor de Capacidad***

El Factor de Capacidad es la energía producida por la tecnología en relación a lo que podría producir si trabajara a máxima potencia y se calcula por año. Este porcentaje puede variar dependiendo de la disponibilidad del recurso solar, y también influye la tecnología.

La energía a producir no es constante a lo largo de un período ni a lo largo de la vida útil de la tecnología. Por lo anterior es de suma importancia conocer las condiciones óptimas de trabajo de cada tecnología y cuál es el rendimiento que tiene cada una de ellas con los niveles de radiación que hay en Chile, en particular el Norte Grande.

### ***2.3.9. Operación y Mantenimiento***

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. A continuación se mencionan y se detallan los aspectos más importantes relacionados con este ítem.

#### **Limpieza de espejos**

La operación de mantenimiento 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. Una correcta limpieza se debe realizar con una frecuencia de una 1 vez por mes [24].

La forma de lavado consiste en rociar los espejos con agua desmineralizada a alta presión. Actualmente para esta operación se utiliza un camión de manera automática con agua a 3000 psi [24], una vez al año.

#### Alineación de Componentes de Campo Solar

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. [24]

#### Rotura de Espejos

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 [24].

## **2.4. Análisis de Factibilidad**

Las faenas mineras son muy variadas en cuanto a sus requerimientos y/o consumos energéticos. Cada uno de ellos varía en virtud del tipo de mineral, de su ley, de sus características geometalúrgicas y del tipo de procesos utilizados.

Se hace necesario tener un registro o seguimiento acabado de cada uno de las operaciones unitarias para poder analizar posibles mejoras y también implementación de nuevas tecnologías que permitan alimentar energéticamente los procesos.

Los procesos mineros no presentan grandes diferencias en el consumo energético entre cada una de las faenas de la gran minería del cobre debido a la estandarización de los procesos y las diferencias son principalmente de costo. Lo anterior se basa en la existencia de contratos bilaterales entre mineras y generadoras. La matriz energética del SING se abastece principalmente de centrales termoeléctricas que utilizan como combustible base carbón y petcoke y por lo tanto las diferencias de costos unitarios sólo tienen relación con la calidad de la tecnología de las centrales y con los acuerdos y/o contratos suscritos entre mineras y generadoras.

#### ***2.4.1. Requerimientos energéticos de procesos mineros***

Los requerimientos energéticos de procesos mineros serán evaluados según su nivel de consumo y la potencia necesaria para alimentar procesos determinados.

De esta forma se evaluará una implementación por partes con la finalidad de probar el funcionamiento de esta tecnología en Chile, que si bien ha mostrado un buen desempeño en países como EEUU y España, aún no ha sido validada en Chile.

Teniendo en cuenta lo anterior, se prevé un buen rendimiento y con una mirada clara en que la validación de esta tecnología permitirá realizar inversiones escalables en el mediano plazo.

#### ***2.4.2. Análisis de operaciones unitarias***

En un amplio sentido, podemos decir que el proceso minero se puede definir como la suma de procedimientos y operaciones mediante los cuales, a partir de un yacimiento, se obtienen metales y/o compuestos metálicos de pureza y calidad comercial, de manera rentable y con un impacto ambiental aceptable [16].

Las operaciones unitarias mina consumen principalmente combustibles, y el consumo eléctrico asociado a equipos grandes como palas y sólo representan aproximadamente un 5 % de energía requerida total de las operaciones unitarias de la mina.

### ***2.4.2.1. Procesos geológicos de generación de cobre***

En Chile y en el mundo los minerales de cobre se presentan geológicamente en su mayoría como pórfidos cupríferos. Más de la 50% de la producción de cobre mundial proviene de este tipo de depósitos. La mayor parte de las faenas mineras del Norte Grande de Chile corresponden a este tipo de yacimientos; entre ellos podemos mencionar Chuquicamata, Radomiro Tomic, Escondida, El Abra y Collahuasi [14].

Estos yacimientos son de alto tonelaje y de baja ley. La mayor parte de los pórfidos cupríferos no son económicamente rentables, a menos que hayan desarrollado enriquecimiento secundario o supérgeno. Sin embargo dadas las condiciones principalmente de tipo económicas y de tecnología, hoy las mineras de este tipo de yacimientos si logran obtener utilidades.

Debido a la naturaleza de los minerales, y según su composición química, óxidos y sulfuros son sometidos a diferentes procesos para su concentración y posterior extracción de cobre. Las características físico-químicas de cada especie mineralógica influyen en el comportamiento frente a cada reactivo y sustancia.

A continuación se explican los detalles de cada operación unitaria y su correspondiente característica energética.

#### ***Óxidos (Carbonatos e hidróxidos)***

Los minerales de cobre se pueden presentar en forma de minerales oxidados y en compuestos sulfurados. En general para efectos de la actividad minera, se les llama óxidos de cobre a todos los minerales que además de tener átomos de oxígeno, en su estructura básica no existe presencia de átomos de azufre. Todos los minerales de este tipo se tratan a través de procesos hidrometalúrgicos [15].

Los hidróxidos y los carbonatos constituyen una variedad de minerales oxidados y junto a los minerales sulfatados también son tratados como óxidos.

El mayor gasto energético se produce en las últimas operaciones del proceso (EW). El consumo en la primera etapa dependerá de cada yacimiento según las etapas de conminución que requiera el mineral oxidado, pudiendo no necesitar o pasando por 1 o 2 etapas.

En la Figura 16 se muestra el diagrama de flujo de las operaciones mineras del proceso de óxidos con sus consumos energéticos promedios asociados por unidad de cobre fino.

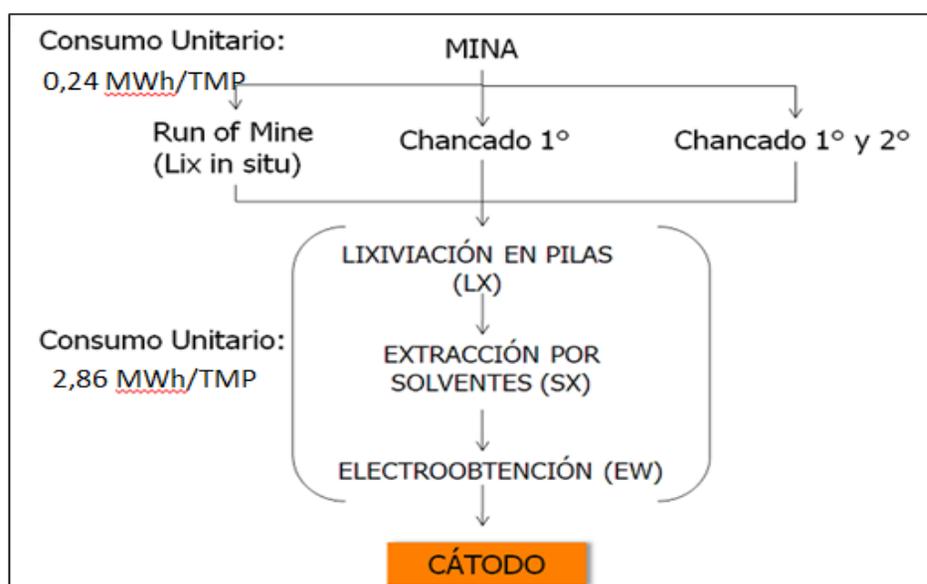


Figura 16: Diagrama de flujo de óxidos y consumo eléctrico por operación unitaria. [37]

### Sulfuros

Los sulfuros son la principal fuente de minerales de cobre que se extraen desde los yacimientos del Norte Grande de Chile. Los sulfuros para efectos de la extracción minera se clasifican en sulfuros de baja ley y sulfuros de alta ley. Los sulfuros de alta ley se tratan a través de procesos pirometalúrgicos, mientras que los de baja ley (sulfatos) son tratados junto a los óxidos. [15]

En la Figura 17 se muestra el diagrama de flujo de las operaciones mineras del proceso de sulfuros con sus consumos energéticos asociados por unidad de cobre fino.

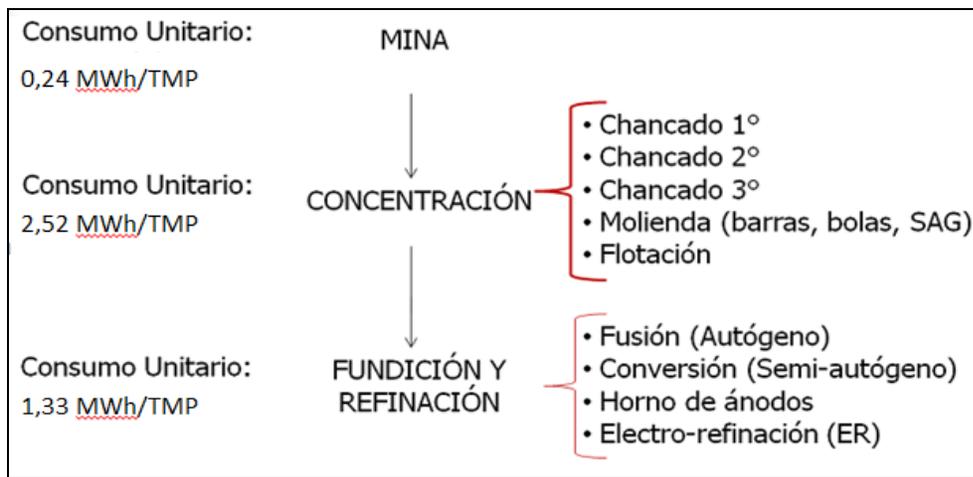


Figura 17: Diagrama de flujo de sulfuros y consumo eléctrico por operación unitaria.

#### 2.4.2.2 Operaciones unitarias del proceso.

##### i. Perforación

Esta operación unitaria está destinada a perforar un pozo con la finalidad de poder cargarlo con explosivo [17].

Para realizar las perforaciones se utilizan grandes equipos de perforación rotatoria. Estos equipos pueden ser de dos tipos: diesel o eléctricos.

##### ii. Tronadura

En cada pozo se introduce un detonante de encendido eléctrico, el que se detona mediante control remoto. Se establece una secuencia de detonaciones entre los distintos pozos de una tronadura, de manera que la roca sea fragmentada en etapas partiendo de la cara expuesta del banco hacia adentro, con diferencia de tiempos de fracciones de segundo entre cada detonación [17].

El producto obtenido es la roca mineralizada fragmentada de un tamaño suficientemente pequeño (en general menor a 1 m de diámetro) como para ser cargada y transportada por los equipos mineros y alimentar al chancador primario, en donde se inicia el proceso de reducción de tamaño en un sistema en línea hasta llegar a la planta de tratamiento.

La operación de tronadura tiene un consumo de electricidad nulo. Sólo utiliza camiones para cargar los pozos y su consumo de energía es en su totalidad combustible.

### iii. Carguío

El material tronado es cargado en camiones de gran tonelaje mediante gigantes palas eléctricas o cargadores frontales.

Las palas eléctricas tienen capacidad para cargar 70 o 100 toneladas de material de una vez, por lo que realizan tres movimientos para cargar un camión. Los cargadores tienen menor capacidad y en minas de gran tamaño son utilizados sólo para trabajos especiales.

### iv. Transporte

La mayoría de las operaciones de transporte de minerales o insumos en las minas consumen principalmente combustibles fósiles. Para efectos de este estudio sólo el uso de correas transportadoras y de sistemas de bombeo para transportar fluidos lixiviados o concentrados son considerados como relevantes en el consumo de electricidad.

El principal insumo utilizado para el desarrollo de la minería es el agua, y frente a la escasez de ésta en la zona norte, la industria ya está utilizando agua de mar para abastecer sus procesos productivos.

Minera Escondida es un ejemplo claro del uso de agua de mar en sus procesos productivos, para lo cual incurre en altos costos de transporte usando gran cantidad de energía eléctrica recorriendo los ductos cerca de 200 kilómetros.

### v. Conminución

La operación de conminución se realiza en chancadores y molinos y está dirigida a acondicionar el tamaño de partícula de mineral para el proceso de lixiviación en pilas, o para liberar y concentrar las especies minerales del metal de interés (chancado + molienda liberadora + flotación) [18].

La conminución es una etapa de gran importancia, ya sea para:

- a) Producir partículas de un cierto tamaño y forma.
- b) Liberar minerales valiosos de la ganga para facilitar su concentración.

c) Incrementar su área superficial disponible para alguna reacción química.

La operación de conminución tiene un alto consumo de electricidad y sumado al resto de las operaciones del área de procesamiento consumen aproximadamente 54 % del total.

#### **vi. Chancado**

El chancado es la primera parte de los procesos de conminución. Generalmente es una operación en seco y usualmente realizada en 1, 2 o 3 etapas.

#### **vii. Molienda**

La molienda es la segunda etapa de los procesos de conminución. Generalmente es una operación en húmedo y usualmente realizada en 1 o 2 etapas.

El mineral chancado proviene normalmente de las etapas de chancado primario o terciario (con granulometrías del orden de 20 cm o 1 cm) y el producto final requerido variará, según sea la liberación requerida del mineral de que trate, entre 100 y 300  $\mu\text{m}$ .

La reducción de tamaño se realiza mediante la combinación de los mecanismos de impacto y abrasión, en tubos cilíndricos o cilíndrico-cónicos llamados molinos rotatorios.

En el interior del molino se utiliza una carga de medios de molienda que se mueven libremente y que por la fuerza centrífuga generada en la rotación del molino, se elevan en la dirección de la rotación y caen por acción de la gravedad. En las faenas los más utilizados son los molinos de bolas, barras y SAG.

#### **viii. Clasificación**

Se utiliza principalmente el hidrociclón que es un tubo cilindro-cónico que conecta al exterior por tres orificios.

Su función es la de clasificar por masa, aunque en ella afecta mucho más el tamaño que la densidad, por lo que es posible utilizar este equipo como clasificador por tamaños.

### ***2.4.3. Tratamiento de Minerales Oxidados y Sulfuros de Baja Ley (Hidrometalurgia)***

Se ha impuesto el sistema de lixiviación en pilas (**LX**) donde se acumula el mineral de óxidos y sulfuros secundarios, de tamaño adecuado y “aglomerado” en pilas. A continuación se describe el proceso para obtener cobre a partir de minerales oxidados [19]

Normalmente la operación comprende dos etapas:

- Una etapa rápida (15 a 45 días) donde se disuelve el 80-90% del mineral oxidado y el 40-50 % de los sulfuros secundarios.
- Una etapa lenta (6 meses), en la cual se completa el 100% de recuperación del oxidado y el 80-90 % del sulfurado.

El mineral oxidado se lixivia, en cambio los sulfuros secundarios (Calcosina, Covelina, Bornita) se disuelven fundamentalmente por la acción de bacterias del tipo Thiobacillus, principalmente Thio-oxidans y Ferro-oxidans que son microorganismos mesofilos que actúan como agente oxidante en presencia de aire y transforman los sulfuros en sulfatos solubles.

La solución o lixiviado final contiene un porcentaje de cobre relativamente bajo (1-3 g/l), la cual está contaminada con hierro y otros elementos, por lo cual debe ser purificada.

### ***2.4.4. Tratamiento de Minerales Sulfurados (Concentración y/o Pirometalurgia)***

Las etapas del proceso de obtención de cátodos de cobre, a partir del mineral ya finamente molido, se pueden resumir de la siguiente manera:

#### **i. Flotación**

El mineral debe ser previamente concentrado mediante “flotación” que es un proceso físico-químico que consiste en la separación de partículas finamente molidas de un mineral, basándose en el diverso grado de humectación de sus distintos componentes con agentes especiales (colectores, espumantes, etc.).

La partícula se adhiere a las pequeñas burbujas de aire que son ingresadas al sistema desde el fondo de la celda y flota hacia la superficie permitiendo su separación del resto de las partículas

de gangas, las que no absorben el colector y debido a ello son humectadas por el agua, quedando e el fondo de las celdas de flotación. [20]

La espuma con las partículas minerales ricas en cobre y otros elementos valiosos se recuperan por rebase de las celdas y se somete a tratamiento de limpieza, de espesamiento y de filtración para eliminar el exceso de humedad.

Esta operación unitaria usa principalmente electricidad pero su aporte al consumo total es bajo.

Los principales consumos de electricidad de esta operación están vinculados a labores auxiliares como lo es la planta de cal, la cual debe alimentar de cal constantemente al proceso de flotación.

## **ii. Pirometalurgia: Fundición y Refinería**

Comprende toda una gama de operaciones térmicas que consisten básicamente en la fusión del concentrado y su transformación de sulfuros de cobre metálico de pureza cada vez más elevada. El secado de los concentrados, después del proceso de filtración permite rebajar su contenido de humedad hasta un 5-8 %, generalmente se emplea una corriente de aire caliente de 800 – 850 °C, para facilitar la operación del horno. [21]

En la etapa de la fusión del horno, el concentrado se transforma en “ejes” o “mata”, mediante reacciones que permiten eliminar el hierro y el azufre contenido en el mineral.

Muchos de los procesos o de los hornos usados en la primera parte de los procesos pirometalúrgicos son autógenos y no tienen necesidad de usar electricidad. Sin embargo también existe el proceso de electro-refinación que si bien consume principalmente electricidad su aporte porcentual al total es bajo.

## **iii. Refinación: Electro-refinación**

Es la disolución electroquímica de los ánodos impuros de cobre, para permitir que el metal se deposite en forma selectiva y con máxima pureza sobre cátodos de cobre [22].

La electro-refinación tiene dos objetivos:

- Eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre.

- Separar las impurezas valiosas del cobre. Éstas pueden ser recuperadas después como subproductos metálicos.

En este proceso tienen lugar las siguientes reacciones:

- El cobre del ánodo se disuelve electroquímicamente dentro de la solución con lo que se producen cationes de cobre, más electrones.
- Los electrones producidos por la reacción, son conducidos hacia el cátodo a través del circuito y suministro de energía externo.
- Los cationes  $\text{Cu}^{2+}$  en la solución, emigran por difusión y convección hacia el electrodo negativo (cátodo).
- Los electrones y los iones  $\text{Cu}^{2+}$  se recombinan en la superficie del cátodo para producir el cobre metálico que se deposita sobre el cátodo.
- En síntesis, se produce la disolución electroquímica del cobre del ánodo; la emigración de electrones e iones de cobre hacia el cátodo, y el depósito de cobre sobre la superficie del cátodo.

Todos los ánodos están a un solo potencial eléctrico y todos los cátodos están en otro potencial más bajo. Cada ánodo está colocado entre dos cátodos, de manera que se disuelven electroquímicamente a velocidad similar.

En general podemos afirmar que el proceso de refinación es casi en su totalidad dependiente del consumo de electricidad, aunque necesita también inyectar combustibles (petróleo, kerosene) con la finalidad de reducir el óxido cuproso en los hornos.

Una vez instalados los ánodos y cátodos, se conecta la energía eléctrica y el cobre se corroe gradualmente en los ánodos para depositarse sobre los cátodos. Lo usual es que un ánodo permita producir dos cátodos, proceso que permite que se extiende por 12 a 14 días.

Al final de un ciclo, cada ánodo ha sido disuelto electroquímicamente en casi el 85%. Los restos de los ánodos sin disolver (desperdicio o chatarra) se retiran de las celdas y después de lavados, se funden y se vuelven a vaciar como ánodos nuevos. Se retira el electrolito de las celdas y los residuos del ánodo se canalizan hacia un sistema de donde se recolectan y desde donde son

transportados a la planta de recuperación de metales preciosos. Entonces comienza de nuevo el ciclo de refinación.

### **3. BARRERAS**

En este capítulo se tratarán en detalle las barreras técnicas, económicas, políticas, ambientales y socioculturales a las que se enfrenta la generación de electricidad a partir de energía solar. Cabe destacar que el análisis sólo considerará barreras al desarrollo de energía solar-eléctrica para consumo propio de las mineras, y no aquellas que consideren la posibilidad de conexión al sistema interconectado, pues ella implicaría vender energía en el mercado eléctrico.

El análisis se enfocará principalmente en la Gran Minería del Norte Grande, ubicada en las regiones de Tarapacá y Antofagasta, zona que presenta los mejores niveles de radiación para el desarrollo de energía solar [31].

#### **3.1. Barreras Técnicas**

Se definen como barreras técnicas los obstáculos provenientes de la no existencia de una adecuada tecnología, del insuficiente conocimiento del recurso energético, de la falta de recurso humano adecuado y/o equipamiento y materiales. La tecnología de energía solar ha sido desarrollada por diferentes centros de investigación en el mundo, sin embargo, el escaso nivel de madurez alcanzado en Chile, sumado a la falta de técnicos y profesionales con formación en el área de ERNC, constituyen una barrera técnica [31].

Dentro de las barreras técnicas se puede mencionar:

- Bajo nivel de eficiencia
- Bajo nivel de madurez tecnológica
- Baja presencia de personal capacitado
- Certificación de productos y materiales

La eficiencia se relaciona, principalmente, con las características propias del material y de la tecnología. Esta indica cuánto del total de radiación solar va a poder ser convertida efectivamente en electricidad. Si bien hoy la eficiencia media de las tecnologías solares disponibles es baja en relación a las tecnologías que utilizan las generadoras convencionales, constituyendo una barrera para el desarrollo de energía solar, ésta podría aumentar en la medida que se invierta en I+D.

El nivel de madurez tiene que ver principalmente con el historial de cada tecnología, lo que se traduce en saber principalmente origen, tiempo de prueba, capacidad instalada a nivel mundial y

también local. El hecho de que una tecnología esté muy desarrollada a nivel mundial, no garantiza factibilidad técnica a nivel nacional.

La instalación de determinada tecnología, no sólo comprende la disponibilidad del material (equipo), sino también el capital humano con el que se cuenta (técnicos y profesionales del área). La baja o nula presencia de personal capacitado es indicio del bajo nivel de madurez existente, pudiendo ser considerada como una barrera de tipo técnica.

Una vez masificado y consolidado el desarrollo de la tecnología solar-eléctrica en Chile, se debe normar e implementar un sistema de certificación para garantizar que todos los equipos comercializados en el país cumplan con determinados estándares de calidad y eficiencia. Así se generará un mayor grado de confianza en los consumidores finales, se incrementará la demanda y fortalecerá el desarrollo de la industria. Asimismo, facilitará el proceso de selección y compra en la variada oferta de productos. También, servirá para comprometer a los proveedores (importadores y fabricantes nacionales) a entregar equipos que cumplan con requisitos y características de calidad basadas en especificaciones técnicas [31].

A continuación se muestra una tabla comparativa de las tecnologías disponibles, mencionadas en el capítulo 2 con sus respectivas características:

**Tabla 3.1: “Comparación de Tecnologías Solares disponibles” [24]**

	Panel Fotovoltaico	Colector cilindro parabólico	Colector Fresnel Lineal	Torre central	Disco Stirling
Eficiencia anual neta (%)		11 - 16	13	7 – 20	12 - 25
Eficiencia peak (solar-eléctrico) (%)	13-30	20	18	23	30
Disponibilidad (%)	90	94	94	94	90
Factor de capacidad (%)	20 - 30	23 - 56	25 – 90	20 - 78	24 - 25
Madurez de la tecnología	Alta	Alta	Media	Media	Bajo
Rango utilización (MW)	1 – 60	30 - 300	2 – 200	10 - 200	0,005 - 0,025

### 3.2. Barreras de Entrada

Al alimentar, durante el día, algunos procesos con energía generada por la propia faena, se altera el consumo normal de electricidad proporcionada por el SING, pudiendo eventualmente producirse una desestabilización del sistema. Para evitar perturbaciones, la Ley General de

Servicios Eléctricos (LGSE), a través de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad del Servicio (NTSCS), exige a todas las mineras (debido a su alto nivel de consumo) en calidad de clientes libres, estándares y exigencias mínimas con la finalidad de no desestabilizar el sistema.

En este contexto, la NTSCS indica lo siguiente:

“Cuando la desconexión intempestiva o reconexión de una parte o la totalidad de un consumo dé lugar a variaciones de frecuencia y/o tensión en un Sistema Interconectado (SI), que excedan los estándares establecidos en el Capítulo N° 5 de la NTSCS, las instalaciones de clientes deberán contar con los automatismos de control necesarios que permitan reducir el nivel de perturbación causado al SI y asegurar el debido cumplimiento de los estándares de seguridad y calidad del servicio, establecidos en la presente Norma Técnica. Para ello, el cliente deberá contar con los equipamientos e instalaciones adecuados.” [32]

Por otra parte, la operación del sistema eléctrico debe ser coordinada por el Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC). Para ello, se debe coordinar la desconexión de carga en barras de consumo, así como otras medidas que fuesen necesarias por parte de los integrantes del sistema eléctrico sujetos a coordinación, para preservar la seguridad de servicio global del sistema eléctrico, según los procedimientos establecidos en el reglamento interno. Para lograr dicha coordinación las mineras deben informar de manera oportuna la disminución de consumo en ciertos períodos del día. [32]

Lo anterior, aunque no constituye una barrera propiamente tal para las ERNC, sí aumenta la complejidad de operación del proceso a alimentar, pues como se mencionó en párrafos previos, el tiempo máximo de almacenamiento para la tecnología más avanzada (CSP) es de 12 horas, teniendo que utilizar eventualmente (por ejemplo en días nublados) electricidad suministrada por el Sistema. De esta manera, aumentan las perturbaciones de demanda de electricidad al SING, por lo cual, las mineras en calidad de clientes finales deben notificar constantemente las variaciones en su consumo.

### **3.3. Barreras Económicas**

Se ha discutido extensamente acerca de cuáles son las barreras que impiden o dificultan el desarrollo de energía solar y cómo éstas deben resolverse. En estudios realizados se reconoce

como aspecto principal los altos costos de inversión y la falta de subsidios directos en esta etapa del proyecto, que promuevan la generación de energía proveniente de fuentes renovables.

Las principales barreras económicas son:

- Altos costos de inversión e implementación
- Falta de subsidios directos en la etapa de inversión

Los altos costos de implementación y de inversión por unidad de potencia instalada en comparación a las tecnologías convencionales, hacen que este tipo de generación en muchos casos no sea rentable para las mineras. Se hace necesaria una reducción en los costos, lo que sería posible al masificarse este tipo de tecnologías.

Los costos de capital también pueden aumentar debido al aumento de riesgo, producto del desarrollo de tecnologías no probadas con anterioridad, generándose así efectos adversos para la competencia y eficiencia. Esto junto con la dificultad para conseguir el capital inicial, afectan la factibilidad económica de un proyecto de este tipo.

Debido a la alta inversión inicial, el período de recuperación se extiende más allá de lo normal para un proyecto energético, a veces superando los 10 años, que según criterios económicos se considera poco viable.

La ley 20.257 que introduce modificaciones a la Ley General de Servicios Eléctricos señala que el 5% (porcentaje vigente para el año en curso) de la energía retirada desde los sistemas eléctricos corresponda a ERNC [33]. Esta ley recae sobre las empresas eléctricas que retiran energía directamente de los sistemas eléctricos para su comercialización. Sin embargo, esta normativa no hace alusión directa a la energía generada por las propias mineras. En relación a esto último, las empresas mineras al no verse afectadas por esta ley, no se incentivan a utilizar energías renovables.

### **3.4. Barreras Políticas**

La creación del Ministerio de Energía, a través de la Ley N° 20.242, publicada en el Diario Oficial de 3 de diciembre de 2009, logra la independencia del tema energético del Ministerio de Minería, poniendo de manifiesto la preocupación del Estado en materia energética.

A pesar de este esfuerzo, los incentivos son insuficientes para impulsar de manera concreta el desarrollo tecnológico o la instalación de centros de investigación en el norte del país (aprovechando la cantidad de radiación solar que tiene dicha zona), pudiendo así aportar a la maduración de este tipo de tecnologías, que a nivel mundial están en pleno desarrollo, pero que en Chile aún están ausentes. Las energías renovables son una necesidad para cumplir las exigencias ambientales y sobre todo dar seguridad energética.

Las denominadas leyes cortas se han presentado para poder incorporar las ERNC en la matriz energética de Chile. La ley 19.940 (Ley Corta I), permite el acceso a las redes de distribución para generadores inferiores a 9 MW, lo que marca un hito, pues establece por primera vez un trato que marca preferencia por las energías renovables no convencionales.

Posteriormente se dictó la ley 20.257 (Ley Corta II). Esta ley le ha dado un auge más directo a las ERNC, al comenzar a exigir a las empresas comercializadoras de energía eléctrica, que acrediten que un porcentaje de la energía vendida proviene de ERNC.

Ambas inciden en la visión geopolítica del país. El profesor Fernando de la Cuadra dice al respecto: “La seguridad energética y el cambio climático son problemas interdisciplinarios que están influenciando el desarrollo de los mercados energéticos en todo el mundo. Los mercados energéticos dependen de la disponibilidad de recursos naturales como combustibles fósiles, la estabilidad política, la tecnología y el medio ambiente”.

“Por lo mismo, la idea de sustentabilidad supera lo estrictamente ambiental, incorporando un conjunto más amplio de dimensiones pertinentes al devenir de la humanidad: económica, social, política y cultural” [34].

Así es como las leyes cortas I y II tienen una gran incidencia en el cambio de cultura y política energética incentivando la generación de energía con fuentes no convencionales y traspasando los costos directos a las generadoras, pero estando conscientes de que no son suficientes, estas leyes marcan un importante antecedente, demarca la legislación chilena energética con lo necesario para comenzar a desarrollar las ERNC, dando el punto de partida para alcanzar los niveles de

utilización de estas energías, lo que permite un mayor autoabastecimiento y competencia con los niveles de producción de estas energías en el plano global.

A pesar de que este estudio no se enfoca en la comercialización de ERNC sino en la generación para consumo propio de las mineras, indistintamente las directrices deben apuntar de manera concreta y rigurosa hacia el fomento de ERNC, para un aprovechamiento óptimo de los recursos energéticos propios y un eficiente uso de la energía.

A continuación se incluyen, además, dos barreras que corresponden a distorsiones de mercado, pero que debido a la naturaleza legislativa de su potencial solución se incorporarán a barreras de tipo políticas:

- Externalidades sin considerar:

En Chile la legislación no contempla que los emisores de dióxido de carbono se hagan responsables de las externalidades negativas que generan. Así, a pesar de que el gobierno no entregue un subsidio directo, el hecho de que no se cobre por los efectos negativos generados en la sociedad (las externalidades no son internalizadas), implica que cada MWh que genera un central de energía convencional recibe de cierta manera un subsidio implícito sobre sus costos de operación (etapa en la cual se producen las emisiones), percibiendo costos menores a los reales, afectando así la competitividad de las ERNC.

Lo anterior no considera los costos en salud que generan las emisiones locales. Desde la perspectiva social es necesario internalizar los costos de las emisiones para que existan incentivos a su reducción hasta un nivel aceptable.

- Barreras transaccionales:

Los altos impuestos a importaciones de tecnología para ERNC podrían elevar los costos de éstas, lo que contribuye a la no rentabilidad de este tipo de proyectos.

### **3.5. Barreras Ambientales**

A partir de los años 90 ha sido posible apreciar una mayor atención y difusión de las ERNC, constituyendo actualmente una opción de fuente energética. [35]

Una de las razones que responden al fenómeno antes mencionado es la aceptación de que algunas fuentes convencionales de energía son agotables y que su uso puede afectar el equilibrio del ecosistema del planeta. No obstante, las energías renovables también son susceptibles de ser cuestionadas en cuanto a su impacto en el medioambiente, aunque en menor medida.

Chile no se ha visto exento del creciente interés por las ERNC. Sin embargo, la comprensible focalización en las áreas técnica, económica y de negocios, no se encuentra acompañada por el dinamismo en el desarrollo de las regulaciones ambientales de las actividades y proyectos necesarios para lograr un uso más intenso de este tipo de energías en nuestro país.

### *3.5.1. Normativa Ambiental*

En Chile el Reglamento de la Ley General de Bases del Medio Ambiente, en su Art. 3, letra c) del DS MINSEGPRES N°95/01 señala que los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases, deberán someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Dentro de estos se encuentran las centrales generadoras de energía mayores a 3 MW.

De acuerdo a estimaciones realizadas por IDIEM, el rango de generación de energía solar-eléctrica posible para una minera de las características descritas por el estudio, está entre 3 MW (escenario abordable) y 50 MW (escenario ambicioso). De acuerdo a esta información, los proyectos posibles de implementar en el sector minero deberían entrar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Por otra parte, El Art. 6, del DTO. MINSEGPRES N°95/01, señala que el titular deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental si su proyecto o actividad genera o presenta efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire.

A objeto de evaluar si se generan o presentan los efectos adversos significativos a que se refiere el párrafo anterior, se considerará entre otros:

- Letra f) La diferencia entre los niveles estimados de inmisión de ruido con proyecto o actividad y el nivel de ruido de fondo representativo y característico del entorno donde se

concentre fauna nativa asociada a hábitats de relevancia para su nidificación, reproducción o alimentación.

- Letra g) Las formas de energía, radiación o vibraciones generadas por el proyecto o actividad.
- Letra h) Los efectos de la combinación y/o interacción conocida de los contaminantes emitidos y/o generados por el proyecto o actividad.
- Letra i) La relación entre las emisiones de los contaminantes generados por el proyecto o actividad y la calidad ambiental de los recursos naturales renovables.
- Letra k) La cantidad y superficie de vegetación nativa intervenida y/o explotada, así como su forma de intervención y/o explotación.

Una vez realizados los estudios previos que permiten determinar la factibilidad técnica y económica de un proyecto, se da paso a la etapa de construcción y luego a la de operación. Cada una de ellas tiene acciones y procedimientos que pueden generar impactos ambientales, existiendo especial interés en la etapa de operación, pues genera cambios en el territorio de manera más permanente en comparación con la etapa de construcción en el que sólo son temporales.

El Art. 12, letra f) del DS MINSEGPRES N°95/01 establece los componentes que deben ser incluidos en el estudio, con objeto de revisar los elementos que podrían ser alterados por tecnologías solares.

La instalación de paneles de energía solar podría generar efectos comunes con otro tipo de proyectos, como la alteración del medio biótico, en particular la flora terrestre a través del despeje de vegetación; el medio físico, al aumentar los niveles de ruido y al empeorar la calidad de aire como consecuencia de la emisión de material particulado y gases, no obstante debido a la existencia de grandes superficies de terreno estériles los efectos mencionados anteriormente son minimizados y sólo se traduce en barreras legales al momento de solicitar los permisos correspondientes arrastrando con los vicios de una burocracia extrema.

El traslado de materiales, que forma parte de las tareas de construcción, también impacta un sector distinto a la de la construcción misma, incidiendo en el tránsito, niveles de ruido y emisión de material particulado.

La etapa de operación afecta principalmente el paisaje y el uso del suelo en que se ubicará la nueva planta. Hay que destacar el eventual conflicto por el uso del territorio, generado a partir de la existencia de poblaciones protegidas en los sectores a ocupar, generalmente indígenas, que valoren culturalmente el espacio y el paisaje.

A pesar de que la normativa vigente trata los puntos antes mencionados, hay que destacar que el desarrollo de ERNC tiene un impacto en el medio ambiente bastante menor que el de las energías convencionales.

Un respaldo de esto es el acuerdo al que llegaron los países firmantes del Protocolo de Kyoto (1997), del cual Chile es partícipe, donde se comprometen a incrementar gradualmente la utilización de ERNC en su matriz energética, como una expresión concreta de esfuerzos por revertir el cambio climático, originado en gran medida por las emisiones de gases de efecto invernadero. El desarrollo de ERNC contribuye con este propósito al disminuir en forma considerable la emisión de CO<sub>2</sub> en comparación a las energías convencionales.

Por lo tanto, el impacto ambiental generado por las ERNC no constituye, comparativamente, una barrera que desincentive su uso, sino un "beneficio" al reducir las externalidades por contaminación.

### **3.6. Barreras Socioculturales**

La falta de información y conciencia sobre las consecuencias de los niveles de contaminación generados por las energías convencionales que actualmente sustentan la matriz energética, y la necesidad de lograr seguridad e independencia, aumentan la incertidumbre con respecto a los proyectos de ERNC, y en consecuencia aumentan los costos de éstos por demoras en aprobación de los proyectos.

Nuestro país no posee una cultura pro investigación y desarrollo, o por lo menos no al nivel de países desarrollados; esto dificulta la inversión en nuevas tecnologías y por ende la adopción de nuevas alternativas de generación eléctrica.

La reticencia al cambio, en particular a aceptar soluciones innovadoras, no probadas anteriormente o con poco tiempo de experiencia, dificulta también el acceso a mejoras sustanciales en el tema energético.

Por otra parte, una cultura reacia al riesgo más allá de lo normal, sumado a la intención de recuperar la inversión u obtener ganancias en el corto plazo, minimizan las posibilidades de desarrollar proyectos que requieren de una alta inversión inicial y que por lo general tardan en recuperar el capital utilizado; son considerados proyectos poco atractivos.

Los mayores beneficios de las ERNC recaen en la sociedad en su conjunto, pero esto no es suficiente para compensar los altos costos en que incurre el sector privado, por lo que a menos que existan incentivos que los beneficien directamente, no hay una mayor motivación por invertir en tecnología solar particularmente.

La falta de gente capacitada en el área de ERNC, promueve un diseño y creación de políticas públicas ineficientes y de poca vida útil, que al ser llevadas a la práctica no aseguran efectividad. Un claro ejemplo es la no consideración de los puntos de vista de los distintos actores vinculados al tema energético (productores, consumidores, expertos en el tema) y las interacciones entre ellos.

#### **4. EVALUACIÓN TÉCNICA Y APLICACIÓN EN INDUSTRIA MINERA**

Los procesos de producción mineros tienen diversas complejidades en su circuito, pero también las hay en su régimen de alimentación siendo bien irregular la mayoría de las veces en su requerimiento energético. Variaciones considerables en la extracción de mineral producen discontinuidades en el nivel de demanda por electricidad en los procesos aguas abajo.

En general podemos decir que no hay procesos continuos en el tratamiento de minerales de cobre, pero si existen equipos y tecnologías que requieren un nivel de consumo eléctrico constante en su funcionamiento independiente del tonelaje de mineral a tratar.

Las tecnologías de concentración solar que poseen el mayor potencial de ser implementadas en el norte de Chile para la generación de electricidad necesitan de un sistema de almacenamiento para poder entregar energía a los diferentes equipos y procesos que intervienen en una faena minera de manera continua.

La tecnología solar a implementar debería ser capaz de asegurar continuidad en la alimentación de electricidad a los procesos a lo largo de todo el día que permita entregar energía en las horas en que no hay radiación solar como lo es durante la noche o en los días nublados.

Una simplificación en el problema de alimentación con electricidad a procesos viene dada por la conexión a la red de transmisión de energía en algún punto o nodo. Esta conexión implica la implementación de una subestación con sistema de inversor y transformador capaz de llevar la electricidad generada a partir de energía solar a la forma de consumo habitual de los procesos tanto en tipo de corriente como en nivel de voltaje.

Con respecto a la elección de la tecnología se optó por la de Concentrador Cilindro Parabólico considerando que la madurez de la tecnología no sólo debe verse en el tamaño de la inversión, sino también en los costos de insumos (ejemplo insumos como repuestos), y nivel de complejidad en operación y mantención de la tecnología.

Para los consumos de energía eléctrica de cada proceso de una faena promedio, es necesario afirmar que los consumos de cada operación o proceso no son constantes a lo largo de las jornadas de trabajo y se debe trabajar bastante alejado del límite de capacidad nominal para evitar

colapso del sistema o con desfases de tiempo en el peak de sus capacidades para operar con seguridad.

Por todo lo anterior cada proceso necesita ser revisado en su funcionamiento y analizado desde el punto de vista del consumo para evitar problemas de alimentación.

Debido a la falta de información técnica detallada acerca de la capacidad de ajuste por parte de las diferentes tecnologías de concentración se asumirá que las tecnologías solares en el peor de los casos tendrán un sistema auxiliar que funcione con combustible fósil el cual se ajustará a la demanda (sistemas híbridos).

Para efectos prácticos se dimensionará la tecnología solar a implementar sólo para aquellas labores productivas que demanden electricidad de manera constante y considerable.

De las etapas o actividades productivas factibles de ser alimentadas por tecnología solar es necesario discriminar aquellas actividades que demandan un nivel continuo de electricidad para sus procesos. Como también analizar exhaustivamente qué procesos alimentar ya que no sólo influye el criterio económico, sino que también se deben considerar aspectos técnicos y mediáticos. Éste último debe ser considerado en virtud de la realidad y la imagen pública de la industria minera.

#### **4.1. Elección de la tecnología**

Considerando los factores que influyen en la evaluación de la tecnología y dada la configuración de la matriz de decisión mostrada en la tabla 5.2, se ha decidió optar por la tecnología de Concentrador Cilindro Parabólico por las siguientes razones:

Nivel de Madurez: presenta el mayor grado de madurez tecnológica, lo cual se traduce principalmente en: una de las que lleva operando con mayor tiempo; el grado de confiabilidad de la operación; la cantidad de unidades desplegadas en función de la tecnología; y por último el potencial de mejora y crecimiento dentro de la misma tecnología., tanto en lo que puede producir como en su potencial de mejora.

Seguridad de la tecnología: al ser fluidos producidos de manera sintética, son susceptibles de ser mejorados tanto en su seguridad como en el caso de impactos ambientales, y al mismo tiempo se puede mejorar la posibilidad de efectos por malos manejos debido a errores humanos.

Disponibilidad del fluido: al trabajar con aceites sintéticos se eliminan una serie de problemas vinculados a la escasez del mismo, pues no dependen de factores ambientales ni de recursos naturales como el agua, que en el norte de Chile son mínimos.

En cuanto a la productividad si bien existen tecnologías con mayores y/o mejores índices, estas no necesariamente tienen el nivel de madurez que permitan asegurar confiabilidad en la alimentación a los procesos como la tecnología de concentradores cilindro parabólicos.

Y finalmente cualquier índice de producción de la tecnología elegida que sea superada por otra, lleva a pensar que su potencial de mejora y crecimiento traerá consigo una serie de beneficios en todas las áreas a medida que se sumen nuevos proyectos de la misma en los aspectos económicos y tecnológicos.

#### **4.2. Elección de los procesos**

En cuanto a los procesos factibles de ser alimentados se consideraron los siguientes aspectos.

- Consumo alto: Es necesario que el o los procesos a determinar para ser alimentados con tecnología solar tengan el mayor impacto posible, no sólo para disminuir costos, sino también por minimizar el período de retorno de la inversión.
- Tiempo útil anual: el porcentaje real del tiempo en que el proceso demanda energía para su funcionamiento también es un aspecto a considerar, pues se pretende que el recurso solar se aproveche al máximo.
- Riesgo en la inversión: debido a que las tecnologías solares en general aún les falta madurez sobre todo las de concentración, la evaluación de la inversión debería medir el riesgo por apostar a una tecnología de este tipo. Por lo tanto se recomienda no implementar la tecnología en procesos de mucho consumo o que necesiten mucha inversión.

Aunque el aspecto económico es de mucha importancia al momento de evaluar una inversión de este tipo, la industria minera también tiene gran interés en que esto tenga un impacto mediático dada las condiciones socio-cultural de cada región en particular donde muchas veces se convive con la existencia de comunidades indígenas.

A continuación se muestra en la Tabla 4.1 el resumen con los procesos más viables de poder ser implementados, incluyendo además la superficie requerida para alimentar con la energía necesaria para cada proceso con la finalidad de dimensionar una posible planta solar.

**Tabla 4.1. Resumen de procesos factibles de ser alimentados con energía solar.**

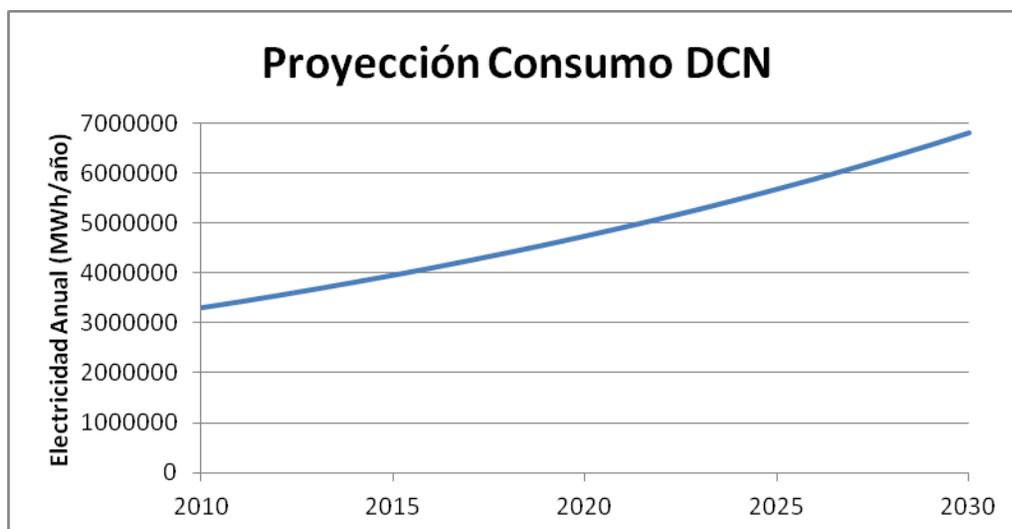
Proceso		Etapa	Consumo Eléctrico (MWh/año)	Porcentaje de utilización anual (%)	Has. Requeridas C.C. Parabólico
Mina		4 Palas	18.707	70-90	33,0
Procesamiento	Chancador	Planta de Cal	5.421	90-95	9,6
		Remolienda	23.062	80-95	40,7
		Compresores	11.525	75-95	20,4
		Bombas de Molinos	3.591	85-95	6,3
		Planta de Molibdeno	4.550	80-95	8,0
	Espesamiento	2 Extracción por Solvente	12.742	70-90	22,5

De los datos expuestos en la tabla 4.1 podemos afirmar que en la eventual ubicación de cada una de las plantas que abastecerán con energía cada uno de los procesos existiría un gran problema con la superficie pues hay procesos y áreas de producción que se encuentran relativamente cerca y esto no es posible tanto por una cuestión técnica como práctica. Por lo anterior es que se muestra como la solución más viable la instalación de una sola gran planta solar capaz de abastecer cada uno de las operaciones unitarias de producción y en la cual dicha energía se conecte directamente al sistema de transmisión interno de la faena.

Para la estimación de los requerimientos energéticos se hará de acuerdo a lo siguiente:

Para calcular el consumo total de electricidad extrapolaremos los datos obtenidos a partir de el informe de consultora REDCO.

Según lo anterior obtenemos el siguiente gráfico la proyección en el consumo para DCN.



**Figura 18: “Proyección consumo de División Codelco Norte”**

Fuente: REDCO y elaboración propia.

Según los datos y el gráfico anterior la División Codelco Norte requiere para el año 2010 de una planta de 600 MW para poder abastecer todos los procesos de la faena en su conjunto (Chuquicamata y Radomiro Tomic).

Con los datos proporcionados por REDCO se tiene:

Consumo año 2010 : 3.500.000 MWh/año

De lo anterior se tiene que:

Bloque de potencia nominal: 400 MWe

Para cumplir con la exigencia de la ley se tiene:

Energía a acreditar:  $10\% * 3.500.000 \text{ MWh/año} = 350.000 \text{ MWh/año}$

Bloque de potencia nominal año 2010:  $10\% * 400 = 40 \text{ MWe}$

Potencia real requerida :  $1,5 * 40 = 60 \text{ MWe}$

Considerando la implementación de una planta solar con Concentradores Cilindro Parabólicos, los cuales tienen una razón de  $22.000 \text{ m}^2/\text{MWe}$ , se tiene que el requerimiento de superficie para implementar dicha tecnología en todos los procesos de la división es:

Hectáreas requeridas:  $60 * 22.000 \text{ m}^2/\text{MWe} / 10.000 \text{ m}^2$

Hectáreas total requeridas: 132 hás.

Los datos técnicos de uso de superficie entregados por empresa SENER – España, la tecnología de CCP los cuales tienen una razón de  $22.000 \text{ m}^2/\text{MWe}$  necesitarán para alimentar con 350.000 MWh de energía, o sea el 10% del consumo total, 132 hectáreas para una potencia de 60 MWe nominal.

## **5. ANÁLISIS ECONÓMICO**

Para evaluar económicamente el proyecto de energía solar con tecnología de cilindro parabólico con almacenamiento se tomó un horizonte de tiempo de 20 años y una tasa de descuento del 10%. A partir del flujo de caja se obtuvo el valor de los distintos indicadores del proyecto y de éstos se dedujo la conveniencia de generar este tipo de energía y su rentabilidad esperada, analizando este proyecto bajo distintos casos.

Debido a las exigencias de ley de ERNC (20.257) las generadoras deben acreditar el año 2024 que el 10% de la electricidad generada debe provenir de fuentes de energía renovables aunque también se ha planteado la posibilidad que dicho porcentaje sea de 20% en el año 2020.

Por lo anterior es que se analizarán distintos escenarios, los que se diferencian dependiendo quien haga la inversión.

### **5.1. Aspectos económicos del proyecto**

El proyecto propuesto se basa en la generación energía solar para ser suministrada a los diferentes procesos mineros que intervienen en la “División Codelco Norte”(DCN). Para ello se evalúan dos escenarios económicos que a continuación se explican:

Para efectos de causar un beneficio real a las mineras DCN que son por lo demás nuestro foco de atención es que nos centraremos sólo en la evaluación económica de la situación en que las mineras hacen la inversión y no obstante conllevaría también consecuencias importantes en el aspecto social y medioambiental.

Por lo tanto nuestro problema quedará reducido a dos posibilidades:

- División Codelco Norte es quien asume el proyecto realizando la inversión de una sola vez y consumiendo toda la energía generada.
- DCN hace la inversión de una sola vez, para su propio consumo, y en el caso de existir excedentes estos podría transarlos en el mercado spot (mercado eléctrico).

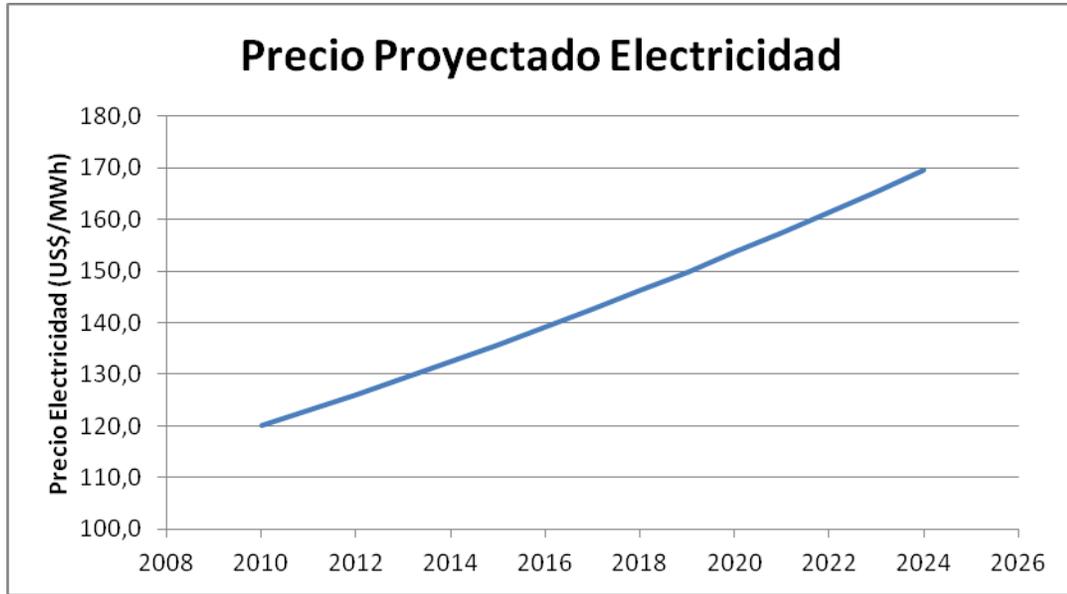
La evaluación considerará que la planta tiene una potencia instalada 60 MW, la cual corresponde a la potencia necesaria para que DCN cumpla con el porcentaje que exige la ley, y que el factor de planta es 50%.

Los supuestos son los siguientes:

- Por consideraciones de tipo técnicas la potencia necesaria y calculada a partir de los consumos anuales de energía para algún proceso productivo o para alguna actividad industrial se incrementó en un 50% para soportar los peak de consumo.
- En ausencia de datos formales de consumo de energía eléctrica para la división Codelco Norte se extrapoló para los años siguientes y asumiendo que podría estancarse el consumo debido a que la minería subterránea demanda menos electricidad que la minería a Cielo Abierto.
- Se asumió que toda la energía generada por la planta es consumida, pudiendo ser por la misma minera o vendida al sistema interconectado correspondiente.
- No se considerará en la evaluación económica inversiones en sub-estaciones o algún tipo de tecnología con la finalidad de implementar y adaptar a condiciones de trabajo la energía generada con la finalidad de modificar sus parámetros de operación.

## **5.2. Información para la evaluación económica**

- El precio potencia de la energía que actualmente suministra el “Sistema Interconectado del Norte Grande” es 120 US\$/MWh, el cual se espera incremente a una tasa anual del 5%.



**Figura 19: “Proyección Consumo de Energía en División Codelco Norte periodo 2011-2030”**

Fuente: Elaboración propia.

#### **Aspectos a considerar en la evaluación:**

- La inversión necesaria para vender bonos de carbono es de 70.000 US\$/año y el valor que tienen estos corresponde a 15,64 US\$/CER. Cabe destacar que las emisiones evitadas corresponden a 54.820 MWh/año.
- Los costos fijos están relacionados a la capacidad de la planta los cuales ascienden a 70.000 US\$/MW año y los costos variables por generación suman 3 US\$/MWh. Ambos costos se asumen constantes durante todo el periodo de evaluación y constituyen el llamado costo de operación y mantención.
- La inversión necesaria para poder construir la planta y poner en marcha el proyecto corresponde a 3.000.000 US\$/MW, siendo esta la única inversión significativa considerada en la evaluación ya que a este nivel los costos en operación y mantención son marginales.
- Las condiciones y porcentajes mínimos de proveniencia de la energía exigidos en la ley 20.257 se mantendrán inalterables.
- Se asume que la cantidad de electricidad consumida en la DCN aumentará progresivamente en el tiempo.

- Se considera que el contrato pactado entre DCN y la generadora correspondiente para efectos de costos éstos se registrarán según estimación proyectada mencionada anteriormente (tasa 2,5% anual) y que no vencerán en el periodo a considerar (2011-2030). Además no hay cambios en los precios pactados para la electricidad independiente del nivel de consumo de energía.

### **5.3. Análisis caso 1**

DCN consume toda la energía de la planta solar con una potencia total igual a la que necesitaría para certificar el 10% de proveniencia de ERNC el año 2030, o sea 120 MWe. Por motivos de planificación de la construcción e implementación de una planta solar habría un desfase de tiempo entre el periodo que se produce el aumento en el consumo y el periodo en que entre en operación dicha planta.

Por lo anterior es que el consumo de electricidad proveniente de la planta solar sería paulatino pudiendo manejar variables por parte de la minera ya sea en los contratos de suministro eléctrico o de cambios estructurales de la alimentación de energía al sistema de transmisión interno.

A medida que vaya entrando en operación la planta deberían liberarse unidades de energía con la finalidad de ser consumidas debido a la mayor dificultad para la extracción y procesamiento del mineral.

Por último señalar que aún cuando todos los años aumente la demanda por energía el año 2030 debería DCN cumplir con las exigencias de la ley de ERNC asumiendo que se mantiene en un 10% la exigencia de la ley de ERNC. Tomando en consideración lo anteriormente señalado se tiene el siguiente flujo de caja:

Ver anexo 1.

Dado lo anterior se obtiene un VAN de 7.401.971 US\$ y una TIR de 11,38%, lo cual es una situación con muy probable de llevar a la realidad.

## 5.4. Análisis caso 2

Este caso considera que DCN decide realizar la inversión en una planta de energía solar capaz de generar el 10% del total de la electricidad consumida con la finalidad de acreditar proveniencia y cumplimiento con la ley de ERNC, basada en proyecciones actuales de la demanda al año 2030. Con lo anterior se espera que los excedentes de ley se puedan vender al sistema interconectado a través del mercado spot con la finalidad que la o las generadoras puedan evitar el pago de multas por concepto de acreditación de proveniencia de energías renovables.

La venta de excedentes quedará sujeta al cumplimiento de la ley de ERNC y al nivel de crecimiento de la demanda interna de electricidad. Esta cantidad de energía transada en el tiempo será cada vez menor.

Los excedentes de energía son vendidos al centro de despacho del sistema interconectado (SING) al precio de transacción. Según lo anterior a medida que transcurre el proyecto cada vez se transarán menos unidades de electricidad proveniente de ERNC.

Tomando como referencia una tasa de crecimiento del consumo anual del 5% (tasa a la cual crece la demanda por electricidad), se tiene que al llegar al último año del periodo de evaluación se consume toda la capacidad de la planta.

Para que al año 2030 DCN consuma toda la energía generada por la planta se debe partir de una base de consumo el año 2011 de 350.000 MWh/año aprox.

Por ello se realizó el siguiente flujo de caja del punto de vista de DCN:

Ver anexo 2.

Dado lo anterior se obtiene un VAN de 38.567.418 US\$/año, con un periodo de recuperación de la inversión de 6 años y una TIR de 17,71%, siendo levemente mayor que la tasa de descuento, por lo cual si se hace conveniente realizar el proyecto bajo este escenario.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo, se estudió la potencial alimentación de procesos mineros con electricidad generada a partir de energía solar; utilizando para ello tecnología disponible y que se encuentra en plena fase de desarrollo.

Se investigó la existencia de diversas barreras a la implementación de este tipo de sistemas basados en energía solar, enfocado específicamente a la industria minera. Como consecuencia de este estudio se encontró que las principales barreras corresponden a las de tipo técnicas, de entrada y políticas o institucionales. Regulación inexistente o poco clara cobran importancia al momento de evaluar una inversión por parte de privados no relacionados con el sector eléctrico.

Se identificó que dichas barreras pueden ser manejables en la medida que se perfeccione la legislación vigente y las políticas energéticas estatales. Se hace necesaria una regulación más rigurosa debido a las generadoras que deben cumplir la ley es menor al que se pretende, ya que existen contratos vigentes pactados al menos a 10 años y por lo tanto se debería esperar a que los contratos venzan.

La generación de electricidad a partir de energía solar se muestra como una alternativa real de ser usada en procesos de producción de cobre de grandes mineras del Norte Grande.

La evaluación económica mostró que una potencial inversión en una planta de energía solar por parte de una minera como es el caso de Codelco (División Codelco Norte) arroja beneficios importantes y se concluye que la solución óptima es la de invertir en una planta que entregue la energía necesaria para cumplir con la ley de ERNC al año 2030 y usar los excedentes de energía con la finalidad de disminuir la dependencia con la energía convencional.

Lo anterior podría provocar variaciones en el precio de corto plazo de la energía pactado entre mineras y generadoras.

Falta una política pública que incentive de manera real la inversión en energía solar internalizando los costos en salud y medioambientales de la generación eléctrica convencional principalmente la relacionada con centrales termoeléctricas.

Desde el punto de vista económico se hace necesario un mecanismo que garantice la venta de electricidad desde energía solar ya sea a través de subsidios o de cuotas aseguradas vendidas al sistema.

El análisis demostró que aún existen muchas barreras para que las empresas mineras inviertan en energía renovable para alimentar sus procesos productivos en forma directa. Las que tienen mayor incidencia en su evaluación de prefactibilidad son las de tipo técnica e institucional.

La ley por su parte no logra ser un real incentivo para avanzar en el uso de energía renovable y así también convertir una parte de la energía consumida desde fuentes renovables. Considerando además que el incumplimiento de la normativa que establece cuotas mínimas de utilización de energía proveniente de energías renovables considera multas aún insuficientes para lograr dicho objetivo debido a sus bajos montos, por lo cual resulta ser más rentable y conveniente pagar la multa que invertir en tecnología solar u otra energía renovable.

En cuanto a la evaluación económica realizada para los dos escenarios propuestos se llegó a la conclusión que la alternativa más viable es el consumo total por parte de la división Codelco Norte de la electricidad generada a partir de energía solar.

Los valores arrojados por la evaluación anterior implican una alta factibilidad económica en el desarrollo e implementación del proyecto. Los valores se obtuvieron desde la empresa SENER España la cual posee plantas de energía solar de tecnología de Concentradores Cilindro Parabólicos que están vigentes pero que no han podido superar una potencia instalada de 50 MWe por asuntos netamente normativos y legales pues perderían beneficios tributarios.

Hoy en Chile aún se están analizando diversas alternativas de consumo y venta de electricidad generada a partir de ERNC pero existen muchas barreras de diverso tipo.

Dentro de las barreras más importantes están las ocasionadas por el mismo mercado y la defensa corporativa de las generadoras al momento de cumplir con las exigencias.

Lo primero es decir que los resquicios legales no permiten que la ley se puede aplicar a cabalidad, pues debido a que la vigencia recae sobre contratos emanados después del año 2007 la opción que hay es que vayan venciendo los contratos, aún así los contratos puede que no se rehagan manteniéndose las condiciones contractuales.

Lo otro es que el mercado spot al ser de tipo marginalista daría prioridad a que entren en funcionamiento las centrales termoeléctricas pudiendo a veces no ser las más nuevas producto de los costos de operación por lo tanto las únicas soluciones a la inversión y posterior entrada en operación de plantas solares son a través de garantizar la compra de esa energía o el subsidio directo a la energía generada en planta solar.

En cuanto al aspecto medioambiental se concluye que la única forma que se incentive la generación de electricidad con tecnologías limpias es a través de una ley mucho más exigente en cuanto a la exigencia de proveniencia de la energía desde ERNC y además de una tasa a las centrales termoeléctricas por motivo de las externalidades principalmente en el área de la salud, provocadas con la operación de este tipo de centrales.

Por último decir que la elección de la tecnología escogida debe ser reevaluada en un horizonte de 10 años, tiempo que corresponde a la mitad de la vida útil de la tecnología de CCP para ver si existen otras que hayan superado los parámetros técnicos de generación.

En vista de lo anterior se propone como trabajo futuro el estudio de factibilidad de alimentación de procesos mineros en zonas menos privilegiadas en cuanto nivel de radiación solar y evaluar técnica y económicamente la alimentación de procesos mineros con tecnología con nivel de madurez medio de concentración solar como lo son las de torre central, paneles fotovoltaicos u otra tecnología solar que pudiera convertir a la minería en una industria sustentable energéticamente.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] [www.cdec-sing.cl](http://www.cdec-sing.cl)
- [2] Comisión Nacional de Energía, “Las Energías Renovables No Convencionales en el Mercado Eléctrico Chileno”. 2009.
- [3] STINE, Williams. B. y GEYER, Michael. POWER FROM THE SUN [en línea] <<http://www.powerfromthesun.net/book.htm>> [consulta: 27 noviembre 2010].
- [4] INCROPERA, Frank. P. y DE WITT, David P. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ª ed. México. Prentice Hall, 1999. 886p.
- [5] Kyocera, <http://global.kyocera.com/prdct/solar/>
- [6] Renewable Energies, its physics, engineering, use, enviromental impacts, economy and planning aspects. Bent Sorensen, Roskilde University. 2004.
- [7] Grid parity analysis of solar photovoltaics system in Germany using experiences curves. Ramchandra Bhandari, Ingo Stadler. Institute for Electrical Engineering, Cologne University of Applied Sciences. Solar Energy, Junio 2009.
- [8] Solar Parabolic Trough, Solarpaces. International Energy Agency.
- [9] Compact Linear Fresnel Reflector Solar Thermal Powerplants. David Mills, Graham Morrison. School of Physics, University of Sydney. Agosto 1999.
- [10] Solar termal collectors and applications, Soteris A. Kalogirou, Deparment of Mechanical Engineering, Higher Technical Institute, Chipre. Febrero 2004.  
  
Global Concentrated Solar Power Industry Report 2010-2011, Juan Martín Torres, Nuria Garzas, Carlos Márquez, CSP Today.
- [11] Steca Solar, <http://www.stecasolar.com/>
- [12] Heat Transfer Fluid (Fluido caloportador)
- [13] Solar termal collectors and applications, Soteris A. Kalogirou, Deparment of Mechanical Engineering, Higher Technical Institute, Chipre. Febrero 2004.

- [14] MAKSAEV, Victor. Pórfidos Cupríferos. Curso Metalogénesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 2007. 16p.
- [15] BISWAS, A.K. y DAVENPORT, W.G. El Cobre: metalurgia extractiva. México, Limusa, 1993. 470 p.
- [16] Decreto Supremo N° 327. Ministerio de Minería
- [17] CODELCO. Proceso productivo: extracción a rajo abierto [en línea] <<https://www.codelcoeduca.cl/proceso/extraccion/extraccion.asp>> [consulta: 27 noviembre 2010].
- [18] COMISIÓN CHILENA DEL COBRE. Coeficientes Unitarios de Consumo de Energía de la Minería del Cobre 2001-2007. Dirección de Estudios. Santiago, 2008. 33p.
- [19] CODELCO. Proceso productivo: lixiviación [en línea] <<https://www.codelcoeduca.cl/proceso/lixiviacion/lixiviacion.asp>> [consulta: 27 noviembre 2010].
- [20] CODELCO. Proceso productivo: flotación [en línea] <<https://www.codelcoeduca.cl/proceso/flotacion/flotacion.asp>> [consulta: 27 noviembre 2010].
- [21] CODELCO. Proceso productivo: fundición [en línea] <<https://www.codelcoeduca.cl/proceso/fundicion/fundicion.asp>> [consulta: 27 noviembre 2010].
- [22] CODELCO. Proceso productivo: electrorrefinación [en línea] <<https://www.codelcoeduca.cl/proceso/electrorrefinacion/electrorrefinacion.asp>> [consulta : 27 noviembre 2010].
- [23] Art. 172. Decreto Supremo N° 327. Ministerio de Minería
- [24] CSP TODAY. Global Concentrated Solar Power Industry Report 2010-2011.
- [25] Capítulo N°3 NTCS: “Exigencias mínimas para diseño de instalaciones”.
- [26] Ley 20.257. Ley que introduce modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales.
- [27] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (CNE), Las Energías Renovables No Convencionales en el Mercado Eléctrico Chileno. 2009. 123p.
- [28] Art. 172. Decreto Supremo N° 327. Ministerio de Minería.

- [29] MARTÍNEZ, Verónica. Estado del arte y evaluación técnica de la generación termosolar de electricidad. Memoria (Ingeniero Civil Químico). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2003. 103 h.
- [30] REDCO CONSULTORES MINEROS. Estudio de requerimientos energéticos para una faena de cobre operada a cielo abierto. 2010.
- [31] IDIEM y AMTC. Energía solar en minería: opciones de desarrollo para el siglo XXI. Santiago, Chile. 2010. 162p.
- [32] ROJAS V, Romina. Estrategias de negocios para grandes consumidores en el nuevo marco legal de energías renovables no convencionales. Memoria (Ingeniero Civil Electricista). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009. 169 h.
- [33] FLORES, Carlos. Optimización técnico-económica de un sistema de producción de calor solar para el proceso de electro-obtención de cobre. Tesis (Magíster en Ciencia de la Ingeniería, mención Mecánica). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009. 122 h.
- [34] DÍAZ, Felipe. Análisis técnico económico de cogeneración para la empresa minera. Memoria (Ingeniero Electricista). Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2009. 116 h.
- [35] REDCO CONSULTORES MINEROS. Estudio de requerimientos energéticos para una faena de cobre operada a cielo abierto. 2010.
- [36] Fuente: Global Concentrated Solar Power Markets and Strategies: 2010-2025. IEH, Emerging Energy Research. Abril 2010.
- [37] Fuente: “Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la minería del cobre de Chile”, COCHILCO, 2009.