



**UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS**

**FACTIBILIDAD DEL USO DE RADIACIÓN SOLAR COMO
FUENTE DE ENERGÍA EN UN HORNO DE FUNDICIÓN
FLASH**

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

YERKO ANDRES LETELIER LETELIER

PROFESOR GUÍA

Dr. René Contreras Nakagawa

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

Dr. Claudio Tenreiro Leiva

Dr. Diógenes Hernández Espinoza

CURICÓ - CHILE

2021

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'.

Curicó, 2022

RESUMEN

Escasez de agua por un lado y fuentes de energías basadas en combustibles fósiles por otro, generan una creciente problemática para el territorio ambientalmente frágil. Esto sugiere que la escasez de fuentes energéticas convencionales debe ser compensada con un conjunto de alternativas como centrales hidroeléctricas y termoeléctricas, centrales solares, eólicas, mareomotrices, entre otras. En 2018 la importancia del sector minero se situó en el 10,1% del PIB nacional y 15% del consumo energético en Chile proviene de dicho sector. Teniendo en cuenta el potencial del recurso solar, se pretende reemplazar el proceso pirometalúrgico pensando en las ventajas medioambientales, económicas y de sustentabilidad que implicaría el uso de la radiación solar. Basado en las estimaciones de la presente investigación, se evalúa un horno de fusión con un campo de heliostatos de 75 m^2 que proporciona una potencia global promedio 14.5 GJ/m^2 al año, índices de reflectividad de $\rho = [0.94 - 0.89]$, índices de recuperación metalúrgica y estimaciones de transmisividad atmosférica basadas en el Modelo de Hottel (1976). Resultados indican que se logra procesar en promedio anual, 143.47 toneladas de fino de Cobre, 273.14 toneladas de fino en Nitratos Naturales y 531.08 toneladas de fino para Prilados de Yodo, además de ser adaptado a procesos como secado/tostación, precipitado y lixiviación para recursos minerales tales como el oro, plata, zinc y carbonatos de litio. Finalmente, se considera que indispensable aprovechar el potencial energético del norte y centro del país, a fin de aumentar la cadena de valor y generar procesos sustentables a mediano y largo plazo en la industria minera nacional.

Palabras Claves: Procesos mineros, medioambiente, radiación solar, potencia energética.

ABSTRACT

On one hand, water shortage, and on the other hand energy sources based on fossil fuels generate a growing problem for the environmentally fragile territory. This situation suggests that the shortage of conventional energy sources must be offset with a mix of alternatives, such as hydroelectric plants and thermoelectric, solar plants, wind power, tidal plants, among others. In 2018, the importance of the mining sector averaged 10.1% of national gross domestic product, and a 15% of energy consumption in Chile comes from the mentioned area. Taking into consideration the potencial of the solar resource, the intention is to replace the pyrometallurgical process thinking of the environmental, economical, and sustainability advantages that would imply the use of solar radiation. According to the current research estimate, a melting furnace with a 75 m^2 heliostats field is reviewed, which provides a 14.5 GJ/m^2 average global power per year, $\rho = [0.94 - 0.89]$ reflectivity rates, metallurgical recovery rates, and atmospheric transmissivity estimates, based on the Hottel Model (1976). The results indicate that 143.47 tons of fine copper, 237.14 tons of fine in Natural Nitrates, and 531.08 tons of fine for Iodine Prillates are processed annually, in addition to be adapted to processes such as drying / roasting, precipitate and leaching for mineral resources as gold, silver, zinc, and lithium carbonates. Finally, it is considered essential to take advantage of the energy potential of the center and south of the country, for the purpose of increasing the value chain and generating sustainable processes at a medium and long term in the national mining industry.

Key words: Mining processes, environment, solar radiation, energy power.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia cercana por el apoyo y contención en este proceso. A todos y cada una de las personas que, a lo largo de mi vida, me han visto crecer, desarrollarme y han creído en mis capacidades. Vecinos de infancia, amigos de vida y personas que se han transformado en mi familia. A esas personas que están de paso por tu vida y te muestran aprecio, cariño y palabras de motivación, dándote esa contención tan necesaria en periodos de dificultad. A quienes de una u otra forma te ofrecen apoyo desinteresado y sienten orgullo por tus logros personales.

A mi hermana Sonia Loreto por mostrarme que siempre existirá alguien que este contigo en los peores momentos, sin importar la distancia ni las circunstancias, por corregirme y forjarme a ser mejor persona, con valores y educación, creer en mi potencial y hacerme parte de sus sueños, que es verme convertido en un futuro profesional.

A Francisco, Gaspar y Cristian, por ser los hermanos que la vida me concedió, por su apoyo, paciencia, carisma y las buenas personas que han logrado ser. Gracias por ser parte de este proceso, por compartir momentos del día a día, por la oportunidad de ser parte de sus vidas y el aprecio que me han entregado. Son los hermanos más unidos que he conocido en mi vida, los aprecio mucho.

A Dayan, Daniel, Gerardo, Adolfo, Ángelo, José, Carlos y Javier, por la amistad que hemos forjado y mantenido por años. Son parte importante de mi vida, mis logros son los suyos, asimismo como lo son para mí los suyos. Los aprecio bastante y como siempre he creído, los amigos son la familia que uno elige en la vida. Agradecido por nuestras conversaciones tan diversas, nuestros momentos de risas y diversión, por hacerme parte de sus vidas. Creo que tienen unos padres maravillosos, que logran transmitir el esfuerzo, sencillez y humildad que uno debe tener en la vida, gracias por darme la oportunidad de conocerlos y a ustedes por estar siempre presente, ni la distancia ni las circunstancias pueden quebrantar una amistad como la nuestra.

A los profesores que he tenido a lo largo de mi formación académica, sin la ayuda, apoyo y formación que entregan, esto no sería posible. Este logro es un pequeño reconocimiento a su importante labor.

Por último, creo que cada persona es importante en la vida de los demás, puesto que entregan enseñanzas, pensamientos y formas de ver la vida, que te ayudan a mirar la vida desde otro punto de vista. Todos logran incidir de una u otra forma en tu persona. A cada uno de ellos, gracias por contribuir en convertirme en la persona que soy hoy en día y esta es una pequeña muestra de mi agradecimiento hacia ustedes.

DEDICATORIA

A mis familiares, amigos y cercanos. A la unidad académica y a todos quienes contribuyeron en la realización de esta investigación.

(La historia de las ciencias nos demuestra que las teorías son perecederas. Con cada nueva verdad revelada, tenemos una mejor comprensión de la naturaleza y nuestras concepciones, y nuestros puntos de vista, se modifican)

Nikola Tesla

INDICE

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Introducción | 12 |
| 1.1 | Antecedentes Generales | 15 |
| 1.1.1 | La Minería en Chile | 15 |
| 1.1.2 | Principales Procesos Mineros | 16 |
| 1.1.2.1 | Pirometalurgia | 18 |
| 1.1.2.2 | Hidrometalurgia | 19 |
| 1.1.3 | Industria Minera y Consumo Energético | 20 |
| 1.1.4 | Energía en Chile y el Mundo | 22 |
| 1.2 | Motivación | 24 |
| 1.3 | Descripción del Problema | 25 |
| 1.4 | Alternativa Propuesta | 25 |
| 1.5 | Objetivos | 26 |
| 1.5.1 | Objetivo General | 26 |
| 1.5.2 | Objetivos Específicos | 26 |
| 1.6 | Alcance | 26 |
| 1.7 | Análisis de Antecedentes | 28 |
| 1.7.1 | Recopilación de Información y Estados del Arte | 28 |
| 1.7.2 | Marco Teórico | 28 |
| 1.7.3 | Análisis de Datos | 28 |
| 1.7.4 | Resultados, Conclusiones y Sugerencias | 29 |
| 2 | Marco Teórico | 30 |
| 2.1 | Minería Extractiva | 30 |
| 2.1.1 | Minería Metálica | 30 |
| 2.1.1.1 | Oro (Au) y Plata (Ag) | 30 |
| 2.1.1.2 | Cobre (Cu) | 32 |
| 2.1.1.3 | Zinc (Zn) | 35 |
| 2.1.2 | Minería No Metálica | 36 |
| 2.1.2.1 | Carbonato de Litio (Li₂CO₃) | 36 |
| 2.1.2.2 | Yodo (I) | 38 |
| 2.1.2.3 | Nitratos Naturales (NaNO₃, KNO₃) | 40 |
| 2.2 | Flujos de energía entre el Sol y la Tierra | 42 |
| 2.2.1 | Geometría entre el Sol y la tierra | 42 |
| 2.2.2 | Comportamiento de rayos en un sistema | 46 |
| 2.3 | Energía Solar Térmica | 47 |
| 2.3.1 | Recurso Solar | 48 |
| 2.3.2 | Distribución espectral de la radiación extraterrestre | 48 |
| 2.3.3 | Atenuación de la Radiación Solar | 49 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 2.3.4 | Absortividad, Reflectividad y Transmisividad..... | 52 |
| 2.3.5 | Tipos de Radiación..... | 56 |
| 2.3.6 | Calor Específico y Capacidad Calorífica..... | 57 |
| 2.4 | Concentradores Solares (CS)..... | 57 |
| 2.5 | Principales componentes para la Concentración Solar | 59 |
| 2.5.1 | Elementos principales..... | 59 |
| 2.5.2 | Pérdidas asociadas al sistema..... | 61 |
| 2.5.3 | Rendimiento..... | 64 |
| 2.6 | Principio de Concentradores Parabólicos | 65 |
| 2.6.1 | Concentradores Solares de Receptor Fijo..... | 66 |
| 2.7 | Hornos Solares de Alta Temperatura..... | 67 |
| 2.8 | Principios de la Transferencia de Calor | 70 |
| 2.8.1 | Radiación..... | 70 |
| 2.8.2 | Concepto de Régimen Transitorio..... | 74 |
| 2.9 | Horno de Fusión Flash | 74 |
| 2.9.1 | Tecnologías utilizadas para la fusión..... | 75 |
| 2.9.2 | Aspectos Técnicos del Horno de Fundición Flash | 76 |
| 3 | Metodología..... | 78 |
| 3.1 | Describir el contexto actual del consumo energético en Chile y el mundo..... | 78 |
| 3.2 | Desarrollo del Marco teórico | 79 |
| 3.3 | Estudio de variables cuantitativas y posterior análisis de datos..... | 81 |
| 4 | Análisis de Resultados..... | 83 |
| 4.1 | Recurso Solar Disponible | 83 |
| 4.1.1 | Posición Geométrica Sol – Tierra..... | 83 |
| 4.1.2 | Irradiancia Solar Atmosférica ($I_0 \rightarrow I_i$)..... | 87 |
| 4.1.3 | Irradiancia Directa sobre una Superficie ($I_i \rightarrow I_r$)..... | 90 |
| 4.1.4 | Irradiación Solar Efectiva ($I_r \rightarrow I_{abs}$)..... | 92 |
| 4.2 | Balance Térmico | 96 |
| 4.2.1 | Cuantificación de Consumo Energético por proceso..... | 96 |
| 4.2.2 | Producción Estimada..... | 98 |
| 5 | Conclusiones..... | 107 |
| 6 | Referencias Bibliograficas..... | 110 |
| 7 | Anexos..... | 113 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 PIB del sector minero y su participación en el PIB nacional al tercer trimestre de 2020. Fuente: (CM, 2020a)..... | 15 |
| Figura 1.2: Consumo energético nacional y el impacto del sector Industrial y Minero. Fuente: (CNE, 2015) . | 20 |
| Figura 1.3: Consumo del sector Industrial y el sector Minero. Fuente: (CNE, 2015)..... | 21 |
| Figura 1.4: Participación sobre el consumo energético de los principales recursos mineros. Fuente: (CNE, 2015) | 21 |
| Figura 1.5: Participación de fuentes de energías como Petróleo, Gas Natural y Carbón (1990 - 2018). Fuente; Enerdata, 2018..... | 22 |
| Figura 1.6 Mapa de los cambios observados en la temperatura en superficie entre 1901 y 2012. Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013..... | 23 |
| Figura 1.7 Mapa mundial de recursos solares. Fuente: Solagris, 2017 | 24 |
| Figura 2.1: Recuperación de Oro y Plata con Carbón Activado. Fuente: (911Metallurgist, 2012) | 32 |
| Figura 2.2: Procesos de Producción del Cobre. Fuente: (Instituto Europeo del Cobre, 2018) | 33 |
| Figura 2.3 Principales procesos para la extracción de cobre sulfurado. Las líneas paralelas indican procesos alternativos. *Principalmente Fundición Mitsubishi y Vanyukov. Fuente: (Biswas & Davenport, 2013) | 34 |
| Figura 2.4: Metalurgia extractiva para la obtención de Zinc. Fuente: (Payno Herrera & Setién Marquínez, 2012) | 35 |
| Figura 2.5: Diagrama del proceso de obtención de carbonato de litio. Fuente: (Gutiérrez Parra, 2018)..... | 37 |
| Figura 2.6: Diagrama del proceso de obtención de yodo basado en las operaciones de Planta María Elena (SQM). Fuente: (Garcés Milla, 2000)..... | 39 |
| Figura 2.7: Proceso productivo del yodo, nitrato de potasio y nitrato de sodio. Fuente: (Guerrero Forno, 2012) | 40 |
| Figura 2.8: Diagrama de procesos de la planta Pedro de Valdivia. Fuente:(Franzosi & Montagna, 2007)..... | 41 |
| Figura 2.9: Representación de los conceptos geográficos de latitudes y longitudes. Fuente:(Fernández-Coppel, 2010)..... | 42 |
| Figura 2.10 Comportamiento del ángulo de declinación solar durante el año. Fuente: (PATEI, 1998)..... | 43 |
| Figura 2.11 Variación de la declinación solar (δ) durante el año en el hemisferio sur. Fuente: Fundación Descubre, 2015 | 44 |
| Figura 2.12 Esquemmatización de las relaciones geométricas entre el Sol y la Tierra. Fuente: (Red Nacional de Radio de Emergencia, 2019)..... | 45 |
| Figura 2.13 Representación de los principios básicos de la Reflexión Especular. | 46 |
| Figura 2.14 Representación de la Reflexión Especular y Reflexión Difusa. Fuente: (Pesa et al., 1995)..... | 47 |
| Figura 2.15: Distribución espectral de la radiación irradiada por el Sol y la Tierra. Fuente: (IDEAM, 2014).... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.16: Atenuación de la radiación solar por la atmosfera terrestre. Fuente: (IDEAM, 2014)..... | 50 |
| Figura 2.17: Absorción, reflexión y transmisión de la radiación por un material semitransparente. Fuente: (Ibarra Salazar & Rojas Pacheco, 2012) | 53 |
| Figura 2.18: Tipos de radiación solar en la atmosfera terrestre. Fuente:(Adler et al., 2013)..... | 56 |
| Figura 2.19 Representación de distintos tipos de concentradores solares. De izquierda a derecha, de arriba hacia abajo. Concentrador Cilindro-Parabólico, Concentradores Fresnel Lineal, Placas de Receptor Lineal y Concentrador Disco-Parabólico. Fuente: Revista Digital EsEnergia España,2020. | 58 |
| Figura 2.20 Capacidad global de concentración de energía solar térmica, por país y región. (2009-2019) Fuente: Informe de estado global de energías renovables 2020. REN21. | 59 |
| Figura 2.21: Disposiciones para el campo de heliostatos. Izquierda: Campo N-S, Derecha: Campo Circundante. Fuente: (Paredes, 2012)..... | 61 |
| Figura 2.22: Pérdidas por el Factor Coseno. Fuente. (Paredes, 2012)..... | 62 |
| Figura 2.23: Pérdidas debido a la geometría de los heliostatos y disposiciones. Izquierda: Pérdidas por sombras. Derecha. Pérdidas por bloqueo. Fuente: (Paredes, 2012)..... | 63 |
| Figura 2.24: Diagrama de flujo del rendimiento del sistema de torre central. Fuente: Elaboración propia basado en (Paredes, 2012)..... | 64 |
| Figura 2.25 Esquemmatización del Principio de reflexión en espejos parabólicos cóncavos | 65 |
| Figura 2.26 Representación de un Concentrador de Paraboloide Fijo o Heliostato Auxiliar. Fuente: (CC San Martin, 2012)..... | 66 |
| Figura 2.27 Horno Solar de Odeillo, Francia..... | 68 |
| Figura 2.28 Esquemmatización de diseño del Horno Solar de Odeillo, Francia..... | 68 |
| Figura 2.29: Horno Solar Mont Louis, Francia. Fuente: Pyrénées Cerdagne,2017..... | 69 |
| Figura 2.30: Plataforma Solar de Almería, España. Fuente:(SOTO, 2009)..... | 69 |
| Figura 2.31: Diferentes comportamientos de la radiación en un cuerpo. Fuente: (Domínguez et al., 2017) .. | 71 |
| Figura 2.32: Energia total liberada por radiación en la superficie de un cuerpo. Fuente: (Domínguez et al, 2017)..... | 72 |
| Figura 2.33: Esquemmatización del concepto del factor de forma. Fuente: (Domínguez et al., 2017)..... | 73 |
| Figura 2.34 Dimensionamiento del Horno de fundición Flash. Fuente:(Schlesinger et al., 2011)..... | 75 |
| Figura 2.35: Tipos de Tecnologías de Fundición. Fuente:(Pérez Vallejos, 2017) | 76 |
| Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso de Antecedentes Generales. Fuente: Elaboración Propia..... | 78 |
| Figura 3.2: Diagrama de flujo que corresponde a Marco Teórico. Fuente: Elaboración Propia..... | 79 |
| Figura 3.3 Diagrama de flujo sobre el Estudio de variables cualitativas. Fuente: Elaboración Propia..... | 81 |
| Figura 4.1 Screenshot correspondiente a página web Explorador Solar. Fuente:(Solar, 2017) | 84 |
| Figura 4.2: Altura solar (hs) para el año 2021 en Mina Maricunga. Fuente: Elaboración propia basado en (SunEarthTools, 2021)..... | 85 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.3: Altura solar (hs) para el año 2021 en Mina Los Bronces. Fuente: Elaboración propia basado en (SunEarthTools, 2021)..... | 86 |
| Figura 4.4: Altura solar (hs) para el año 2021 en Faena Aguas Blancas. Fuente: Elaboración propia basado en (SunEarthTools, 2021)..... | 86 |
| Figura 4.5: Radiación Directa en Plano Inclinado en función de la Transmisividad Atmosférica. Fuente: Elaboración propia basado en (SunEarthTools, 2021) y (Hermosillo Villalobos et al., 1995)..... | 90 |
| Figura 4.6: Ciclo de radiación incidente, reflejada y absorbida desde el punto A al punto C. Fuente: Elaboración propia realizada en (Adobe Illustrator, 2021)..... | 95 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1 Subetapas de la Metalurgia Extractiva. Fuente: Elaboración propia basado en (Restrepo Baena et al, 2008)..... | 17 |
| Tabla 2.1: Factores de corrección para algunos tipos de climas. Fuente: Elaboración propia basado en (Hermosillo Villalobos et al., 1995)..... | 52 |
| Tabla 2.2: Reflectancia especular normal solar de diversas superficies. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)..... | 55 |
| Tabla 2.3: Transmitancia solar para vidrio grabado y no grabado en función del ángulo de incidencia. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)..... | 55 |
| Tabla 2.4: Características técnicas del Horno de Fusión Flash. Fuente: (Code lco, 2015)..... | 77 |
| Tabla 4.1 Valores de declinación solar (en grados decimales) para los días 15 de cada mes acumulados del año. Fuente: Elaboración propia basado en el Anexo 2..... | 83 |
| Tabla 4.2: Localización de puntos relevantes en grados y coordenadas UTM. Fuente: Elaboración propia basada en Google Earth..... | 84 |
| Tabla 4.3: Valores de azimut (γ) y altura solar (hs) en grados decimales de las tres localidades seleccionadas. Fuente: Elaboración propia basado en (SunEarthTools, 2021)..... | 85 |
| Tabla 4.4: Radiación Normal Extraterrestre. Fuente: Elaboración propia basado en (Hermosillo Villalobos et al., 1995)..... | 87 |
| Tabla 4.5: Estimación de la Transmisividad Atmosférica para la Mina Maricunga durante el 15 de Noviembre del 2021. Fuente: Elaboración propia basado en (Hermosillo Villalobos et al., 1995)..... | 88 |
| Tabla 4.6: Irradiancia total en función de la transmisividad atmosférica anual expresada en ($kWh/m^2/x$ mes) para las tres localidades. Fuente: Elaboración propia basado en (Hermosillo Villalobos et al., 1995)..... | 89 |
| Tabla 4.7: Reflectividad sobre la Irradiancia Directa de un Plano Inclinado para la Faena Aguas Blancas basado en el “Vidrio de baja reflectancia con plateado posterior” (Coef.R1) y “Aluminio de alta pureza procesado en bruto” (Coef.R2). Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)..... | 91 |
| Tabla 4.8: Reflectividad sobre la Irradiancia Directa de un Plano Inclinado para la Mina Los Bronces basado en el “Vidrio de baja reflectancia con plateado posterior” (Coef.R1) y “Aluminio de alta pureza procesado en bruto” (Coef.R2). Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 4.9: Reflectividad sobre la Irradiancia Directa de un Plano Inclinado para la Mina Maricunga basado en el “Vidrio de baja reflectancia con plateado posterior” (Coef.R1) y “Aluminio de alta pureza procesado en bruto” (Coef.R2). Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)..... | 92 |
| Tabla 4.10: Aproximación lineal de los parámetros de vidrio grabado. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)..... | 93 |
| Tabla 4.11: Estimación de transmitancia de <i>vidrio grabado</i> para la Faena Aguas Blancas. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)..... | 93 |
| Tabla 4.12: Estimación de transmitancia de <i>vidrio grabado</i> para la Mina Los Bronces. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)..... | 94 |
| Tabla 4.13: Estimación de transmitancia de <i>vidrio grabado</i> para Mina Maricunga. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)..... | 94 |
| Tabla 4.14: Estimación de Irradiación Total en $MJm^2 \cdot dia$. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)..... | 96 |
| Tabla 4.15: Consumo energético para diferentes procesos térmicos de algunos recursos minerales. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017)..... | 97 |
| Tabla 4.16: Producción en términos de $ton/xdia$ en función de la disponibilidad energética de 75 m^2 de heliostatos para la Faena Aguas Blancas. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017)... | 98 |
| Tabla 4.17: Producción en términos de $ton/xdia$ en función de la disponibilidad energética de 75 m^2 de heliostatos para la Mina Los Bronces. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017)..... | 99 |
| Tabla 4.18: Producción en términos de $ton/xdia$ en función de la disponibilidad energética de 75 m^2 de heliostatos para la Mina Maricunga. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017)..... | 100 |
| Tabla 4.19: Producción en términos de $ton/xmes$ en función de la disponibilidad energética de 75 m^2 de heliostatos para la Faena Aguas Blancas. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).101 | |
| Tabla 4.20: Producción en términos de $ton/xmes$ en función de la disponibilidad energética de 75 m^2 de heliostatos para la Mina Los Bronces. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017)..... | 102 |
| Tabla 4.21: Producción en términos de $ton/xmes$ en función de la disponibilidad energética de 75 m^2 de heliostatos para la Mina Maricunga. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017)..... | 103 |
| Tabla 4.22: Energía total estimada del recurso solar por el campo de heliostatos en un año. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017)..... | 104 |
| Tabla 4.23: Producción Total Estimada por proceso para las tres localizaciones basado en el aporte energético anual del sistema. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017). | 104 |
| Tabla 4.24: Índices metalúrgicos de recuperación para el tipo de proceso. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017)..... | 105 |
| Tabla 4.25: Producción Total estimada por proceso, basado en la aplicación de índices metalúrgicos de recuperación. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017). | 106 |

ANEXOS

| | |
|--|-----|
| Anexo 1: Balance Nacional de Energía para 2018. Fuente: (Comision Nacional de Energia, 2019)..... | 113 |
| Anexo 2: Declinación Solar Anual con variación diaria. Fuente: Elaboración propia basado en (PATEI, 1998). | 114 |
| Anexo 3: Propiedades Térmicas de diversos elementos y compuestos. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)..... | 115 |
| Anexo 4: Estimación de calor específico y capacidad térmica para el concentrado de cobre típico (30% en <i>Cu</i>) para procesos de Secado y Fundición. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)..... | 116 |
| Anexo 5: Estimación de calor específico y capacidad térmica para el concentrado de metal doré típico (11.8% en <i>Au</i> y 9.4% <i>Ag</i>) para procesos de Secado y fundición. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013) | 117 |
| Anexo 6: Estimación de calor específico y capacidad térmica para carbonatos de litio típico (25.5% en <i>Li</i>) para procesos de Secado y Precipitado de sales. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)..... | 118 |
| Anexo 7: Estimación de calor específico y capacidad térmica para sales de nitratos típico (45% en <i>NaNO3</i> y 2-3% en <i>K</i>) en procesos de Secado y Fundición. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)..... | 119 |
| Anexo 8: Estimación de calor específico y capacidad térmica para el concentrados de zinc típico (42.5% en <i>Zn</i>) para procesos de Secado y Lixiviación. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)..... | 120 |
| Anexo 9: Estimación de calor específico y capacidad térmica para sales de nitratos típico (producción de yodo en un 19% en <i>I2</i>). Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)..... | 121 |
| Anexo 10: Mapas regionales para Chile continental, exponiendo la disponibilidad de recurso solar en todo el territorio según su tipo (GHI, DNI e Irradiancia Horizontal Difusa, DHI) así como su distribución climatológica según la clasificación de Köppen-Geiger. Fuente: (Escobar & Castillejo-Cuberos, 2020)..... | 122 |

1 INTRODUCCIÓN

El sector de minería e hidrocarburos ha representado en Chile entre un 13% y un 20,6% del PIB en los últimos 10 años. En términos de valor agregado, el sector minero representa casi 200 veces el tamaño del sector acuícola, 24 veces el del sector forestal, 17 veces el sector vitivinícola, etc. (Correa Mautz, 2016). En los procesos primarios de extracción de diversos metales, existen etapas posteriores para la obtención de metales de interés económico. Estas etapas corresponden a la metalurgia extractiva, donde se destacan los procesos de Pirometalurgia e Hidrometalurgia.

La Pirometalurgia se lleva cabo mediante operaciones por vía seca que se realizan a altas temperaturas entre productos en estado sólido, líquido o gaseoso (Muñoz Portero, 2016b). Este proceso se basa en la separación del metal a partir del mineral con presencia de una fase acuosa y alta temperatura. La Hidrometalurgia en cambio, involucra procesamiento de minerales con valioso contenido metálico, donde el uso de agua es fundamental, en medios ácidos, alcalino o neutra, para una disolución de mayor selectividad posible; uno de los procesos representativos de la hidrometalurgia es la lixiviación (Suero Iquiapaza, 2018).

En la corteza terrestre existen diversas formaciones de minerales destacando los minerales sulfurados y minerales oxidados u óxidos. Los minerales sulfurados están constituidos por el enlace entre el azufre y elementos metálicos tales como cobre, hierro, molibdeno, plomo y zinc, entre otros (Minmin, 2017). En cambio, los minerales oxidados se refiere al proceso de oxidación de un yacimiento, es decir, el ataque del mineral por parte del oxígeno proveniente de la atmósfera bajo la forma de fluidos oxidantes (agua, aire). Por esta razón, estos minerales se forman cerca de la superficie (Minmin, 2017).

Dependiendo del tipo de formación del mineral y el metal a extraer, se evalúa el proceso de metalurgia extractiva más conveniente para su procesamiento. En este sentido y basado en (CM, 2015), para los minerales sulfurados el proceso de extracción posee una mayor complejidad, desde ubicaciones a mayor profundidad que repercute directamente en la dureza hasta los procesos de separación del metal. Para este tipo de minerales es utilizada la pirometalurgia como método de separación.

Existen dos subetapas de interés que generan ventajas para los procesos de pirometalurgia e hidrometalurgia respectivamente. El secado de concentrados (subetapa de la pirometalurgia), corresponde a la reducción del porcentaje de humedad post flotación de (14% -18%) de H_2O a (8% - 10%) de H_2O en secado parcial o (0,1% - 0,3%) de H_2O en secado a muerte (Riveros Urzúa, 2011). En este proceso no existe transformación química y tiene como objetivo reducción en los costos de transporte, mejorar la operación de los hornos de fusión, lo que implica una reducción de costos en términos energéticos. Por otra parte, la subetapa para la hidrometalurgia corresponde a la tostación, tiene como principal objetivo la oxidación parcial de sulfuros secundarios (más cercanos a la superficie y mayor cinética) (Cochilco, 2017), debido a que existe una liberación de SO_2 en el proceso, compuesto que puede ser utilizado para la producción de ácido sulfúrico utilizado en las pilas de lixiviación. La temperatura de operación para este proceso bordea entre los $500^{\circ}C$ – $800^{\circ}C$ (Riveros Urzúa, 2011).

En base al consumo energético que implican los diversos procesos en la minería y teniendo en cuenta el potencial del recurso solar, en conjunto con las nuevas tecnologías incorporadas en la industria energética durante las últimas décadas, el enfoque de este estudio busca como finalidad, reemplazar el proceso pirometalúrgico tomando en cuenta las ventajas medioambientales, económicas y de sustentabilidad que implicaría el uso de la radiación solar.

En la misma línea se busca un modelo energético sostenible, aquel caracterizado por unos patrones de producción y consumo que compatibilizarán el

desarrollo económico, social y ambiental, satisfaciendo las necesidades energéticas de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades (Núñez et al., 2017).

Para explicar este modelo energético sostenible, se considera que el Sol en su núcleo produce continuamente reacciones atómicas de fusión nuclear que convierten el hidrógeno en helio. Este proceso libera gran cantidad de energía que sale hasta la superficie visible del Sol (fotosfera), y escapa en forma de rayos solares al espacio exterior. Solo una pequeña parte de la energía resultante de las reacciones que tienen lugar al interior del Sol llega a la superficie terrestre; aun así, es la fuente de energía más abundante de que disponen los seres vivos (Fabre Morales, 2013). Por otro lado, la constante solar es la energía que incide por unidad de área y en unidad de tiempo sobre una superficie orientada normalmente a la dirección de la propagación de la radiación solar y situada en el exterior de la atmósfera terrestre. Este valor varía ligeramente y equivale en valor promedio a 1367 W/m^2 . La radiación emitida por el Sol se distribuye en un amplio espectro de longitudes de onda correspondiendo la mayor parte de la energía radiada a la porción comprendida entre 0.2 y $3.0 \mu\text{m}$, con una distribución espectral muy similar a la producida por un cuerpo negro a 5777 K (Núñez et al., 2017).

Finalmente, uno de los principios de esta investigación busca la factibilidad técnica de la radiación solar como fuente de energía para ser utilizada en un horno de fundición Flash, con el propósito de generar un proceso sustentable y amigable con el medioambiente, y a su vez, generar innovaciones en los procesos mineros convencionales.

1.1 Antecedentes Generales

1.1.1 La Minería en Chile

Durante los siglos XIX y XX, Chile se posicionó como importante productor de cobre a nivel mundial y recibió ingenieros y especialistas en minas y metalurgia desde el extranjero. Asimismo, creció la inversión extranjera en el rubro minero, especialmente norteamericana, inglesa, francesa, alemana e italiana. Adelantos como el uso de carbón mineral, la construcción de ferrocarriles y nuevas fundiciones dieron un gran impulso a la minería nacional (CM, 2020b). La gran minería se ubica principalmente en 7 regiones de país (Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins), asimismo la participación de la grandes empresas en la producción minera corresponde a 97% de Molibdeno (Mo), 94% de Cobre (Cu), 71% de Plata (Ag), 55% de Oro (Au) y 100% de los Nitratos Naturales (CM, 2020c).

Según la Figura 1.1, en el año 2018 la importancia del sector minero se situó en el 10,1% del PIB nacional, destacando la participación de la minería del cobre, con un 9,0% del PIB (ICEX, 2018). El compromiso por una minería sostenible y su impacto en el medioambiente, la sociedad y la economía, la gran minería en Chile genera un aporte en 11 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2015).

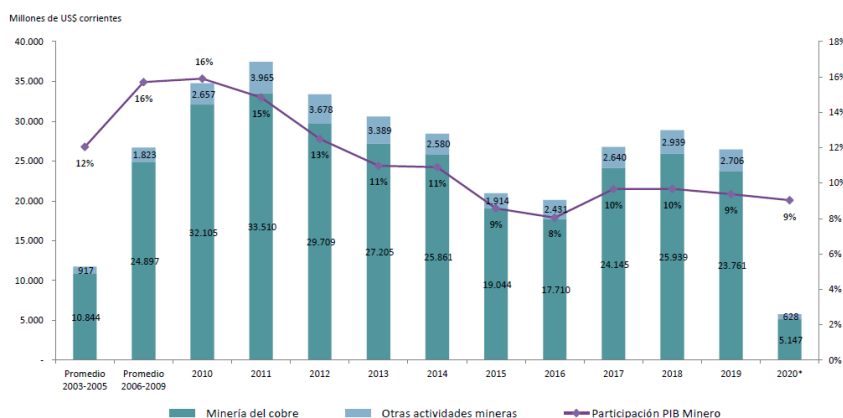


Figura 1.1 PIB del sector minero y su participación en el PIB nacional al tercer trimestre de 2020.
Fuente: (CM, 2020a)

La minería no metálica de Chile comprende una gran variedad de productos que constituyen la materia prima para diversos sectores industriales, por lo que también es común referirse a estos productos como minerales industriales. Existen también en el país otros yacimientos de recursos empleados en la construcción, como los áridos y arcillas, en el ámbito manufacturero (baritina, carbonatos blancos, caolín, feldespato y talco), en la agroindustria (apatita, bentonita, diatomita, dolomita y guano), y en la preservación del medio ambiente (bentonita, diatomita, perlita y zeolitas),(Sernageomin, 2019b).

1.1.2 Principales Procesos Mineros

Un primer concepto importante a considerar se relaciona con el tipo de mineral que se busca extraer. En términos generales, los minerales se clasifican en metálicos y no metálicos según (Minmin, 2018). Dado lo anterior, su extracción y preparación previa, seguirá métodos diferentes según el recurso que se pretende explotar.

En la actualidad ciertos yacimientos mineros en exploración cuentan con minerales diseminados, los cuales son procesados a partir del beneficio de minerales, estos procesos constan de un conjunto de operaciones físicas que tiene como objetivo liberar los valores de los materiales estériles y obtener un concentrado de valores con alta ley y recuperación en forma rentable (De La Rosa et al., 2007). En la minería metálica, el conjunto de operaciones físicas se relaciona con la reducción de tamaño, que tiene por objetivo la manipulación y manejo del mineral, liberar las especies valiosas contenidas en ellas y preparar el mineral para sus procesos posteriores de concentración (Navarro Donoso, 2014).

En tanto, la minería no metálica, comprende la actividad de extracción de recursos minerales que, luego de un tratamiento especial, se transforman en productos que por sus propiedades físicas y/o químicas pueden aplicarse a usos industriales y agrícolas. Por ejemplo, salitre, yodo, yeso, carbonato de litio, potasio,

carbonato de calcio, cal, asbesto, arcillas comunes o sulfato de sodio (Minmin, 2018). Dicha preparación depende de las características físicas del mineral destacando dos vías para su extracción.

La extracción en seco es similar para minerales sueltos y consolidados, con la diferencia de que estos últimos deben ser arrancados primero de la roca; luego, al igual que en la explotación de materiales sueltos, serán cargados, transportados y procesados mecánicamente. En la explotación por vía húmeda de materiales sueltos, éstos son extraídos con ayuda de medios mecánicos o hidráulicos, el método de transporte para su procesamiento es el mismo. La mayoría de estas plantas de extracción se instalan directamente en el agua, y constan a menudo de plataformas flotantes en ríos o en lagos artificiales (Häberer, 2012). En la metalurgia extractiva se realizan procesos de separación del recurso desde el mineral de origen. En la Tabla 1.1 se detalla esta subdivisión.

Tabla 1.1 Subetapas de la Metalurgia Extractiva. Fuente: Elaboración propia basado en (Restrepo Baena et al., 2008).

| Pirometalurgia | Hidrometalurgia |
|--|--|
| Calcinación | Lixiviación <ul style="list-style-type: none"> • Ácida • Básica • Neutra |
| Tostación <ul style="list-style-type: none"> • Clorurante • Aglomerante • Oxidante • Sulfatante | Purificante y/o concentración <ul style="list-style-type: none"> • Métodos químicos convencionales • Cementación • Resinas de cambio de ion • Extracción con disolventes |
| (Otras) Fusión <ul style="list-style-type: none"> • Reductora • Ultrareductora • Neutra • Oxidante | Precipitación <ul style="list-style-type: none"> • Cementación • Electrolisis • Métodos químicos |
| (Otras) Volatilización | |

| | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Reductora • Oxidante • De haluros • De Carbonilos | |
| (Otras) Electrolisis Ígnea o de sales fundidas | |
| (Otras) Metalotermia | |

1.1.2.1 Pirometalurgia

Se describe como técnicas de recuperación de un metal a partir de un mineral, utilizando altas temperaturas y con presencia de una fase acuosa. En el procesamiento pirometalúrgico de concentrados de cobre por ejemplo, la tecnología más utilizada es el horno de fundición instantánea (Balladares et al., 2014).

Dados los procesos previos de reducción física y concentración del mineral, la reducción química del mineral preparado se efectúa en hornos y convertidores de distinto tipo. Al final del proceso de refinación se obtiene un metal o aleación (Restrepo Baena et al., 2008).

Calcinación y Tostación: Tiene por objetivo principal la transformación del mineral en óxidos para su posterior reducción a partir de descomposición térmica. Básicamente, la reducción consiste en la separación del oxígeno del metal de interés usando sustancias capaces de generar este cambio químico, por ejemplo, la incorporación de carbono en forma de carbón vegetal o coque (DED Goya, 2012). En resumen, la calcinación descompone compuestos (carbonato, sulfato, hidróxido, etc.) en sus óxidos formadores, mientras la tostación consiste en sulfuros, que al reaccionar con el oxígeno del aire, se transforma en un óxido (reducción),(Muñoz Portero, 2016b).

Fusión: Se basa en la obtención, en un horno adecuado, varias fases fundidas: metal, escoria y mata. Es una de las operaciones más utilizadas en metalurgia extractiva. Por ejemplo, se usa para extraer el hierro (fusión

reductora) o como paso previo en la obtención del cobre (fusión neutra: fusión a mata). La escoria se forma al reaccionar la ganga contenida en el mineral con un fundente (ácido o básico) (Muñoz Portero, 2016b).

Volatilización: Consiste en la operación que conduce a un metal (reductora), un compuesto (oxidante), un haluro (de haluros) o un carbonilo metálico (de carbonilos) en forma gaseosa. Por ejemplo, en la metalurgia del cinc por vía seca, el metal se obtiene como un gas por reducción del óxido (DED Goya, 2012).

Electrolisis de sales fundidas: Tiene por objeto la obtención de un metal a partir de uno de sus compuestos disuelto en un electrólito fundido y utilizando la corriente eléctrica como agente reductor. Por ejemplo, se usa en la obtención del aluminio por electrólisis de la alúmina disuelta en un baño de criolita fundida (Muñoz Portero, 2016b).

Metalotermia: Operación en la que un metal desplaza a otro de sus compuestos al ser más reactivo. Por ejemplo, en la obtención del titanio se utiliza magnesio para reducir el tetracloruro de titanio (DED Goya, 2012).

1.1.2.2 Hidrometalurgia

El nombre se refiere al empleo generalizado de soluciones acuosas como agente de disolución. Dentro de las subetapas de la pirometalurgia, la tostación, cumple el rol de oxidar minerales sulfurados secundarios, este proceso genera óxidos que pueden ser procesados por la vía acuosa de la hidrometalurgia, produciendo ventajas económicas y disminución del gasto energético.

Lixiviación: Consiste en la disolución del elemento de interés del mineral, por acción de un agente lixivante externo o suministrado directamente por el

mineral en condiciones apropiadas. Finalmente, la solución rica en el elemento de interés se recoge en la base del lecho (Cárdenas et al., 2010).

Concentración Hidrometalúrgica: El objetivo de esta operación es retirar determinadas impurezas de la disolución antes de que ésta sea sometida a la siguiente etapa (Muñoz Portero, 2016a).

Precipitación: Corresponde a separar el metal valioso de la disolución, en forma elemental (casi siempre) o en forma oxidada (en raras ocasiones). (Muñoz Portero, 2016a).

1.1.3 Industria Minera y Consumo Energético

Basado en la información proporcionada por (CNE, 2015), el 35% del consumo energético en Chile proviene del sector Industrial y Minero, siendo el de mayor impacto en el mercado nacional. (Véase Figura 1.2). Asimismo, dentro del sector Industrial y Minero, la actividad minera concentra el 38% del consumo (Véase Figura 1.3).

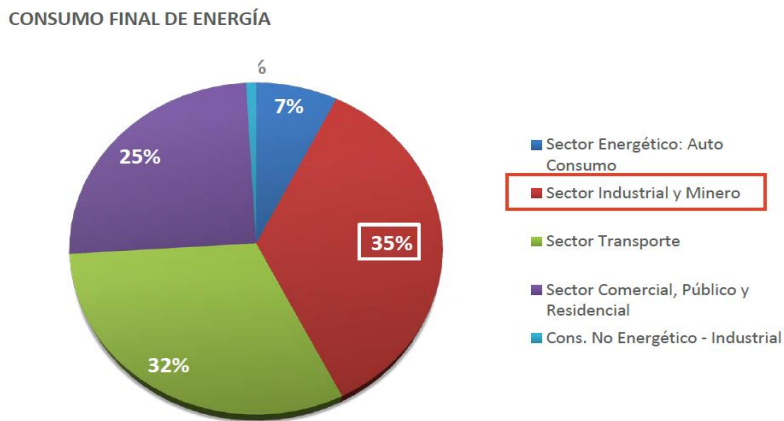


Figura 1.2: Consumo energético nacional y el impacto del sector Industrial y Minero. Fuente: (CNE, 2015)

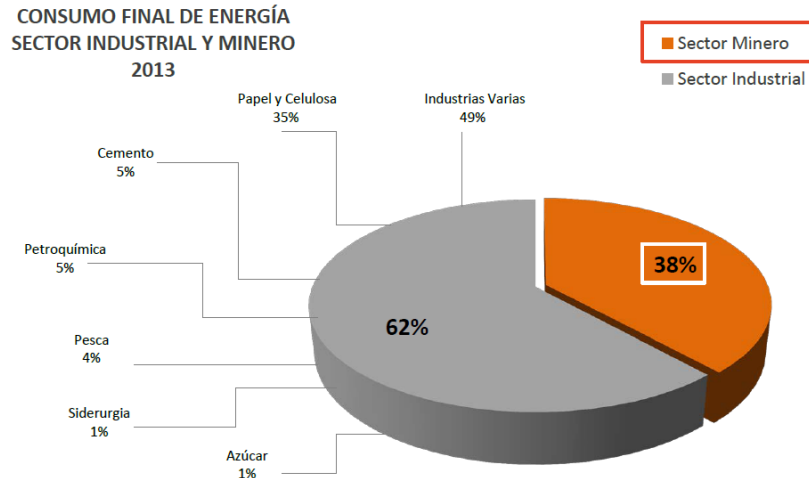


Figura 1.3: Consumo del sector Industrial y el sector Minero. Fuente: (CNE, 2015)

Sumado a lo anterior y tomando en cuenta el impacto significativo del sector minero en la industria nacional relativo al consumo energético, es importante estudiar el consumo energético de metales y no metales de producción nacional, así también en otros puntos del globo terrestre (Figura 1.4).

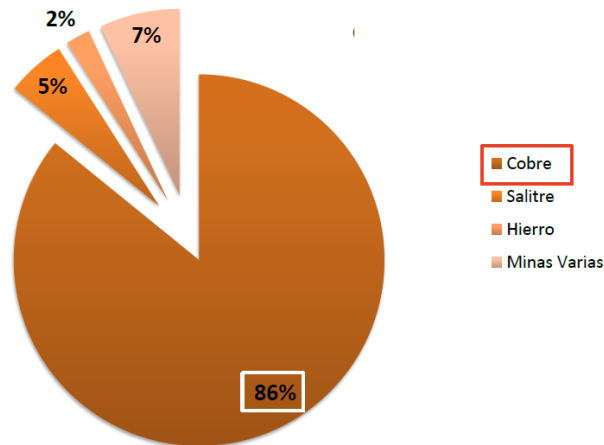


Figura 1.4: Participación sobre el consumo energético de los principales recursos mineros. Fuente: (CNE, 2015)

1.1.4 Energía en Chile y el Mundo

El consumo energético en el mundo sostiene las actividades socioeconómicas y el desarrollo de una nación. Los países industrializados con economías de gran escala requieren abundantes cantidades de energía sólo para mantener su funcionamiento. Por otro lado, los países en vías de desarrollo requieren incrementar sus consumos energéticos para sostener su crecimiento (Biol, 2008). Un excesivo consumo energético puede afectar el medio ambiente. Por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero, producto del consumo de combustibles fósiles, están asociadas a un incremento sostenido de la temperatura global (Solomon, 2007). Como se representa en la Figura 1.5, el consumo de energía en el mundo se genera principalmente por fuentes energéticas de Petróleo, Gas y Carbón, asimismo en las últimas décadas se visualiza un alto crecimiento en consumo energético generado por biocombustibles.

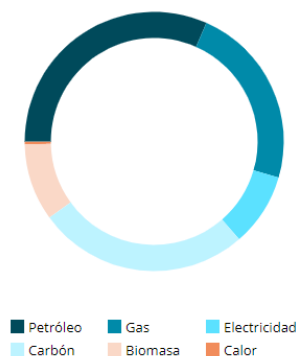


Figura 1.5: Participación de fuentes de energías como Petróleo, Gas Natural y Carbón (1990 - 2018). Fuente; Enerdata, 2018.

La escasez de fuentes energéticas convencionales, tales como petróleo, carbón y gas natural, sugiere que este crecimiento debe ser compensado con un conjunto de alternativas que deben incluir, además de centrales termoeléctricas e hidroeléctricas, centrales solares, eólicas y mareomotrices, entre otras. La escasez de agua por un lado y las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles por otra, generan una creciente problemática para este territorio extremo,

ambientalmente frágil y que busca opciones sustentables para su desarrollo presente y futuro (Osses et al., 2017).

En Chile, el Comité de Seguridad Energética reconoce que un abastecimiento seguro y confiable de energía es clave para el desarrollo económico y social del país (Pastén, 2012). El consumo energético en Chile posee las mismas tendencias globales en lo que a fuentes energéticas se refiere siendo estas Petróleo Crudo, Biomasa, Carbón Mineral, Gas Natural y Energía Hídrica, las que aportan un 97% de oferta energética aproximadamente (BNE, 2018). En el Anexo 1 se representa la oferta y demanda de las principales fuentes de energía, junto a la exportación e importación de estas para satisfacer el consumo energético de los principales sectores del país.

Cabe destacar que solo el 9.4% de la energía producida en Chile durante 2018 proviene de fuentes renovables, lo que conlleva un gran desafío para el país en materia de energía no contaminante, que promueva la disminución de gases de efecto invernadero con la finalidad de contribuir de manera positiva en el cambio climático. El calentamiento global asociado al exceso de emisiones de gases que agudizan el efecto invernadero es un ejemplo del desbalance que existe actualmente (Solomon, 2007). Si bien se puede argumentar sobre las causas de esta problemática, no se puede desconocer que sus efectos pueden tener fuertes repercusiones en la economía chilena (Pastén, 2012). Véase Figura 1.6

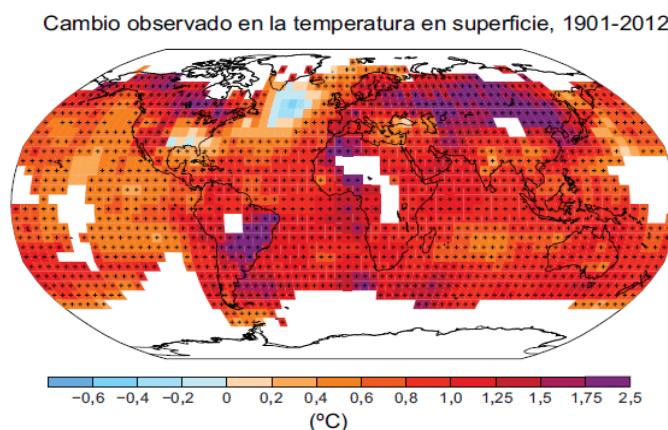


Figura 1.6 Mapa de los cambios observados en la temperatura en superficie entre 1901 y 2012.
Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013

Es importante destacar que Chile posee un gran potencial en materia de energía solar, debido a que presenta una de las zonas geográficas con mayor radiación en el mundo. Como se representa en la Figura 1.7, la radiación en el norte de Chile es una de las más, sino la más, favorecidas del mundo, alcanzando valores cercanos a los 10 [$kWh/m^2 \cdot día$].

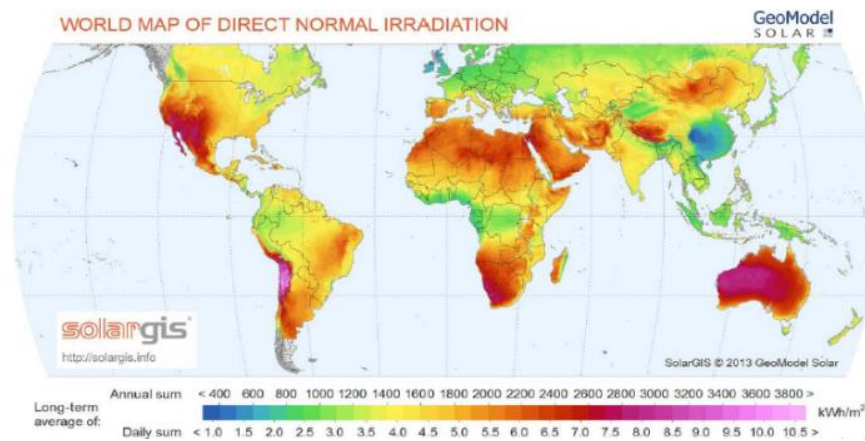


Figura 1.7 Mapa mundial de recursos solares. Fuente: Solagris, 2017

1.2 Motivación

La principal causa que promueve la presente investigación nace del compromiso personal por generar cambios positivos en la industria minera. Entendiéndose que Chile es un país de tradición minera, y a su vez, posee un potencial energético que con el compromiso de la industria, apoyada de buenas políticas públicas y profesionales comprometidos con el crecimiento y desarrollo del país, podría posicionar a Chile como un referente energético a nivel mundial. Existe un amplio consenso científico respecto de las consecuencias e impactos del Cambio Climático, por lo cual es trascendental involucrar a las futuras generaciones de profesionales respecto a su importancia. Además, generar nuevas ideas que proporcionen un cambio positivo hacia el medio ambiente y la calidad de vida de todos los ciudadanos.

1.3 Descripción del Problema

En las principales fundiciones del país se procesan grandes cantidades de metales como oro, plata, cobre, hierro entre otros, se suma a lo anterior, la explotación de recursos no metálicos; estos procesos conjuntos generan consumos energéticos elevados en la industria minera, que representa un 38% del consumo nacional (330.770 Tcal),(CNE, 2019). Desafíos como la disponibilidad de recursos hídricos, productividad en los procesos mineros, innovación productiva en el sector, disponibilidad y calidad del capital humano, y por último, el desempeño medioambiental de las compañías mineras hace necesario un cambio en la industria del sector minero nacional, avanzar en procesos más sustentables, que generen mayor productividad y eficiencia, para así progresar en la cadena de valor (Cifuentes, 2018).

1.4 Alternativa Propuesta

El foco principal de la presente investigación busca fusionar las tecnologías de concentración solar y los procesos pirometalúrgicos asociados, mediante el rediseño de un horno de fusión Flash para procesar metales y/o no metales de interés económico. El estudio basará su análisis asociando características externas e internas del proceso de fundición, destacando su uso en zonas del norte y centro de Chile. Lo mencionado anteriormente, busca dar una solución sustentable y amigable con el medio ambiente que pretende aprovechar el potencial solar presente a lo largo del país. Asimismo, se busca generar un mayor interés por el uso de estas tecnologías y adaptarlas a procesos convencionales de la industria minera.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

- Estudiar la factibilidad técnica del uso de radiación solar como fuente de calor en un horno de fundición Flash con la finalidad de incorporar un proceso sustentable y amigable con el medio ambiente.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Analizar mediante revisión bibliográfica las características del proceso de fundición asociadas a la fuente de calor.
- Asociar variables externas que afecten el proceso de fundición mediante herramientas de simulación y la utilización de radiación solar como fuente de calor.
- Proponer un modelo de rediseño de un horno de fundición Flash para reemplazar la fuente de calor dependiendo de los niveles energéticos alcanzados según su ubicación.
- Aplicar su uso en operaciones mineras y sus recursos, describiendo los niveles energéticos necesarios para su operación.

1.6 Alcance

Si bien existen de manera reducida proyectos e investigaciones relacionados a incorporación de tecnologías de concentración solar, se hace necesaria la incorporación e innovación de los actuales procesos mineros. Sin duda, las propuestas para concentración solar suelen ser elevadas en su inversión inicial, al reducir la estructura de un concentrador solar tipo parabólico en conjunto con la reducción de combustible para el proceso de fundición y/o tostación, genera como consecuencia reducción de costos de operación, reducción de gastos en

materia energética, además de garantizar un proceso sustentable, amigable con el medio ambiente y fortalecer la imagen corporativa de la compañía con procesos innovadores en materia de concentración solar.

Dentro de las limitantes, se destaca un cambio en la disposición de equipos producto de la utilización del espacio necesario para tecnologías de concentración solar, la producción de concentración solar dependerá de las condiciones climáticas presentes y su trabajo productivo en un lapso determinado de horas durante el día, su elevada inversión inicial y el poco interés de la industria en materia de implementación de estas tecnologías a gran escala.

Es por lo anterior, la presente investigación busca una alternativa que ayude a fusionar de manera exitosa dos tecnologías, con la finalidad de reducir de manera significativa los altos costos de consumo energético en la actividad minera, mediante la incorporación de concentración solar como fuente de energía para el proceso de fundición y/o tostación de ciertos metales o no metales de interés económico, como por ejemplo el oro, la plata, zinc, el cobre, entre otros. Cabe destacar, que debido a las implicancias y características técnicas de la presente investigación, no se realizará un análisis económico del mismo, la investigación solo abordará aspectos técnicos y no experimentales, además de considerar principalmente las zonas geográficas con mayor factibilidad en el uso de estas tecnologías correspondientes a la zona del norte y centro de Chile.

1.7 Análisis de Antecedentes

1.7.1 Recopilación de Información y Estados del Arte

En primera instancia, se realizará una revisión de antecedentes generales que proporcionen una contextualización general del panorama nacional respecto a la industria minera y sus procesos productivos, asimismo, la energía solar, su utilización y el crecimiento como potencial fuente de energía para las sociedades y la industria en la actualidad.

1.7.2 Marco Teórico

El dominio de este apartado se basa en la descripción de procesos unitarios y comparación teórica del requerimiento energético por tonelada de material a procesar de diferentes productos metálicos y no metálicos, además, los procesos pirometalúrgicos involucrados y la energía incidente del recurso solar como principales tópicos. En los primeros capítulos se hace relación con las características geométricas existentes entre el Sol y la Tierra, propiedades externas e internas, características de la Concentración Solar y los diferentes métodos de captación de radiación solar. Posteriormente, se estudiarán procesos mineros de diferentes metales y no metales.

1.7.3 Análisis de Datos

Con el propósito de evaluar y comparar datos de consumos energéticos de diferentes metales y no metales, se abordará bajo tres tópicos principales. En primera instancia, se realizará una evaluación de la radiación solar incidente en tres localidades mineras del país, a fin de conocer el recurso solar disponible en diferentes épocas del año. Posteriormente se evaluarán los requerimientos energéticos de diferentes productos mineros. Finalmente, se elaborará un balance energético para dichos productos, con el fin de estimar

la posibilidad de procesamiento mediante la utilización de radiación solar como fuente de energía y estimar posibles cantidades a procesar para estos productos, con el objetivo final de complementar los procesos mineros convencionales.

1.7.4 Resultados, Conclusiones y Sugerencias

Posterior a los balances realizados y los datos evaluados, se pretende encontrar una ventaja adaptativa del resultado generado en el estudio. Igualmente se puede sugerir futuros estudios en otras localizaciones del país, estudiar el efecto del clima en el proceso, un análisis económico y un desarrollo experimental del estudio.

Es importante generar interés en la industria, en los profesionales y el rol que cumple el mercado para la incorporación exitosa de tecnologías amigables con el medioambiente. Esto a su vez, potencia la cadena de valor en la industria minera nacional.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Minería Extractiva

En el presente apartado se abordarán seis recursos mineros de producción nacional, con el propósito de evaluar el requerimiento energético y su viabilidad del uso del recurso solar disponible para su producción y/o separación del elemento de interés. Dichos recursos minerales se consideran técnicamente viables en función del volumen reducido de procesamiento, requerimientos energéticos de menor escala y en base a la producción nacional, que posea un impacto positivo para la utilización de nuevas tecnologías basado en la producción de pequeña y mediana minería. Minerales parcialmente autógenos que requieren aporte de energía para su procesamiento.

2.1.1 Minería Metálica

2.1.1.1 Oro (*Au*) y Plata (*Ag*)

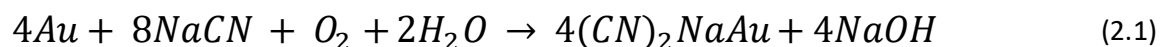
Mientras que las empresas mineras auríferas realizan el 59% de la producción nacional de oro, las empresas cupríferas aportan con el restante 41%, siendo el mecanismo de explotación la obtención de subproductos derivados de la explotación de cobre. Las empresas de plomo y cinc aportan también, pero de forma marginal a la producción de oro (Correa Mautz, 2016).

El procedimiento de obtención de oro desde el mineral comienza posterior a los procesos de pre-minado y minado, luego el mineral es cargado y depositado en las pilas de lixiviación (o PAD), previamente acondicionada con una geomembrana (evita la filtración de líquidos a la superficie, evitando problemas medioambientales de gran envergadura debido a la toxicidad del cianuro). En dichas pilas de lixiviación son regadas con una solución cianurada (solución de 50 ppm; es decir, 50 g de cianuro por cada 1.000 litros de agua), para recuperar el oro y la plata. Esta

solución rica en metales es dirigida hacia pozas de operación mediante tuberías colectoras.

Posteriormente, se opera en base al proceso Gold Mill que tiene por objeto procesar el metal que no fue obtenido en las pilas de lixiviación. El oro se recupera en 24 hrs., con diferencia al proceso de lixiviación que tiene una duración promedio de 60 días. A lo anterior, se suma las Columnas de Carbón (Figura 2.1); proceso que permite la concentración de oro de la solución rica en metales, mediante desorción (etapa que utiliza una solución cianurada para extraer el oro dispuesto sobre la superficie del carbón), dicha solución es filtrada y limpiada. Luego se elimina el oxígeno y se añade polvo de Zinc para precipitar el metal y hacerlo sólido. Dicho procedimiento se define como Merrill Crowe, producto que pasa al proceso de refinación.

Finalmente, el producto sólido obtenido se somete a secado en hornos de retortas a 650°C y posteriormente es fundido en hornos de arco eléctrico a 1.200°C para obtener el Doré (22 kg, ley de oro 48%, ley de plata 58%, fundición 6 hrs.), que corresponde al producto final, en donde es factible la utilización de un horno solar, debido a las condiciones del proceso. El proceso de obtención de oro mediante soluciones cianuradas obedece a la siguiente reacción (ecuación 2.1):



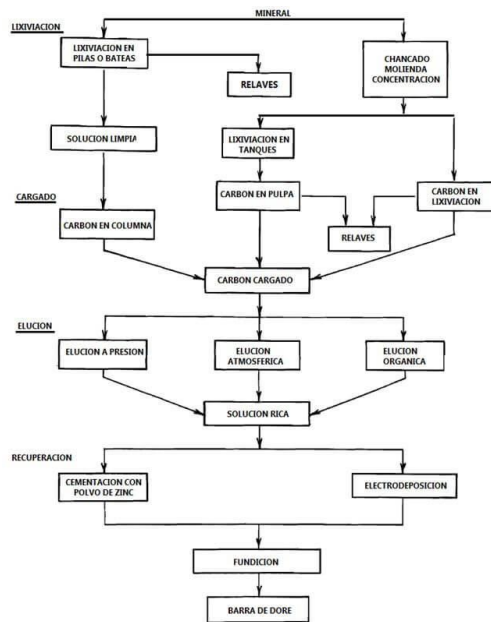


Figura 2.1: Recuperación de Oro y Plata con Carbón Activado. Fuente: (911Metallurgist, 2012)

2.1.1.2 Cobre (Cu)

El 80% del cobre primario mundial se extrae de minerales sulfurados. En Chile el 70% del cobre mina producido es procesado por beneficio de minerales (chancado, molienda y flotación) y el 25% del cobre mina producido, es tratado por vía pirometalúrgica (Cochilco, 2017).

En cuanto al proceso, inicialmente se realiza la extracción, chancado y molienda (reducción de tamaño a 0.2 mm), (CNE, 2015). Dependiendo del tipo de mineral (oxidado o sulfurado) se envía a pilas de lixiviación o al proceso de flotación siguiendo el esquema de la Figura 2.2.

Para el mineral oxidado, el material se dispone en pilas de lixiviación, las cuales son rociadas en ácido sulfúrico. La reacción produce sulfato de cobre en agua, posteriormente se realizan lavados a la solución obtenida con reactivos específicos que cumplen la función de separar el cobre disuelto de otros minerales y concentrar para aumentar la eficiencia de los procesos posteriores, el proceso anterior se denomina Extracción por Solventes. Seguido a lo anterior, se aplica electricidad a la solución de cobre, metal que es depositado como cobre metálico en el cátodo (Electro obtención), (CM, 2015).

Para el mineral sulfurado, el material es dispuesto en celdas de flotación, que posee una solución con reactivos específicos, produciendo burbujas que generan la adhesión del metal de cobre a la superficie de estas. Luego, se realiza la separación de la espuma resultante, generando el concentrado de cobre (30% de Cu aprox.). Posteriormente es secado (a muerte o parcial) y dispuesto a fundición en hornos de 1.200°C aproximadamente, generando la separación del mineral sulfurado de cobre (70%-75% de Cu) (véase Figura 2.3). La solución fundida es dispuesta en moldes para formar los denominados ánodos de cobre metálico sólido. Finalmente, estos ánodos se introducen en una solución de sulfato de cobre y se introduce corriente, el cobre localizado en el ánodo se disuelve y posteriormente es depositado como cobre metálico en el cátodo (CM, 2015).

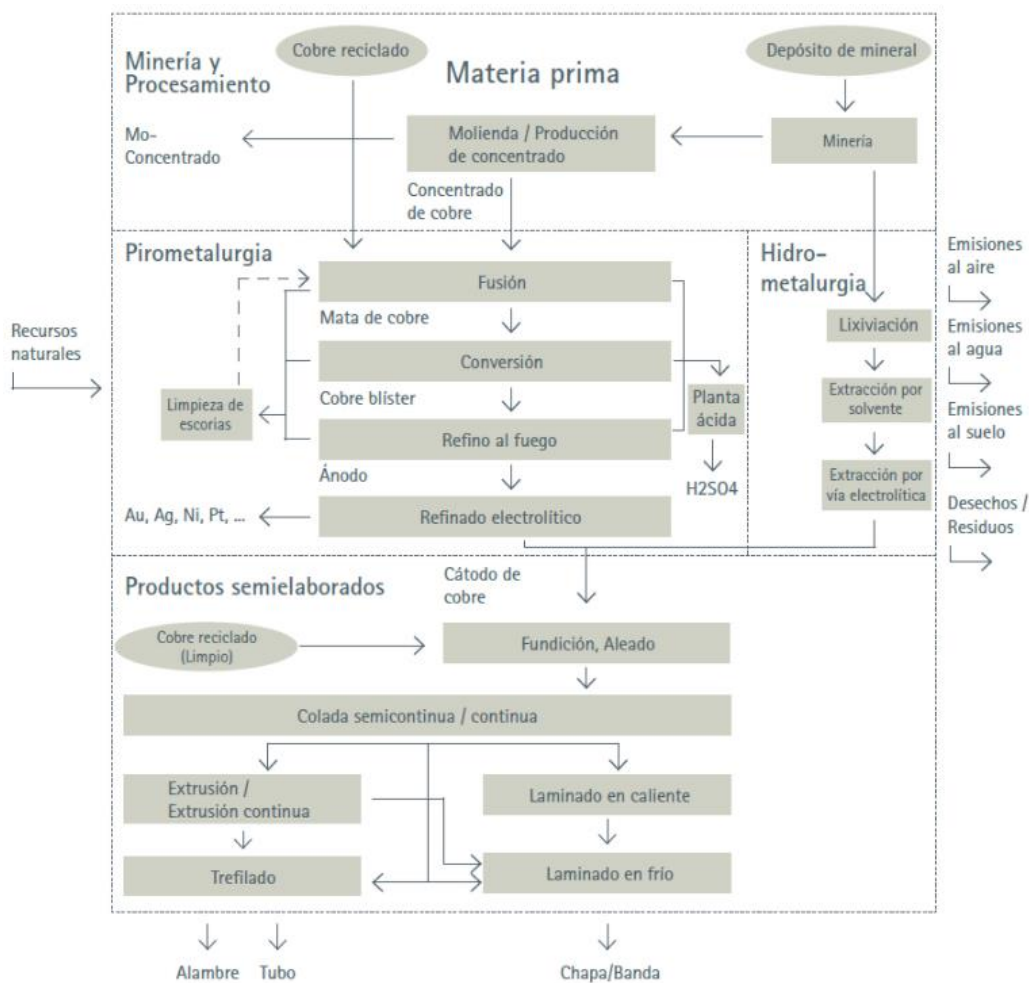


Figura 2.2: Procesos de Producción del Cobre. Fuente: (Instituto Europeo del Cobre, 2018)

En la Figura 2.3 se puede visualizar el tipo de tratamiento para minerales sulfurados y diferentes líneas de procesamiento para producir mata (50 – 70% Cu).

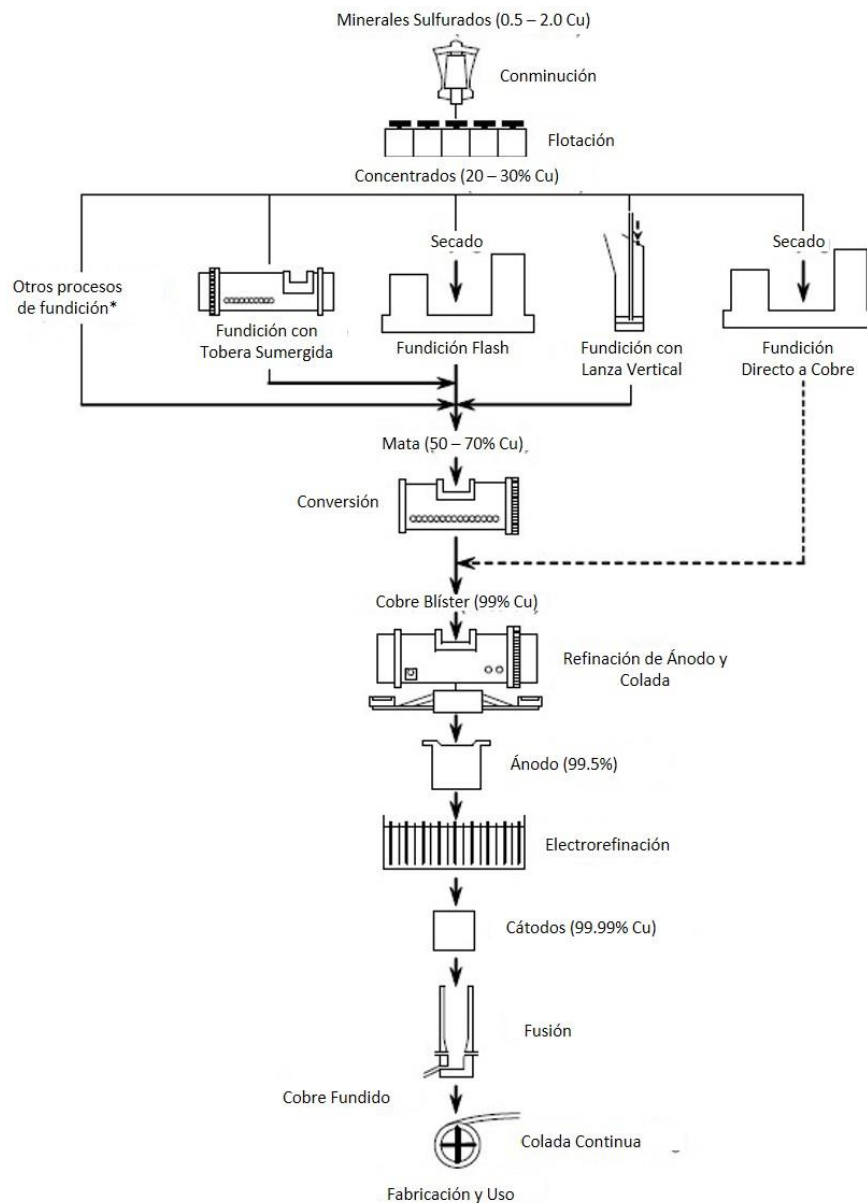


Figura 2.3 Principales procesos para la extracción de cobre sulfurado. Las líneas paralelas indican procesos alternativos. *Principalmente Fundición Mitsubishi y Vanyukov. Fuente: (Biswas & Davenport, 2013)

2.1.1.3 Zinc (Zn)

En el caso del cinc existen varios procesos que conducen a la obtención del cinc metal: procesos de reducción térmica, proceso de retortas horizontales, proceso de retortas verticales, proceso electrotérmico, proceso ISF y el proceso electrolítico que, actualmente, acapara la producción de mayor tonelaje de metal produciendo el 85% del cinc mundial (Solano Marín, 2008).

El proceso de extracción de cinc guarda similitudes con el proceso del cobre (véase Figura 2.4), la práctica normal de la flotación en menas mixtas es flotar primero los minerales de cobre, deprimiendo los de cinc y plomo. A continuación, se flota la galena (PbS), luego la blenda (ZnS) y, a veces, finalmente, la pirita (FeS_2). Posteriormente, se somete el concentrado de cinc a tostación oxidante (sobre $700^{\circ}C$ y agitación continua) con el propósito de favorecer la recuperación del metal. Para mejorar la recuperación del cinc y evitar así pérdidas de metal, se efectúa la lixiviación ácida en caliente ($90 - 95^{\circ}C$) durante 2-4 horas (Solano Marín, 2008).

Una vez purificada la solución, esta es enviada a la instalación de electrolisis para la recuperación metálica (Solano Marín, 2008).

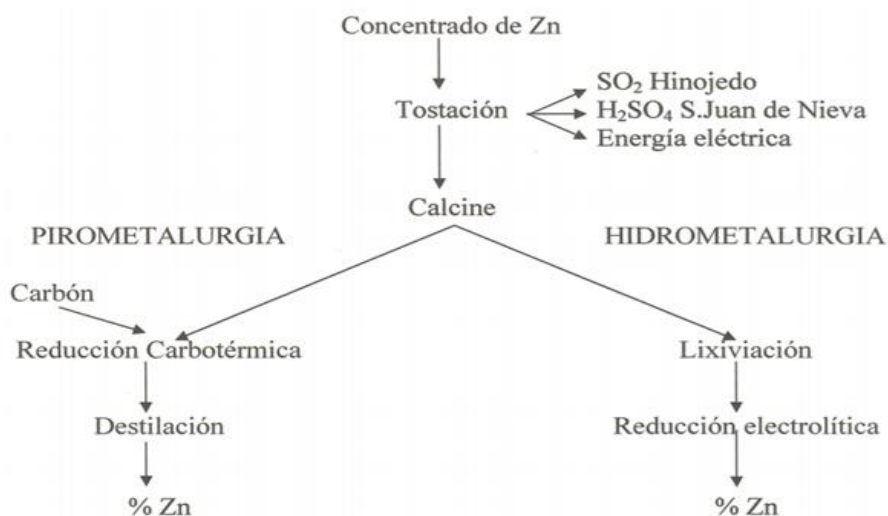


Figura 2.4: Metalurgia extractiva para la obtención de Zinc. Fuente: (Payno Herrera & Setién Marquínez, 2012)

2.1.2 Minería No Metálica

2.1.2.1 Carbonato de Litio (Li_2CO_3)

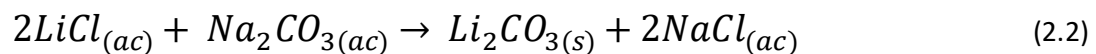
Si bien el litio se encuentra presente tanto en minerales, salmueras, pozos petrolíferos, campos geotermales, arcillas e incluso en los océanos, en la actualidad solo dos procesos de obtención son económicamente factibles: mediante salmueras y minerales (Rojas Iturra & Miranda Miranda, 2018).

El litio es un elemento que se puede extraer desde distintas fuentes, en Chile la mayor fuente de litio corresponde al Salar de Atacama ubicado en la región de Antofagasta. La salmuera en el salar posee una composición variada con presencia de elementos tales como potasio, sodio, calcio, magnesio, hierro, boro, bromo, cloro, nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos (Gutiérrez Parra, 2018).

En primer lugar, la salmuera es bombeada desde una profundidad aproximada de 40 m para ser enviadas a piscinas de evaporación solar de aproximadamente 600 m x 800 m de área superficial y 1.5 m de profundidad, lugar donde se cristalizan secuencialmente las distintas sales.

El proceso de evaporación permite concentrar la salmuera en litio hasta aproximadamente un 4.5%. La etapa de purificación química efectuada posteriormente requiere entre 5.5-6.0% de litio, motivo por el cual se debe proseguir con la etapa de evaporación de agua hasta llegar a la concentración de litio requerida. (Gutiérrez Parra, 2018)

Luego se envía la salmuera a planta donde se minimiza el contenido de boro mediante extracción por solventes y posteriormente se purifica eliminando el calcio y magnesio de la salmuera. La solución purificada de cloruro de litio se hace reaccionar con ceniza de soda en caliente para producir carbonato de litio según ecuación (2.2):



La precipitación de carbonato de litio se lleva a cabo a una temperatura entre $90 - 95^{\circ}\text{C}$ debido a su solubilidad inversa con la temperatura. Después este se sedimenta, filtra y lava en caliente para posteriormente secarlo y envasarlo, siendo el producto final un compuesto comercializable de pureza relativamente alta con un 99% de carbonato de litio. Por otra parte, el proceso de precipitación de carbonato de litio genera una solución agotada en litio que se recircula, denominada licor madre (Cochilco, 2009), (Figura 2.5).

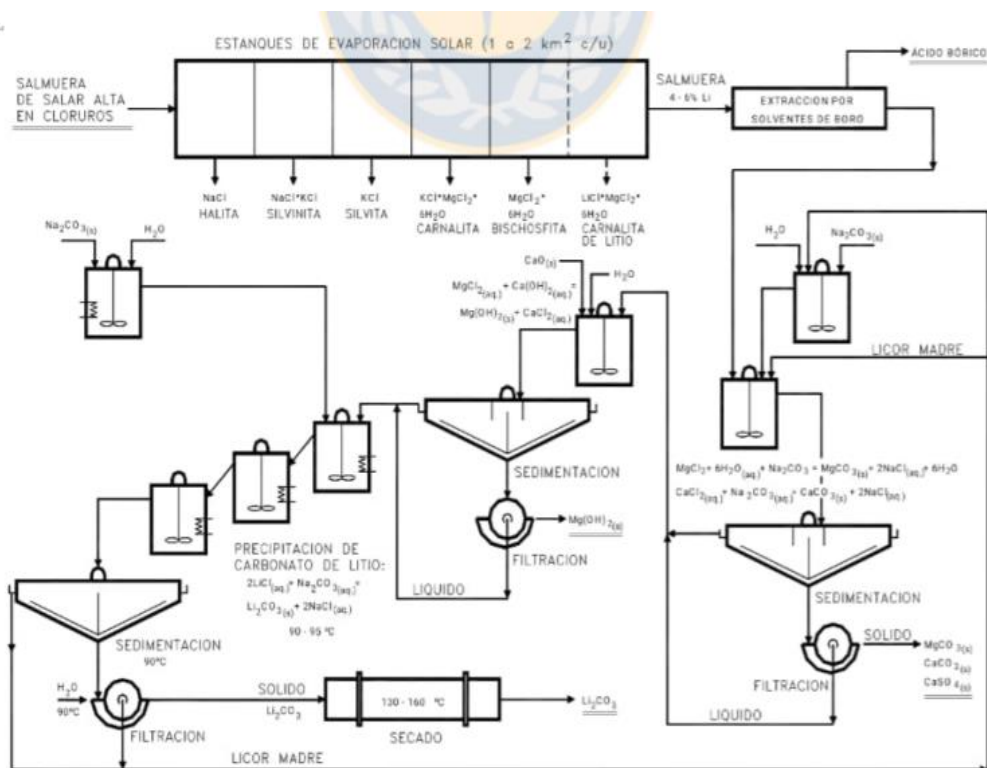


Figura 2.5: Diagrama del proceso de obtención de carbonato de litio. Fuente: (Gutiérrez Parra, 2018)

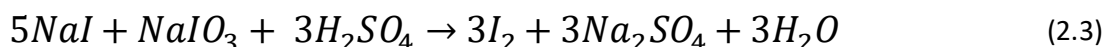
2.1.2.2 Yodo (I)

Chile es el mayor productor y exportador de yodo del mundo. Este elemento, que se obtiene del caliche como subproducto del salitre, es utilizado principalmente en medicina como desinfectante, en agricultura como complemento alimenticio, en productos farmacéuticos como medio de contraste para rayos X, en producción de fibras sintéticas y moléculas orgánicas, etc. (Garcés Milla, 2000)

Muchas salmueras subterráneas contienen compuestos de yodo y el agua de mar contiene alrededor de 0,05 ppm. Algunas algas pueden acumularlo hasta en un 0,45%, y una fuente de extraordinaria importancia son los yacimientos de nitratos de Chile (Sernageomin, 2019a).

El yodo se presenta en el caliche, como yodatos. Parte de este yodo se disuelve junto con el nitrato, por lo que es posible su extracción. En la planta, el objetivo es reducir el yodato de sodio de las soluciones fuertes (300 g/l de $NaNO_3$), provenientes de la lixiviación del caliche, para llevarlo a yodo libre, luego separarlo y purificarlo (Garcés Milla, 2000).

La materia prima posee una composición de 10% $NaNO_3$, 15% Na_2SO_4 , 20% $NaCl$ y 520 ppm de IO_3^- y otros compuestos en menor concentración. El yoduro producido es llevado al estanque o reactor de cortadura, donde se encuentra con el yodato (IO_3^-) proveniente de las piscinas de alimentación a la planta, produciéndose yodo libre según la ecuación 2.3



Se aprovechan ciertas características físico-químicas del yodo: es hidrófobo (inmiscible con el agua), aerófilo (tiene gran afinidad con el aire) y soluble en yoduro (permite recuperar todo el yodo y dejarlo en condiciones estables para su manejo). La solución proveniente de la cortadura se bombea las torres de Blow-Out donde se introduce en contracorriente con aire. Al entrar en contacto ambas corrientes se produce la transferencia del yodo desde la fase líquida acuosa hacia la fase gaseosa (el descarte de esta etapa se denomina “agua feble”). Para recuperar el yodo de la

corriente gaseosa, se envía a las torres de absorción de yodo, utilizando una solución que contiene ion yoduro en contracorriente, formándose el ion triyoduro, que es inestable. La solución de ion triyoduro se envía a las torres reductoras (enfriaderas) que por contacto con SO_2 se enfría ($150 - 26^\circ C$) se disocia, obteniéndose yodo elemental, el cual se reduce a I^- (Veloso, 2012).

La planta de refinación tiene como función, transformar el yoduro a yodo metálico, purificarlo mediante fusión, transformarlo en flakes (láminas) o shot (esferas) y envasarlo. El yodo pasta se calienta en un reactor y se funde desalojando las impurezas (se purifica). El yodo al estado líquido se envía a un laminador o a un sistema de prilado. El yodo laminado o prilado (realizado por caída libre en una torre nebulizando agua, haciendo enfriar el yodo para formar el prill (Garcés Milla, 2000), se envasa en tambores de cartón (se llaman “cuñetes”) de 50 kg con una pureza de 99,5%. Véase Figura 2.6.

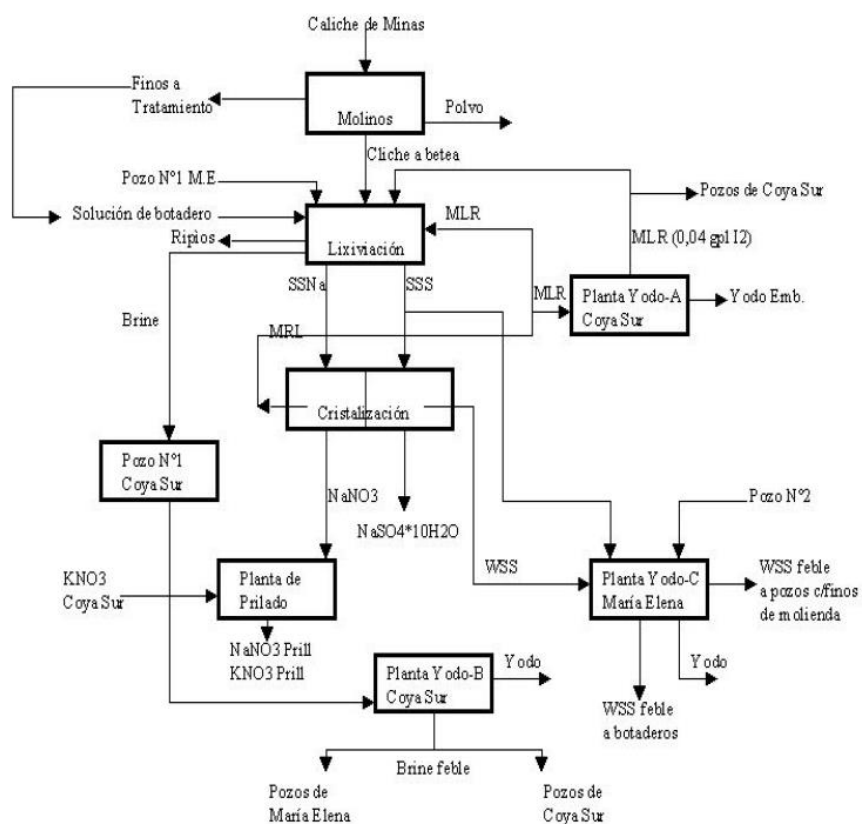


Figura 2.6: Diagrama del proceso de obtención de yodo basado en las operaciones de Planta María Elena (SQM). Fuente: (Garcés Milla, 2000).

2.1.2.3 Nitratos Naturales ($NaNO_3$, KNO_3)

Los nitratos corresponden a compuestos nitrogenados naturales, presentes en los yacimientos de salitre ubicados en el norte del país, en las regiones de Tarapacá y Antofagasta. Las dos formas principales en que se presentan son, nitrato de sodio ($NaNO_3$) y nitrato de potasio (KNO_3), (Sernageomin, 2019a). La producción chilena de nitratos constituye la única producción mundial de nitratos naturales, y representa menos del 1% del consumo mundial de compuestos nitrogenados (Gajardo Cubillos, 2014).

En la actualidad, los nitratos se obtienen de la explotación de depósitos y de repastos, que corresponden a sectores de antigua explotación, y el yodo, principalmente, de la lixiviación de acopios de estériles, “tortas”, de la antigua explotación de los nitratos. La materia prima es caliche (mineral del cual se extrae el salitre), (Franzosi & Montagna, 2007), al igual que el proceso productivo del yodo, por lo cual guarda ciertas similitudes en su proceso. El mineral extraído se lixivia en pilas, obteniendo soluciones destinadas a la producción de yodo. Posteriormente, se transportan a pozas de evaporación solar donde se cristalizan sales con alta concentración de nitrato, que son transportadas y posteriormente, utilizadas como insumo en la producción de nitrato de potasio. Así se obtienen productos como el nitrato de sodio, nitrato de potasio, nitrato sódico potásico, yodo y derivados de yodo (Guerrero Forno, 2012). Para comprender el proceso general de los nitratos naturales se ve explicado en la Figura 2.7.

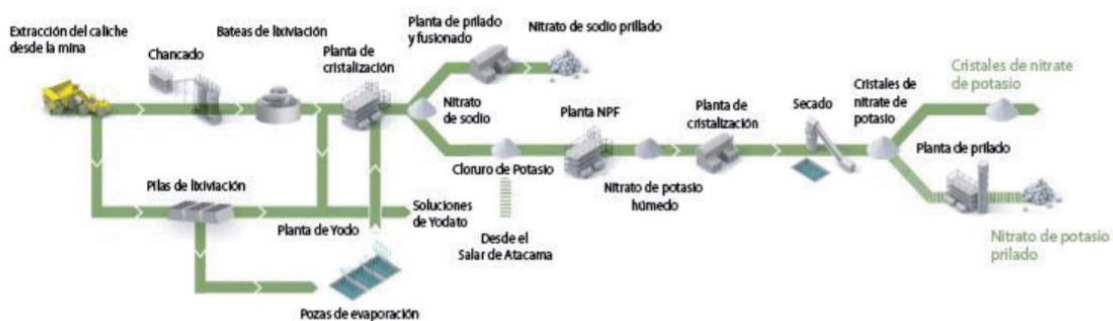


Figura 2.7: Proceso productivo del yodo, nitrato de potasio y nitrato de sodio. Fuente: (Guerrero Forno, 2012)

Posterior a las fases iniciales del proceso, en las cuales principalmente se realiza la molienda de mineral (oficinas de Pedro de Valdivia y María Helena, se trabajan unas 50 mil toneladas separando el material fino de la granza), se ingresa la solución a la planta de tratamiento de sales y se produce la disolución de las mismas en un periodo aproximado de 4 hrs. El proceso de lixiviación en bateas considera tres puntos claves: (Franzosi & Montagna, 2007)

- Lixiviación de nitrato del caliche (con agregación de solución de retorno de cristalización a temperatura de $48^{\circ}C$ con circulación por 20 horas).
- Desplazamiento de la solución fuerte a cristalización.
- Lavado o cola de estruje.

La solución fuerte de $41^{\circ}C$ es enfriada a $12^{\circ}C$ mediante intercambiadores de tubos y empleo de estanques refrigeradores en base a amoníaco. Luego, parte del material cristaliza y la suspensión es separada mediante espesadores y centrifugas. Como la sal húmeda forma conglomerados, se efectúa un proceso de prilado con un procedimiento de fundición ($400^{\circ}C$) aprox., ya sea de nitrato de potasio o sódico con calentadores a petróleo. El fundido se bombea a una torre de prilado. Las gotitas a caer y enfriarse en su trayectoria forman los priles (Véase Figura 2.8).



Figura 2.8: Diagrama de procesos de la planta Pedro de Valdivia. Fuente: (Franzosi & Montagna, 2007)

2.2 Flujos de energía entre el Sol y la Tierra

2.2.1 Geometría entre el Sol y la tierra

Una de las características en común de las tecnologías solares es que todas funcionan mejor (y en algunos casos sólo funcionan) si poseen seguimiento solar. Teniendo en cuenta que el Sol cambia su posición relativa respecto a la Tierra en todo momento, esto conlleva que la radiación incidente en particular la radiación directa, cambie constantemente. Debido a esto, con seguimiento solar las tecnologías solares pueden aprovechar de manera eficiente la radiación directa. Para comprender las tecnologías de seguimiento solar, es necesario entender la geometría que existe entre el Sol y la tierra.

El planeta se divide en paralelos, que definen latitud (ϕ). El hemisferio norte tiene latitud positiva definida entre 0° y 90° , y el hemisferio sur latitudes negativas entre 0° a -90° . El paralelo 0° se llama ecuador terrestre (Fernández-Coppel, 2010). El segundo parámetro para definir un punto sobre la superficie es la longitud, dada por meridianos de polo norte a sur. Se define como meridiano 0° el que pasa por Greenwich, Inglaterra. Los meridianos aumentan de -180° a $+180^\circ$ de este a oeste. En la Figura 2.9 se representa la expresión de latitudes y longitudes (Fernández-Coppel, 2010).

Cualquier punto de la Tierra, correspondiente al origen de la Figura 2.11, se define por latitud y longitud, datos que son implementados en grados y/o en coordenadas UTM.

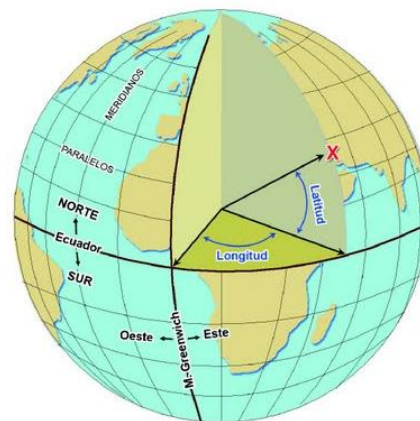


Figura 2.9: Representación de los conceptos geográficos de latitudes y longitudes.

Fuente: (Fernández-Coppel, 2010)

En cuanto a la posición relativa del Sol respecto de la tierra se necesitan varias definiciones:

Cenit: corresponde a la línea perpendicular al plano horizontal en el punto de observación (Figura 2.11).

Declinación (δ): es la distancia angular entre un objeto en la bóveda y el ecuador celestes. Se mide de 0 a $\pm 90^\circ$. Valores positivos hacia el norte celeste, negativos hacia el sur. Hace relación a que, en una determinada localidad, si bien la rotación del sol es siempre en una misma dirección, su trayecto aparentemente se desplaza durante el año, debido el ángulo de inclinación de la tierra (Figura 2.11). Es importante destacar el hemisferio donde se encuentra dicha localidad. La declinación se calcula mediante la ecuación (2.4), valores que están representados en el Anexo 2 para todo el año.

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + d)}{365}\right) \quad (2.4)$$

Donde d corresponde al día del año siendo 1 el primer día del año (1 de enero) y 365 el último día del año (31 de diciembre). Lo anterior se representa gráficamente desde la Figura 2.10.

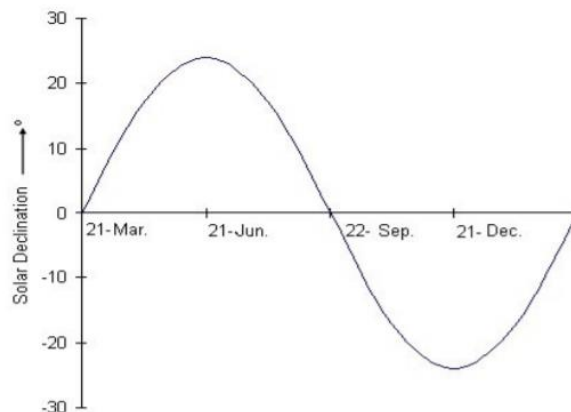


Figura 2.10 Comportamiento del ángulo de declinación solar durante el año. Fuente: (PATEI, 1998)

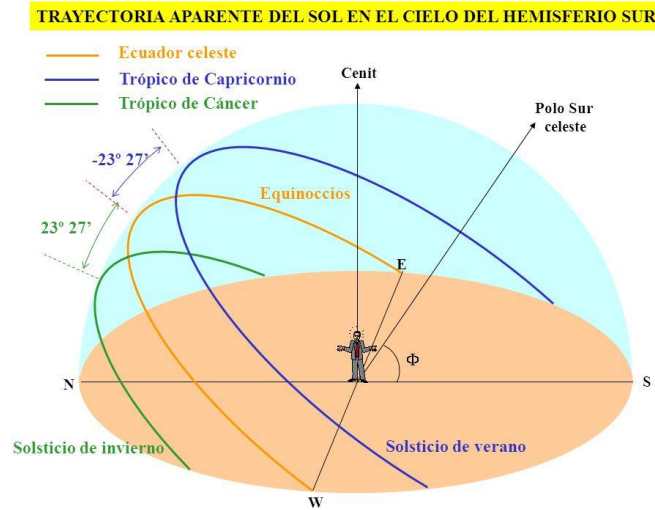


Figura 2.11 Variación de la declinación solar (δ) durante el año en el hemisferio sur. Fuente: Fundación Descubre, 2015

Hora solar (h): corresponde a la hora en referencia a un día solar, esto quiere decir, con las 12:00 hrs del mediodía justo cuando el sol se encuentra en la máxima elevación, y es medida en grados.

Angulo Horario (ω): corresponde a la distancia angular entre la intersección del meridiano del lugar con el ecuador celeste y la proyección del objeto sobre el mismo ecuador celeste. El ángulo horario se mide entre 0 a $\pm 180^\circ$. Valores negativos en la mañana y positivos en la tarde. Para el Sol, el ángulo horario varía a razón de 15° por hora. El ángulo horario se calcula en base a la ecuación (2.5)

$$\omega = -180^\circ + 15^\circ \cdot h_s \quad (2.5)$$

Altura Solar (h_s): corresponde a la distancia angular entre el horizonte y el objeto en la bóveda celeste. Se mide de 0° a 90° . Si el objeto está por debajo del horizonte, la altura es negativa (véase la Figura 2.11). Dicha magnitud se obtiene mediante la ecuación (2.6)

$$\cos(h_s) = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (2.6)$$

Ángulo Zenit (θ): es el complemento de la altura solar (Figura 2.11).

Azimut (γ): corresponde a la distancia angular entre la intersección del meridiano del lugar con la horizontal y la proyección del objeto sobre el horizonte. Esta intersección se mide sobre aquella que apunta hacia el Ecuador (Véase Figura 2.12). El azimut se mide entre 0° a $\pm 180^\circ$. Valores negativos en la mañana y positivos en la tarde. Se obtiene mediante la ecuación (2.7).

$$\cos \gamma = \frac{\cos \delta \cdot \cos w - \sin h_s \cdot \sin \varphi}{\cos h_s \cdot \sin \varphi} \quad (2.7)$$

Para un plano con inclinación (β) y azimut (γ) se cumple la siguiente relación entre la normal del plano y el rayo vector del sol (véase ecuación(2.8))

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \cos(\beta) - \cos(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(\gamma) \\ & + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos \beta \cdot \cos(w) + \text{sen}(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\beta) \\ & \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(w) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\gamma) \cdot \text{sen}(w) \end{aligned} \quad (2.8)$$

El ángulo zenit θ corresponde a la diferencia entre la normal del plano y un rayo proveniente del sol.

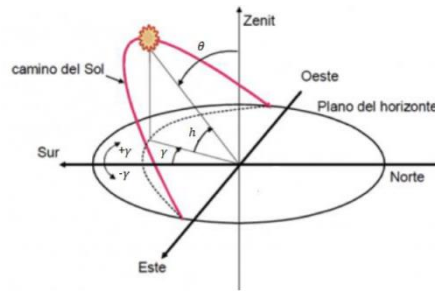


Figura 2.12 Esquematización de las relaciones geométricas entre el Sol y la Tierra. Fuente: (Red Nacional de Radio de Emergencia, 2019)

En base a estas definiciones se asume que los rayos incidentes provenientes del Sol llegan a la Tierra de manera paralela entre ellos. Debido a la gran distancia entre los dos cuerpos celestes dicho supuesto se puede considerar como una aproximación aceptable (Fernández-Coppel, 2010). Para efectos del estudio, se considera una superposición de imagen para la potencia energética incidente, lo que evita una alta precisión de concentración para la radiación solar, considerando al Sol como un emisor puntual.

2.2.2 Comportamiento de rayos en un sistema

Para comprender el uso y utilización de tecnologías de concentración solar, es importante entender cómo evoluciona el comportamiento de los rayos incidentes en un sistema. Por lo tanto, es de vital importancia comprender como los rayos llegan a un sistema, se reflejan de un sistema y como existen pérdidas asociadas a dichos comportamientos. Para lograr entender dicho supuesto, a lo largo del tiempo se han desarrollado herramientas de trazado de rayos, que obedecen a principios físicos como geométricos.

Una vez generados los rayos, estos son capaces de interactuar con los elementos del sistema, conservando los principios físicos básicos de la incidencia de los rayos solares. Los rayos pueden ser absorbidos, transmitidos, o reflejados. En cuanto a la reflexión, en una primera aproximación se pueden considerar como reflexión especular (Figura 2.13). Dicho rayo es reflejado de manera especular con igual probabilidad al coeficiente de reflexión (ρ) del material. En caso de no ser reflejado, este rayo es transmitido o bien absorbido por el elemento.

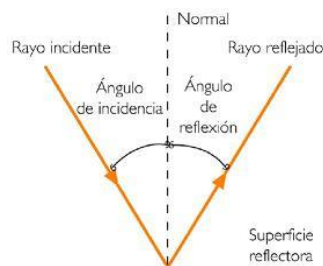


Figura 2.13 Representación de los principios básicos de la Reflexión Especular. Fuente: (Pesa et al., 1995)

Teóricamente la Figura 2.13 es una representación de la realidad, ya que el comportamiento no es absolutamente especular y existe una componente difusa (Véase Figura 2.14). Existen factores que determinan cuán especular o difusa es la incidencia de los rayos, y en caso de ser difusa cuanta dispersión posee dicha incidencia. Estrechamente relacionadas con los errores micro y macro de la superficie reflectante. Una consideración importante, corresponde a que no se estudiaran sus efectos en la presente investigación.

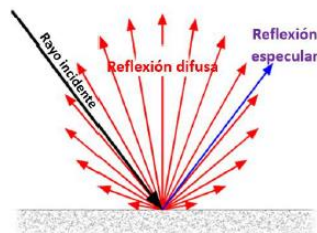


Figura 2.14 Representación de la Reflexión Especular y Reflexión Difusa. Fuente: (Pesa et al., 1995)

2.3 Energía Solar Térmica

La energía solar representa una oportunidad para la generación energética mundial y muy favorable para el caso particular de Chile, que como se mencionó anteriormente posee un gran potencial en este aspecto. La radiación proveniente del Sol entrega calor y luz a la tierra, haciendo posible la vida tal y como se conoce. Con el paso de los años, la especie humana ha aprendido a aprovecharla y sacar beneficios adicionales de ésta.

(Osses et al., 2017) “Dentro de las fuentes de energía que han utilizado, destacan las hidroeléctricas, gas natural, carbón y petróleo. Sin embargo, el año 2013, se publicó la Ley 20.698, que establece que al año 2025, el 20% de la energía comercializada debe provenir de fuentes renovables no convencionales (Santana *et al.*, 2014: 6). Chile es considerado un país muy atractivo para desarrollar e implementar tecnologías de este tipo dada su ubicación geográfica y gran diversidad biológica, proporcionando abundantes recursos energéticos (Agostini *et al.*, 2015: 40). El desierto de Atacama tiene uno de los mayores potenciales solares del mundo, con casi 365 días de cielo despejado, alta radiación solar y baja humedad, proporcionando una importante oportunidad para contribuir a la diversificación energética del país (Agostini *et al.*, 2015: 40)”.

2.3.1 Recurso Solar

El Sol es una inmensa esfera de gases a alta temperatura, con un diámetro de $1,39 \times 10^9 \text{ m}$, situado a la distancia media de $1,495 \times 10^{11} \text{ m}$ respecto de la Tierra, esta distancia se llama unidad astronómica. El sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión (Huanca Fuentes, 2012).

Se estima que la temperatura en el interior del Sol es del orden de 10^7 K , pero en la fotosfera, es decir, en la superficie externa, la temperatura es de 5777 K . El Sol puede ser considerado como un cuerpo negro (emisividad igual a 1), con una temperatura efectiva de emisión de 5777 K .

Basado en la literatura, el ciclo solar dura aproximadamente 11 años y estudios indican que la variación de la radiación solar emitida es menor al 1%, lo que prácticamente es constante para el estudio de la misma. Para el campo de la ingeniería esta intensidad se considera constante y su valor corresponde a $G_{sc} = 1.367 \text{ W/m}^2$ (Plasencia et al., 2007)

Su variación aproximada es $\pm 0.02\%$ por ciclo solar, además se suma la variación dependiente de la excentricidad de la órbita terrestre que corresponde a 1.7% aproximadamente. Los máximos y mínimos de radiación solar incidente a la atmosfera terrestre están relacionados con el perihelio (mínima distancia Sol-Tierra) y el afelio (máxima distancia Sol-Tierra), esta variación se puede expresar mediante la siguiente ecuación (1.9)

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (1.9)$$

G_{sc} : Constante Solar 1.367 W/m^2 (Plasencia et al., 2007)

n : día del año acumulado (ej. 15 de mayo ($n = 136$))

2.3.2 Distribución espectral de la radiación extraterrestre

El Sol emite radiación en todo el espectro electromagnético, desde rayos gamma hasta ondas de radio. En forma de onda corta, principalmente radiación ultravioleta (UV), espectro visible y radiación infrarroja cercana que comprende el

rango de $0.2 \mu m$ a $3.0 \mu m$, esto contempla el 99% de la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, en tanto, la mayor parte de la radiación terrestre emitida es de onda larga $3.5 \mu m$ a $50 \mu m$. Finalmente, el espectro de onda corta comprendido entre los $0.25 \mu m$ hasta los $4.0 \mu m$, es aprovechado para variados propósitos desde el proceso de fotosíntesis hasta celdas solares (IDEAM, 2014). Los aspectos mencionados anteriormente están expresados gráficamente en la Figura 2.15

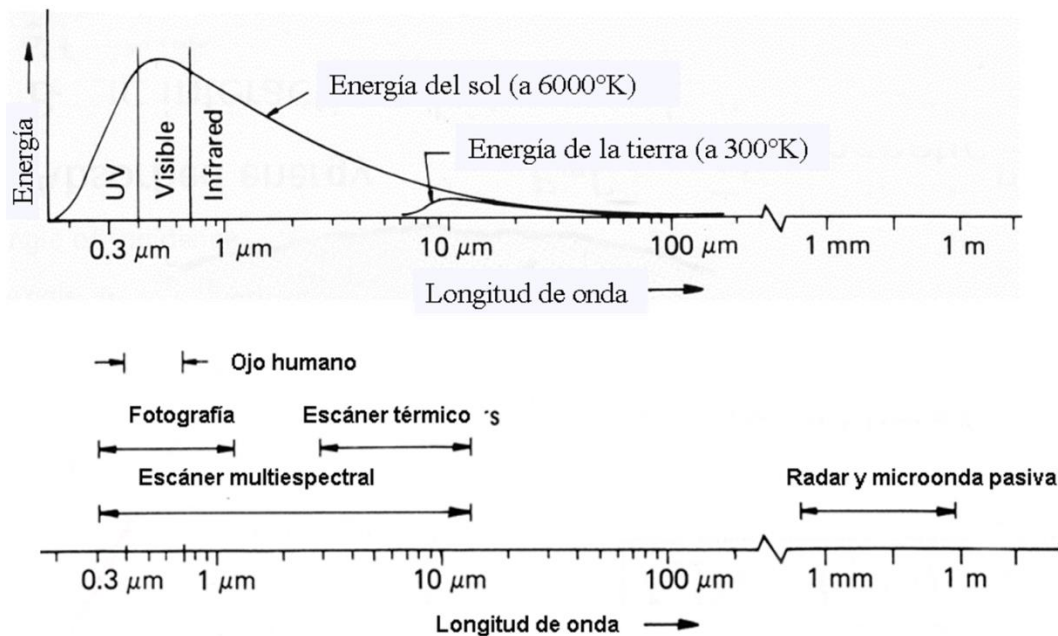


Figura 2.15: Distribución espectral de la radiación irradiada por el Sol y la Tierra. Fuente: (IDEAM, 2014).

2.3.3 Atenuación de la Radiación Solar

La radiación solar recibida sobre la superficie de la Tierra depende estrechamente de las variaciones relacionadas a la atmósfera terrestre, puesto que se comporta como un medio participante en la radiación. Debido a lo anterior, la superficie recibe una atenuación relacionada fundamentalmente a 2 o 3 fenómenos: la reflexión (albedo), la dispersión y absorción atmosférica.

- a) Dispersión Atmosférica: Proceso mediante el cual pequeñas partículas suspendidas en un medio de diferente índice de refracción, dispersa una parte de la radiación incidente en todas direcciones. La dispersión no provoca una transformación de la energía sino un cambio de la distribución espacial de la energía. Este proceso difumina la radiación, dispersándola en diferentes direcciones (radiación difusa).
- b) Absorción Atmosférica: Proceso por el cual la radiación incidente es retenida por una sustancia. La atmosfera actúa como dicha sustancia, este proceso provoca una absorción de la energía que termina transformándose en otro tipo de energía.
- c) Reflexión (Albedo): Porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella. Este tipo de atenuación tiene mayor recurrencia en la superficie terrestre.

Los fenómenos anteriormente explicados se esquematizan mediante la Figura (2.16).

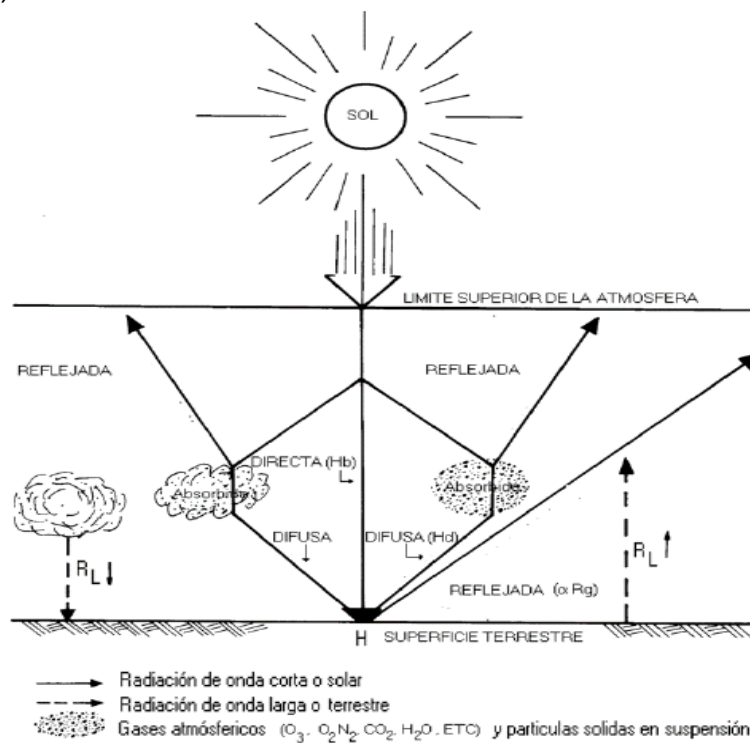


Figura 2.16: Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre. Fuente: (IDEAM, 2014).

En función de la atenuación presente en la atmosfera, la dispersión se representa bajo parámetros de Dispersión Rayleigh y Dispersión Mie. Para el caso particular de esta investigación, se utilizará los parámetros de aproximación del Modelo de Hottel.

El Modelo de Hottel (1976), expresa la transmitancia atmosférica para la radiación directa, τ_b en función del ángulo cenital, θ_z , (mayor transmitancia en dirección vertical, menor hacia el horizonte), de la altura sobre el nivel del mar, A , en kilómetros, (mayor transmitancia a mayor altura) y del tipo de clima; de la forma (ecuación (2.10)):

$$\tau = a_0 + a_1 \cdot e^{-k/\cos\theta_z} \quad (2.10)$$

El ángulo θ_z corresponde al ángulo cenital de incidencia del sistema horno-heliostatos y a_0, a_1, k a parámetros ajustados empíricamente que para la corrección de altura y el tipo de clima. Dichas expresiones se presentan a continuación, (ecuación (2.11);(2.12);(2.13))

$$a_0 = r_0 [0.4237 - 0.00821(6 - A)^2] \quad (2.11)$$

$$a_1 = r_1 [0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2] \quad (2.12)$$

$$k = r_k [0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2] \quad (2.13)$$

donde A es la altura sobre el nivel del mar en km y las magnitudes r_0, r_1, r_k están presentes en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Factores de corrección para algunos tipos de climas. Fuente: Elaboración propia basado en (Hermosillo Villalobos et al., 1995).

| Tipo de Clima | r_0 | r_1 | r_k |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| Tropical | 0.95 | 0.98 | 1.02 |
| Verano, latitud media | 0.97 | 0.99 | 1.02 |
| Verano, sub-ártico | 0.99 | 0.99 | 1.01 |
| Invierno, lat. Media | 1.03 | 1.01 | 1.00 |

Para la utilización de este modelo atmosférico, dada la latitud geográfica, la fecha y la hora, debe calcularse el coseno del ángulo cenital, según la siguiente formulación (ecuación (2.14)):

$$\cos \theta_z = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2.14)$$

ϕ : Latitud del lugar

δ : Declinacion

ω : Hora solar en plano local

θ_z : Angulo cenital

Finalmente, la expresión se define como la ecuación (2.15)

$$I_i = I_o \cdot (a_0 + a_1 \cdot e^{-k/\cos\theta_z}) \quad (2.15)$$

I_o : corresponde a G_{on} (Plasencia et al., 2007)

$\cos(\theta_z)$: angulo cenital

a_0, a_1, k : Parametros del Modelo de Hottel

2.3.4 Absortividad, Reflectividad y Transmisividad

Todo el entorno emite radiación en forma constante y todo cuerpo que posea una temperatura mayor al cero absoluto emite radiación térmica, junto a lo anterior la emisividad representa las características de emisión de radiación térmica en comparación con un cuerpo negro a la misma temperatura (Ibarra Salazar & Rojas Pacheco, 2012) .

Lo anterior significa que todo cuerpo incluyendo el cuerpo humano es constantemente bombardeado por la radiación proveniente de todas direcciones en un intervalo de longitudes de onda. La radiación que incide sobre una superficie se llama irradiación y se denota por G . Cuando la radiación incide sobre la superficie, parte de ella es absorbida, parte de ella es reflejada y la parte restante, si es que existe, es transmitida. Esto se explica en la Figura 2.17.

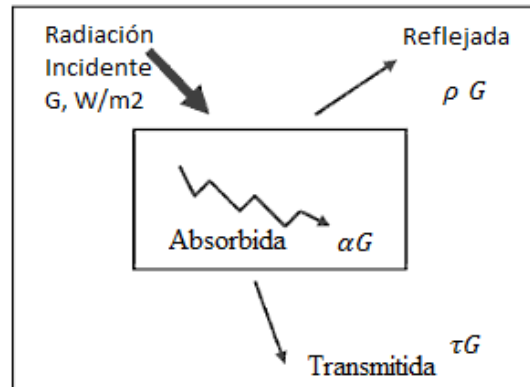


Figura 2.17: Absorción, reflexión y transmisión de la radiación por un material semitransparente.
Fuente: (Ibarra Salazar & Rojas Pacheco, 2012)

Respecto a la irradiación absorbida por la superficie es denominada absorptividad (α), la fracción reflejada es denominada reflectividad (ρ) y, por último, la porción transmitida es llamada transmisividad (τ). Dichas denominaciones se expresan bajo las siguientes formulaciones (ecuaciones (2.16);(2.17) y (2.18))

$$\alpha = \frac{\text{Radiación Absorbida}}{\text{Radiación Incidente}} = \frac{G_{abs}}{G} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2.16)$$

$$\rho = \frac{\text{Radiación Reflejada}}{\text{Radiación Incidente}} = \frac{G_{ref}}{G} \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (2.17)$$

$$\tau = \frac{\text{Radiación Transmitida}}{\text{Radiación Incidente}} = \frac{G_{tr}}{G} \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (2.18)$$

G es la energía de la radiación que incide sobre la superficie y G_{abs} , G_{ref} y G_{tr} son las fracciones absorbida, reflejada y transmitida a ella respectivamente. En cuanto a la primera ley de la termodinámica se indica que la suma de energía de radiación absorbida, reflejada y transmitida sea igual a la radiación incidente. Esto se puede expresar en la siguiente formulación (ecuación (2.19)).

$$G_{abs} + G_{ref} + G_{tr} = G \quad (2.19)$$

Aplicando el producto de G^{-1} sobre la expresión, se obtiene (ecuación (2.20)):

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.20)$$

En cuanto a las superficies opacas, $\tau = 0$, por tanto (ecuación (2.21)):

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.21)$$

La relación anterior nos permite determinar tanto la absorptividad como la reflectividad de una superficie opaca. Para la reflectividad se aplica la Ley de Snell-Descartes, quedando como expresión general la siguiente ecuación (2.22)

$$I_r = I_i \cdot \rho \cdot \sin \theta_r \quad (2.22)$$

I_i : Irradiancia total afectada por la trasmisividad atmosférica

$\sin \theta_r$: corresponde al ángulo de refracción dado por la Ley de Snell – Descartes

ρ : índice de reflectancia del material

Tabla 2.2: Reflectancia especular normal solar de diversas superficies. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)

| Superficie | ρ |
|---|--------|
| Vidrio de baja reflectancia con plateado posterior | 0.94 |
| Plata electrochapada, nueva | 0.96 |
| Aluminio de alta pureza, nuevo y limpio | 0.91 |
| Reflector óptico con depósito de aluminio | 0.89 |
| Aluminio de alta pureza procesado en bruto | 0.89 |
| Vidrio blanco (Bajo en hierro) con plateado posterior, nuevo y limpio | 0.88 |
| Aluminio revestido con SiO, limpio | 0.87 |
| Papel de aluminio, con pureza del 99.5% | 0.86 |
| Acrílico 3M aluminizado, nuevo | 0.86 |
| Acrílico 3M aluminizado* | 0.85 |
| Aluminio comercial procesado Alzac | 0.85 |

Esa magnitud que incide sobre el recubrimiento del horno es afectada por el ángulo de incidencia y el factor de transmitancia del recubrimiento. A continuación, se expresa la siguiente formulación que representa dichas condiciones (ecuación 2.23).

$$I_{abs} = I_r \cdot \tau_v \quad (2.23)$$

I_r : Irradiancia reflejada afectada por el índice de reflectividad del material
 τ_v : Transmitancia del vidrio en función del ángulo de incidencia

Tabla 2.3: Transmitancia solar para vidrio grabado y no grabado en función del ángulo de incidencia. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013)

| Tipo de Vidrio | Transmitancia por ángulo de Incidencia | | | | | | |
|----------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0° | 20° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| Grabado | 0.941 | 0.947 | 0.945 | 0.938 | 0.916 | 0.808 | 0.562 |
| No Grabado | 0.888 | 0.894 | 0.903 | 0.886 | 0.854 | 0.736 | 0.468 |
| Variación % | 5.63 | 5.60 | 4.44 | 5.54 | 6.77 | 8.91 | 16.73 |

2.3.5 Tipos de Radiación

Debido a la atenuación provocada por la atmosfera terrestre, la radiación solar sufre transformaciones al incidir sobre la superficie. Debido a esto existen tipos de radiación (Véase Figura 2.18) descritas a continuación:

- a) Radiación Directa: Corresponde a aquella proveniente directamente del Sol, sin haber sufrido ninguna modificación. Puede representar más de un 90% del total de radiación recibida en días despejados.
- b) Radiación Difusa: Es aquella que es recibida después de haber sufrido modificaciones como resultado de reflexiones y refracciones de la radiación solar en la atmósfera.
- c) Radiación Reflejada: Es aquella proveniente de la reflexión en el suelo o en edificios circundantes. La reflectividad (ρ) varía entre 0,2 y 0,7 en función de la superficie reflectante.

Para efectos de esta investigación, se analizarán parámetros energéticos en función de la radiación directa debido a que aporta mayor radiación térmica respecto a los otros tipos de radiación, se suma a lo anterior los aspectos técnicos a considerar para la correcta estimación de la radiación difusa y el albedo.

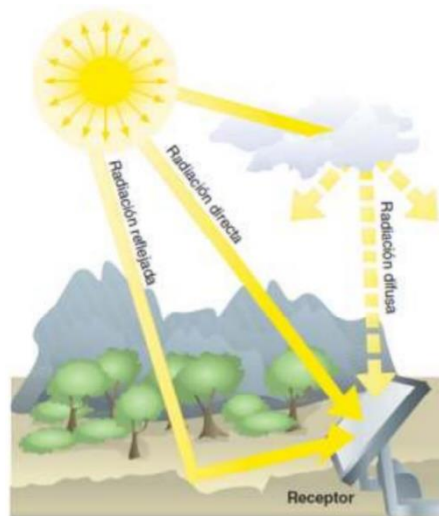


Figura 2.18: Tipos de radiación solar en la atmosfera terrestre. Fuente: (Adler et al., 2013)

2.3.6 Calor Específico y Capacidad Calorífica

Existen diversas formas en las cuales se transfiere energía por calor, al agregar calor a una sustancia y esta se traduce en una diferencia de temperatura, dicho calor dependerá de la capacidad calorífica c ($\frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$) de dicha sustancia. Lo anterior esta dado para una cantidad de sustancia m (kg) y una diferencia de temperatura ΔT ($^\circ C$) (Altamirano, 2019). (Véase ecuación 2.24)

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T^\circ \quad (2.24)$$

La ecuación 2.24 solo es válida únicamente cuando la adición de calor no produce un cambio de estado en la sustancia, es decir, solo existe una variación de temperatura en la sustancia. Lo anterior, a su vez, dependerá del proceso en el cual se realiza la transferencia de calor. Es decir, a presión constante c_p o volumen constante c_v .

Cuando el cambio de estado se produce, es necesario emplear las constantes de calor latente de fusión L ($\frac{KJ}{Kg}$) y/o calor latente de vaporización L_v ($\frac{KJ}{Kg}$). Finalmente, la ecuación general que traduce el aporte de energía global a una sustancia para generar un cambio desde el estado sólido al estado gaseoso. (véase ecuación 2.25)

$$Q_t = m \cdot c \cdot \Delta T^\circ + (m \cdot c \cdot \Delta T_f + m \cdot L) + (m \cdot c \cdot \Delta T_v + m \cdot L_v) \quad (2.25)$$

2.4 Concentradores Solares (CS)

Básicamente existen tres formas para aprovechar la energía solar: los paneles fotovoltaicos, los colectores y concentradores solares.

Entendiéndose que los paneles solares fotovoltaicos y los colectores solares son bastante útiles para determinadas funciones, muchas veces se desea trabajar con temperaturas mayores a las que dichos dispositivos pueden otorgar. Para lograr

alcanzar dichas temperaturas, se debe reunir toda la radiación de una determinada área en una zona más pequeña, logrando potencias de energía mucho más elevadas en dicha zona. Es este principio de los concentradores solares.

Un concentrador solar cuenta con dos elementos principales, un concentrador y un receptor. El concentrador tiene como tarea reunir la energía de una determinada área en un punto o zona pequeña, la cual se denominará zona focal o foco. A su vez, dicho foco posee la finalidad de captar ese gran flujo de energía y aprovecharlo, ya sea para generar vapor, calentar un líquido u otro fin que busque aprovechar dicho flujo.

En la Figura 2.19 se representan cuatro tipos de concentradores solares: cilindro-parabólicos, Fresnel lineal, disco parabólico y receptor central. Estos serán explicados y detallado su funcionamiento básico.

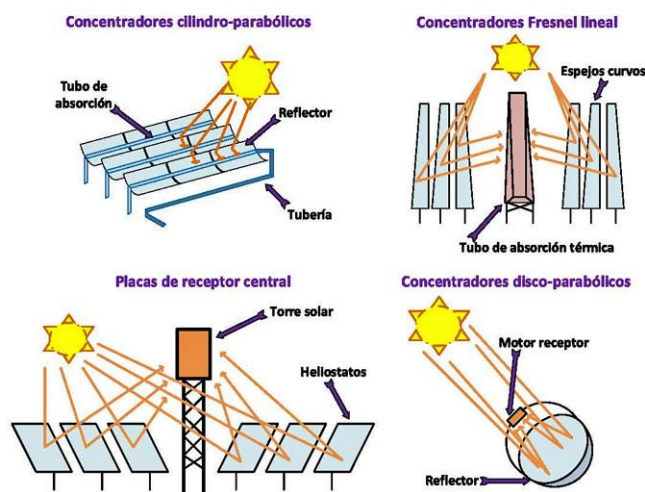


Figura 2.19 Representación de distintos tipos de concentradores solares. De izquierda a derecha, de arriba hacia abajo. Concentrador Cilindro-Parabólico, Concentradores Fresnel Lineal, Placas de Receptor Lineal y Concentrador Disco-Parabólico. Fuente: Revista Digital EsEnergia España, 2020.

El objetivo de los concentradores solares es redirigir el flujo de energía en forma de radiación solar hacia una determinada zona focal. Para lograr dicho principio, es primordial saber con exactitud la dirección de los rayos incidentes (Bauerle Concha, 2018). Para la radiación difusa no es posible determinar con precisión la dirección de los rayos, mientras que para la radiación directa sí es

posible lograrlo. En consecuencia, los concentradores solo son capaces de utilizar la radiación directa principalmente (Bauerle Concha, 2018).

La tecnología de concentradores solares se ha visto con un fuerte aumento en los últimos años (Bauerle Concha, 2018). Asimismo, España se ha posicionado como el mayor propulsor de esta área (Figura 2.20). La capacidad global creció solo un 11% en 2019 a 6,2 [GW] con 600 [MW] en funcionamiento. Esto fue por debajo de los 700 [MW] puesto en servicio en 2018 y muy por debajo del promedio anual de 24% de la última década (Labandeira et al., 2012).

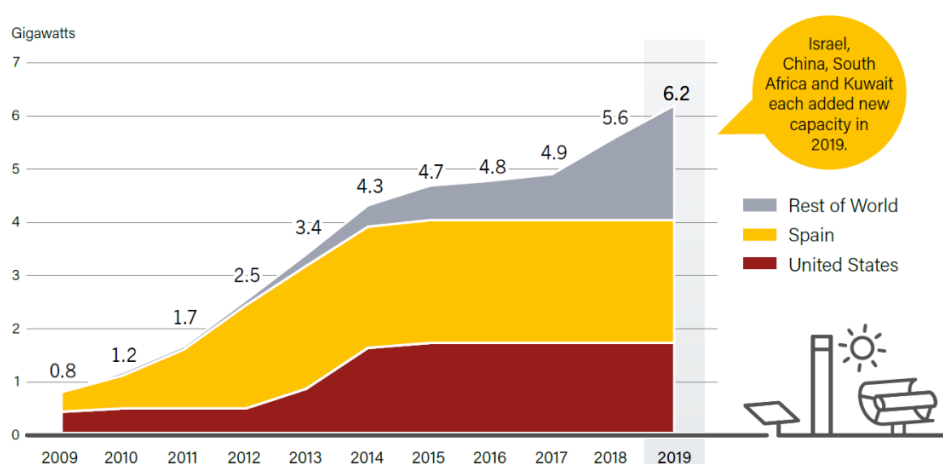


Figura 2.20 Capacidad global de concentración de energía solar térmica, por país y región. (2009-2019) Fuente: Informe de estado global de energías renovables 2020. REN21.

2.5 Principales componentes para la Concentración Solar

2.5.1 Elementos principales

Para un correcto funcionamiento del sistema conjunto, se requiere de una serie de equipos y sistemas auxiliares. Estos elementos se detallarán a continuación.

1. **Sistema Colector:** Los heliostatos, en conjunto con el receptor, representan a los componentes con mayor importancia dentro del

sistema, llegando a suponer el 60% del costo total del componente solar.

Su función principal corresponde a captar la radiación solar incidente y redirigirla al receptor. Básicamente está compuesto por una superficie reflectante (espejos de vidrios), además de una estructura de soporte, mecanismos de movimientos y un sistema de control.

En función del tamaño, existen varias dimensiones, $40 m^2$ ó $50 m^2$, hasta su posterior evolución de $150 m^2$. en la actualidad se tiende a la utilización de heliostatos pequeños, debido a ventajas prácticas como su simplificación y abaratamiento en los procesos de transporte, instalación y puesta en marcha.

La disposición espacial del campo de heliostatos con respecto al receptor está condicionada en gran medida por la orografía. Esto hace relación con la geografía física que se encarga del estudio, descripción y representación del relieve terrestre (Ulate, 2012); asimismo, el tamaño de la planta y por la disposición del receptor. Las formas más utilizadas para la disposición del campo de heliostatos corresponden a:

- Campo Circundante: Heliostatos alrededor de la torre.
- Campo Norte-Sur: Heliostatos a un lado de la torre. La orientación depende de la latitud en la que se encuentre el emplazamiento dado.(Paredes, 2012)

En la Figura 2.21 se visualiza la representación de dichas disposiciones para el campo de heliostatos.

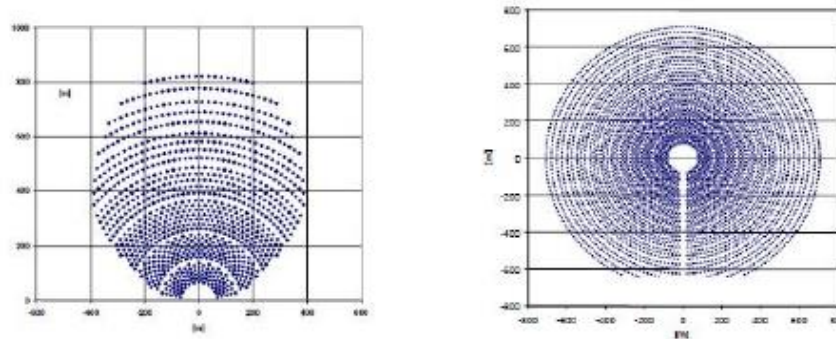


Figura 2.21: Disposiciones para el campo de heliostatos. Izquierda: Campo N-S, Derecha: Campo Circundante. Fuente: (Paredes, 2012).

2. **Soporte**: Su función principal es el sostenimiento del receptor, que mayoritariamente se sitúa a una cierta altura sobre el nivel del campo de heliostatos, con el propósito de reducir sombras y bloqueo entre estos, además de otros elementos auxiliares que puedan provocar este tipo de desventajas. Por lo general la construcción de estos soportes están constituidas de estructuras metálicas o de hormigón.
3. **Receptor**: Es el dispositivo donde se lleva a cabo la conversión de radiación solar concentrada en energía térmica.

2.5.2 Pérdidas asociadas al sistema

Todo sistema de trabajo energético lleva consigo pérdidas asociadas a trabajo mecánico, disposición de componentes y elementos externos propios del rendimiento del sistema. Uno de los más influyentes corresponde al aumento de la temperatura, puesto que a mayor temperatura aumenta la entropía del sistema.

- a) **Pérdidas geométricas**: Corresponde a las dimensiones y posiciones relativas de los elementos que conforman el campo de heliostatos. Asimismo, la posición del Sol, que a su vez depende de la hora local y las magnitudes geométricas (azimut,

inclinación, altura solar, declinación). Las tres causantes principales a distinguir son:

- Pérdidas originadas debido a la reducción de área proyectada visible para el Sol: Son proporcionales al coseno del ángulo de inclinación de la normal al heliostato respecto de los rayos solares, y se cuantifican mediante el factor coseno, (Véase Figura 2.22).

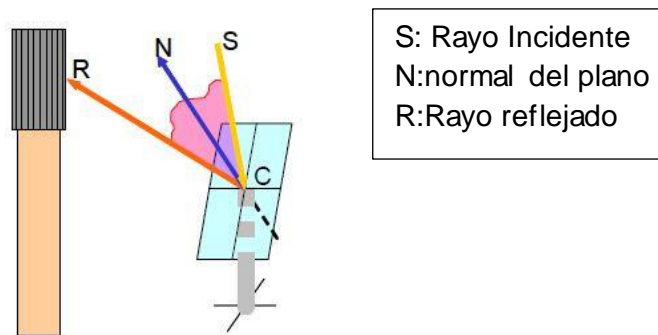


Figura 2.22: Pérdidas por el Factor Coseno. Fuente. (Paredes, 2012)

- Pérdidas producto de sombras: Generan una reducción del área útil reflexiva de los heliostatos. (Véase Figura 2.23)
- Pérdidas por bloqueo: Responde a la fracción de radiación solar reflejada por los heliostatos que no llega al receptor producto de otro heliostato posterior. (Véase Figura 2.23)

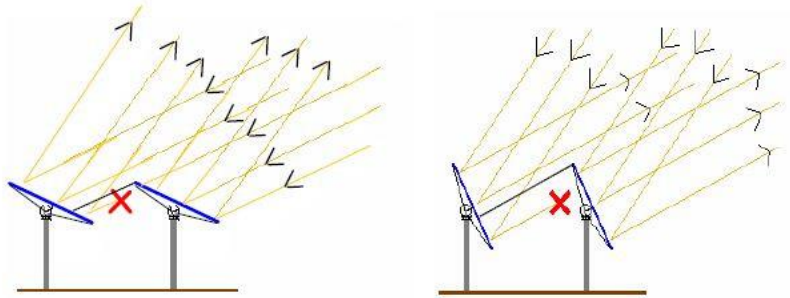


Figura 2.23: Pérdidas debido a la geometría de los heliostatos y disposiciones. Izquierda: Pérdidas por sombras. Derecha. Pérdidas por bloqueo. Fuente: (Paredes, 2012).

- b) **Pérdidas por reflectividad:** Una parte de la radiación incidente sobre la superficie reflexiva de un heliostato no logra ser reflejada, sino que es absorbida por el captador. La razón entre la radiación incidente y la reflejada se denomina “reflectividad”, la que depende de la longitud de onda. La cuantificación se determina mediante un valor ponderado por el espectro solar.
- c) **Pérdidas asociadas a la captación de radiación solar:** Una parte de la radiación reflejada del campo de heliostatos, no logra alcanzar la superficie reflectora debido a la imperfección de los heliostatos, errores de dirección al punto focal, etc. Una forma de cuantificar este efecto es mediante el factor de desbordamiento o *spillage*.
- d) **Pérdidas en la conversión fototérmica:** Se incluyen las pérdidas por radiación, convección y conducción entre los diferentes medios que conforman el sistema.

2.5.3 Rendimiento

Para analizar la eficiencia del sistema de concentración se deben dar a conocer los valores de las pérdidas asociadas propias del funcionamiento, otro elemento a considerar es la correcta estimación de dichos factores. Posterior a esto, se analiza la eficiencia del sistema. Para explicar lo anterior, se presentará un diagrama de flujo en la Figura 2.24. (Cabe destacar que estos valores son estimativos basados en (Paredes, 2012)).

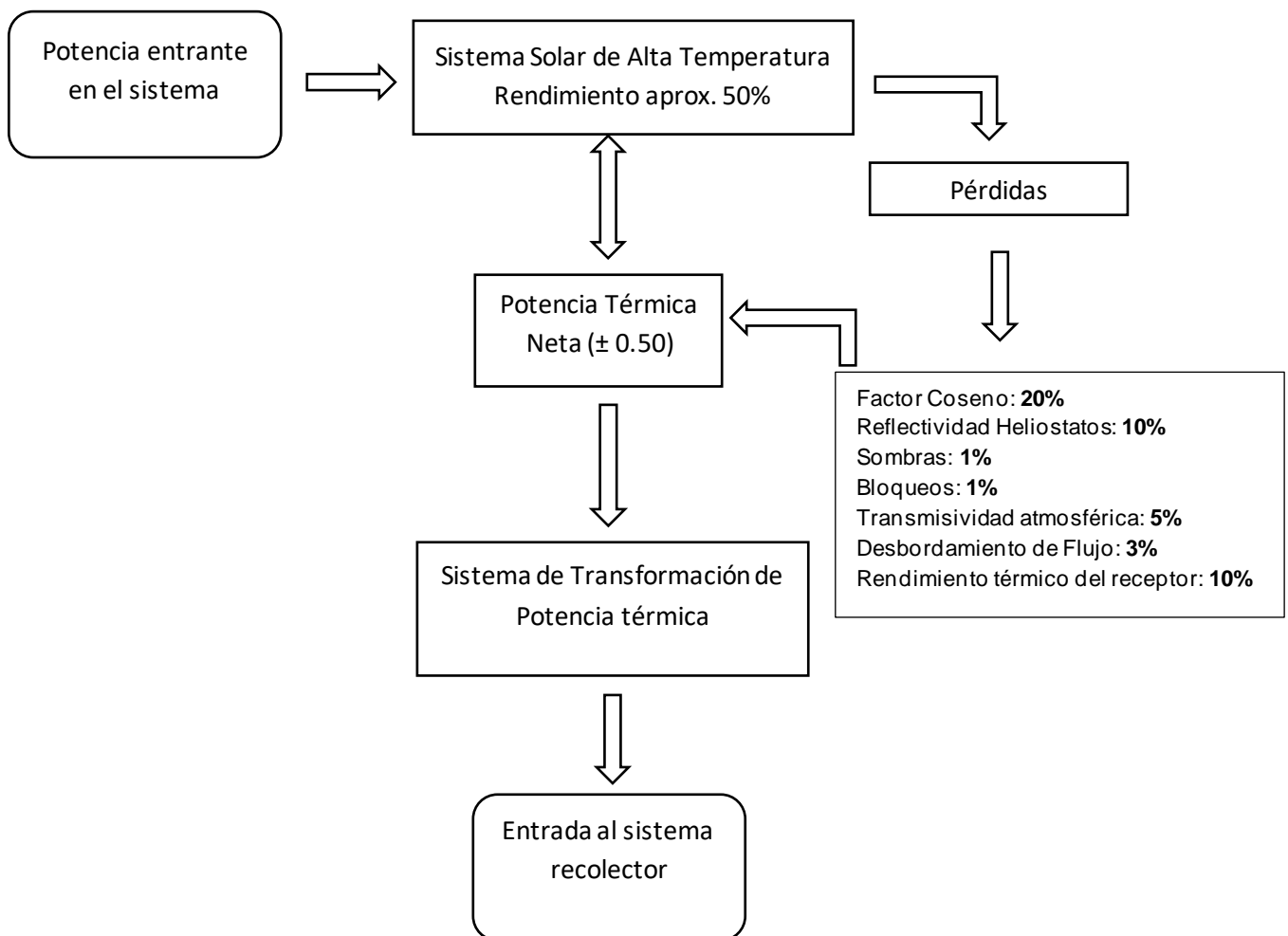


Figura 2.24: Diagrama de flujo del rendimiento del sistema de torre central. Fuente: Elaboración propia basado en (Paredes, 2012).

2.6 Principio de Concentradores Parabólicos

Se puede decir que los concentradores parabólicos funcionan en base a un principio fundamental, el cual se explica cómo “para cualquier rayo incidente en la parte interior de una parábola en forma paralela a su eje, su reflexión especular siempre pasará por el foco de dicha parábola, sin importar en que parte incida”. Este principio se explica con la esquematización siguiente (véase Figura 2.25):

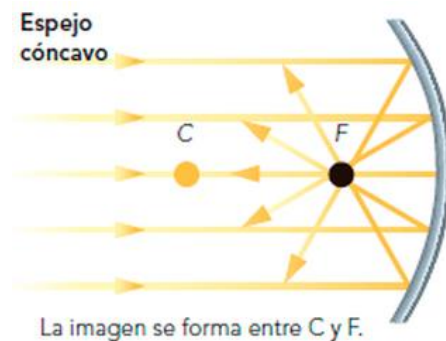


Figura 2.25 Esquematización del Principio de reflexión en espejos parabólicos cóncavos. Fuente: Física, Óptica, Espejos planos y esféricos, 2016

En dicho principio, es importante destacar que la concentración se lleva a cabo teóricamente, en un punto y no en una zona. Es importante considerar que en la realidad la concentración de energía no se produce en un punto, sino en una zona muy pequeña. En el caso de los concentradores parabólicos de revolución, los flujos que se logran alcanzar en dicha zona suelen ser elevados, llegando a ser del orden de 10.000 veces la densidad energética incidente de una superficie expuesta al sol, mientras que los de concentración lineal (cilindro-parabólicos) puede llegar a un factor de concentración de 100.

2.6.1 Concentradores Solares de Receptor Fijo

En base a los concentradores solares, se distinguen cuatro tipos que poseen la característica de un receptor fijo.

Para interés de la investigación, los “Concentradores de Torre Central”, son efectivos y útiles para proyectos de gran escala. Como su fabricación requiere de una gran cantidad de heliostatos, debido a que se trabaja con altas temperaturas en la zona focal, es necesaria una gran inversión para montar este tipo de tecnologías.

Además existe los “Concentradores de Paraboloides de Revolución Fijo, o Heliostato Auxiliar”, representados en la Figura 2.26. Este tipo de concentrador tiene como base un heliostato que redirige los rayos incidentes a un paraboloide de revolución fijo, con el objetivo de que los rayos solares siempre incidan de manera paralela al eje focal, esto genera un foco fijo. Dentro de sus características más importantes, destacan una fácil operación, así como también el hecho de poseer doble reflexión que generan pérdidas. Sumado a lo anterior, el diseño genera importantes pérdidas producto del efecto coseno durante el amanecer y la puesta de sol.

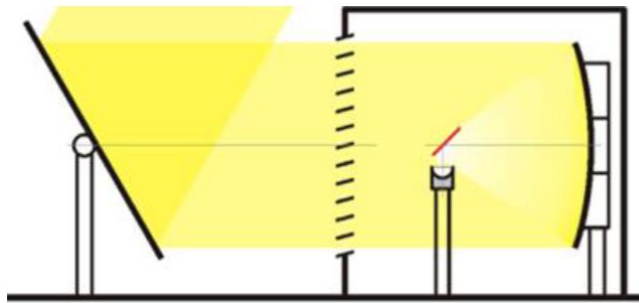


Figura 2.26 Representación de un Concentrador de Paraboloides Fijo o Heliostato Auxiliar. Fuente: (CC San Martín, 2012)

2.7 Hornos Solares de Alta Temperatura

En la actualidad existe una diversidad de hornos solares, todos con características propias y la variedad que se requiera. En particular, los de alta temperatura poseen en común la utilización de concentración puntual. Al igual que la mayoría de las tecnologías de concentración solar, se pueden identificar dos elementos, el mecanismo de reflexión (o concentración) y el receptor.

En cuanto al receptor, todos poseen en común una importante estructura aislante. Se entiende que las pérdidas térmicas aumentan drásticamente con el incremento de la temperatura, por lo que es necesario aislar de buena manera la zona receptora con el fin de minimizar al máximo las pérdidas calóricas, punto clave en el diseño de los hornos si se pretende alcanzar altas temperaturas sin la necesidad de consumir demasiada energía.

A su vez, el mecanismo de reflexión tiene como propósito redirigir la radiación solar incidente a la zona focal o receptor. Es importante tener en cuenta que toda reflexión trae consigo pérdidas de energía, por lo que reducir la cantidad de reflexiones es idealmente deseable. En su mayoría de los hornos solares el receptor es fijo, y requieren de al menos dos reflexiones. Por otro lado, la mayoría de los hornos solares con una sola reflexión poseen receptor móvil.

El horno solar de Odeillo, Francia, es el horno solar más grande en la actualidad (Figura 2.27). Fue puesto en operación en el año 1970 y alcanza temperaturas del orden de los $4.000^{\circ}C$ (Bauerle Concha, 2018). Para lograr ello cuenta con 63 heliostatos móviles que reflejan los rayos a un concentrador parabólico de 48 m de alto por 54 m de ancho, alcanzando una potencia térmica de 1 MW (Figura 2.28). Para el caso a investigar el receptor es fijo.



Figura 2.27 Horno Solar de Odeillo, Francia. Fuente: (CC San Martin, 2012)

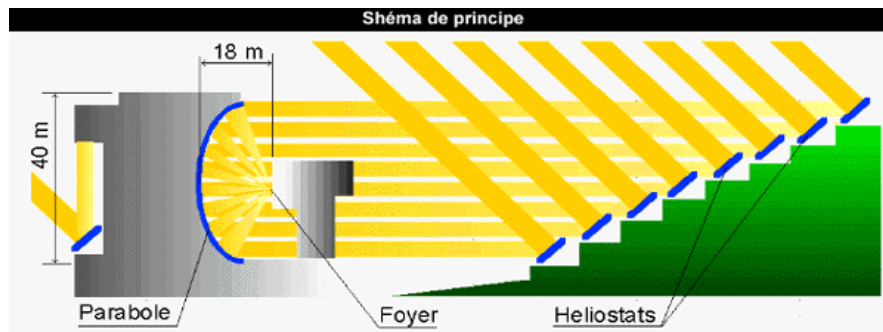


Figura 2.28 Esquematación de diseño del Horno Solar de Odeillo, Francia. Fuente:(CC San Martin, 2012)

Otro tipo de horno solar de esta envergadura es el horno solar de Mont Louis, Francia, el cual fue inaugurado en el año 1949 (Figura 2.29). Posee un heliostato de al menos 160 m^2 , el cual redirige los rayos hacia un concentrador parabólico de aproximadamente 10 m de apertura focal. Es capaz de alcanzar 3000°C , y genera 50 kW térmicos (Bauerle Concha, 2018). Para este caso también el receptor es fijo.



Figura 2.29: Horno Solar Mont Louis, Francia. Fuente: Pyrénées Cerdagne, 2017.

Otro ejemplo para destacar es la plataforma solar de Almería (Figura 2.30), España, que cuenta con tres hornos solares de alta temperatura: el SF-5, el SF-40 y el SF-60. Como sus nombres lo indican, tienen una potencia de 5, 40 y 69 *kW* térmicos respectivamente. Asimismo, logran concentraciones máximas de 6.000, 7.000 y 3.000 soles respectivamente. Los tres hornos solares poseen un heliostato móvil y un concentrador parabólico de revolución, obteniendo superficies de reflexión (en cuanto a los concentradores parabólicos) de 8,77 m^2 , 56,5 m^2 y 99,8 m^2 respectivamente (Plataforma Solar de Almería, «www.psa.es,», 2018). Al igual que los ejemplos anteriormente mencionados, los tres hornos de la plataforma solar de Almería presentan receptor fijo.



Figura 2.30: Plataforma Solar de Almería, España. Fuente:(SOTO, 2009)

Es importante destacar los últimos avances, estudios e investigaciones relacionadas con hornos solares de alta temperatura que están en dirección hacia tres focos principales, la generación de combustibles solares, la obtención de agua potable a partir de agua de mar y el estudio del comportamiento de diversos materiales a altas temperaturas.

2.8 Principios de la Transferencia de Calor

Para cualquier sistema térmico, es de suma importancia conocer la transferencia de calor presente, ya sea para su diseño, optimizar dicho sistema, y por consiguiente evitar pérdidas innecesarias de energía. Lo anterior involucra el diseño de hornos, debido a que se desea llegar a una temperatura utilizando la menor energía posible. En consecuencia, es de vital importancia lograr aislar el sistema para evitar pérdidas de calor.

Existen tres formas de transferencia de calor, de los cuales se hace necesario entender su comportamiento (Conesa, 2013). Estas formas de transferir calor son conducción, convección y radiación. De dichas formas, la de mayor relevancia para esta investigación es la radiación. A continuación, se abordará en dicha forma de transferencia de calor.

2.8.1 Radiación

Este mecanismo de transferencia se experimenta en todo tipo de cuerpo y en todo momento (Conesa, 2013). A diferencia de las dos formas de transferencia mencionadas con anterioridad, este método no necesita de un medio material para transferirse. Un ejemplo de esta forma de transferencia de calor es la energía térmica proveniente del Sol que llega a la Tierra.

Entendiéndose que todo cuerpo emite radiación de manera constante, esta se cuantifica a través de la Ley de Stefan-Boltzmann, presentada en la ecuación (2.26):

$$Q_{E,rad} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4 + \rho \cdot G \quad (2.26)$$

En la ecuación anterior, $Q_{E,rad}$ representa el calor por radiación emitido por un cuerpo, ε la emisividad del cuerpo emisor, A el área superficial del cuerpo emisor, σ la constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{K}$ y T temperatura superficial del cuerpo emisor.

Bajo estos principios la radiación siempre es emitida por un cuerpo, pero posterior a ello esta es capaz de interactuar con otros cuerpos. Se toma en cuenta que un material, al recibir radiación, puede reflejarla, absorberla o transmitirla (Figura 2.31). Cada una de ellas se manifiesta en proporción al coeficiente de reflectividad (ρ), absorptividad (α) y transmisividad (τ) del material correspondiente. Para efectos prácticos del estudio solo se considerará la variante reflejada, puesto que la variante de emisividad no es suficiente para llegar al horno en función de la distancia. En base al principio de la conservación de energía, la suma de los tres coeficientes debe ser igual a 1.

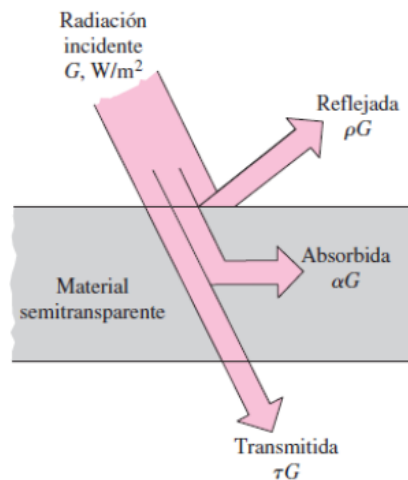


Figura 2.31: Diferentes comportamientos de la radiación en un cuerpo. Fuente: (Domínguez et al., 2017)

Es importante recordar que, para las superficies opacas la transmisividad, $\tau = 0$ por lo tanto $\alpha + \rho = 1$.

Considerando lo anterior, el total de energía por radiación resultante de un cuerpo que posee materialidad reflectante corresponde a la suma de lo que emite y lo que refleja de la radiación incidente (Figura 2.32). La ecuación (2.37) expresa dicha relación:

$$Q_{E,rad} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4 + \rho \cdot G \quad (2.37)$$

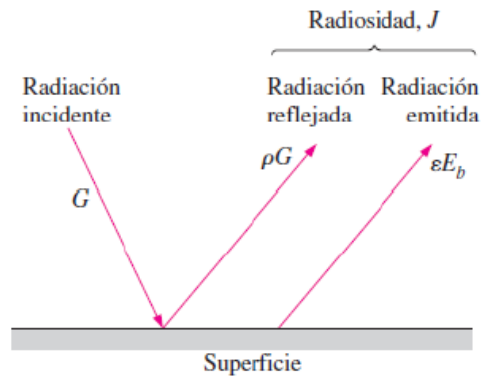


Figura 2.32: Energía total liberada por radiación en la superficie de un cuerpo. Fuente: (Domínguez et al., 2017).

En la cual Q_{rad} representa el total de energía liberada por radiación por parte de una superficie y G la radiación incidente de dicha superficie.

La ecuación (2.37) hace referencia a toda la energía liberada por una superficie. Para poder determinar cuantificadamente la energía que está impactando a otra determinada superficie, se requiere el concepto de factor de forma o factor de visión.

El factor de forma, representado en la Figura 2.33, da noción a la porción del total de energía liberada por medio de radiación de una superficie 1 que finalmente impacta sobre otra superficie 2.

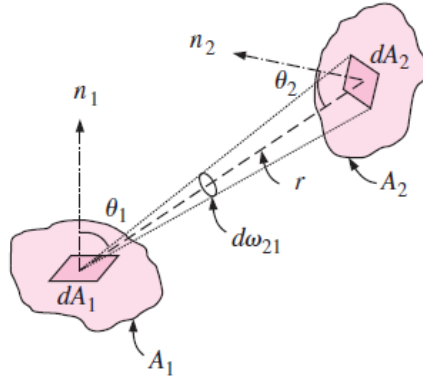


Figura 2.33: Esquematzación del concepto del factor de forma. Fuente: (Domínguez et al., 2017).

El factor de visión o forma de 1 hacia 2 ($F_{1 \rightarrow 2}$) se obtiene de la ecuación (2.48)

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi \cdot r^2} dA_1 dA_2 \quad (2.48)$$

Los ángulos y áreas de la ecuación (2.48) se encuentran expresados en la Figura 2.36.

Cabe mencionar que el factor $F_{1 \rightarrow 1} > 0$ cuando la superficie es cóncava. De ser convexa, $F_{1 \rightarrow 1} = 0$

Los factores de visión se pueden relacionar según la ecuación (2.59):

$$A_1 F_{1 \rightarrow 2} = A_2 F_{2 \rightarrow 1} \quad (2.59)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores, el calor entregado por una superficie 1 a una superficie 2 por medio de radiación ($Q_{rad,1 \rightarrow 2}$) queda expresado en la ecuación (2.30):

$$\dot{Q}_{rad,1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 2} \cdot (\epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4 + \rho \cdot G) \quad (2.30)$$

Por otra parte, la Conducción es un mecanismo de transferencia de calor a través de cuerpos sólidos y es por lo anterior que necesita de un medio material

para manifestarse (Conesa, 2013). En cambio, la Convección se entiende como el mecanismo en el cual se transmite calor por medio de líquidos y sólidos, y al igual que la Conducción se requiere de un medio material para manifestarse (Conesa, 2013).

2.8.2 Concepto de Régimen Transitorio

Considerando el concepto de un material o un cuerpo que comienza a recibir calor, de forma natural comenzará a aumentar su temperatura (Conesa, 2013). A medida que el aumento de temperatura va progresando, también existirían pérdidas de calor propias de la interacción con el entorno. Bajo estas condiciones y si se mantienen, se llegará a un punto donde las pérdidas de calor serán de igual magnitud al calor que está incidiendo sobre dicho cuerpo. Asimismo, este cuerpo conservará esta nueva temperatura de forma estacionaria. Dicho proceso para alcanzar una temperatura de estado estacionario se le conoce termodinámicamente como Régimen Transitorio.

La expresión que generaliza el concepto mencionado, con una temperatura del cuerpo hacia un régimen estacionario se visualiza en la siguiente ecuación (2.31):

$$\left(\begin{array}{l} \text{Transferencia de calor} \\ \text{hacia el cuerpo durante } dt \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Incremento en la energía} \\ \text{del cuerpo durante } dt \end{array} \right) \quad (2.31)$$

2.9 Horno de Fusión Flash

Principalmente consiste en oxidar un flujo de concentrado seco, que para el caso del cobre contiene $Cu - Fe - S$, en una corriente enriquecida con oxígeno (básicamente aire con 21% de O_2). La oxidación se lleva a cabo dentro de la cámara cilíndrica vertical, conocida como torre de reacción, en la cual tanto el concentrado seco como el aire enriquecido son inyectados por un quemador, localizado en la parte superior de la torre. En la Figura 2.34 se aprecia el esquema básico del Horno

de Fusión Flash Outokumpu, el cual consiste con dos torres principales, en la primera torre (Torre de Reacción) se localiza el quemador, en el cual se inyectan las materias primas del proceso, la segunda torre (Torre UP Take) corresponde a la torre de captación de gases sulfurados, partículas en suspensión, entre otros elementos que son recirculados al proceso para una mayor recuperación.

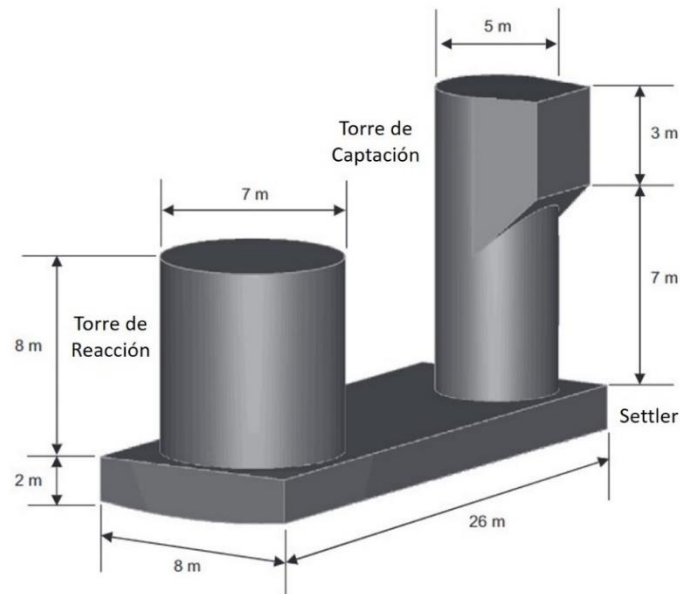


Figura 2.34 Dimensionamiento del Horno de fundición Flash. Fuente:(Schlesinger et al., 2011)

2.9.1 Tecnologías utilizadas para la fusión

a) Fusión por calentamiento directo

Su funcionamiento se basa principalmente en el calentamiento directo del concentrado (combustión de hidrocarburos). Dentro de los hornos más conocido se encuentra el Horno de Reverbero, el cual ya no es utilizado a nivel mundial por su alta ineficiencia térmica y el alto impacto contaminante del mismo.

b) Fusión de baño

Básicamente es una especie de reactor que lleva a cabo reacciones de oxidación (procesos exotérmicos) en su interior. Los más conocidos

corresponden a Convertidor Teniente (CT), Noranda, Isasmelt, Ausmelt y Mitsubishi.

c) Fusión por inyección en baño líquido (Flash)

El proceso consiste en la fusión de partículas de concentrado en suspensión en las altas Torres de Reacción. El con mayor uso de este tipo de tecnología es el Horno de Fusión de Outotec.

En la Figura 2.35 se visualizan las principales tecnologías de fusión. La presente investigación se profundizará sobre las características técnicas del Horno de Fusión Flash.

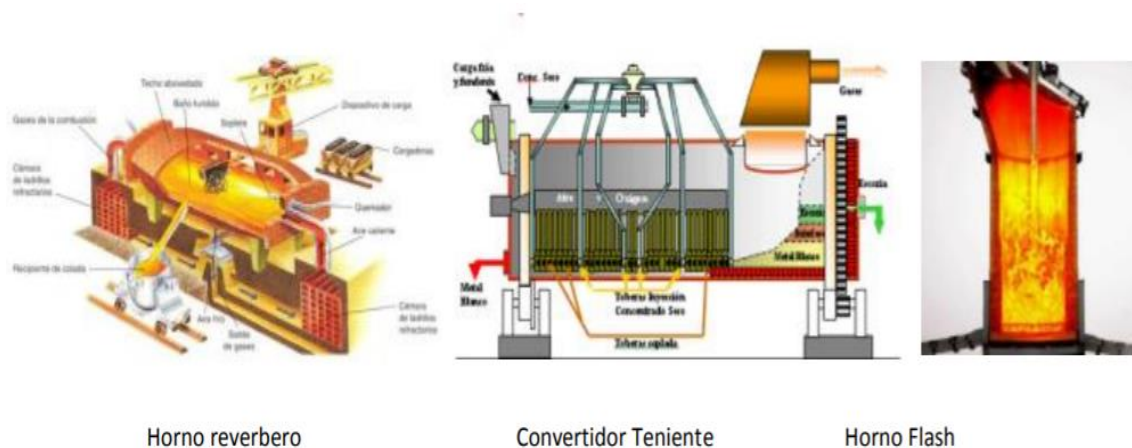


Figura 2.35: Tipos de Tecnologías de Fundición. Fuente:(Pérez Vallejos, 2017)

2.9.2 Aspectos Técnicos del Horno de Fundición Flash

Dentro de los componentes técnicos principales del horno de fundición Flash alimentado con concentrados de cobre para el caso práctico del estudio, se detallarán en la Tabla 2.4. En dicha tabla figuran temperaturas de contenido de escoria y eje, asimismo se detallan la geometría y dimensiones del horno de fundición.

Dependiendo de las fundiciones y las cantidades a procesar, las características de dimensionamiento pueden variar. Por ejemplo, en los procesos

de fundición Flash de Codelco, las dimensiones de la base del horno corresponden a 22 m para el largo, 2 m de alto y 7 m de ancho (Codelco, 2015). Asimismo, las torres del horno de fundición presentan leves variaciones de dimensionamiento, que en particular corresponde a las características propias de la fundición donde se ejecute dicho proceso.

Tabla 2.4: Características técnicas del Horno de Fusión Flash. Fuente: (Codelco, 2015)

| FICHA TÉCNICA HORNO FLASH | |
|--|---|
| Geometría | 2 Torres Cilíndricas montadas en una caja rectangular |
| Dimensiones | 26 m L x 2 m h x 8 m A 7 m D x 8 m h (T. rxc) 5 m D x 10 m h (U.T) |
| Nivel de Fusión | 2200-2300 TPD |
| Gases | 18% - 20% SO ₂ 70.000 Nm ³ /h |
| Temperatura de Proceso (Ej. Concentrados de Cobre) | Eje 1220 - 1240 °C Escoria 1290 - 1310 °C |
| Aire Soplado | Aire (1.2 PSI) + Oxígeno mezclado e introducido en el quemador de concentrado 45% - 60% O ₂ |

3 METODOLOGÍA

Para desarrollar los objetivos de la presente investigación, a continuación, se detalla el proceso llevado a cabo.

3.1 Describir el contexto actual del consumo energético en Chile y el mundo.

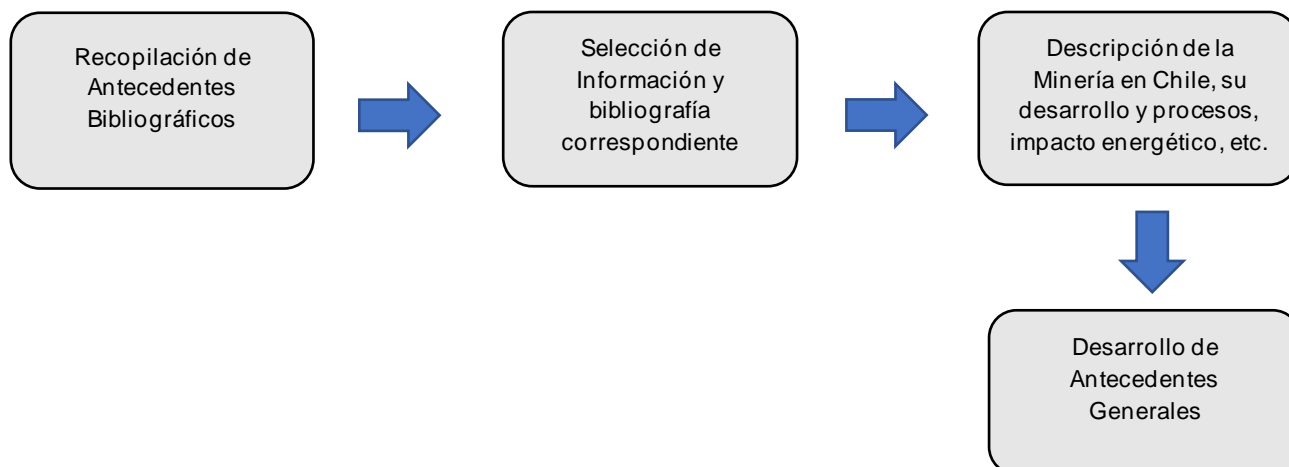


Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso de Antecedentes Generales. Fuente: Elaboración Propia

Dentro de los ítems más importantes en el desarrollo de la primera parte de la investigación, se destacan la “Minería en Chile”, como una de las principales actividades económicas a nivel nacional, los principales procesos de la metalurgia extractiva de metales y no metales, además de impacto en el consumo energético en los distintos procesos de la industria. Por último, se destaca la importancia del uso de energías renovables en las últimas décadas, en conjunto con la creciente demanda de los países desarrollados y países en vías de desarrollo, quienes deben mantener sus estándares de consumos para mantener su crecimiento constante. Se suma a lo anterior las demandas de las sociedades en desarrollo, el consumo sustentable y procesos afines a estándares de calidad para mitigar sus efectos en el medio ambiente. Los distintos desafíos de la actualidad buscan generar maneras innovadoras de desarrollar energías con bajos costos y procesos sustentables, el uso de la energía solar es la que más interés a generado por parte de la industria.

Debido a la relevancia de la energía solar como fuente de energía, el aumento de su uso en los últimos años y las ventajas geográficas de la incidencia de radiación solar en nuestro territorio, particularmente en el norte del país que presenta los mayores índices de radiación a nivel mundial. Reuniendo estas cualidades, Chile posee una gran ventaja comparativa en el uso de energía solar, ventaja que es un foco de estudio en la presente investigación.

3.2 Desarrollo del Marco teórico

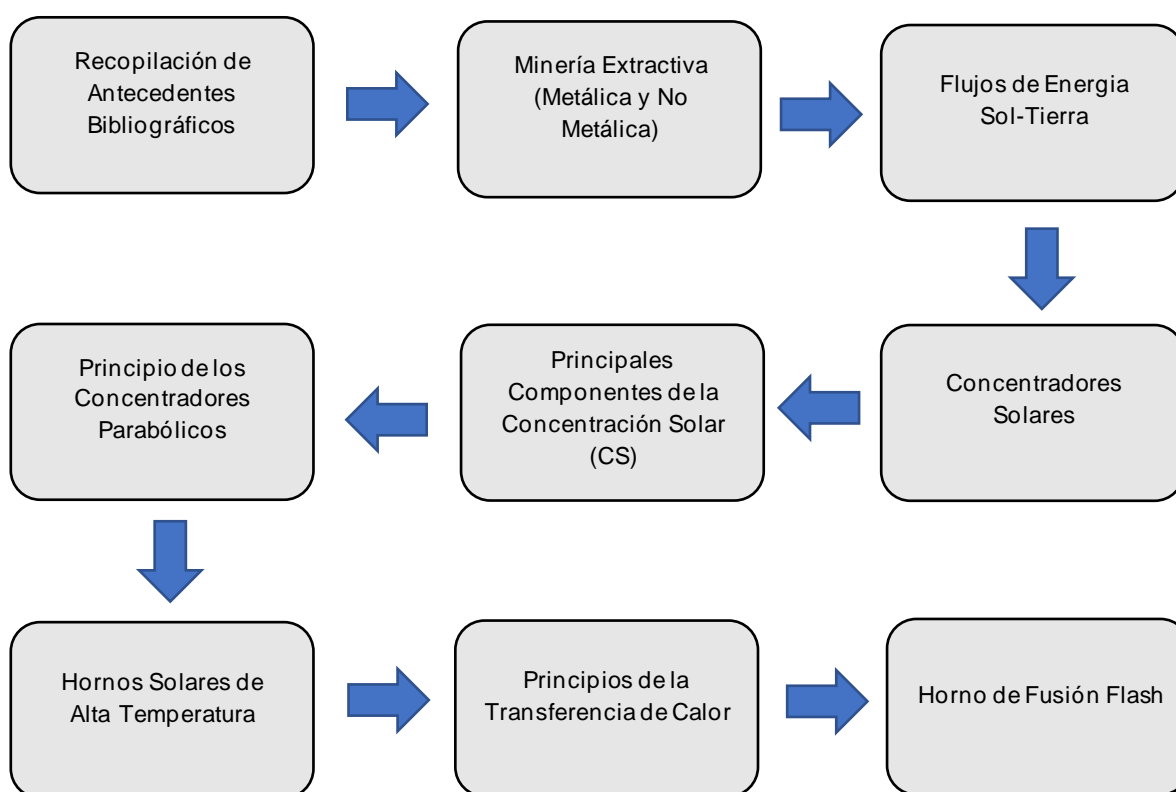


Figura 3.2: Diagrama de flujo que corresponde a Marco Teórico. Fuente: Elaboración Propia

Desde el punto de vista minero es imprescindible conocer los principales procesos de producción de los diferentes recursos mineros dispuestos a lo largo del territorio. En particular, de los productos procesados en la pequeña y mediana minería. Otro elemento importante a estudiar hace referencia al flujo energético existente entre el Sol y la Tierra, y como es que

este flujo de energía en forma de radiación electromagnética es aprovechado por distintas tecnologías y la naturaleza misma.

Basado en los conceptos teóricos detrás de estos procesos de producción y de tecnologías que aprovechan la irradiación, sumado a la contextualización de la situación energética en Chile y la urgencia de reemplazar métodos tradicionales de uso energético por procesos sustentables que generen un menor impacto en el entorno, se profundiza en la revisión bibliográfica de la energía solar. Paralelamente se describen los principios básicos de los concentradores solares, principales sistemas de concentración solar y utilización de tecnologías de altas temperaturas, además especificar conceptos teóricos de la transferencia de calor, comportamiento vectorial de la incidencia de radiación en un sistema.

Uno de los principios que persigue el presente estudio, es trabajar con la radiación incidente con el propósito de generar reflexión de la densidad energética proveniente de la atmosfera hacia un punto focal principal ubicado en la parte superior del horno de fusión.

Entendiendo los conceptos teóricos, se pretende crear un diagrama grafico que busca plantear un rediseño en el sistema de fundición, principalmente en el horno de fusión con el propósito de perseguir el objetivo principal de la investigación, que es generar un proceso sustentable a una de las etapas más importantes de la extracción del metal, reemplazando la fuente de energía mediante la utilización de radiación solar.

3.3 Estudio de variables cuantitativas y posterior análisis de datos.

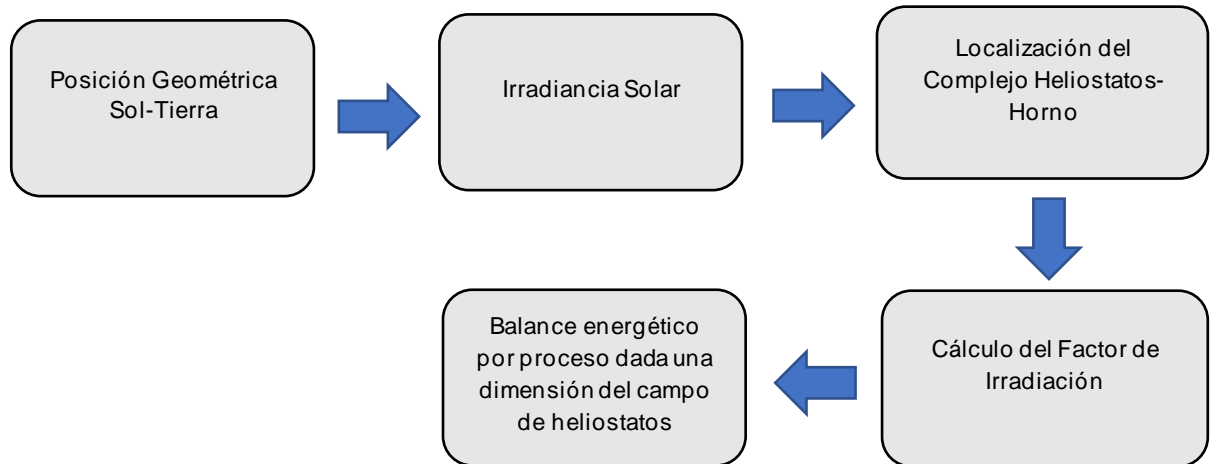


Figura 3.3 Diagrama de flujo sobre el Estudio de variables cualitativas. Fuente: Elaboración Propia

Dadas las localizaciones en el globo terrestre, por medio de las coordenadas de Latitud y Longitud, se consideran tres puntos del territorio nacional para realizar las estimaciones correspondientes a la irradiancia solar directa sobre la superficie del heliostato.

Lo anterior se logra, obteniendo valores de declinación terrestre, la cual varía a lo largo del año debido al comportamiento elíptico de la Tierra y que puede entenderse que dependiendo de la posición de la Tierra en la órbita (perihelio y afelio), se genera este efecto producto de la Traslación Terrestre.

Seleccionadas las tres localidades, se procede a evaluar el azimut y la altura solar, durante el horizonte horario disponible para el día en particular. Estas estimaciones están basadas en (SunEarthTools, 2021), y particularmente están evaluadas para los días 15 de cada mes durante el año 2021, expresadas en la Tabla 4.3.

En cuanto al cálculo de la Irradiancia Solar, se cuantifica en función de la constante solar y la corrección Sol-Tierra.

Posteriormente se analiza la transmisividad atmosférica (τ), con el fin de cuantificar la radiación directa efectiva sobre una superficie inclinada, basado en el

Modelo de Hottel, explicado durante el capítulo de Energía Solar Térmica/Atenuación de la Radiación Solar.

Los valores estimados se calculan en función de las tres localidades, para los 12 meses del año 2021. Dichos valores se expresan en la Tabla 4.5. Otro valor a estimar corresponde a la reflectividad (ρ) de la superficie del heliostato, se evalúan dos tipos de configuraciones de las facetas de los heliostatos basados en los datos proporcionados por la Tabla 2.2 para cuantificar la reflectividad presente en dichas configuraciones.

Con las estimaciones correspondientes de la radiación reflejada al horno, se deben estimar valores para su transmitancia a través del material. Este análisis está basado en la observación de (Duffie & Beckman, 2013), sobre vidrios grabados y no grabados. Las estimaciones realizadas consideran valores de la Tabla 2.3 y sus resultados se visualizan en la Tabla 4.11, 4.12 y 4.13.

Posteriormente, se realiza un balance térmico en función del aporte energético del campo de heliostatos dispuesto. Calculando la energía necesaria para cada proceso y el aporte total del sistema, se estima la capacidad productiva para cada recurso mineral, en términos de días, meses y producción anual. Se incorporan diferentes índices de recuperación metalúrgica con la finalidad de generar un ajuste aproximado de la producción anual para las tres localizaciones.

Finalmente, se realizan conclusiones y sugerencias al respecto con el propósito de evaluar su factibilidad en el uso de radiación solar como fuente de energía a los procesos de metalurgia extractiva de la minería nacional.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Recurso Solar Disponible

4.1.1 Posición Geométrica Sol – Tierra

Basado en el comportamiento elíptico de la tierra, la radiación incidente varía en tres aspectos fundamentales:

- Declinación (γ)
- Posición Local (Latitud, Longitud)
- Época del año (Traslación)

Para la declinación y basados en los cálculos de la ecuación (2.4) se extrae la siguiente información (véase Tabla 4.1) considerando los días 15 de cada mes durante los 12 meses del año.

Tabla 4.1 Valores de declinación solar (en grados decimales) para los días 15 de cada mes acumulados del año. Fuente: Elaboración propia basado en el Anexo 2.

| Mes | Día | Declinación (δ) |
|------------|-----|--------------------------|
| Enero | 15 | -21.27 |
| Febrero | 46 | -13.29 |
| Marzo | 75 | -2.42 |
| Abril | 106 | 9.78 |
| Mayo | 136 | 19.03 |
| Junio | 167 | 23.35 |
| Julio | 197 | 21.35 |
| Agosto | 228 | 13.45 |
| Septiembre | 259 | 1.81 |
| Octubre | 289 | -9.97 |
| Noviembre | 320 | -19.38 |
| Diciembre | 350 | -23.37 |

Respecto a la posición local, se considera tres puntos de actividad minera de la zona norte y centro del país, que serán objeto de análisis. (Véase Tabla 4.2)

Tabla 4.2: Localización de puntos relevantes en grados y coordenadas UTM.
Fuente: Elaboración propia basada en Google Earth.

| Localización | Ubicación (Grados decimales) | | Altura (m.s.n.m) | Coordenadas UTM | |
|---|------------------------------|-----------|------------------|-----------------|--------------|
| | Latitud: | Longitud: | | | |
| Faena Aguas Blancas (Atacama Minerals Chile) | -24.1232 | -69.8597 | 985 | 412640.23 E | 7331865.52 N |
| Mina Maricunga (Kinross Chile) | -27.5511 | -69.2970 | 4387 | 470678.01 E | 6952487.81 N |
| Mina Los Bronces (Anglo American Chile) | -33.1468 | -70.2864 | 3495 | 380025.18 E | 6331702.09 N |

Dichas ubicaciones a ser analizadas se extraen de la base de datos de Explorador Solar (Véase Figura 4.1), una herramienta en línea para el análisis de recursos renovables dispuesta por el Ministerio de Energía en colaboración con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ).

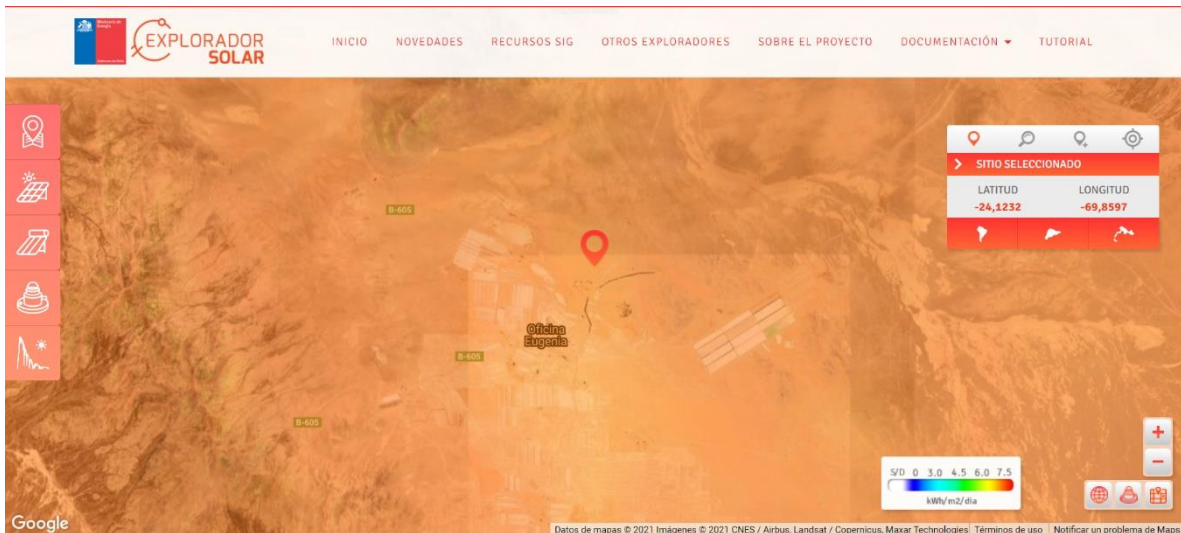


Figura 4.1 Screenshot correspondiente a página web Explorador Solar. Fuente:(Solar, 2017)

Junto a lo anterior, se realiza un análisis de valores de azimut (γ) y altura solar (hs), para los días respectivos representados en la Tabla 4.3. Estas magnitudes son evaluadas respecto a ecuación (2.7) y (2.6) para el día 15 de cada mes a las 12:00 del día, es decir, en ángulo cenital igual a 0 para esa hora. Las magnitudes permiten evaluar la radiación directa que incide sobre un plano. Estos valores se expresan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Valores de azimut (γ) y altura solar (hs) en grados decimales de las tres localidades seleccionadas. Fuente: Elaboración propia basado en (SunEarthTools, 2021).

| Faena Aguas Blancas | | | Mina Maricunga | | | Mina Los Bronces | | |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| Dia | Azimut (γ°) | Alt. Solar (hs°) | Dia | Azimut (γ°) | Alt. Solar (hs°) | Dia | Azimut (γ°) | Alt. Solar (hs°) |
| 15-ene | 76.96 | 78.26 | 15-ene | 60.92 | 77.50 | 15-ene | 45.98 | 73.44 |
| 15-feb | 49.71 | 72.76 | 15-feb | 40.99 | 70.71 | 15-feb | 34.59 | 65.75 |
| 15-mar | 29.47 | 64.87 | 15-mar | 25.17 | 62.06 | 15-mar | 23.12 | 56.6 |
| 15-abr | 16.88 | 54.54 | 15-abr | 14.75 | 51.38 | 15-abr | 14.58 | 45.75 |
| 15-may | 12.23 | 45.98 | 15-may | 10.83 | 42.72 | 15-may | 11.14 | 37.06 |
| 15-jun | 12.32 | 41.56 | 15-jun | 11.08 | 38.30 | 15-jun | 11.4 | 32.65 |
| 15-jul | 14.58 | 43.14 | 15-jul | 13.17 | 39.93 | 15-jul | 13.33 | 34.29 |
| 15-ago | 16.91 | 50.56 | 15-ago | 15.02 | 47.40 | 15-ago | 14.91 | 41.78 |
| 15-sep | 18.52 | 61.83 | 15-sep | 15.66 | 58.71 | 15-sep | 15.18 | 53.08 |
| 15-oct | 22.41 | 73.51 | 15-oct | 17.14 | 70.45 | 15-oct | 15.77 | 64.84 |
| 15-nov | 46.88 | 82.16 | 15-nov | 30.59 | 79.78 | 15-nov | 23.33 | 74.39 |
| 15-dic | 85.84 | 82.00 | 15-dic | 61.71 | 81.52 | 15-dic | 41.47 | 77.3 |

Sumado a lo anterior, se puede expresar de forma gráfica la altura solar mínima y máxima de las tres localidades a estudiar, esto con el fin de analizar el rango promedio considerable que es necesario para evaluar la radiación directa en dichas localidades. De lo anterior, se desprenden las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4.

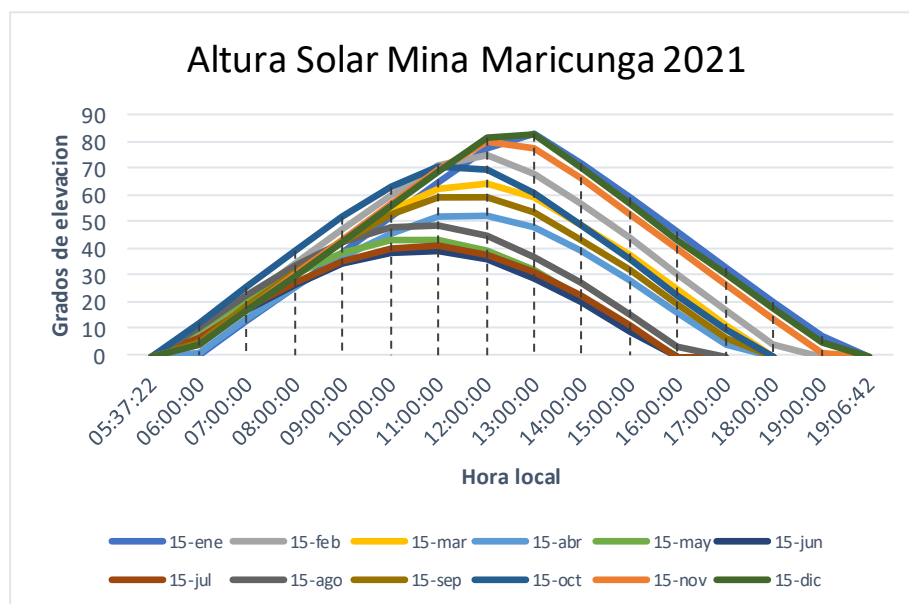


Figura 4.2: Altura solar (hs) para el año 2021 en Mina Maricunga. Fuente: Elaboración propia basado en (SunEarthTools, 2021).

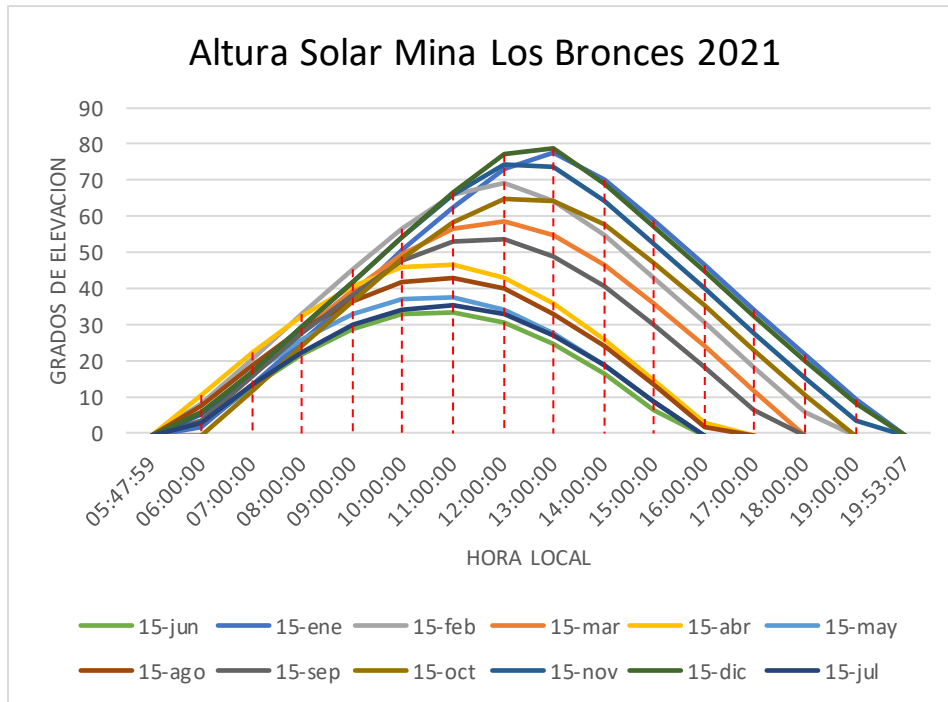


Figura 4.3: Altura solar (hs) para el año 2021 en Mina Los Bronces. Fuente: Elaboración propia basado en (SunEarthTools, 2021).

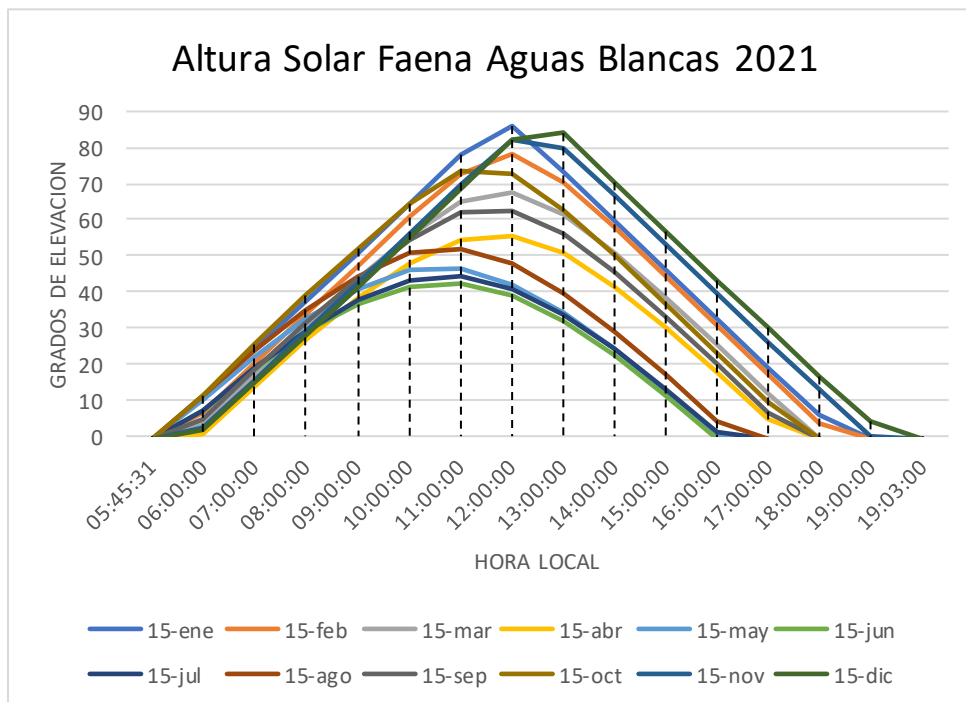


Figura 4.4: Altura solar (hs) para el año 2021 en Faena Aguas Blancas. Fuente: Elaboración propia basado en (SunEarthTools, 2021).

4.1.2 Irradiancia Solar Atmosférica ($I_0 \rightarrow I_i$)

Es necesario cuantificar la energía recibida en función de las variables que intervienen en el proceso. Para lo anterior se deben realizar una serie de consideraciones a tomar en cuenta para su posterior cálculo.

- Radiación Normal Extraterrestre
- Corrección de Distancia Sol – Tierra
- Emisividad de similar a un cuerpo negro (5777 K)

En función de la ecuación (2.4), se extraen los valores expuestos en la Tabla 4.4, correspondiente a los días 15 de cada mes para el año 2021.

Tabla 4.4: Radiación Normal Extraterrestre. Fuente: Elaboración propia basado en (Hermosillo Villalobos et al., 1995).

| Día (n) | $G_{sc}(W/m^2)$ | Corrección Distancia Sol Tierra | $G_{on}(W/m^2)$ |
|---------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|
| 15 | 1367 | 0.98 | 1339.44 |
| 46 | 1367 | 1.01 | 1375.22 |
| 75 | 1367 | 1.00 | 1373.53 |
| 106 | 1367 | 0.98 | 1338.10 |
| 136 | 1367 | 0.98 | 1340.81 |
| 167 | 1367 | 1.01 | 1376.90 |
| 197 | 1367 | 1.03 | 1407.07 |
| 228 | 1367 | 1.01 | 1378.28 |
| 259 | 1367 | 0.98 | 1341.99 |
| 289 | 1367 | 0.98 | 1337.02 |
| 320 | 1367 | 1.00 | 1372.11 |
| 350 | 1367 | 1.03 | 1409.06 |

Estimados los valores es necesario cuantificar la energía, en función de la dispersión (Dispersión Rayleigh y Dispersión Mie) presente en la atmosfera, para ello se analiza la transmitancia atmosférica basada en el Modelo de Hottel (Passamai, 2000), que no considerará la radiación difusa y la radiación reflejada. Dicha expresión es detallada en el Capítulo 2 (Atenuación de la Radiación Solar). Para lo expuesto se utilizarán las ecuaciones (2.10), (2.11), (2.12), (2.13) y (2.14).

El análisis se considera el tipo de clima “Verano, latitud media” en función de la latitud de las localidades a evaluar, y se considera “Invierno, latitud media” en los meses de Junio, Julio y Agosto.

A modo explicativo se analiza la transmisividad para el 15 de Noviembre de 2021 en Mina Maricunga (Latitud -27.5511 , Longitud -69.2970), con una altura dada de 4.387 m.s.n.m (Solar, 2017). La evaluación de parámetros y valores se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Estimación de la Transmisividad Atmosférica para la Mina Maricunga durante el 15 de Noviembre del 2021. Fuente: Elaboración propia basado en (Hermosillo Villalobos et al., 1995).

| Hora | T | Radiación Directa PI Wh/m^2 | Irradiancia Total Wh/m^2 |
|-------|--------|----------------------------------|-------------------------------|
| 07:00 | 0.5981 | 1372.11 | 820.70 |
| 08:00 | 0.6788 | 1372.11 | 931.45 |
| 09:00 | 0.7222 | 1372.11 | 990.92 |
| 10:00 | 0.7462 | 1372.11 | 1023.91 |
| 11:00 | 0.7586 | 1372.11 | 1040.83 |
| 12:00 | 0.7624 | 1372.11 | 1046.07 |
| 13:00 | 0.7586 | 1372.11 | 1040.83 |
| 14:00 | 0.7462 | 1372.11 | 1023.91 |
| 15:00 | 0.7222 | 1372.11 | 990.92 |
| 16:00 | 0.6788 | 1372.11 | 931.45 |
| 17:00 | 0.5981 | 1372.11 | 820.70 |
| 18:00 | 0.4463 | 1372.11 | 612.34 |
| | | | 11.274,03 |

Basado en las condiciones anteriores, el valor de Irradiancia Total para el día 15 de Noviembre es $11.27 \text{ kWh}/m^2/día$, valor estimado en función de la ecuación (2.15).

En función de las estimaciones presentadas anteriormente, estas deben ser evaluadas para los 12 meses del año en las tres localidades mencionadas en la Tabla 4.2. Dichas estimaciones se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Irradiancia total en función de la transmisividad atmosférica anual expresada en $(kWh/m^2/\bar{x} \text{ mes})$ para las tres localidades. Fuente: Elaboración propia basado en (Hermosillo Villalobos et al., 1995).

| | Faena Aguas Blancas ($kWh/m^2/\bar{x} \text{ mes}$) | Mina Los Bronces ($kWh/m^2/\bar{x} \text{ mes}$) | Mina Maricunga ($kWh/m^2/\bar{x} \text{ mes}$) |
|------------|--|---|---|
| Enero | 9.72 | 11.27 | 11.05 |
| Febrero | 9.74 | 11.26 | 11.12 |
| Marzo | 9.33 | 10.74 | 10.74 |
| Abril | 7.76 | 8.69 | 9.37 |
| Mayo | 7.23 | 8.09 | 8.32 |
| Junio | 7.48 | 7.87 | 8.74 |
| Julio | 7.80 | 8.77 | 9.07 |
| Agosto | 8.58 | 9.17 | 9.96 |
| Septiembre | 8.92 | 9.79 | 10.22 |
| Octubre | 9.35 | 10.80 | 10.71 |
| Noviembre | 9.91 | 11.48 | 11.27 |
| Diciembre | 10.28 | 11.93 | 11.68 |
| | 106.10 | 119.87 | 122.26 |

Un análisis en función de los datos entregados explica que dicho modelo representa la importante variación en función de la altura de la localidad a estudiar, visibilizando una tendencia al aumento de potencia entregada a mayor altura, como es el caso de la Mina Maricunga. A modo de ejemplificar los datos de la Tabla 4.6, en la siguiente gráfica, (Véase Figura 4.5) se aprecia la tendencia mayor sobre los meses del solsticio de verano y una baja en los solsticio de invierno, la Radiación Directa en un Plano Inclinado para las tres instalaciones mineras, considerando Faena Aguas Blancas (985 *m.s.n.m.*), Mina Los Bronces (3.495 *m.s.n.m.*) y Mina Maricunga (4.387 *m.s.n.m.*).

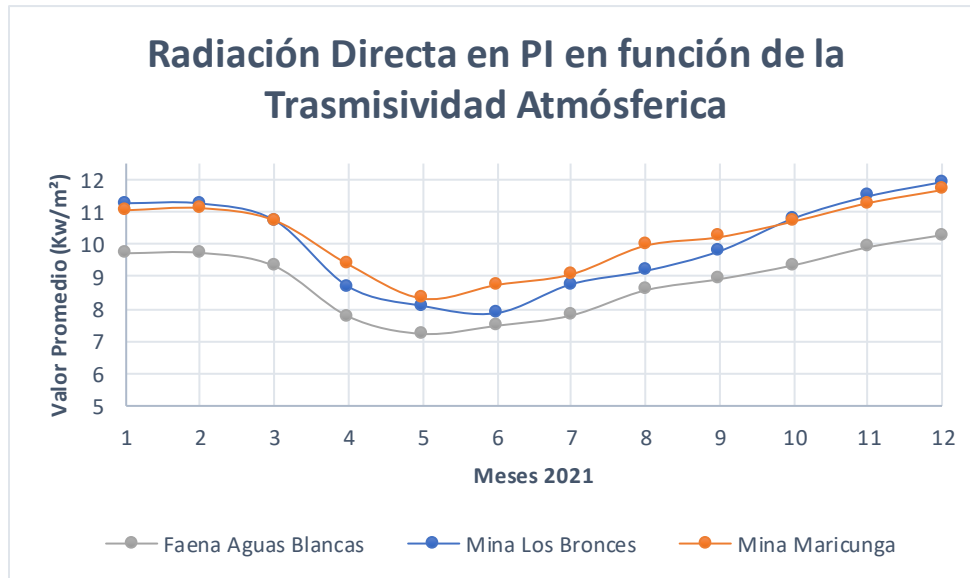


Figura 4.5: Radiación Directa en Plano Inclinado en función de la Transmisividad Atmosférica. Fuente: Elaboración propia basado en (SunEarthTools, 2021) y (Hermosillo Villalobos et al., 1995).

4.1.3 Irradiancia Directa sobre una Superficie ($I_i \rightarrow I_r$)

Conocidos los valores de irradiancia directa, es necesario estimar la reflectividad (ρ) de la superficie de los heliostatos presentes en el sistema. Para lo anterior, se debe conocer el material de recubrimiento, para estimar la variación existente al reflejar la irradiancia directa sobre la superficie en cuestión.

Basado en datos de la literatura, la Tabla 2.2 detalla una serie de los elementos más comunes utilizados en la fabricación de facetas de heliostatos. Para efectos del análisis, se estudiará el comportamiento de la irradiancia sobre un “vidrio de baja reflectancia con plateado posterior” ($\rho = 0.94$) y “aluminio de alta pureza procesado en bruto” ($\rho = 0.89$). Esto se expresa mediante la ecuación (2.22)

Lo anterior explica el concepto de reflectividad sobre una superficie en conjunto con el ángulo reflejado, explicado en la teoría de reflexión especular. Para expresar dichas magnitudes, se presentan las Tablas 4.7, 4.8 y 4.9, donde se consideran los materiales mencionados anteriormente. Las estimaciones realizadas consideran las tres localidades, los 12 meses del año, las 3 líneas de disposición de heliostatos y los dos materiales sometidos a la reflexión de la radiación directa.

Tabla 4.7: Reflectividad sobre la Irradiancia Directa de un Plano Inclinado para la Faena Aguas Blancas basado en el “Vidrio de baja reflectancia con plateado posterior” (Coef.R1) y “Aluminio de alta pureza procesado en bruto” (Coef.R2). Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013).

| Reflectividad Faena Aguas Blancas | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | 0.94 | | | 0.89 | | |
| Mes | Coef. R1-1 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ | Coef R1-2 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ | Coef R1-3 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ | Coef R2-1 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ | Coef R2-2 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ | Coef R2-3 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ |
| Enero | 4600.63 | 4914.15 | 5049.63 | 4355.92 | 4652.76 | 4781.03 |
| Febrero | 4669.10 | 4921.27 | 5027.98 | 4420.74 | 4659.50 | 4760.53 |
| Marzo | 4631.11 | 4868.78 | 4971.35 | 4384.77 | 4609.80 | 4706.92 |
| Abril | 3713.37 | 3860.37 | 3915.49 | 3515.85 | 3655.04 | 3707.22 |
| Mayo | 3456.27 | 3567.38 | 3615.01 | 3272.43 | 3377.63 | 3422.72 |
| Junio | 3574.58 | 3693.77 | 3741.99 | 3384.44 | 3497.29 | 3542.95 |
| Julio | 3719.49 | 3868.01 | 3919.49 | 3521.65 | 3662.27 | 3711.01 |
| Agosto | 3933.60 | 4126.51 | 4197.17 | 3724.36 | 3907.02 | 3973.92 |
| Septiembre | 4264.90 | 4448.13 | 4516.68 | 4038.04 | 4211.53 | 4276.43 |
| Octubre | 4493.61 | 4724.02 | 4802.54 | 4254.59 | 4472.74 | 4547.09 |
| Noviembre | 4803.70 | 5059.84 | 5170.00 | 4548.18 | 4790.70 | 4895.00 |
| Diciembre | 4891.79 | 5225.70 | 5369.86 | 4631.58 | 4947.74 | 5084.23 |

Tabla 4.8: Reflectividad sobre la Irradiancia Directa de un Plano Inclinado para la Mina Los Bronces basado en el “Vidrio de baja reflectancia con plateado posterior” (Coef.R1) y “Aluminio de alta pureza procesado en bruto” (Coef.R2). Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013).

| Reflectividad Mina Los Bronces | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | 0.94 | | | 0.89 | | |
| Mes | Coef R1-1 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ | Coef R1-2 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ | Coef R1-3 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ | Coef R2-1 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ | Coef R2-2 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ | Coef R2-3 $Wh/m^2 \bar{x}_{mes}$ |
| Enero | 5481.12 | 5754.71 | 5873.74 | 5189.57 | 5448.60 | 5561.30 |
| Febrero | 5436.38 | 5699.79 | 5814.58 | 5147.21 | 5396.61 | 5505.30 |
| Marzo | 5156.86 | 5395.32 | 5475.85 | 4882.56 | 5108.34 | 5184.58 |
| Abril | 4189.41 | 4327.08 | 4384.10 | 3966.57 | 4096.91 | 4150.90 |
| Mayo | 3890.25 | 4004.48 | 4054.18 | 3683.32 | 3791.47 | 3838.53 |
| Junio | 3844.85 | 3969.67 | 4011.52 | 3640.34 | 3758.51 | 3798.14 |
| Julio | 4188.99 | 4360.72 | 4416.05 | 3966.17 | 4128.77 | 4181.15 |
| Agosto | 4410.58 | 4574.96 | 4634.23 | 4175.98 | 4331.61 | 4387.73 |
| Septiembre | 4552.50 | 4732.41 | 4810.46 | 4310.34 | 4480.69 | 4554.58 |
| Octubre | 5232.48 | 5422.73 | 5505.22 | 4954.15 | 5134.29 | 5212.39 |
| Noviembre | 5582.30 | 5845.63 | 5938.78 | 5285.37 | 5534.69 | 5622.89 |
| Diciembre | 5820.90 | 6111.89 | 6238.30 | 5511.28 | 5786.79 | 5906.48 |

Tabla 4.9: Reflectividad sobre la Irradiancia Directa de un Plano Inclinado para la Mina Maricunga basado en el “*Vidrio de baja reflectancia con plateado posterior*” (Coef.R1) y “*Aluminio de alta pureza procesado en bruto*” (Coef.R2). Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013).

| Reflectividad Mina Maricunga | | | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| | 0.94 | | | 0.89 | | |
| Mes | Coef R1-1 <i>Wh/m² x mes</i> | Coef R1-2 <i>Wh/m² x mes</i> | Coef R1-3 <i>Wh/m² x mes</i> | Coef R2-1 <i>Wh/m² x mes</i> | Coef R2-2 <i>Wh/m² x mes</i> | Coef R2-3 <i>Wh/m² x mes</i> |
| Enero | 5317.42 | 5648.52 | 5771.37 | 5034.58 | 5348.07 | 5464.39 |
| Febrero | 5342.50 | 5618.86 | 5738.32 | 5058.32 | 5319.99 | 5433.09 |
| Marzo | 5124.27 | 5379.76 | 5474.04 | 4851.70 | 5093.60 | 5182.86 |
| Abril | 4324.74 | 4503.34 | 4580.16 | 4094.70 | 4263.80 | 4336.53 |
| Mayo | 3966.20 | 4095.02 | 4150.49 | 3755.23 | 3877.20 | 3929.72 |
| Junio | 4169.88 | 4303.40 | 4360.98 | 3948.08 | 4074.49 | 4129.01 |
| Julio | 4324.18 | 4485.26 | 4546.12 | 4094.17 | 4246.68 | 4304.30 |
| Agosto | 4584.30 | 4785.28 | 4866.53 | 4340.46 | 4530.74 | 4607.68 |
| Septiembre | 4896.78 | 5077.69 | 5155.62 | 4636.32 | 4807.60 | 4881.39 |
| Octubre | 5152.75 | 5370.68 | 5457.51 | 4878.67 | 5085.01 | 5167.22 |
| Noviembre | 5448.41 | 5732.11 | 5854.37 | 5158.60 | 5427.21 | 5542.97 |
| Diciembre | 5667.40 | 6003.98 | 6134.58 | 5365.94 | 5684.62 | 5808.27 |

4.1.4 Irradiación Solar Efectiva ($I_r \rightarrow I_{abs}$)

El proceso final de redireccionar la radiación solar incidente corresponde a la capacidad del material de absorber el flujo de energía refractado producto de la redirección de los flujos energéticos provenientes del Sol. Para lo anterior se analizan distintos recubrimientos que posean la capacidad de transmitancia efectiva del material en el proceso. Lo anterior se explica mediante la ecuación (2.23)

Para las estimaciones correspondientes se basará el estudio en un material de recubrimiento de vidrio grabado para aumentar la eficiencia del mismo, considerando el ángulo de incidencia correspondiente, estos valores son extraídos de la Tabla 2.3. Estimando una tendencia lineal de los parámetros expuestos, una altura de torre de 3 m y 2 m de alto para el horno, se considera el punto medio del horno como centro de incidencia de los rayos reflejados. Para lo anterior se toman las siguientes magnitudes. (Véase Tabla 4.10)

Tabla 4.10: Aproximación lineal de los parámetros de vidrio grabado. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013).

| Horizonte | Ang. Inc.(°) | Distancia Línea-Horno(m) | Parámetro de incidencia |
|-----------|--------------|--------------------------|-------------------------|
| Línea 1 | 33.69 | 6 | 0.9456 |
| Línea 2 | 21.80 | 10 | 0.9468 |
| Línea 3 | 15.95 | 14 | 0.9458 |

Considerando lo anterior, se extraen las siguientes tablas con la estimación de valores en función de la ubicación del horizonte de heliostatos en el campo para las tres localidades .(Véase Tabla 4.11,4.12 y 4.13)

Tabla 4.11: Estimación de transmitancia de *vidrio grabado* para la Faena Aguas Blancas. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013).

| Transmitancia Faena Aguas Blancas | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Mes | Coef Abs1-1 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs1-2 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs1-3 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs2-1 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs2-2 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs2-3 $Wh/m^2\bar{x}mes$ |
| Enero | 4350.50 | 4652.82 | 4775.87 | 4119.09 | 4405.33 | 4521.83 |
| Febrero | 4415.24 | 4659.56 | 4755.39 | 4180.39 | 4411.71 | 4502.44 |
| Marzo | 4379.32 | 4609.86 | 4701.83 | 4146.38 | 4364.65 | 4451.73 |
| Abril | 3511.48 | 3655.08 | 3703.21 | 3324.70 | 3460.66 | 3506.23 |
| Mayo | 3268.36 | 3377.67 | 3419.02 | 3094.51 | 3198.01 | 3237.16 |
| Junio | 3380.23 | 3497.33 | 3539.12 | 3200.43 | 3311.31 | 3350.87 |
| Julio | 3517.27 | 3662.31 | 3707.00 | 3330.18 | 3467.51 | 3509.82 |
| Agosto | 3719.73 | 3907.06 | 3969.62 | 3521.87 | 3699.24 | 3758.47 |
| Septiembre | 4033.02 | 4211.58 | 4271.81 | 3818.50 | 3987.56 | 4044.59 |
| Octubre | 4249.30 | 4472.79 | 4542.17 | 4023.27 | 4234.88 | 4300.57 |
| Noviembre | 4542.53 | 4790.76 | 4889.71 | 4300.90 | 4535.93 | 4629.62 |
| Diciembre | 4625.82 | 4947.80 | 5078.73 | 4379.77 | 4684.62 | 4808.59 |

Tabla 4.12: Estimación de transmitancia de *vidrio grabado* para la Mina Los Bronces. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013).

| Transmitancia Mina Los Bronces | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Mes | Coef Abs1-1 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs1-2 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs1-3 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs2-1 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs2-2 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs2-3 $Wh/m^2\bar{x}mes$ |
| Enero | 5183.11 | 5448.67 | 5555.29 | 4907.42 | 5158.85 | 5259.80 |
| Febrero | 5140.81 | 5396.67 | 5499.35 | 4867.36 | 5109.62 | 5206.83 |
| Marzo | 4876.49 | 5108.40 | 5178.98 | 4617.10 | 4836.67 | 4903.50 |
| Abril | 3961.63 | 4096.96 | 4146.41 | 3750.91 | 3879.04 | 3925.86 |
| Mayo | 3678.74 | 3791.52 | 3834.38 | 3483.07 | 3589.84 | 3630.43 |
| Junio | 3635.81 | 3758.56 | 3794.03 | 3442.41 | 3558.64 | 3592.22 |
| Julio | 3961.24 | 4128.82 | 4176.63 | 3750.54 | 3909.20 | 3954.47 |
| Agosto | 4170.78 | 4331.66 | 4382.99 | 3948.93 | 4101.26 | 4149.85 |
| Septiembre | 4304.98 | 4480.74 | 4549.66 | 4076.00 | 4242.40 | 4307.66 |
| Octubre | 4947.99 | 5134.35 | 5206.76 | 4684.80 | 4861.24 | 4929.80 |
| Noviembre | 5278.80 | 5534.76 | 5616.81 | 4998.01 | 5240.35 | 5318.05 |
| Diciembre | 5504.43 | 5786.86 | 5900.09 | 5211.64 | 5479.05 | 5586.26 |

Tabla 4.13: Estimación de transmitancia de *vidrio grabado* para Mina Maricunga. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013).

| Transmitancia Mina Maricunga | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Mes | Coef Abs1-1 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs1-2 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs1-3 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs2-1 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs2-2 $Wh/m^2\bar{x}mes$ | Coef Abs2-3 $Wh/m^2\bar{x}mes$ |
| Enero | 5028.32 | 5348.13 | 5458.48 | 4760.86 | 5063.66 | 5168.14 |
| Febrero | 5052.03 | 5320.05 | 5427.22 | 4783.31 | 5037.07 | 5138.54 |
| Marzo | 4845.67 | 5093.67 | 5177.26 | 4587.92 | 4822.73 | 4901.88 |
| Abril | 4089.60 | 4263.86 | 4331.84 | 3872.07 | 4037.06 | 4101.43 |
| Mayo | 3750.56 | 3877.24 | 3925.47 | 3551.06 | 3671.01 | 3716.67 |
| Junio | 3943.17 | 4074.54 | 4124.55 | 3733.42 | 3857.81 | 3905.16 |
| Julio | 4089.07 | 4246.73 | 4299.65 | 3871.57 | 4020.84 | 4070.94 |
| Agosto | 4335.06 | 4530.80 | 4602.69 | 4104.47 | 4289.80 | 4357.87 |
| Septiembre | 4630.55 | 4807.66 | 4876.11 | 4384.25 | 4551.93 | 4616.74 |
| Octubre | 4872.60 | 5085.07 | 5161.63 | 4613.42 | 4814.59 | 4887.07 |
| Noviembre | 5152.18 | 5427.27 | 5536.98 | 4878.13 | 5138.59 | 5242.46 |
| Diciembre | 5359.27 | 5684.69 | 5801.99 | 5074.20 | 5382.31 | 5493.37 |

Completando el ciclo del flujo de energía y la atenuación presente en la atmosfera, el diagrama presenta las características de dicho ciclo desde el punto A al punto C (véase Figura 4.6). Se considera atenuación por transmisividad atmosférica despreciable desde el punto B al punto C, puesto que la distancia presente entre los heliostatos y el horno de fusión no se considera técnicamente influyente sobre la pérdida de energía total a esas magnitudes de distancias.

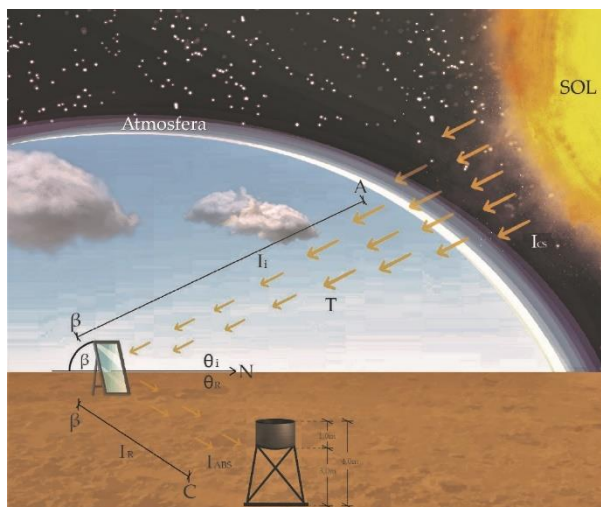


Figura 4.6: Ciclo de radiación incidente, reflejada y absorbida desde el punto A al punto C. Fuente: Elaboración propia realizada en (Adobe Illustrator, 2021).

Finalmente, la Tabla 4.14 evaluando el factor de conversión correspondiente, genera un resumen sobre la irradiancia total que recibe el horno de la Figura 4.6. Se considera para Mina Maricunga un índice de reflectividad $\rho = 0.89$, en tanto para Mina Los Bronces y Faena Aguas Blancas, se tomará un índice de reflectividad de $\rho = 0.94$. Junto a lo anterior, estos valores incorporan el factor de transmitancia del vidrio grabado para el ángulo de incidencia correspondiente. (Véase Tabla 4.14 y 4.15).

El primer término (1 y 2) hace referencia al índice de reflectividad del material, en cuanto al segundo término (1, 2 y 3) corresponde a la distancia de la línea de heliostatos en función de la distancia que se explican en la Tabla 4.10.

Tabla 4.14: Estimación de Irradiación Total en $MJ/m^2 \cdot dia$. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013).

| Periodo | Faena Aguas Blancas ($\rho = 0.94$) | | | Mina Los Bronces ($\rho = 0.94$) | | | Mina Maricunga ($\rho = 0.89$) | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | Irr. Total 1-1 ($1 \cdot 10^6 J$ /mes) | Irr. Total 1-2 ($1 \cdot 10^6 J$ /mes) | Irr. Total 1-3 ($1 \cdot 10^6 J$ /mes) | Irr. Total 1-1 ($1 \cdot 10^6 J$ /mes) | Irr. Total 1-2 ($1 \cdot 10^6 J$ /mes) | Irr. Total 1-3 ($1 \cdot 10^6 J$ /mes) | Irr. Total 2-1 ($1 \cdot 10^6 J$ /mes) | Irr. Total 2-2 ($1 \cdot 10^6 J$ /mes) | Irr. Total 2-3 ($1 \cdot 10^6 J$ /mes) |
| Enero | 15.66 | 16.75 | 17.19 | 18.66 | 19.62 | 20.00 | 17.14 | 18.23 | 18.61 |
| Febrero | 15.89 | 16.77 | 17.12 | 18.51 | 19.43 | 19.80 | 17.22 | 18.13 | 18.50 |
| Marzo | 15.77 | 16.60 | 16.93 | 17.56 | 18.39 | 18.64 | 16.52 | 17.36 | 17.65 |
| Abril | 12.64 | 13.16 | 13.33 | 14.26 | 14.75 | 14.93 | 13.94 | 14.53 | 14.77 |
| Mayo | 11.77 | 12.16 | 12.31 | 13.24 | 13.65 | 13.80 | 12.78 | 13.22 | 13.38 |
| Junio | 12.17 | 12.59 | 12.74 | 13.09 | 13.53 | 13.66 | 13.44 | 13.89 | 14.06 |
| Julio | 12.66 | 13.18 | 13.35 | 14.26 | 14.86 | 15.04 | 13.94 | 14.48 | 14.66 |
| Agosto | 13.39 | 14.07 | 14.29 | 15.01 | 15.59 | 15.78 | 14.78 | 15.44 | 15.69 |
| Septiembre | 14.52 | 15.16 | 15.38 | 15.50 | 16.13 | 16.38 | 15.78 | 16.39 | 16.62 |
| Octubre | 15.30 | 16.10 | 16.35 | 17.81 | 18.48 | 18.74 | 16.61 | 17.33 | 17.59 |
| Noviembre | 16.35 | 17.25 | 17.60 | 19.00 | 19.93 | 20.22 | 17.56 | 18.50 | 18.87 |
| Diciembre | 16.65 | 17.81 | 18.28 | 19.82 | 20.83 | 21.24 | 18.27 | 19.38 | 19.78 |

4.2 Balance Térmico

4.2.1 Cuantificación de Consumo Energético por proceso

Con la finalidad de generar un balance energético que permita medir la energía necesaria para el procesamiento de los metales y no metales seleccionados, es necesario cuantificar su energía en función de parámetros termodinámicos. Basados en la literatura, se considera los distintos puntos de calor específico, temperatura de fusión, temperatura de ebullición, calor latente de fusión y vaporización, considerando estos valores para una tonelada de concentrado del recurso mineral a estimar (Véase Anexo 3).

Tomando la información proporcionada en antecedentes generales, se describe una recopilación de los principales procesos que necesitan de aporte de calor para su operación. En la Tabla 4.15 se exponen dichos procesos, con la temperatura necesaria para llevarse a cabo y su requerimiento energético. La

estimación de estos valores, se hace uso de la ecuación 2.25 y el procedimiento se describen en los Anexos 4,5,6,7,8 y 9.

Tabla 4.15: Consumo energético para diferentes procesos térmicos de algunos recursos minerales. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).

| Recurso Mineral | Precipitado | Lixiviación | Secado | Fundición |
|---|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Metal Doré | - | - | 600 (°C) | 1200 (°C) |
| Ley Au (9.45%) | - | - | 72.06 (MJ/ton) | 345.08 (MJ/ton) |
| Ley Ag (11.8%) | - | - | | |
| Concentrados de Cobre | - | - | 650 (°C) | 1250 (°C) |
| Metal Blanco 75% Cu aprox. | - | - | 528.08 (MJ/ton) | 864.81 (MJ/ton) |
| Concentrados de Zinc | - | 100 (°C) | 500 (°C) | - |
| Sol. Electrolítica 95% Zn | - | 37.99 (MJ/ton) | 414.73 (MJ/ton) | - |
| Carbonatos de Litio | 95 (°C) | - | 160 (°C) | - |
| Pureza 98.9% | 149.16 (MJ/ton) | - | 808.23 (MJ/ton) | - |
| Prilados de Yodo | - | - | 80 (°C) | 140 (°C) |
| Purificado 99.99% | - | - | 42.62 (MJ/ton) | 144.81 (MJ/ton) |
| Nitratos Naturales | - | - | 60 (°C) | 400 (°C) |
| Pureza 98% (KNO ₃ -NaNO ₃) | - | - | 26.93 (MJ/ton) | 708.8 (MJ/ton) |

Considerando los datos estimados de la Tabla 4.14 y la Tabla 4.15, se estima la producción generada por proceso para un campo de heliostatos de 75 m². Esta proporcionalidad desprenden las Tablas 4.16, 4.17 y 4.18. Importante destacar, que dichos valores están expresados en función de la distribución de tres líneas de heliostatos, es decir, la producción estimada es generada por la sumatoria de las L1, L2 y L3, y este valor a su vez, proporcional al área total dispuesta. Para ejemplificar, la siguiente expresión considera el proceso de secado para concentrados de cobre en la Mina Los Bronces durante el mes de Mayo. (Véase ecuación 4.1)

$$\begin{aligned}
 L1 + L2 + L3 &= (13.24 + 13.65 + 13.80) \text{ MJ dia} \\
 3 \text{ m}^2 &= 40.70 \text{ MJ dia} \\
 75 \text{ m}^2 &= X \text{ MJ/m}^2 \implies 1017.5 \text{ MJ dia} \\
 \text{Secado (650}^\circ\text{C)} &= 528.08 \text{ MJ/ton}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

$$\frac{1017.5 \text{ MJ dia}}{528.08 \text{ MJ/ton}} = 1.93 \text{ ton/dia}$$

4.2.2 Producción Estimada

Dada un área determinada de 75 m^2 de heliostatos dispuestos sobre las diferentes localizaciones, se realiza una estimación de la producción para 30 días en cada mes, generando un valor anual de tonelaje de concentrados que serán procesados por medio del sistema de fusión a base de energía solar.

Tabla 4.16: Producción en términos de $ton/\bar{x}dia$ en función de la disponibilidad energética de 75 m^2 de heliostatos para la Faena Aguas Blancas. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).

| Faena Aguas Blancas | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Recurso Mineral | Concentrados Metal Dore | | Concentrados de Cobre | | Concentrados de Zinc | | Carbonatos de Litio | | Prilados de Yodo | | Nitratos Naturales | |
| Mes | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Lixiviación ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Precipitado ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) |
| Enero | 17.21 | 3.59 | 2.35 | 1.43 | 32.64 | 2.99 | 8.31 | 1.53 | 29.10 | 8.56 | 46.05 | 1.75 |
| Febrero | 17.27 | 3.61 | 2.36 | 1.44 | 32.76 | 3.00 | 8.34 | 1.54 | 29.21 | 8.60 | 46.22 | 1.76 |
| Marzo | 17.10 | 3.57 | 2.33 | 1.42 | 32.43 | 2.97 | 8.26 | 1.52 | 28.91 | 8.51 | 45.76 | 1.74 |
| Abril | 13.58 | 2.83 | 1.85 | 1.13 | 25.75 | 2.36 | 6.56 | 1.21 | 22.95 | 6.76 | 36.33 | 1.38 |
| Mayo | 12.57 | 2.63 | 1.72 | 1.05 | 23.84 | 2.18 | 6.07 | 1.12 | 21.25 | 6.26 | 33.64 | 1.28 |
| Junio | 13.01 | 2.72 | 1.78 | 1.08 | 24.68 | 2.26 | 6.29 | 1.16 | 22.00 | 6.47 | 34.81 | 1.32 |
| Julio | 13.60 | 2.84 | 1.86 | 1.13 | 25.79 | 2.36 | 6.57 | 1.21 | 22.99 | 6.77 | 36.38 | 1.38 |
| Agosto | 14.48 | 3.02 | 1.98 | 1.21 | 27.47 | 2.52 | 7.00 | 1.29 | 24.49 | 7.21 | 38.76 | 1.47 |
| Septiembre | 15.63 | 3.26 | 2.13 | 1.30 | 29.65 | 2.72 | 7.55 | 1.39 | 26.43 | 7.78 | 41.83 | 1.59 |
| Octubre | 16.57 | 3.46 | 2.26 | 1.38 | 31.42 | 2.88 | 8.00 | 1.48 | 28.01 | 8.24 | 44.33 | 1.68 |
| Noviembre | 17.76 | 3.71 | 2.42 | 1.48 | 33.69 | 3.09 | 8.58 | 1.58 | 30.03 | 8.84 | 47.53 | 1.81 |
| Diciembre | 18.30 | 3.82 | 2.50 | 1.52 | 34.71 | 3.18 | 8.84 | 1.63 | 30.94 | 9.11 | 48.97 | 1.86 |

Tabla 4.17: Producción en términos de $ton/\bar{x}dia$ en función de la disponibilidad energética de $75 m^2$ de heliostatos para la Mina Los Bronces. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).

| Mina Los Bronces | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Recurso Mineral | Concentrados Metal Dore | | Concentrados de Cobre | | Concentrados de Zinc | | Carbonatos de Litio | | Prilados de Yodo | | Nitratos Naturales | |
| Mes | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Lixiviación ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Lixiviación ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) |
| Enero | 20.22 | 4.22 | 2.76 | 1.68 | 38.35 | 3.51 | 9.77 | 1.80 | 34.18 | 10.06 | 54.10 | 2.06 |
| Febrero | 20.03 | 4.18 | 2.73 | 1.67 | 37.99 | 3.48 | 9.68 | 1.79 | 33.86 | 9.97 | 53.60 | 2.04 |
| Marzo | 18.94 | 3.95 | 2.58 | 1.58 | 35.92 | 3.29 | 9.15 | 1.69 | 32.02 | 9.42 | 50.68 | 1.93 |
| Abril | 15.24 | 3.18 | 2.08 | 1.27 | 28.91 | 2.65 | 7.36 | 1.36 | 25.77 | 7.59 | 40.79 | 1.55 |
| Mayo | 14.12 | 2.95 | 1.93 | 1.18 | 26.78 | 2.45 | 6.82 | 1.26 | 23.87 | 7.03 | 37.78 | 1.44 |
| Junio | 13.97 | 2.92 | 1.91 | 1.16 | 26.51 | 2.43 | 6.75 | 1.25 | 23.63 | 6.95 | 37.39 | 1.42 |
| Julio | 15.32 | 3.20 | 2.09 | 1.28 | 29.06 | 2.66 | 7.40 | 1.37 | 25.90 | 7.62 | 41.00 | 1.56 |
| Agosto | 16.09 | 3.36 | 2.20 | 1.34 | 30.53 | 2.80 | 7.77 | 1.43 | 27.21 | 8.01 | 43.06 | 1.64 |
| Septiembre | 16.66 | 3.48 | 2.27 | 1.39 | 31.59 | 2.89 | 8.05 | 1.48 | 28.16 | 8.29 | 44.57 | 1.69 |
| Octubre | 19.10 | 3.99 | 2.61 | 1.59 | 36.22 | 3.32 | 9.23 | 1.70 | 32.29 | 9.50 | 51.10 | 1.94 |
| Noviembre | 20.52 | 4.29 | 2.80 | 1.71 | 38.92 | 3.57 | 9.91 | 1.83 | 34.70 | 10.21 | 54.91 | 2.09 |
| Diciembre | 21.47 | 4.48 | 2.93 | 1.79 | 40.73 | 3.73 | 10.37 | 1.91 | 36.30 | 10.68 | 57.45 | 2.18 |

Tabla 4.18: Producción en términos de $ton/\bar{x}dia$ en función de la disponibilidad energética de $75 m^2$ de heliostatos para la Mina Maricunga. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).

| Mina Maricunga | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Recurso Mineral | Concentrados Metal Dore | | Concentrados de Cobre | | Concentrados de Zinc | | Carbonatos de Litio | | Prilados de Yodo | | Nitratos Naturales | |
| Mes | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Lixiviación ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) | Fundición ($ton/\bar{x}dia$) | Lixiviación ($ton/\bar{x}dia$) | Secado ($ton/\bar{x}dia$) |
| Enero | 18.73 | 3.91 | 2.56 | 1.56 | 35.52 | 3.25 | 9.05 | 1.67 | 31.66 | 9.32 | 50.11 | 1.90 |
| Febrero | 18.68 | 3.90 | 2.55 | 1.56 | 35.44 | 3.25 | 9.03 | 1.67 | 31.59 | 9.30 | 49.99 | 1.90 |
| Marzo | 17.88 | 3.73 | 2.44 | 1.49 | 33.91 | 3.11 | 8.64 | 1.59 | 30.22 | 8.90 | 47.83 | 1.82 |
| Abril | 15.00 | 3.13 | 2.05 | 1.25 | 28.45 | 2.61 | 7.25 | 1.34 | 25.36 | 7.46 | 40.14 | 1.53 |
| Mayo | 13.66 | 2.85 | 1.86 | 1.14 | 25.91 | 2.37 | 6.60 | 1.22 | 23.10 | 6.80 | 36.56 | 1.39 |
| Junio | 14.36 | 3.00 | 1.96 | 1.20 | 27.24 | 2.49 | 6.94 | 1.28 | 24.28 | 7.15 | 38.42 | 1.46 |
| Julio | 14.94 | 3.12 | 2.04 | 1.25 | 28.34 | 2.60 | 7.22 | 1.33 | 25.26 | 7.44 | 39.98 | 1.52 |
| Agosto | 15.93 | 3.33 | 2.17 | 1.33 | 30.21 | 2.77 | 7.69 | 1.42 | 26.93 | 7.93 | 42.62 | 1.62 |
| Septiembre | 16.93 | 3.53 | 2.31 | 1.41 | 32.11 | 2.94 | 8.18 | 1.51 | 28.62 | 8.42 | 45.29 | 1.72 |
| Octubre | 17.88 | 3.73 | 2.44 | 1.49 | 33.91 | 3.11 | 8.64 | 1.59 | 30.23 | 8.90 | 47.84 | 1.82 |
| Noviembre | 19.06 | 3.98 | 2.60 | 1.59 | 36.15 | 3.31 | 9.21 | 1.70 | 32.22 | 9.48 | 51.00 | 1.94 |
| Diciembre | 19.92 | 4.16 | 2.72 | 1.66 | 37.79 | 3.46 | 9.62 | 1.78 | 33.68 | 9.91 | 53.30 | 2.03 |

Tabla 4.19: Producción en términos de $ton/\bar{x}mes$ en función de la disponibilidad energética de $75 m^2$ de heliostatos para la Faena Aguas Blancas. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).

| Faena Aguas Blancas | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Recurso Mineral | Concentrados Metal Dore | | Concentrados de Cobre | | Concentrados de Zinc | | Carbonatos de Litio | | Prilados de Yodo | | Nitratos Naturales | |
| Mes | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) | Lixiviación ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Precipitado ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) |
| Enero | 516.29 | 107.81 | 70.45 | 43.02 | 979.31 | 89.71 | 249.42 | 46.03 | 872.92 | 256.91 | 1381.50 | 52.49 |
| Febrero | 518.20 | 108.21 | 70.71 | 43.18 | 982.93 | 90.04 | 250.35 | 46.20 | 876.15 | 257.87 | 1386.61 | 52.68 |
| Marzo | 512.99 | 107.12 | 70.00 | 42.74 | 973.04 | 89.13 | 247.83 | 45.74 | 867.33 | 255.27 | 1372.66 | 52.15 |
| Abril | 407.28 | 85.05 | 55.58 | 33.94 | 772.53 | 70.77 | 196.76 | 36.31 | 688.61 | 202.67 | 1089.80 | 41.41 |
| Mayo | 377.12 | 78.75 | 51.46 | 31.42 | 715.34 | 65.53 | 182.19 | 33.62 | 637.63 | 187.66 | 1009.12 | 38.34 |
| Junio | 390.30 | 81.50 | 53.26 | 32.52 | 740.33 | 67.82 | 188.56 | 34.80 | 659.90 | 194.22 | 1044.38 | 39.68 |
| Julio | 407.91 | 85.18 | 55.66 | 33.99 | 773.72 | 70.87 | 197.06 | 36.37 | 689.67 | 202.98 | 1091.49 | 41.47 |
| Agosto | 434.50 | 90.73 | 59.29 | 36.20 | 824.17 | 75.50 | 209.91 | 38.74 | 734.64 | 216.22 | 1162.66 | 44.17 |
| Septiembre | 468.97 | 97.93 | 63.99 | 39.08 | 889.56 | 81.49 | 226.56 | 41.81 | 792.92 | 233.37 | 1254.89 | 47.68 |
| Octubre | 497.00 | 103.78 | 67.82 | 41.41 | 942.71 | 86.35 | 240.10 | 44.31 | 840.30 | 247.31 | 1329.87 | 50.53 |
| Noviembre | 532.92 | 111.28 | 72.72 | 44.41 | 1010.85 | 92.60 | 257.46 | 47.51 | 901.03 | 265.19 | 1426.00 | 54.18 |
| Diciembre | 549.01 | 114.64 | 74.92 | 45.75 | 1041.36 | 95.39 | 265.23 | 48.95 | 928.23 | 273.19 | 1469.04 | 55.81 |
| | 5612.48 | 1172.00 | 765.86 | 467.66 | 10645.84 | 975.18 | 2711.42 | 500.40 | 9489.33 | 2792.87 | 15018.03 | 570.59 |

Tabla 4.20: Producción en términos de $ton/\bar{x}mes$ en función de la disponibilidad energética de $75 m^2$ de heliostatos para la Mina Los Bronces. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).

| Mina Los Bronces | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Recurso Mineral | Concentrados Metal Dore | | Concentrados de Cobre | | Concentrados de Zinc | | Carbonatos de Litio | | Prilados de Yodo | | Nitratos Naturales | |
| Mes | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) | Lixiviación ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Precipitado ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) |
| Enero | 606.51 | 126.65 | 82.76 | 50.54 | 1150.44 | 105.38 | 293.01 | 54.08 | 1025.46 | 301.81 | 1622.92 | 61.66 |
| Febrero | 600.88 | 125.48 | 81.99 | 50.07 | 1139.76 | 104.40 | 290.29 | 53.57 | 1015.94 | 299.01 | 1607.85 | 61.09 |
| Marzo | 568.17 | 118.65 | 77.53 | 47.34 | 1077.72 | 98.72 | 274.49 | 50.66 | 960.64 | 282.73 | 1520.33 | 57.76 |
| Abril | 457.31 | 95.50 | 62.40 | 38.10 | 867.43 | 79.46 | 220.93 | 40.77 | 773.19 | 227.56 | 1223.67 | 46.49 |
| Mayo | 423.57 | 88.45 | 57.80 | 35.29 | 803.44 | 73.60 | 204.63 | 37.76 | 716.16 | 210.78 | 1133.40 | 43.06 |
| Junio | 419.22 | 87.54 | 57.20 | 34.93 | 795.17 | 72.84 | 202.53 | 37.38 | 708.79 | 208.61 | 1121.75 | 42.62 |
| Julio | 459.62 | 95.98 | 62.72 | 38.30 | 871.81 | 79.86 | 222.04 | 40.98 | 777.10 | 228.71 | 1229.86 | 46.73 |
| Agosto | 482.80 | 100.82 | 65.88 | 40.23 | 915.79 | 83.89 | 233.24 | 43.05 | 816.30 | 240.25 | 1291.89 | 49.08 |
| Septiembre | 499.66 | 104.34 | 68.18 | 41.63 | 947.76 | 86.82 | 241.39 | 44.55 | 844.80 | 248.64 | 1337.00 | 50.80 |
| Octubre | 572.86 | 119.63 | 78.17 | 47.73 | 1086.62 | 99.54 | 276.75 | 51.08 | 968.57 | 285.07 | 1532.88 | 58.24 |
| Noviembre | 615.63 | 128.56 | 84.01 | 51.30 | 1167.73 | 106.97 | 297.41 | 54.89 | 1040.87 | 306.35 | 1647.31 | 62.59 |
| Diciembre | 644.14 | 134.51 | 87.90 | 53.67 | 1221.81 | 111.92 | 311.19 | 57.43 | 1089.08 | 320.54 | 1723.61 | 65.49 |
| | 6350.36 | 1326.09 | 866.55 | 529.14 | 12045.47 | 1103.39 | 3067.90 | 566.18 | 10736.91 | 3160.05 | 16992.47 | 645.61 |

Tabla 4.21: Producción en términos de $ton/\bar{x}mes$ en función de la disponibilidad energética de $75 m^2$ de heliostatos para la Mina Maricunga. Fuente: Elaboración propia basado en (Dominguez et al., 2017).

| Mina Maricunga | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Recurso Mineral | Concentrados Metal Dore | | Concentrados de Cobre | | Concentrados de Zinc | | Carbonatos de Litio | | Prilados de Yodo | | Nitratos Naturales | |
| Mes | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) | Lixiviación ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Precipitado ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) | Secado ($ton/\bar{x}mes$) | Fundición ($ton/\bar{x}mes$) |
| Enero | 561.76 | 117.31 | 76.66 | 46.81 | 1065.55 | 97.61 | 271.39 | 50.08 | 949.79 | 279.54 | 1503.16 | 57.11 |
| Febrero | 560.49 | 117.04 | 76.48 | 46.70 | 1063.15 | 97.39 | 270.78 | 49.97 | 947.66 | 278.91 | 1499.78 | 56.98 |
| Marzo | 536.27 | 111.99 | 73.18 | 44.68 | 1017.21 | 93.18 | 259.08 | 47.81 | 906.71 | 266.86 | 1434.97 | 54.52 |
| Abril | 450.02 | 93.97 | 61.41 | 37.50 | 853.61 | 78.19 | 217.41 | 40.12 | 760.88 | 223.94 | 1204.18 | 45.75 |
| Mayo | 409.86 | 85.59 | 55.93 | 34.15 | 777.43 | 71.21 | 198.01 | 36.54 | 692.98 | 203.95 | 1096.72 | 41.67 |
| Junio | 430.76 | 89.95 | 58.78 | 35.89 | 817.06 | 74.84 | 208.10 | 38.41 | 728.30 | 214.35 | 1152.63 | 43.79 |
| Julio | 448.25 | 93.60 | 61.17 | 37.35 | 850.25 | 77.88 | 216.55 | 39.97 | 757.88 | 223.06 | 1199.45 | 45.57 |
| Agosto | 477.81 | 99.78 | 65.20 | 39.81 | 906.31 | 83.02 | 230.83 | 42.60 | 807.85 | 237.77 | 1278.53 | 48.58 |
| Septiembre | 507.81 | 106.04 | 69.29 | 42.31 | 963.22 | 88.23 | 245.33 | 45.28 | 858.58 | 252.70 | 1358.81 | 51.63 |
| Octubre | 536.37 | 112.01 | 73.19 | 44.69 | 1017.39 | 93.19 | 259.12 | 47.82 | 906.87 | 266.91 | 1435.23 | 54.53 |
| Noviembre | 571.74 | 119.39 | 78.02 | 47.64 | 1084.49 | 99.34 | 276.21 | 50.98 | 966.68 | 284.51 | 1529.88 | 58.13 |
| Diciembre | 597.62 | 124.80 | 81.55 | 49.80 | 1133.58 | 103.84 | 288.71 | 53.28 | 1010.43 | 297.39 | 1599.13 | 60.76 |
| | 6088.76 | 1271.46 | 830.85 | 507.34 | 11549.26 | 1057.93 | 2941.51 | 542.86 | 10294.61 | 3029.88 | 16292.47 | 619.01 |

La recopilación de datos extraída de la Tabla 4.14 sugiere que, en base a una disposición en el campo de heliostatos de $75 m^2$ que se distribuye en 3 líneas con distancias de $6 m$, $10 m$ y $14 m$ respectivamente desde el horno de fusión. Esto genera un aporte energético total que es expresado en la Tabla 4.22. Dichos valores consideran la energía aportada durante un año (2021) por el total del campo de heliostatos.

Tabla 4.22: Energía total estimada del recurso solar por el campo de heliostatos en un año. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).

| Faena Aguas Blancas | | | Mina Los Bronces | | | Mina Maricunga | | |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| L1 (MJ/m ²) | L2 (MJ/m ²) | L3 (MJ/m ²) | L1 (MJ/m ²) | L2 (MJ/m ²) | L3 (MJ/m ²) | L1 (MJ/m ²) | L2 (MJ/m ²) | L3 (MJ/m ²) |
| 4319.35 | 4540.02 | 4621.81 | 4918.03 | 5129.82 | 5205.72 | 4699.32 | 4921.87 | 5004.02 |
| 13.48 (GJ/m²) | | | 15.25 (GJ/m²) | | | 14.63 (GJ/m²) | | |

Tabla 4.23: Producción Total Estimada por proceso para las tres localizaciones basado en el aporte energético anual del sistema. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).

| Recurso Mineral | Concentrados de Metal Dore | | Concentrados de Cobre | | Concentrados de Zinc | | Carbonatos de Litio | | Prilados de Yodo | | Nitratos Naturales | |
|---------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| | Secado (ton/̄año) | Fundición (ton/̄año) | Secado (ton/̄año) | Fundición (ton/̄año) | Lixiviación (ton/̄año) | Secado (ton/̄año) | Precipitado (ton/̄año) | Secado (ton/̄año) | Secado (ton/̄año) | Fundición (ton/̄año) | Secado (ton/̄año) | Fundición (ton/̄año) |
| Faena Aguas Blancas | 5612.48 | 1172.00 | 765.86 | 467.66 | 10645.84 | 975.18 | 2711.42 | 500.40 | 9489.33 | 2792.87 | 15018.03 | 570.59 |
| Mina Los Bronces | 6350.36 | 1326.09 | 866.55 | 529.14 | 12045.47 | 1103.39 | 3067.90 | 566.18 | 10736.91 | 3160.05 | 16992.47 | 645.61 |
| Mina Maricunga | 6088.76 | 1271.46 | 830.85 | 507.34 | 11549.26 | 1057.93 | 2941.51 | 542.86 | 10294.61 | 3029.88 | 16292.47 | 619.01 |

Dada la producción total estimada que puede generar el sistema del horno de fusión a base de radiación solar incidente en las tres localidades, se hace necesario la aplicación de índices metalúrgicos de recuperación para cada proceso (Véase Tabla 4.24). Dichos índices generan un valor calculado de material fino, material seco, lixiviado y precipitado dependiendo del recurso mineral a procesar.

Tabla 4.24: Índices metalúrgicos de recuperación para el tipo de proceso. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).

| Recurso Mineral | Ley Metal (%) | Índices Metalúrgicos de Recuperación | | | | | | |
|-------------------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------------|--|
| | | Pérdida Metalúrgica (Fundición) (5%) | Recuperación Material Seco (%) | Pérdida Metalúrgica (Secado) (5 %) | Recuperación Material Lixiviado (%) | Pérdida Metalúrgica (Lixiviación) (10 %) | Recuperación Material Precipitado (%) | Pérdida Metalúrgica (Precipitado) (10 %) |
| Concentrados Metal Dore | 11.88 | 95 | 95 | 95 | | | | |
| | 9.36 | | | | | | | |
| Concentrados de Cobre | 30.12 | 95 | 90 | 95 | | | | |
| Concentrados de Zinc | 42.5 | 95 | 85 | 95 | 85 | 90 | | |
| Carbonatos de Litio | 30 | 95 | 80 | 95 | | | 90 | 90 |
| Sales de Yodo | 18.67 | 95 | 85 | 95 | | | | |
| Nitratos Naturales | 45 | 95 | 85 | 95 | | | | |
| | 2 | | | | | | | |

Tabla 4.25: Producción Total estimada por proceso, basado en la aplicación de índices metalúrgicos de recuperación. Fuente: Elaboración propia basado en (Domínguez et al., 2017).

| Recurso Mineral | Concentrados de Metal Dore | | Concentrados de Cobre | | Concentrados de Zinc | | Carbonatos de Litio | | Prilados de Yodo | | Nitratos Naturales | |
|---------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| | Secado (tons/año) | Fundición (tonf/año) | Secado (tons/año) | Fundición (tonf/año) | Lixiviación (tonL/año) | Secado (tons/año) | Precipitado (tonP/año) | Secado (tons/año) | Secado (tons/año) | Fundición (tonf/año) | Secado (tons/año) | Fundición (tonf/año) |
| Faena Aguas Blancas | 5065.26 | 236.49 | 654.81 | 133.82 | 8144.07 | 787.46 | 2196.25 | 380.30 | 7662.64 | 495.36 | 12127.06 | 254.77 |
| Mina Los Bronces | 5731.20 | 267.58 | 740.90 | 151.41 | 9214.78 | 890.98 | 2485.00 | 430.30 | 8670.06 | 560.48 | 13721.42 | 288.26 |
| Mina Maricunga | 5495.11 | 256.56 | 710.38 | 145.17 | 8835.18 | 854.28 | 2382.63 | 412.57 | 8312.90 | 537.39 | 13156.17 | 276.39 |

En síntesis, la recopilación de datos de la Tabla 4.25 entrega un panorama general de la producción anual del sistema que ha sido estudiado en la presente investigación. Dichas estimaciones consideran una serie de índices y condiciones que pueden ser estudiadas, modificadas y adaptadas, con el fin de generar valores que posean una mayor correlación a los procesos actuales de la metalurgia extractiva.

No se asocian costos económicos e inversión de capital, programas de simulación o análisis de pruebas *in situ*. El análisis sugiere un estudio en otras locaciones de la región, dentro de las cuales, las condiciones climáticas propicien una adaptabilidad del presente estudio. Por ejemplo, el Altiplano Boliviano, localidades mineras del Perú, zonas mineras de México o la aplicación en la minería colombiana, y así también, extender el estudio a otras localidades mineras de Chile estandarizando datos basados en el Atlas Solar de Chile (Véase Anexo 10) y el estudio de (Escobar & Castillejo-Cuberos, 2020).

5 CONCLUSIONES

- Las estimaciones de radiación incidente directa se basan en un promedio mensual considerando la declinación de los días 15 de cada mes, esta estimación puede generar un error de arrastre en función de la media aritmética aplicada. Se sugiere aplicar valores de declinación para los 365 días del año, con el propósito de generar una estimación que disminuya dicho error de arrastre.
- En términos de transmisividad atmosférica y aplicando el Modelo de Hottel (Duffie & Beckman, 2013), se consideró parámetros del clima “Invierno, latitud media” en meses de Junio, Julio y Agosto. Para los meses restantes del año se aplicaron parámetros de “Verano, latitud media”. Se sugiere una aplicación de diferentes parámetros del clima para estudiar su variación en términos de transmisividad atmosférica.
- La Irradiancia Total para Mina Los Bronces es de $119.87 \text{ kWh/m}^2 \cdot \bar{x} \text{ año}$, para Mina Maricunga corresponde a $122.26 \text{ kWh/m}^2 \cdot \bar{x} \text{ año}$, por último, para Faena Aguas Blancas es de $106.1 \text{ kWh/m}^2 \cdot \bar{x} \text{ año}$. Las estimaciones evidencian una fuerte tendencia respecto de la zona geográfica y la altura del emplazamiento estudiado.
- Se analiza la estimación de reflectividad para materiales de fabricación de “vidrio de baja reflectancia con plateado posterior” ($\rho = 0.94$) y “aluminio de alta pureza procesado en bruto” ($\rho = 0.89$). Se sugiere una evaluación de factores de reflectividad para diferentes materiales de fabricación. El estudio compararía indicadores de costos y rendimiento del sistema.
- Se considera una distribución de heliostatos en tres líneas (L1, L2 y L3), cada línea aporta 25 m^2 , generando distancias de 6 m , 10 m y 14 m respectivamente desde el horno de fusión. El fenómeno de atenuación atmosférica se considera despreciable en términos de pérdidas de energía global. Se sugiere realizar una estimación en función de distancias acotadas y estudiar su relevancia en términos totales de energía reflejada.

- Apoyado en los datos entregados para la transmitancia solar en vidrio grabado, se sugiere mantener un ángulo de incidencia de 20° a 40°, con el fin de aprovechar al máximo su factor de transmitancia solar.
- Considerando requerimientos energéticos y temperaturas de procesamiento estándar. Se aconseja adaptar dichas estimaciones en función de los procesos, equipos y temperaturas efectivas de procesamiento. Dicha estimación, puede generar una correlación más aproximada entre el aporte de energía por parte del sistema y el proceso de metalurgia extractiva del concentrado o sales de proceso.
- En términos de procesamiento por *ton/año* de concentrados y sales, Mina Los Bronces produce un 11.62% más que Faena Aguas Blancas y un 4.12% más que Mina Maricunga, para todos los procesos dadas las condiciones mencionadas en el capítulo anterior.
- Aplicando el Modelo de Hottel (Duffie & Beckman, 2013), factores de reflectividad del material de fabricación para las facetas de heliostatos y el factor de transmisividad para vidrio grabado en la superficie del horno de fusión, se estiman valores anuales de 15.25 *GJ/año* para Mina Los Bronces, 14.63 *GJ/año* para Mina Maricunga y 13.48 *GJ/año* . Dichas estimaciones son evaluadas para el aporte energético de un campo de heliostatos de 75 *m*².
- Basado en las consideraciones técnicas y estimaciones realizadas, en conjunto con la información proporcionada por (Sernageomin, 2019a). Se considera que para la minería del Oro y la Plata, se generaría un aporte significativo basado en la matriz energética térmica requerida para los procesos de metalurgia extractiva de estos metales.
- Considerando los datos proporcionados por (Sernageomin, 2019a), el valor medio porcentual que genera el aporte del sistema evaluado a la producción anual en toneladas métricas de fino de cobre al año 2019, corresponde a 0.0025% aproximadamente, estimación que se considera marginal para la producción nacional de cobre. Se recomienda el procesamiento de otros recursos minerales de producción nacional.

- Se estima que el sistema evaluado generaría un aporte aproximado de 69.9% a los procesos de metalurgia extractiva del zinc, considerando que existió una variación de -79.0% en la producción nacional de este recurso mineral durante el periodo 2018-2019 según (Sernageomin, 2019a).
- Se estima un aporte porcentual medio de 2.36% respecto de 2019, a la producción nacional de compuestos de litio en forma de precipitados, un aporte medio de 1.49% a la producción de nitratos y un aporte medio de 39.45% a la producción nacional de yodo. Estimación se basada en datos proporcionado por (Sernageomin, 2019a).
- Para la obtención de valores oficiales se recomienda normalizar datos en base al Atlas Solar de Chile.
- Para las estimaciones de datos en la Zona Central del país se recomienda estimaciones *in situ*, puesto que la geometría local puede generar presencia de microclimas en ciertas localidades.
- Tomando en cuenta las evaluaciones, consideraciones y modificaciones futuras, la presente investigación es factible desde el punto de vista técnico-teórico, en especial, para metales de baja producción respecto a la minería nacional del cobre, entendiéndose, producción extractiva de oro, plata, zinc y en productos no metálicos como nitratos, sales de yodo y compuestos de litio.
- Se recomienda una evaluación para minerales metálicos como el plomo y estaño, a su vez considerar productos no metálicos como compuestos de boro, azufre, potasio, cloruro de sodio y carbonato de calcio, entre otros.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

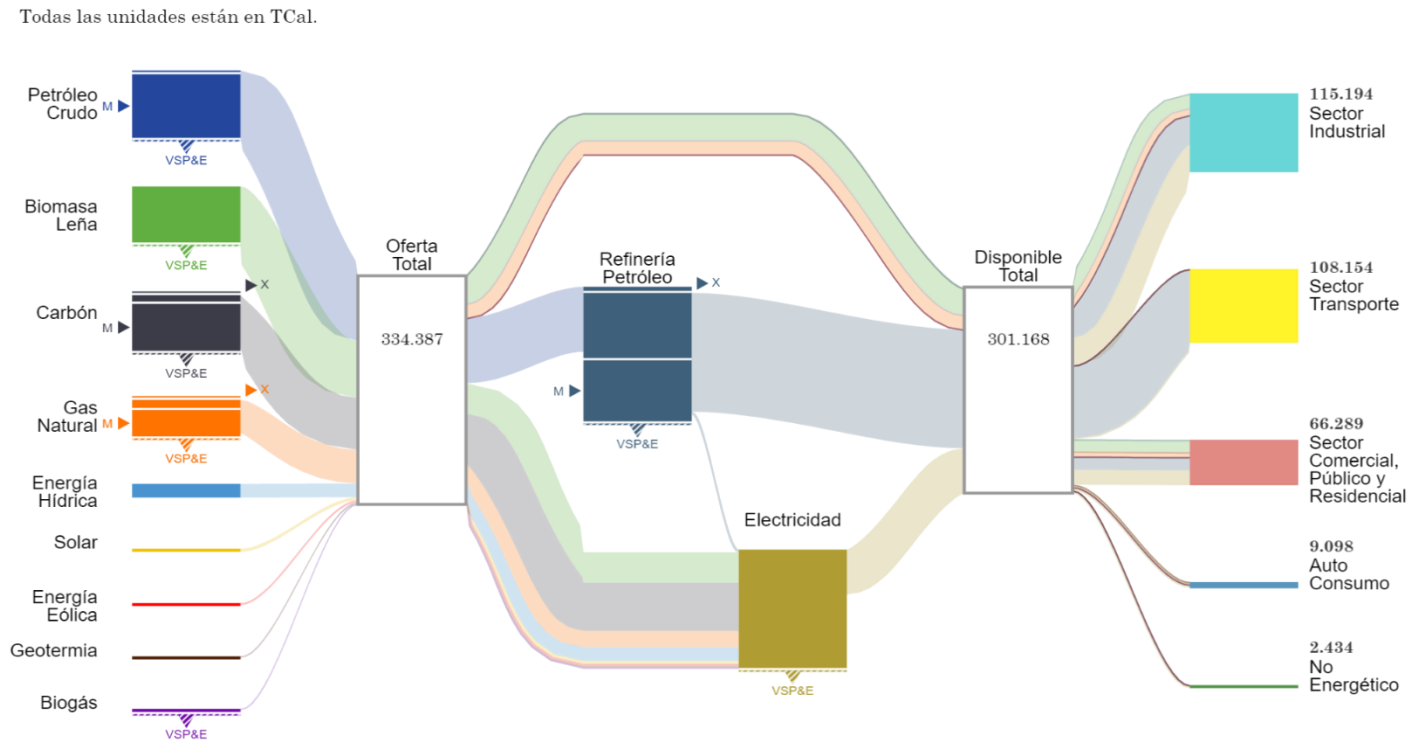
- 911Metallurgist. (2012). *Proceso Merrill Crowe Cementación Con Zinc*.
<https://www.911metallurgist.com/metalurgia/proceso-merrill-crowe-cementacion-zinc/>
- Adler, F. P. F., Berardi, M., García Pedrosa, M., Monticelli, F., & Morquecho, M. (2013). *Energía Solar Fotovoltaica. Notas Del Curso Instalaciones Industriales Universidad Nacional de Mar de Plata*.
- Adobe Illustrator. (2021). *Adobe Illustrator 2021*.
- Altamirano, J. S. R. (2019). *Calor Específico En Sólidos (Práctica 9)*.
- Balladares, E., Kelm, U., Helle, S., Parra, R., & Araneda, E. (2014). Chemical-mineralogical characterization of copper smelting flue dust. *Dyna*, 81(186), 11–18.
- Bauerle Concha, I. A. (2018). *Diseño conceptual de un horno solar de alta temperatura, mediante segmento de paraboloide móvil, con receptor fijo, de pequeña escala*.
- Biroi, F. (2008). World energy outlook. *Paris: International Energy Agency*, 23(4), 329.
- Biswas, A. K., & Davenport, W. G. (2013). *Extractive metallurgy of copper: international series on materials science and technology* (Vol. 20). Elsevier.
- Cárdenas, F., Díaz, M., Guajardo, C., & Oliva, M. B. (2010). Lixiviación de minerales mediante pilas y bateas. *Universidad de Chile, Santiago de Chile*.
- CC San Martin. (2012). *Aprovechamiento de la energía solar. Conversion Termica*.
<https://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/tag/horno/>
- Cifuentes, C. (2018). Mercado de concentrados: situación mundial y mirada nacional. *Santiago*.
- CM. (2015). *Procesos productivos del cobre*. 3,5-8.
- CM. (2020a). *Cifras actualizadas de la minería*.
- CM. (2020b). *Minería en Chile*. <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/aprende-de-mineria/mineria-en-chile/>
- CM. (2020c). *Minería en Numeros. 4ta Edicio*.
- CNE. (2015). *Innovación en Eficiencia Energética para Programa de Proveedores de Clase Mundial (PPCM) en la Minería*.
- CNE. (2019). *Balance Nacional de Energía*. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>
- Cochilco. (2009). *Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos: Litio (DE/12/09)*.
- Cochilco. (2017). *Sulfuros primarios: Desafíos y Oportunidades*.
- Codelco. (2015). *Procesos de Fusión de Concentrados* (pp. 2–29).
- Conesa, J. A. (2013). Mecanismos de transmisión de calor (conducción, convección, radiación). *Experimentación En Ingeniería Química I*.
- Correa Mautz, F. (2016). *Encadenamientos productivos desde la minería de Chile*.
- De La Rosa, J. M., Huerta, A., & Villaverde, L. M. (2007). *PRUEBAS PRELIMINARES DE SEPARACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE UN MINERAL DE PIRROTITA*.
- DED Goya. (2012). *Etapas Proceso Metalurgico*.
<https://sites.google.com/site/dedgoyaetpmateriales/unidad-2---materiales-metalicos/proceso-metalurgico?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>
- Domínguez, M. O., Avilés, A. C., & Sánchez, Y. M. (2017). Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de La Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 4(8).
- Duffie, J. A., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Ed.*
- Escobar, R., & Castillejo-Cuberos, A. (2020). Understanding solar resource variability: An in-depth analysis, using Chile as a case of study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109664.
- Fabre Morales, M. (2013). *Estimación de la irradiancia directa normal a partir de las medidas registradas por un pirheliómetro y un modelo para cielo despejado*.
- Fernández-Coppel, I. A. (2010). *Las Coordenadas Geográficas*.
- Franzosi, C., & Montagna, S. (2007). *Mercado y yacimientos de Nitratos*.

- Gajardo Cubillos, A. (2014). Depositos de Salitre en Chile. *Sernageomin*.
- Garcés Milla, D. I. (2000). *LA INDUSTRIA DEL YODO EN CHILE: PROCESOS, PRODUCCION, MERCADO Y USOS*.
- Guerrero Forno, A. (2012). *DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA SIMULAR EL PROCESO DE FUSIÓN EN LA PLANTA DE PRILADO, SQM*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO.
- Gutiérrez Parra, G. E. (2018). *Alternativas de extracción de litio para salmueras de SQM Salar*.
- Häberer, H. (2012). Guía de manejo ambiental para minería no metálica. *Ministerio de Energía y Minas, (MEN)*.
- Hermosillo Villalobos, J. J., Ayala, D. G., & Ramírez, M. M. (1995). *Energía Solar*. Tlaquepaque: ITESO.
- Huanca Fuentes, W. A. (2012). *PROYECTO DE INSTALACIÓN DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN EL POLIDEPORTIVO SISTRELLS UBICADO EN BADALONA*.
- Ibarra Salazar, B. A., & Rojas Pacheco, F. J. (2012). *Diseño y construcción de un prototipo de colector solar parabólico giratorio de mediana temperatura*.
- ICEX. (2018). *Informe Económico y Comercial, Chile*.
- IDEAM. (2014). *Radiación Solar*. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>
- Instituto Europeo del Cobre. (2018). *Procesos de producción del cobre*. <https://copperalliance.es/cobre/cobre-y-sus-aleaciones/procesos/>
- Labandeira, X., Linares, P., & Würzburg, K. (2012). Energías renovables y cambio climático. *Cuadernos Económicos de ICE*, 83, 37–60.
- Minmin. (2017). *Glosario Minero*. <https://www.minmineria.cl/glosario-minero-s>
- Minmin. (2018). *Tipos de Minerales (Ministerio de Minería)*. <https://www.minmineria.cl/que-es-la-mineria/tipos-de-minerales>
- Muñoz Portero, M. J. (2016a). *Extracción de metales por hidrometalurgia: Procesamiento de cobre y cinc*. Universitat Politècnica de València.
- Muñoz Portero, M. J. (2016b). *Extracción de metales por pirometalurgia: Procesamiento de hierro, acero, cobre y aluminio*.
- Navarro Donoso, P. (2014). *Conminucion y Separacion de Tamaños*. <https://es.slideshare.net/BrunoVillanueva/30712-materialdeestudiopartei-diap180>
- Núñez, F. J. C., Pérez, M. A. S., & Aparicio, E. P. (2017). *Optimización óptica de un sistema de concentración solar de receptor central*.
- ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible. Agenda 2030*.
- Osses, P., Escobar, R., del Rio, C., Garcia, R., & Vargas, C. (2017). El Clima desértico costero con nublados abundantes del desierto de Atacama y su relación con los recursos naturales energía solar y agua de niebla. Caso de estudio Alto Patache (20, 5° S), región de Tarapacá, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 68, 33–48.
- Paredes, C. (2012). *Diseño de captador solar cilindro parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay*. 1–83.
- Passamai, V. (2000). Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 3(2), 8–89.
- Pastén, C. (2012). Chile, energía y desarrollo. *Obras y Proyectos*, 11, 28–39.
- PATEI. (1998). 3. *Principios de la Geometría Solar*.
- Payno Herrera, M. L., & Setián Marquínez, J. (2012). *Metalurgia de los metales no férricos (Metalurgia del Zinc)*.
- Pérez Vallejos, J. P. (2017). *Problemática de las fundiciones de cobre en Chile y Lean management como metodología de gestión*.
- Pesa, M. A., Cudmani, L., & Bravo, S. (1995). Formas de razonamientos asociadas a los sistemas preconceptuales sobre naturaleza y propagación de la luz: Resultados de una experiencia piloto. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 12(1), 17–31.
- Plasencia, E., Matos, L., Posadas, A., & Cabrera, C. (2007). Estimación horaria de la irradiancia solar total extraterrestre. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 10(19), 72–77.
- Red Nacional de Radio de Emergencia. (2019). *Glosario VADEMECUM REMER*.

- Restrepo Baena, O. J., Bustamante Rúa, M. O., & Gaviria Cartagena, A. C. (2008). Pirometalurgia. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Riveros Urzúa, G. (2011). *Fundamentos de la Metalurgia Extractiva Auxiliar 3 y 4 -Pirometalurgia* (pp. 6–8).
- Rojas Iturra, J. O., & Miranda Miranda, L. D. (2018). *El Lito y sus principios, proceso de Extracción y Producción*.
- Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C., & Davenport, W. G. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper fifth edition* (M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole, & W. G. B. T.-E. M. of C. (Fifth E. Davenport (eds.); pp. 89–110). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096789-9.10006-X>
- Sernageomin. (2019a). *Anuario Nacional de la Minería de Chile*.
- Sernageomin. (2019b). *Minería No Metálica*.
- Solano Marín, A. M. (2008). *Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc*.
- Solar, E. (2017). Ministerio de Energía. *Explorador Solar*. <http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>
- Solomon, S. (2007). IPCC (2007): Climate change the physical science basis. *AGUFM, 2007*, U43D-01.
- SOTO, G. S. B. (2009). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD EN LA INSTALACIÓN DE UNA TORRE SOLAR EN LA II REGIÓN DE CHILE*. Universidad Austral de Chile.
- Suero Iquiapaza, P. A. (2018). *Introducción a la hidrometalurgia*.
- SunEarthTools. (2021). *SunEarthTools.com*. <https://www.sunearthtools.com/index.php>
- Ulate, G. V. (2012). Espacio y territorio en el análisis geográfico. *Reflexiones*, 91(1), 313–326.
- Veloso, X. (2012). *Minerales Industriales. Capítulo 5*.

7 ANEXOS

Anexo 1: Balance Nacional de Energía para 2018. Fuente: (CNE, 2019)



Fuente: Ministerio de Energía

Anexo 2: Declinación Solar Anual con variación diaria. Fuente: Elaboración propia basado en (PATEI, 1998).

| Tabla de Declinación Solar | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---------|-----|---------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|------------|-----|---------|-----|-----------|-----|-----------|
| Día | Enero | Día | Febrero | Día | Marzo | Día | Abril | Día | Mayo | Día | Junio | Día | Julio | Día | Agosto | Día | Septiembre | Día | Octubre | Día | Noviembre | Día | Diciembre |
| 1 | -23.012 | 32 | -17.516 | 60 | -8.294 | 91 | 4.017 | 121 | 16.582 | 152 | 22.040 | 182 | 22.542 | 213 | 17.913 | 244 | 7.725 | 274 | -4.216 | 305 | -15.363 | 335 | -22.108 |
| 2 | -22.931 | 33 | -17.246 | 61 | -7.915 | 92 | 4.414 | 122 | 16.869 | 153 | 22.174 | 183 | 22.425 | 214 | 17.650 | 245 | 7.342 | 275 | -4.612 | 306 | -15.666 | 336 | -22.239 |
| 3 | -22.843 | 34 | -16.969 | 62 | -7.534 | 93 | 4.810 | 123 | 17.150 | 154 | 22.302 | 184 | 22.302 | 215 | 17.382 | 246 | 6.958 | 276 | -5.007 | 307 | -15.964 | 337 | -22.364 |
| 4 | -22.748 | 35 | -16.688 | 63 | -7.150 | 94 | 5.204 | 124 | 17.427 | 155 | 22.424 | 185 | 22.172 | 216 | 17.108 | 247 | 6.571 | 277 | -5.401 | 308 | -16.257 | 338 | -22.482 |
| 5 | -22.647 | 36 | -16.402 | 64 | -6.765 | 95 | 5.597 | 125 | 17.698 | 156 | 22.538 | 186 | 22.036 | 217 | 16.830 | 248 | 6.183 | 278 | -5.793 | 309 | -16.546 | 339 | -22.593 |
| 6 | -22.538 | 37 | -16.111 | 65 | -6.377 | 96 | 5.988 | 126 | 17.964 | 157 | 22.647 | 187 | 21.892 | 218 | 16.546 | 249 | 5.793 | 279 | -6.183 | 310 | -16.830 | 340 | -22.698 |
| 7 | -22.424 | 38 | -15.816 | 66 | -5.988 | 97 | 6.377 | 127 | 18.224 | 158 | 22.748 | 188 | 21.742 | 219 | 16.257 | 250 | 5.401 | 280 | -6.571 | 311 | -17.108 | 341 | -22.796 |
| 8 | -22.302 | 39 | -15.515 | 67 | -5.597 | 98 | 6.765 | 128 | 18.479 | 159 | 22.843 | 189 | 21.586 | 220 | 15.964 | 251 | 5.007 | 281 | -6.958 | 312 | -17.382 | 342 | -22.887 |
| 9 | -22.174 | 40 | -15.210 | 68 | -5.204 | 99 | 7.150 | 129 | 18.728 | 160 | 22.931 | 190 | 21.423 | 221 | 15.666 | 252 | 4.612 | 282 | -7.342 | 313 | -17.650 | 343 | -22.972 |
| 10 | -22.040 | 41 | -14.901 | 69 | -4.810 | 100 | 7.534 | 130 | 18.971 | 161 | 23.012 | 191 | 21.253 | 222 | 15.363 | 253 | 4.216 | 283 | -7.725 | 314 | -17.913 | 344 | -23.050 |
| 11 | -21.898 | 42 | -14.587 | 70 | -4.414 | 101 | 7.915 | 131 | 19.209 | 162 | 23.086 | 192 | 21.077 | 223 | 15.056 | 254 | 3.818 | 284 | -8.105 | 315 | -18.171 | 345 | -23.120 |
| 12 | -21.751 | 43 | -14.269 | 71 | -4.017 | 102 | 8.294 | 132 | 19.441 | 163 | 23.153 | 193 | 20.894 | 224 | 14.744 | 255 | 3.419 | 285 | -8.482 | 316 | -18.423 | 346 | -23.184 |
| 13 | -21.597 | 44 | -13.946 | 72 | -3.619 | 103 | 8.670 | 133 | 19.667 | 164 | 23.214 | 194 | 20.705 | 225 | 14.428 | 256 | 3.019 | 286 | -8.857 | 317 | -18.670 | 347 | -23.242 |
| 14 | -21.436 | 45 | -13.620 | 73 | -3.219 | 104 | 9.044 | 134 | 19.887 | 165 | 23.268 | 195 | 20.510 | 226 | 14.108 | 257 | 2.618 | 287 | -9.230 | 318 | -18.912 | 348 | -23.292 |
| 15 | -21.269 | 46 | -13.289 | 74 | -2.819 | 105 | 9.415 | 135 | 20.101 | 166 | 23.314 | 196 | 20.308 | 227 | 13.784 | 258 | 2.217 | 288 | -9.599 | 319 | -19.148 | 349 | -23.335 |
| 16 | -21.096 | 47 | -12.955 | 75 | -2.418 | 106 | 9.783 | 136 | 20.308 | 167 | 23.354 | 197 | 20.101 | 228 | 13.455 | 259 | 1.815 | 289 | -9.966 | 320 | -19.378 | 350 | -23.372 |
| 17 | -20.917 | 48 | -12.616 | 76 | -2.016 | 107 | 10.149 | 137 | 20.510 | 168 | 23.387 | 198 | 19.887 | 229 | 13.122 | 260 | 1.412 | 290 | -10.330 | 321 | -19.602 | 351 | -23.401 |
| 18 | -20.731 | 49 | -12.274 | 77 | -1.613 | 108 | 10.511 | 138 | 20.705 | 169 | 23.413 | 199 | 19.667 | 230 | 12.786 | 261 | 1.009 | 291 | -10.691 | 322 | -19.821 | 352 | -23.424 |
| 19 | -20.540 | 50 | -11.928 | 78 | -1.210 | 109 | 10.870 | 139 | 20.894 | 170 | 23.432 | 200 | 19.441 | 231 | 12.446 | 262 | 0.605 | 292 | -11.049 | 323 | -20.034 | 353 | -23.439 |
| 20 | -20.342 | 51 | -11.579 | 79 | -0.807 | 110 | 11.226 | 140 | 21.077 | 171 | 23.445 | 201 | 19.209 | 232 | 12.102 | 263 | 0.202 | 293 | -11.403 | 324 | -20.241 | 354 | -23.448 |
| 21 | -20.138 | 52 | -11.226 | 80 | -0.404 | 111 | 11.579 | 141 | 21.253 | 172 | 23.450 | 202 | 18.971 | 233 | 11.754 | 264 | -0.202 | 294 | -11.754 | 325 | -20.442 | 355 | -23.450 |
| 22 | -19.928 | 53 | -10.870 | 81 | 0.000 | 112 | 11.928 | 142 | 21.423 | 173 | 23.448 | 203 | 18.728 | 234 | 11.403 | 265 | -0.605 | 295 | -12.102 | 326 | -20.636 | 356 | -23.445 |
| 23 | -19.713 | 54 | -10.511 | 82 | 0.404 | 113 | 12.274 | 143 | 21.586 | 174 | 23.439 | 204 | 18.479 | 235 | 11.049 | 266 | -1.009 | 296 | -12.446 | 327 | -20.825 | 357 | -23.432 |
| 24 | -19.491 | 55 | -10.149 | 83 | 0.807 | 114 | 12.616 | 144 | 21.742 | 175 | 23.424 | 205 | 18.224 | 236 | 10.691 | 267 | -1.412 | 297 | -12.786 | 328 | -21.007 | 358 | -23.413 |
| 25 | -19.264 | 56 | -9.783 | 84 | 1.210 | 115 | 12.955 | 145 | 21.892 | 176 | 23.401 | 206 | 17.964 | 237 | 10.330 | 268 | -1.815 | 298 | -13.122 | 329 | -21.184 | 359 | -23.387 |
| 26 | -19.031 | 57 | -9.415 | 85 | 1.613 | 116 | 13.289 | 146 | 22.036 | 177 | 23.372 | 207 | 17.698 | 238 | 9.966 | 269 | -2.217 | 299 | -13.455 | 330 | -21.354 | 360 | -23.354 |
| 27 | -18.792 | 58 | -9.044 | 86 | 2.016 | 117 | 13.620 | 147 | 22.172 | 178 | 23.335 | 208 | 17.427 | 239 | 9.599 | 270 | -2.618 | 300 | -13.784 | 331 | -21.517 | 361 | -23.314 |
| 28 | -18.548 | 59 | -8.670 | 87 | 2.418 | 118 | 13.946 | 148 | 22.302 | 179 | 23.292 | 209 | 17.150 | 240 | 9.230 | 271 | -3.019 | 301 | -14.108 | 332 | -21.675 | 362 | -23.268 |
| 29 | -18.298 | | | 88 | 2.819 | 119 | 14.269 | 149 | 22.425 | 180 | 23.242 | 210 | 16.869 | 241 | 8.857 | 272 | -3.419 | 302 | -14.428 | 333 | -21.825 | 363 | -23.214 |
| 30 | -18.043 | | | 89 | 3.219 | 120 | 14.587 | 150 | 22.542 | 181 | 23.184 | 211 | 16.582 | 242 | 8.482 | 273 | -3.818 | 303 | -14.744 | 334 | -21.970 | 364 | -23.153 |
| 31 | -17.782 | | | 90 | 3.619 | | | 151 | 22.651 | | | 212 | 16.290 | 243 | 8.105 | | | 304 | -15.056 | | | 365 | -23.086 |

Anexo 3: Propiedades Térmicas de diversos elementos y compuestos. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013).

| Elemento/ Compuesto | T° Fusión (°C) | C Especifico (KJ/ Kg) | C Fusión (KJ/Kg) | T° Ebullición (°C) | C Vaporización (KJ/Kg) |
|---|-------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|
| <i>Au</i> | 1064.00 | 0.13 | 64.50 | 2856.00 | |
| <i>Ag</i> | 960.00 | 0.23 | 88.30 | 2162.00 | |
| <i>S</i> | 115.20 | 0.72 | 37.42 | 444.60 | 328.40 |
| <i>Zn</i> | 420.00 | 0.39 | 111.00 | 907.00 | 1784.00 |
| <i>Pb</i> | 327.50 | 0.13 | 24.50 | 1749.00 | |
| <i>Al</i> | 660.30 | 0.88 | 397.00 | 2519.00 | |
| <i>As</i> | 816.80 | 0.33 | 370.00 | 913.00 | 463.96 |
| <i>Cu</i> | 1083.00 | 0.39 | 134.00 | 2562.00 | |
| <i>Fe</i> | 1538.00 | 0.45 | 293.00 | 2861.00 | |
| <i>Mg</i> | 650.00 | 1.02 | 362.00 | 1090.00 | 5254.00 |
| <i>Na</i> | 97.79 | 1.30 | 113 | 833 | |
| <i>K</i> | 63.5 | 0.76 | 60.8 | 760 | |
| <i>Li</i> | 180.5 | 3.58 | 213.08 | 1330 | |
| <i>Ca</i> | 842.00 | 0.65 | 209.00 | 1484.00 | |
| <i>Ni</i> | 1455.00 | 0.44 | 292.00 | 2913.00 | |
| <i>B</i> | 2076.0 | 1.29 | 2090 | 3927 | |
| <i>Ti</i> | 1668.00 | 0.52 | 365.00 | 3287.00 | |
| <i>Ba</i> | 727.00 | 0.20 | 55.80 | 1897.00 | |
| <i>Mn</i> | 1242.00 | 0.48 | 267.00 | 2061.00 | |
| <i>V</i> | 1910.00 | 0.49 | 345.00 | 3407.00 | |
| <i>Sn</i> | 231.90 | 0.23 | 57.00 | 2602.00 | |
| <i>Cd</i> | 321.10 | 0.23 | 59.00 | 766.80 | |
| <i>I₂</i> | 113.7 | 0.1450 | 60.23 | 184.9 | 164.45 |
| <i>H₂O</i> | 0.00 | 4.19 | 334.00 | 100.00 | 2260.00 |
| <i>Bórax (Na₂B₄O₇)</i> | 743.00 | 1.29 | 58.21 | 1575.00 | |
| <i>NaNO₃</i> | 308.00 | 0.96 | 174.00 | 380.00 | 215.00 |
| <i>Fluor Sapr</i> | 1418.00 | 0.85 | 145.00 | 2533.00 | |
| <i>SiO₂</i> | 1710.00 | 0.13 | 121.00 | 2230.00 | |
| <i>CaO</i> | 2572.00 | 0.06 | 165.84 | 2850.00 | 2691.70 |
| <i>MgO</i> | 2852.00 | 0.82 | 1910.00 | 3600.00 | 8205.00 |
| <i>Al₂O₃</i> | 2100.00 | 0.56 | 1067.60 | 2977.00 | |
| <i>SO₄</i> | 10.0 | 0.19 | 113 | 337 | |
| <i>NaCl</i> | 801.0 | 0.88 | 214 | 1465 | |
| <i>NaCO₃</i> | 851.0 | 1.23 | 24.5 | 1600 | |
| <i>KClO₄</i> | 525.0 | 1.0800 | | 600 | |
| <i>N₂SO₄</i> | 884.0 | 0.9030 | | 1429 | |

Anexo 4: Estimación de calor específico y capacidad térmica para el concentrado de cobre típico (30% en *Cu*) para procesos de Secado y Fundición. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)

| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusion | T de Fundicion | T Ambiente | C Espcifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusion | T ebullicion | C Vaporizacion | Cambio de Estado | Fundicion | Cambio de Estado | Vaporizacion | Energia Total |
|----------|-----------------|-----------|----------|----------------|------------|----------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|-----------|------------------|--------------|---------------|
| Cu | 30.12 | 301.20 | 1083.0 | 1250 | 25 | 0.0846 | 0.3540 | 134.00 | 2562.0 | - | 130615.38 | 40360.80 | | | 170976.18 |
| S | 32.81 | 328.10 | 115.20 | 1250 | 25 | 0.1723 | 0.7215 | 37.42 | 444.6 | 328.4 | 289987.08 | 12277.50 | 99329.45 | 107748.04 | 509342.08 |
| Fe | 26.64 | 266.40 | 1538.0 | 1250 | 25 | 0.1075 | 0.4501 | 293.00 | 2861.0 | - | 146879.37 | | | | 146879.37 |
| SiO2 | 5.30 | 53.00 | 1710.0 | 1250 | 25 | 0.0303 | 0.1270 | 121.00 | 2230.0 | - | 8245.48 | | | | 8245.48 |
| Al2O3 | 3.40 | 34.00 | 2100.0 | 1250 | 25 | 0.1340 | 0.5610 | 1067.60 | 2977.0 | - | 23365.65 | | | | 23365.65 |
| CaO | 0.90 | 9.00 | 2572.0 | 1250 | 25 | 0.0153 | 0.0640 | 165.84 | 2850.0 | 2691.7 | 705.60 | | | | 705.60 |
| MgO | 0.50 | 5.00 | 2852.0 | 1250 | 25 | 0.1966 | 0.8230 | 1910.00 | 3600.0 | 8205 | 5040.88 | | | | 5040.88 |
| Otros | 0.23 | 2.30 | 1810.0 | 1250 | 25 | 0.0179 | 0.0750 | 233.00 | 2110.0 | - | 211.31 | | | | 211.31 |
| S/Cu | 0.10 | 1.00 | 1734.0 | 1250 | 25 | 0.0088 | 0.0370 | 547.00 | 2245.0 | - | 45.33 | | | | 45.33 |
| | 100.00 | | | | | | | | | | | | | | 864.81 |

| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusion | T de Secado | T Ambiente | C Espcifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusion | T ebullicion | C Vaporizacion | Cambio de Estado | Fundicion | Cambio de Estado | Vaporizacion | Energia Total |
|----------|-----------------|-----------|----------|-------------|------------|----------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|-----------|------------------|--------------|---------------|
| Cu | 30.12 | 301.20 | 1083.0 | 650 | 25 | 0.0846 | 0.3540 | 134.00 | 2562.0 | - | 66640.50 | | | | 66640.50 |
| S | 32.81 | 328.10 | 115.20 | 650 | 25 | 0.1723 | 0.7215 | 37.42 | 444.6 | 328.4 | 147952.59 | 12277.50 | 99329.45 | 107748.04 | 367307.59 |
| Fe | 26.64 | 266.40 | 1538.0 | 650 | 25 | 0.1075 | 0.4501 | 293.00 | 2861.0 | - | 74938.45 | | | | 74938.45 |
| SiO2 | 5.30 | 53.00 | 1710.0 | 650 | 25 | 0.0303 | 0.1270 | 121.00 | 2230.0 | - | 4206.88 | | | | 4206.88 |
| Al2O3 | 3.40 | 34.00 | 2100.0 | 650 | 25 | 0.1340 | 0.5610 | 1067.60 | 2977.0 | - | 11921.25 | | | | 11921.25 |
| CaO | 0.90 | 9.00 | 2572.0 | 650 | 25 | 0.0153 | 0.0640 | 165.84 | 2850.0 | 2691.7 | 360.00 | | | | 360.00 |
| MgO | 0.50 | 5.00 | 2852.0 | 650 | 25 | 0.1966 | 0.8230 | 1910.00 | 3600.0 | 8205 | 2571.88 | | | | 2571.88 |
| Otros | 0.23 | 2.30 | 1810.0 | 650 | 25 | 0.0179 | 0.0750 | 233.00 | 2110.0 | - | 107.81 | | | | 107.81 |
| S/Cu | 0.10 | 1.00 | 1734.0 | 650 | 25 | 0.0088 | 0.0370 | 547.00 | 2245 | - | 23.13 | | | | 23.13 |
| | 100.00 | | | | | | | | | | | | | | 528.08 |

Anexo 5: Estimación de calor específico y capacidad térmica para el concentrado de metal doré típico (11.8% en *Au* y 9.4% *Ag*) para procesos de Secado y fundición. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)

| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusión | T de Fundición | T Ambiente | C Especifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusión | T ebullición | C Vaporización | Cambio de Estado | Fundición | Cambio de Estado | Vaporización | Energía Total |
|------------|-----------------|-----------|----------|----------------|------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|-----------|------------------|--------------|---------------|
| SiO2 | 39.620 | 396.20 | 1710.0 | 1200 | 25 | 0.1684 | 0.1270 | 121 | 2230 | - | 5912.29 | | | | 5912.29 |
| Au | 11.880 | 118.80 | 1064.0 | 1200 | 25 | 0.0310 | 0.1298 | 64.5 | 2856 | - | 1811.75 | 7662.60 | | | 9474.35 |
| Ag | 9.360 | 93.60 | 960.0 | 1200 | 25 | 0.0560 | 0.2345 | 88.3 | 2162 | - | 2578.60 | 8264.88 | | | 10843.48 |
| Zn | 8.500 | 85.00 | 420.0 | 1200 | 25 | 0.0940 | 0.3936 | 111 | 907 | 1784 | 3930.67 | 9435.00 | 29505.12 | 151640 | 194510.79 |
| Pb | 2.510 | 25.10 | 327.5 | 1200 | 25 | 0.0310 | 0.1298 | 24.5 | 1749 | - | 382.79 | 614.95 | | | 997.74 |
| Al | 1.260 | 12.60 | 660.3 | 1200 | 25 | 0.2102 | 0.8801 | 397 | 2519 | - | 1302.94 | 5002.20 | | | 6305.14 |
| As | 1.140 | 11.40 | 816.8 | 1200 | 25 | 0.0783 | 0.3278 | 370 | 913 | 463.96 | 439.12 | 4218.00 | 3318.65 | 5289.144 | 13264.92 |
| Cu | 1.080 | 10.80 | 1083.0 | 1200 | 25 | 0.0940 | 0.3936 | 134 | 2562 | - | 499.43 | 1447.20 | | | 1946.63 |
| Fe | 0.800 | 8.00 | 1538.0 | 1200 | 25 | 0.1075 | 0.4501 | 293 | 2861 | - | 423.08 | | | | 423.08 |
| Mg | 0.400 | 4.00 | 650.0 | 1200 | 25 | 0.2443 | 1.0228 | 362 | 1090 | 5254 | 480.73 | 1448.00 | 4357.28 | 21016 | 27302.01 |
| Ca | 0.340 | 3.40 | 842.0 | 1200 | 25 | 0.1552 | 0.6498 | 209 | 1484 | - | 259.59 | 710.60 | | | 970.19 |
| Ni | 0.250 | 2.50 | 1455.0 | 1200 | 25 | 0.1051 | 0.4400 | 292 | 2913 | - | 129.26 | | | | 129.26 |
| Ti | 0.060 | 0.60 | 1668.0 | 1200 | 25 | 0.1242 | 0.5200 | 365 | 3287 | - | 36.66 | | | | 36.66 |
| Ba | 0.050 | 0.50 | 727.0 | 1200 | 25 | 0.0487 | 0.2039 | 55.8 | 1897 | - | 11.98 | 27.90 | | | 39.88 |
| Mn | 0.025 | 0.25 | 1242.0 | 1200 | 25 | 0.1139 | 0.4769 | 267 | 2061 | - | 14.01 | | | | 14.01 |
| V | 0.025 | 0.25 | 1910.0 | 1200 | 25 | 0.1170 | 0.4899 | 345 | 3407 | - | 14.39 | | | | 14.39 |
| Borax | 20.000 | 200.00 | 743.0 | 1200 | 25 | 0.3084 | 1.2912 | 58.21 | 1575 | - | 30343.40 | 11642.00 | | | 41985.40 |
| NaNO3 | 1.000 | 10.00 | 308.0 | 1200 | 25 | 1.8200 | 0.9630 | 174 | 380 | 215 | 1131.53 | 1740.00 | 3418.65 | 2150 | 8440.18 |
| Fluor Sapr | 1.000 | 10.00 | 1418.0 | 1200 | 25 | 0.2039 | 0.8537 | 145 | 2533 | - | 1003.08 | | | | 1003.08 |
| Agua | 0.700 | 7.00 | 0.0 | 1200 | 25 | 1.0000 | 4.1868 | 334 | 100 | 2260 | 3443.64 | | 2198.07 | 15820 | 21461.71 |
| | 100.000 | | | | | | | | | | | | | | 345.08 |

| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusión | T de Secado | T Ambiente | C Especifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusión | T ebullición | C Vaporización | CE Solido | Fundición | CE Ebullición | Vaporización | Energía Total |
|------------|-----------------|-----------|----------|-------------|------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------|-----------|-----------|---------------|--------------|---------------|
| SiO2 | 39.620 | 396.20 | 1710.0 | 600 | 25 | 0.1684 | 0.1270 | 350 | 2230 | - | 2893.25 | | | | 2893.25 |
| Au | 11.880 | 118.80 | 1064.0 | 600 | 25 | 0.0310 | 0.1298 | 64.5 | 2856 | - | 886.60 | | | | 886.60 |
| Ag | 9.360 | 93.60 | 960.0 | 600 | 25 | 0.0560 | 0.2345 | 88.3 | 2162 | - | 1261.87 | | | | 1261.87 |
| Zn | 8.500 | 85.00 | 420.0 | 600 | 25 | 0.0940 | 0.3936 | 111 | 907 | 1784 | 1923.52 | 9435.00 | | | 11358.52 |
| Pb | 2.510 | 25.10 | 327.5 | 600 | 25 | 0.0310 | 0.1298 | 24.5 | 1749 | - | 187.32 | 614.95 | | | 802.27 |
| Al | 1.260 | 12.60 | 660.3 | 600 | 25 | 0.2102 | 0.8801 | 397 | 2519 | - | 637.61 | | | | 637.61 |
| As | 1.140 | 11.40 | 816.8 | 600 | 25 | 0.0783 | 0.3278 | 370 | 913 | 463.96 | 214.89 | | | | 214.89 |
| Cu | 1.080 | 10.80 | 1083.0 | 600 | 25 | 0.0940 | 0.3936 | 134 | 2562 | - | 244.40 | | | | 244.40 |
| Fe | 0.800 | 8.00 | 1538.0 | 600 | 25 | 0.1075 | 0.4501 | 293 | 2861 | - | 207.04 | | | | 207.04 |
| Mg | 0.400 | 4.00 | 650.0 | 600 | 25 | 0.2443 | 1.0228 | 362 | 1090 | 5254 | 235.25 | | | | 235.25 |
| Ca | 0.340 | 3.40 | 842.0 | 600 | 25 | 0.1552 | 0.6498 | 209 | 1484 | - | 127.03 | | | | 127.03 |
| Ni | 0.250 | 2.50 | 1455.0 | 600 | 25 | 0.1051 | 0.4400 | 292 | 2913 | - | 63.25 | | | | 63.25 |
| Ti | 0.060 | 0.60 | 1668.0 | 600 | 25 | 0.1242 | 0.5200 | 365 | 3287 | - | 17.94 | | | | 17.94 |
| Ba | 0.050 | 0.50 | 727.0 | 600 | 25 | 0.0487 | 0.2039 | 55.8 | 1897 | - | 5.86 | | | | 5.86 |
| Mn | 0.025 | 0.25 | 1242.0 | 600 | 25 | 0.1139 | 0.4769 | 267 | 2061 | - | 6.86 | | | | 6.86 |
| V | 0.025 | 0.25 | 1910.0 | 600 | 25 | 0.1170 | 0.4899 | 345 | 3407 | - | 7.04 | | | | 7.04 |
| Borax | 20.000 | 200.00 | 743.0 | 600 | 25 | 0.3084 | 1.2912 | 58.21 | 1575 | - | 14848.90 | | | | 14848.90 |
| NaNO3 | 1.000 | 10.00 | 308.0 | 600 | 25 | 1.8200 | 0.9630 | 174 | 380 | 1233 | 553.73 | 1740.00 | 3418.65 | 12330 | 18042.38 |
| Fluor Sapr | 1.000 | 10.00 | 1418.0 | 600 | 25 | 0.2039 | 0.8537 | 145 | 2533 | - | 490.87 | | | | 490.87 |
| Agua | 0.700 | 7.00 | 0.0 | 600 | 25 | 1.0000 | 4.1868 | 334 | 100 | 2260 | 1685.19 | | 2198.07 | 15820 | 19703.26 |
| | 100.000 | | | | | | | | | | | | | | 72.06 |

Anexo 6: Estimación de calor específico y capacidad térmica para carbonatos de litio típico (25.5% en *Li*) para procesos de Secado y Precipitado de sales. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)

| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusion | T de Secado | T Ambiente | C Especifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusion | T ebullicion | C Vaporizacion | Cambio de Estado | CE Fusion | Vaporizacion | Energia Total |
|----------|-----------------|-----------|----------|-------------|------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|-----------|--------------|---------------|
| Na | 7.6 | 76.0 | 97.79 | 160 | 25 | 0.3105 | 1.30000 | 113 | 833 | | 13338.00 | 8588 | | 21926.00 |
| K | 1.85 | 18.5 | 63.5 | 160 | 25 | 0.1808 | 0.75700 | 60.8 | 760 | | 1890.61 | 1124.8 | | 3015.41 |
| Mg | 0.96 | 9.6 | 650.0 | 160 | 25 | 0.2436 | 1.02000 | 348.9 | 1091 | | 1321.92 | | | 1321.92 |
| Li | 25.5 | 255.0 | 180.5 | 160 | 25 | 0.8555 | 3.58200 | 213.08 | 1330 | | 123310.35 | | | 123310.35 |
| Ca | 0.03 | 0.3 | 842.0 | 160 | 25 | 0.0001 | 0.00062 | 55.8 | 1440 | | 0.03 | | | 0.03 |
| SO4 | 1.65 | 16.5 | 10.0 | 160 | 25 | 0.0461 | 0.19300 | 113 | 337 | | 429.91 | 1864.5 | | 2294.41 |
| NaCl | 16 | 160.0 | 801.0 | 160 | 25 | 0.2099 | 0.87900 | 214 | 1465 | | 18986.40 | | | 18986.40 |
| B | 0.06 | 0.6 | 2076.0 | 160 | 25 | 0.3084 | 1.29100 | 2090 | 3927 | | 104.57 | | | 104.57 |
| NaCO3 | 4.4 | 44.0 | 851.0 | 160 | 25 | 0.2938 | 1.23000 | 24.5 | 1600 | | 7306.20 | | | 7306.20 |
| Agua | 20 | 200.0 | 0.0 | 160 | 25 | 0.9993 | 4.18400 | 334 | 100 | 2260 | 112968.00 | | 62760 | 627728.00 |
| Otros | 22 | 220.0 | 957.0 | 160 | 25 | 0.0180 | 0.0754 | 1567 | 898 | | 2239.38 | | | 2239.38 |
| | 100.05 | | | | | | | | | | | | | 808.23 |

| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusion | T de Precipitado | T Ambiente | C Especifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusion | T ebullicion | C Vaporizacion | Cambio de Estado | Cambio de Estado | Energia Total |
|----------|-----------------|-----------|----------|------------------|------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|------------------|---------------|
| Na | 7.6 | 76.0 | 97.79 | 95 | 25 | 0.3105 | 1.30000 | 113 | 833 | | 6916.00 | | 6916.00 |
| K | 1.85 | 18.5 | 63.5 | 95 | 25 | 0.1808 | 0.75700 | 60.8 | 760 | | 980.32 | 1124.8 | 2105.12 |
| Mg | 0.96 | 9.6 | 650.0 | 95 | 25 | 0.2436 | 1.02000 | 348.9 | 1091 | | 685.44 | | 685.44 |
| Li | 25.5 | 255.0 | 180.5 | 95 | 25 | 0.8555 | 3.58200 | 213.08 | 1330 | | 63938.70 | | 63938.70 |
| Ca | 0.03 | 0.3 | 842.0 | 95 | 25 | 0.0001 | 0.00062 | 55.8 | 1440 | | 0.01 | | 0.01 |
| SO4 | 1.65 | 16.5 | 10.0 | 95 | 25 | 0.0461 | 0.19300 | 113 | 337 | | 222.92 | 1864.5 | 2087.42 |
| NaCl | 16 | 160.0 | 801.0 | 95 | 25 | 0.2099 | 0.87900 | 214 | 1465 | | 9844.80 | | 9844.80 |
| B | 0.06 | 0.6 | 2076.0 | 95 | 25 | 0.3084 | 1.29100 | 2090 | 3927 | | 54.22 | | 54.22 |
| NaCO3 | 4.4 | 44.0 | 851.0 | 95 | 25 | 0.2938 | 1.23000 | 24.5 | 1600 | | 3788.40 | | 3788.40 |
| Agua | 20 | 200.0 | 0.0 | 95 | 25 | 0.9993 | 4.18400 | 334 | 100 | 2260 | 58576.00 | | 58576.00 |
| Otros | 22 | 220.0 | 957.0 | 95 | 25 | 0.0180 | 0.0754 | 1567 | 898 | | 1161.16 | | 1161.16 |
| | 100.05 | | | | | | | | | | | | 149.16 |

Anexo 7: Estimación de calor específico y capacidad térmica para sales de nitratos típico (45% en $NaNO_3$ y 2-3% en K) en procesos de Secado y Fundición. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)

| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusion | T de Fundicion | T Ambiente | C Especifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusion | T ebullicion | C Vaporizacion | Cambio de Estado | CE Fusion | CE Vaporizacion | Vaporizacion | Energia Total |
|----------|-----------------|-----------|----------|----------------|------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|-----------|-----------------|--------------|---------------|
| I2 | 18.67 | 186.70 | 113.7 | 400 | 25 | 0.0346 | 0.1450 | 60.23 | 184.9 | 164.45 | 10151.81 | 11244.94 | 4328.73 | 30702.815 | 56428.30 |
| Ca | 2.71 | 27.10 | 842.0 | 400 | 25 | 0.1552 | 0.6498 | 209 | 1484 | | 6603.59 | | | | 6603.59 |
| K | 0.49 | 4.86 | 63.5 | 400 | 25 | 0.1808 | 0.7570 | 60.8 | 760 | | 1379.63 | 295.49 | | | 1675.12 |
| Mg | 0.25 | 2.50 | 650.0 | 400 | 25 | 0.2436 | 1.0200 | 348.9 | 1091 | | 956.25 | | | | 956.25 |
| NaCl | 5.22 | 52.20 | 801.0 | 400 | 25 | 0.2099 | 0.8790 | 214 | 1465 | | 17206.43 | | | | 17206.43 |
| NaNo3 | 45.00 | 450.00 | 308.0 | 400 | 25 | 0.2300 | 0.9630 | 174 | 380 | 215 | 162506.25 | 78300.00 | 153839.25 | 96750 | 491395.50 |
| Borax | 0.45 | 4.50 | 743.0 | 400 | 25 | 0.4589 | 1.9212 | 58.21 | 1575 | | 3242.03 | | | | 3242.03 |
| KClO4 | 1.03 | 10.34 | 525.0 | 400 | 25 | 0.2580 | 1.0800 | - | 600 | | 4189.32 | | | | 4189.32 |
| N2SO4 | 15.50 | 155.00 | 884.0 | 400 | 25 | 0.2157 | 0.9030 | - | 1429 | | 52486.88 | | | | 52486.88 |
| Agua | 1.74 | 17.40 | - | 400 | 25 | 0.9993 | 4.1840 | 334 | 100 | 2260 | 27300.60 | | 5460.12 | 39324 | 72084.72 |
| Otros | 8.94 | 89.44 | 957.0 | 400 | 25 | 0.0180 | 0.0754 | 756 | 898 | | 2529.03 | | | | 2529.03 |
| | 100.0048 | | | | | | | | | | | | | | 708.80 |

| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusion | T de Secado | T Ambiente | C Especifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusion | T ebullicion | C Vaporizacion | Cambio de Estado | Energia Total |
|----------|-----------------|-----------|----------|-------------|------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|---------------|
| I2 | 18.67 | 186.70 | 113.7 | 60 | 25 | 0.0346 | 0.1450 | 60.23 | 184.9 | 164.45 | 947.50 | 947.50 |
| Ca | 2.71 | 27.10 | 842.0 | 60 | 25 | 0.1552 | 0.6498 | 209 | 1484 | | 616.34 | 616.34 |
| K | 0.49 | 4.86 | 63.5 | 60 | 25 | 0.1808 | 0.7570 | 60.8 | 760 | | 128.77 | 128.77 |
| Mg | 0.25 | 2.50 | 650.0 | 60 | 25 | 0.2436 | 1.0200 | 348.9 | 1091 | | 89.25 | 89.25 |
| NaCl | 5.22 | 52.20 | 801.0 | 60 | 25 | 0.2099 | 0.8790 | 214 | 1465 | | 1605.93 | 1605.93 |
| NaNo3 | 45.00 | 450.00 | 308.0 | 60 | 25 | 0.2300 | 0.9630 | 174 | 380 | 215 | 15167.25 | 15167.25 |
| Borax | 0.45 | 4.50 | 743.0 | 60 | 25 | 0.4589 | 1.9212 | 58.21 | 1575 | | 302.59 | 302.59 |
| KClO4 | 1.03 | 10.34 | 525.0 | 60 | 25 | 0.2580 | 1.0800 | - | 600 | | 391.00 | 391.00 |
| N2SO4 | 15.50 | 155.00 | 884.0 | 60 | 25 | 0.2157 | 0.9030 | - | 1429 | | 4898.78 | 4898.78 |
| Agua | 1.74 | 17.40 | - | 60 | 25 | 0.9993 | 4.1840 | 334 | 100 | 2260 | 2548.06 | 2548.06 |
| Otros | 8.94 | 89.44 | 957.0 | 60 | 25 | 0.0180 | 0.0754 | 756 | 898 | | 236.04 | 236.04 |
| | 100.0048 | | | | | | | | | | | 26.93 |

Anexo 8: Estimación de calor específico y capacidad térmica para el concentrados de zinc típico (42.5% en Zn) para procesos de Secado y Lixiviación. Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)

| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusion | T de Secado | T Ambiente | C Especifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusion | T ebullicion | C Vaporizacion | Cambio de Estado | Fundición | Cambio de Estado | Vaporizacion | Energia Total |
|----------|-----------------|-----------|----------|------------------|------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|---------------|------------------|--------------|---------------|
| Zn | 42.50 | 425.00 | 420.0 | 500 | 25 | 0.0940 | 0.3936 | 111.0 | 907.0 | | 79449.73 | 47175.00 | | | 126624.73 |
| S | 33.82 | 338.20 | 115.2 | 500 | 25 | 0.1723 | 0.7215 | 37.4 | 444.6 | 328.4 | 115905.37 | 12655.44 | 102387.14 | 11106.49 | 242054.44 |
| Fe | 16.90 | 169.00 | 1538.0 | 500 | 25 | 0.1075 | 0.4501 | 293.0 | 2861.0 | | 36130.24 | | | | 36130.24 |
| SiO2 | 2.00 | 20.00 | 1710.0 | 500 | 25 | 0.0303 | 0.1270 | 121.0 | 2230.0 | | 1206.50 | | | | 1206.50 |
| Pb | 1.60 | 16.00 | 327.5 | 500 | 25 | 0.0310 | 0.1298 | 24.5 | 1749.0 | | 986.41 | 392.00 | | | 1378.41 |
| Al2O3 | 0.98 | 9.80 | 2100.0 | 500 | 25 | 0.1340 | 0.5610 | 1067.6 | 2977.0 | | 2611.46 | | | | 2611.46 |
| Sn | 0.56 | 5.60 | 231.9 | 500 | 25 | 0.0545 | 0.2280 | 57.0 | 2602.0 | | 606.48 | 319.20 | | | 925.68 |
| Cu | 0.49 | 4.90 | 1083.0 | 500 | 25 | 0.0846 | 0.3540 | 134.0 | 2562.0 | | 823.94 | | | | 823.94 |
| MgO | 0.40 | 4.00 | 2852.0 | 500 | 25 | 0.1966 | 0.8230 | 1910.0 | 3600.0 | | 1563.70 | | | | 1563.70 |
| Mn | 0.40 | 4.00 | 1246.0 | 500 | 25 | 0.1139 | 0.4769 | 267.0 | 2061.0 | | 906.11 | | | | 906.11 |
| Cd | 0.19 | 1.90 | 321.1 | 500 | 25 | 0.0554 | 0.2320 | 59.0 | 766.8 | | 209.38 | 112.10 | | | 321.48 |
| As | 0.10 | 1.00 | 816.8 | 500 | 25 | 0.0783 | 0.3278 | 370.0 | 919.0 | | 155.72 | | | | 155.72 |
| Otros | 0.06 | 0.60 | 756.0 | 500 | 25 | 0.0234 | 0.0980 | 1102.0 | 2370.0 | | 27.93 | | | | 27.93 |
| | 100.000 | | | | | | | | | | | | | | 414.73 |
| | 100.000 | 1000.00 | | | | | | | | | | | | | |
| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusion | T de Lixiviacion | T Ambiente | C Especifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusion | T ebullicion | C Vaporizacion | Cambio de Estado | Energia Total | | | |
| Zn | 42.50 | 425.00 | 420.0 | 100 | 25 | 0.0940 | 0.3936 | 111.0 | 907.0 | | 12544.69 | 12544.69 | | | |
| S | 33.82 | 338.20 | 115.2 | 100 | 25 | 0.1723 | 0.7215 | 37.4 | 444.6 | 328.4 | 18300.85 | 18300.85 | | | |
| Fe | 16.90 | 169.00 | 1538.0 | 100 | 25 | 0.1075 | 0.4501 | 293.0 | 2861.0 | | 5704.77 | 5704.77 | | | |
| SiO2 | 2.00 | 20.00 | 1710.0 | 100 | 25 | 0.0303 | 0.1270 | 121.0 | 2230.0 | | 190.50 | 190.50 | | | |
| Pb | 1.60 | 16.00 | 327.5 | 100 | 25 | 0.0310 | 0.1298 | 24.5 | 1749.0 | | 155.75 | 155.75 | | | |
| Al2O3 | 0.98 | 9.80 | 2100.0 | 100 | 25 | 0.1340 | 0.5610 | 1067.6 | 2977.0 | | 412.34 | 412.34 | | | |
| Sn | 0.56 | 5.60 | 231.9 | 100 | 25 | 0.0545 | 0.2280 | 57.0 | 2602.0 | | 95.76 | 95.76 | | | |
| Cu | 0.49 | 4.90 | 1083.0 | 100 | 25 | 0.0846 | 0.3540 | 134.0 | 2562.0 | | 130.10 | 130.10 | | | |
| MgO | 0.40 | 4.00 | 2852.0 | 100 | 25 | 0.1966 | 0.8230 | 1910.0 | 3600.0 | | 246.90 | 246.90 | | | |
| Mn | 0.40 | 4.00 | 1246.0 | 100 | 25 | 0.1139 | 0.4769 | 267.0 | 2061.0 | | 143.07 | 143.07 | | | |
| Cd | 0.19 | 1.90 | 321.1 | 100 | 25 | 0.0554 | 0.2320 | 59.0 | 766.8 | | 33.06 | 33.06 | | | |
| As | 0.10 | 1.00 | 816.8 | 100 | 25 | 0.0783 | 0.3278 | 370.0 | 919.0 | | 24.59 | 24.59 | | | |
| Otros | 0.06 | 0.60 | 756.0 | 100 | 25 | 0.0234 | 0.0980 | 1102.0 | 2370.0 | | 4.41 | 4.41 | | | |
| | 100.000 | | | | | | | | | | | 37.99 | | | |

Anexo 9: Estimación de calor específico y capacidad térmica para sales de nitratos típico (producción de yodo en un 19% en I₂). Fuente: Elaboración propia basado en (Duffie & Beckman, 2013),(Hermosillo Villalobos et al., 1995) y (Biswas & Davenport, 2013)

| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusion | T de Fundicion | T Ambiente | C Especifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusion | T ebullicion | C Vaporizacion | Cambio de Estado | CE Fusion | CE Vaporizacion | Vaporizacion | Energia Total |
|----------|-----------------|-----------|----------|----------------|------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|-----------|-----------------|--------------|---------------|
| I2 | 18.670 | 186.70 | 113.7 | 140 | 25 | 0.0346 | 0.145 | 60.23 | 184.9 | 164.45 | 3113.22 | 11244.94 | | | 14358.16 |
| Ca | 2.710 | 27.10 | 842 | 140 | 25 | 0.1552 | 0.650 | 209 | 1484 | | 2025.10 | | | | 2025.10 |
| K | 0.486 | 4.86 | 63.5 | 140 | 25 | 0.1808 | 0.757 | 60.8 | 760 | | 423.09 | 295.49 | | | 718.58 |
| Mg | 0.250 | 2.50 | 650 | 140 | 25 | 0.2436 | 1.020 | 348.9 | 1091 | | 293.25 | | | | 293.25 |
| NaCl | 5.220 | 52.20 | 801 | 140 | 25 | 0.2099 | 0.879 | 214 | 1465 | | 5276.64 | | | | 5276.64 |
| NaNo3 | 45.000 | 450.00 | 308 | 140 | 25 | 0.2300 | 0.963 | 174 | 380 | 215 | 49835.25 | | | | 49835.25 |
| Borax | 0.450 | 4.50 | 743 | 140 | 25 | 0.4589 | 1.921 | 58.21 | 1575 | | 994.22 | | | | 994.22 |
| KClO4 | 1.034 | 10.34 | 525 | 140 | 25 | 0.2580 | 1.080 | - | 600 | | 1284.72 | | | | 1284.72 |
| N2SO4 | 15.500 | 155.00 | 884 | 140 | 25 | 0.2157 | 0.903 | - | 1429 | | 16095.98 | | | | 16095.98 |
| Agua | 1.740 | 17.40 | 0 | 140 | 25 | 0.9993 | 4.184 | 334 | 100 | 2260 | 8372.18 | | 5460.12 | 39324.00 | 53156.30 |
| Otros | 8.944 | 89.44 | 957 | 140 | 25 | 0.0180 | 0.075 | 756 | 898 | | 775.57 | | | | 775.57 |
| | 100.005 | | | | | | | | | | | | | | 144.81 |
| | 100 | 1000 | | | | | | | | | | | | | |
| Elemento | % Participacion | Masa (Kg) | T Fusion | T de Secado | T Ambiente | C Especifico(Kcal/Kg) | C Especifico (KJ/Kg) | C Latente Fusion | T ebullicion | C Vaporizacion | Cambio de Estado | CE Fusion | CE Vaporizacion | Vaporizacion | Energia Total |
| I2 | 18.670 | 186.70 | 113.7 | 80 | 25 | 0.0346 | 0.145 | 60.23 | 184.9 | 164.45 | 1488.93 | | | | 1488.93 |
| Ca | 2.710 | 27.10 | 842 | 80 | 25 | 0.1552 | 0.650 | 209 | 1484 | | 968.53 | | | | 968.53 |
| K | 0.486 | 4.86 | 63.5 | 80 | 25 | 0.1808 | 0.757 | 60.8 | 760 | | 202.35 | 295.49 | | | 497.83 |
| Mg | 0.250 | 2.50 | 650 | 80 | 25 | 0.2436 | 1.020 | 348.9 | 1091 | | 140.25 | | | | 140.25 |
| NaCl | 5.220 | 52.20 | 801 | 80 | 25 | 0.2099 | 0.879 | 214 | 1465 | | 2523.61 | | | | 2523.61 |
| NaNo3 | 45.000 | 450.00 | 308 | 80 | 25 | 0.2300 | 0.963 | 174 | 380 | 215 | 23834.25 | | | | 23834.25 |
| Borax | 0.450 | 4.50 | 743 | 80 | 25 | 0.4589 | 1.921 | 58.21 | 1575 | | 475.50 | | | | 475.50 |
| KClO4 | 1.034 | 10.34 | 525 | 80 | 25 | 0.2580 | 1.080 | - | 600 | | 614.43 | | | | 614.43 |
| N2SO4 | 15.500 | 155.00 | 884 | 80 | 25 | 0.2157 | 0.903 | - | 1429 | | 7698.08 | | | | 7698.08 |
| Agua | 1.740 | 17.40 | 0 | 80 | 25 | 0.9993 | 4.184 | 334 | 100 | 2260 | 4004.09 | | | | 4004.09 |
| Otros | 8.944 | 89.44 | 957 | 80 | 25 | 0.0180 | 0.075 | 756 | 898 | | 370.92 | | | | 370.92 |
| | 100.005 | | | | | | | | | | | | | | 42.62 |

Anexo 10: Mapas regionales para Chile continental, exponiendo la disponibilidad de recurso solar en todo el territorio según su tipo (GHI, DNI e Irradiancia Horizontal Difusa, DHI) así como su distribución climatológica según la clasificación de Köppen-Geiger. Fuente: (Escobar & Castillejo-Cuberos, 2020).

