

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