



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

INSERCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN PLANTAS MINERAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

RODRIGO SEBASTIÁN ROTHEN VÉLIZ

PROFESOR GUÍA
RODRIGO PALMA BEHNKE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
WILLY KRACHT GAJARDO
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA

SANTIAGO DE CHILE
2015

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: Rodrigo Sebastián Rothen Véliz
FECHA: 2015
PROFESOR GUÍA: Rodrigo Palma Behnke**

INSERCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN PLANTAS MINERAS

La minería es la principal actividad económica de Chile, cuyo principal producto comercial es el cobre. La extracción, transporte y procesamiento de minerales producen impactos significativos que perduran en el tiempo. Por esta razón es fundamental utilizar los recursos como el agua y energía de manera eficiente e incorporar nuevas fuentes de energía, como las renovables no convencionales (ERNC). Considerando este escenario, el presente trabajo de memoria busca contribuir y facilitar el desarrollo de proyectos ERNC en plantas mineras, disponiendo de una base conceptual, modelamiento y herramienta computacional que permita evaluar sistemáticamente la inserción de energías renovables no convencionales en plantas mineras.

Con respecto al estado del arte, existe una toma de conciencia en el ámbito nacional e internacional que se origina de la necesidad de hacer un uso cada vez más racional de los recursos existentes en nuestro planeta. La sustentabilidad como un modelo integral para el futuro exige la integración de tres aspectos principales: sustentabilidad económica, ambiental y social. Las ERNC en este sentido ofrecen una solución sustentable a la industria minera. Se pudo realizar un contexto general de la minería del cobre, las sinergias con las ERNC, los procesos de extracción y concentración del cobre, y las distintas herramientas computacionales disponibles en el mercado.

Se estableció una distribución histórica y proyectada de la energía eléctrica y térmica en minería, global y por procesos, que en conjunto con las entrevistas realizadas a 5 profesionales relacionados a la energía, sustentabilidad y minería, llevaron a considerar los proyectos termosolares como el valor a agregar a la herramienta.

Dado que los consumos térmicos son intensivos y crecientes al igual que los eléctricos, el software considera proyectos, plantas y tecnologías térmicas, lo que conlleva a una serie de mejoras estructurales y de diseño del software. Dentro de las tecnologías termosolares, las que consideran como caso base el reemplazo de combustible Diesel, se considera un nuevo tipo de tecnología denominada híbrida fotovoltaica-térmica o PVT, la que permite generar energía eléctrica y térmica en un solo colector, lo que involucra la incorporación del componente híbrido al software.

El primer caso de estudio evalúa el valor práctico de la herramienta mediante datos estadísticos y de operación de la central termosolar Pampa Elvira Solar de Codelco, lo que permite evaluar los datos técnico-económicos reales de la planta y compararlos con la simulación; el segundo utiliza el modelo de la tecnología PVT para realizar un análisis técnico-económico de un proyecto híbrido, cuyos resultados revelan que los paneles PVT amorfos presentan una mejor eficiencia térmica que los policristalinos, y que estos últimos poseen una mejor eficiencia eléctrica comparado con los amorfos. El alto costo de los colectores PVT policristalinos hace que sea más atractivo económicamente realizar un proyecto con PVT amorfos.

El sistema de placas planas sigue siendo más rentable que el sistema PVT, sin embargo si se dispone de una superficie de terreno limitada como puede ocurrir en las mineras, los sistemas híbridos plantean una solución satisfactoria para generar calor y electricidad en una misma área.

AGRADECIMIENTOS

En las próximas líneas me gustaría agradecer a aquellas personas que me han acompañado y brindado su apoyo a lo largo de mi vida académica.

Primero que todo a mis padres, el motor fundamental de mi éxito, quienes me han apoyado en momentos difíciles y me han enseñado que el estudio es la mejor forma de superación. La manera en que miro y enfrento la vida es gracias a ustedes, a su dedicación, esfuerzo, amor y valentía. Absolutamente nada de esto sería posible sin ustedes. Doy gracias por tenerlos como mis padres y por creer en mí desde muy pequeño. Ahora es momento de cosechar lo sembrado.

A la Caro por ser mucho más que mi hermana y compartir juntos momentos imborrables. A pesar de mis defectos, trato de ser un modelo para que sigas y enfrentes la vida de la mejor forma.

Este largo camino comienza con la postulación al Instituto Nacional (idea de mi papá), institución de la que estaré eternamente agradecido por recibir mucho a cambio de muy poco. Sus profesores hacen una labor hermosa reflejada en sus alumnos y exalumnos. Conocí a mis mejores amigos en el Instituto Nacional y me siento muy orgulloso de haber pertenecido a él.

Agradezco a mis abuelos Carlos e Irma por su cariño y preocupación constante por mis estudios y trabajo. Han sido una constante motivación, gracias a ustedes considero que mi esfuerzo vale la pena. Siempre han sido un canal abierto de comunicación (desde pequeño, era el único número de teléfono que me sabía de memoria). Todo esto también es de ustedes. Los quiero mucho.

A mis abuelos Cote y Tina por su cariño y afecto, siempre me sentí apoyado por ustedes a pesar de la distancia.

A la Cony por su apoyo en los momentos más difíciles de mi carrera y animarme cuando más lo necesitaba. El tiempo que hemos pasado juntos ha sido espectacular.

Al profesor Rodrigo Palma por su apoyo y dedicación en esta memoria, además de los proyectos Eolian 2 y 3, Lada Niva, y V2G. En cada trabajo que ha liderado siento que hubo algo distinto que aprender. Agradezco la oportunidad de participar en el Eolian 3, lejos el proyecto más gratificante y emocionante en el que estuve. Al profesor Álvaro Silva y Marco Peirano por su importante apoyo en la realización de este trabajo.

A todos mis amigos del Instituto Nacional: Kirby (fundamental en esta memoria, sin tu ayuda no la habría podido terminar), Pancho, Monsalve, Sordo, y Negro.

Al proyecto FONDECYT N° 1120317, por el apoyo económico para el desarrollo de este trabajo.

Labor Omnia Vincit

TABLA DE CONTENIDO

1.-	INTRODUCCIÓN	1
1.1.-	MOTIVACIÓN	1
1.2.-	ALCANCES Y OBJETIVO GENERAL	2
1.3.-	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2.-	ANTECEDENTES.....	3
2.1.-	ERNC Y DESARROLLO SUSTENTABLE	3
2.1.2.-	ERNC en Chile.....	6
2.2.-	DESARROLLO SUSTENTABLE EN LA INDUSTRIA Y LA MINERÍA	9
2.3.-	ERNC EN MINERÍA.....	12
2.3.1.-	Competitividad en la Industria Minera del Cobre	13
2.4.-	CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE LA GRAN MINERÍA DEL COBRE.....	16
2.4.1.-	Minería del Cobre.....	16
2.4.2.-	Diagrama General del Proceso Minero del Cobre.....	19
2.4.3.-	Procesos de extracción del cobre [42].....	21
2.4.4.-	Procesos de concentración [42].....	23
2.5.-	HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA ERNC	25
2.5.1.-	Herramientas de Simulación	25
2.5.2.-	Herramientas de Evaluación Económica.....	26
3.-	METODOLOGÍA	28
3.1.-	CONSUMOS ENERGÉTICOS EN LA GRAN MINERÍA DEL COBRE	28
3.1.1.-	Introducción	28
3.1.2.-	Consumo de Energía [41].....	29
3.1.3.-	Proyección del consumo de energía eléctrica al año 2025	36
3.2.-	DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS SOLARES	38
3.3.-	ENTREVISTAS DIRIGIDAS.....	41
3.3.1.-	Estructuración de la Entrevista.....	42
3.3.2.-	Respuestas a las Entrevistas	44
3.4.-	SELECCIÓN Y PRIORIZACIÓN DE MEJORAS	45
3.4.1.-	Sistemas Híbridos Fotovoltaicos Térmicos (PVT).....	45
3.5.-	IMPLEMENTACIÓN EN EL SOFTWARE	48
3.5.1.-	Requerimientos Generales [7].....	48

3.5.2.-	Requerimientos sobre la Modelación de las Plantas [7].....	48
3.5.3.-	Consideraciones Generales sobre los Recursos [7].....	49
3.5.4.-	Consideraciones Generales sobre los Proyectos [7].....	49
3.5.5.-	Requerimientos sobre el ahorro de combustibles.....	52
3.5.6.-	Diseño de la Herramienta Computacional.....	52
4.-	CASOS DE ESTUDIO.....	68
4.1.-	CASO DE ESTUDIO TÉRMICO.....	70
4.1.1.-	Agregar Recursos.....	70
4.1.2.-	Agregar Consumo (Planta).....	73
4.1.3.-	Análisis y Validación de Resultados.....	76
4.2.-	CASO DE ESTUDIO HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-TÉRMICO.....	79
4.2.1.-	Agregar Recursos.....	79
4.2.2.-	Agregar Consumo (Planta).....	79
4.2.3.-	Análisis y Validación de Resultados.....	84
5.-	CONCLUSIONES.....	89
6.-	BIBLIOGRAFÍA.....	91
7.-	ANEXOS.....	98
7.1.-	ENTREVISTA DIRIGIDA – SOFTWARE DE INTEGRACIÓN ERNC EN MINERÍA.....	98
7.2.-	MANUAL DE USUARIO.....	99
7.2.1.-	Ingreso de Datos.....	101
7.2.2.-	Configuración de Proyectos Individuales.....	102
7.2.3.-	Impacto por Pérdidas del Sistema de Transmisión [7].....	105
7.3.-	RECOMENDACIONES AL PROGRAMADOR.....	106

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Estado de Proyectos ERNC (MW) al 31 de mayo de 2015. Fuente: CIFES, SEA, CDEC, CNE. Junio 2015 [20].	8
Tabla 2-2: Principales procesos y equipos de la minería del cobre [42].	21
Tabla 3-1: Precio de combustibles al por mayor - Semana 30/10 al 5/11. Fuente: CNE.	65
Tabla 3-2: Poder calorífico combustibles más utilizados.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Esquema del Desarrollo Sustentable [9].....	3
Figura 2-2: Estado Global de Proyectos ERNC (MW). Junio 2015 [20].....	8
Figura 2-3: Ciclo de Vida de un Proyecto Minero [23].	10
Figura 2-4: Leyes de mineral en la minería del cobre en Chile 2003-2012 [31].....	14
Figura 2-5: Costos en la minería del cobre en Chile vs el resto del mundo: 2003-2012 [31].....	14
Figura 2-6: Comparación de costos de concentrado de cobre, entre Chile y otros países mineros, para los tipos de proyectos en riesgo al 2020 [31].....	15
Figura 2-7: Formas en que se encuentra el Cobre en la naturaleza [36].	17
Figura 2-8: Tipos de minas [36].....	18
Figura 2-9: Diagrama General del Proceso Minero del Cobre [40].	20
Figura 2-10: Procesos mineros según el tipo de mineral de cobre [41].	21
Figura 2-11: Proceso de extracción en una Mina [43].	22
Figura 3-1: Fuentes de Energía en la Minería del Cobre [41].....	29
Figura 3-2: Tipos de combustibles y sistemas interconectados [41].....	29
Figura 3-3: Incremento del Consumo de Energía en la Minería del Cobre [41].	29
Figura 3-4: Evolución del consumo de energía en la minería del cobre y de la producción de cobre fino [41].	30
Figura 3-5: Consumo de energía asociada a combustibles a nivel país, desde 2001 a 2012 [41].	31
Figura 3-6: Consumo de combustible por proceso minero a nivel país, desde 2001 a 2012 [41].....	31
Figura 3-7: Distribución porcentual del consumo de combustible a nivel país, desde 2001 a 2012 [41]. ...	32
Figura 3-8: Consumo de energía eléctrica de la minería del cobre a nivel país [41].	33
Figura 3-9: Consumo de energía eléctrica por parte de la minería del cobre - SING [41].....	33
Figura 3-10: Consumo de energía eléctrica por proceso minero – SING [41].....	34
Figura 3-11: Distribución porcentual del consumo de energía eléctrica por proceso minero – SING [41].	34
Figura 3-12: Consumo de energía eléctrica por parte de la minería del cobre – SIC [41].	35
Figura 3-13: Consumo de energía eléctrica por proceso minero – SIC [41].....	35
Figura 3-14: Consumo de energía eléctrica por proceso minero y su distribución porcentual – SIC [41].	36
Figura 3-15: Proyección del consumo esperado de energía eléctrica por parte de la minería del cobre a nivel país [41].....	37
Figura 3-16: Proyección del consumo esperado de energía eléctrica por procesos a nivel país [41].....	38
Figura 3-17: Clasificación de colectores solares térmicos según su temperatura.	39
Figura 3-18: Clasificación de colectores solares térmicos dependiendo del tipo de energía final.	40
Figura 3-19: Concentración solar del tipo: (a) Colector cilindro-parabólico (b) Colector Fresnel lineal (c) Colector disco Stirling (d) Colector torre central [52].	41
Figura 3-20: Estructuración de la entrevista.....	43
Figura 3-21: Clasificación de Sistemas Fotovoltaicos Térmicos [53].....	46
Figura 3-22: Ejemplos de colectores híbridos Fotovoltaico/Térmico [53].	47
Figura 3-23: Descripción general del proceso de desarrollo de software [56].....	53
Figura 3-24: A través de la máquina virtual de Java, la misma aplicación puede correr en múltiples plataformas [56].	54
Figura 3-25: Objeto de un software. Posee estado y comportamiento [57].	55
Figura 3-26: Una bicicleta modelada como un objeto de software [57].	55

Figura 3-27: Una jerarquía de clases de bicicleta [57].	56
Figura 3-28: Diagrama de funcionamiento de la herramienta - Caso base e impacto de los proyectos.	58
Figura 3-29: Proceso de creación de un proyecto.	59
Figura 3-30: Clase planta.	60
Figura 3-31: Clase recurso y sus subclases.	61
Figura 3-32: Clase proyecto y sus subclases.	62
Figura 3-33: Clase tecnología y sus subclases.	63
Figura 4-1: Diagrama planta termosolar Pampa Elvira de Codelco.	69
Figura 4-2: Ingreso del recurso solar – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.	71
Figura 4-3: Ingreso del recurso fósil – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.	72
Figura 4-4: Perfil diario de irradiación solar horizontal – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.	73
Figura 4-5: Consumo térmico – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.	74
Figura 4-6: Análisis técnico-económico y perfiles de generación - Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.	75
Figura 4-7: Botón configurar parámetros técnicos – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.	76
Figura 4-8: Análisis técnico-económico – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.	77
Figura 4-9: Consumo térmico y temperatura ambiente – Proyecto PVT Gaby.	81
Figura 4-10: Análisis técnico-económico y perfiles de generación – Panel PVT policristalino – Proyecto PVT Gaby.	82
Figura 4-11: Perfil diario de generación térmica - Panel PVT policristalino – Proyecto PVT Gaby.	83
Figura 4-12: Análisis técnico-económico y perfiles de generación – Panel PVT amorfo – Proyecto PVT Gaby.	83
Figura 4-13: Perfil diario de generación térmica - Panel PVT amorfo – Proyecto PVT Gaby.	84
Figura 4-14: Sistema eléctrico en DeepEdit - Proyecto PVT Gaby	85
Figura 4-15: Botón configurar parámetros técnicos - Panel PVT policristalino y amorfo – Proyecto PVT Gaby.	86
Figura 7-1: Ejecución de DeepEdit y ELPM.	100
Figura 7-2: Interfaz gráfica para agregar recursos renovables a la base de datos.	101
Figura 7-3: Interfaz gráfica para agregar plantas mineras a la base de datos.	102
Figura 7-4: Interfaz gráfica para visualizar los proyectos individuales.	103
Figura 7-5: Interfaz gráfica para la configuración de parámetros técnicos – Proyecto solar térmico.	104
Figura 7-6: Interfaz gráfica para la configuración de parámetros económicos - Proyecto solar térmico.	104
Figura 7-7: Interfaz gráfica para visualizar el proyecto individual en el resumen de proyectos.	105
Figura 7-8: Interfaz gráfica para el cálculo de pérdidas en transmisión.	106
Figura 7-9: Diagrama de clases estructurales de la herramienta computacional.	107
Figura 7-10: Cómo se guarda y extrae la información de la base de datos.	108

1.- INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presenta un marco general del trabajo de memoria. Éste incluye las motivaciones que fundamentan la realización del presente trabajo; se definen los alcances, objetivos generales y objetivos específicos; y finalmente se establece la estructura de la memoria.

1.1.- MOTIVACIÓN

La minería es una de las principales actividades económicas de Chile y representa al primer trimestre de 2014 el 15.8% del PIB nacional [1]. El primer producto comercial de la minería es el cobre, del que Chile es el mayor productor (32%) y el que cuenta con las mayores reservas a nivel mundial (28%) [2]. La industria del cobre está en constante crecimiento y se estima un aumento sustancial del consumo de cobre para los próximos años. Prueba de esto es que Chile ha triplicado su producción de cobre en los últimos veinte años; y que se pronostica un aumento de un 50% en el consumo de cobre para el año 2025 respecto del consumo en 2011. Además es una industria que genera empleos y beneficios para las comunidades. En resumen, la industria minera ha sido y continuará siendo un factor clave en el desarrollo de Chile [3].

La extracción, transporte y procesamiento de minerales produce impactos medioambientales significativos que perduran en el tiempo, más allá de la duración de las operaciones de una mina [4]. Desde 1990 a la fecha, el impacto ambiental de la actividad minera ha tomado mayor relevancia y actualmente se vive un momento en que las políticas ambientales son cada vez más estrictas y la presión de la comunidad con respecto a faenas existentes, expansiones y nuevos proyectos es cada vez mayor [5]. Si además se considera el uso intensivo y creciente del agua y energía, es fundamental utilizar los recursos de manera eficiente e incorporar nuevas fuentes de energía, como las renovables no convencionales (ERNC). Tanto las empresas mineras como el Estado han realizado esfuerzos para que el desarrollo sustentable vaya de la mano con el desarrollo económico y social.

Chile tiene una gran posibilidad de mantener y aumentar su liderazgo como primer país productor de cobre. Fomentar el uso eficiente de los recursos, en particular del agua y la energía, y obtener energía de tecnologías más limpias son fundamentales para mantener la competitividad de la industria; disminuir la huella de carbono provocada por los altos consumos de energía; y mejorar la percepción que las comunidades tienen sobre la industria minera.

Cada vez hay un ambiente más propicio para el desarrollo de ERNC en minería. En el último tiempo la industria minera ha volcado su atención a proyectos ERNC no solo por el cumplimiento de la ley 20.698 (exigencia de inyecciones de ERNC con una curva de crecimiento que va desde un 6% en el 2014 hasta el 20% el año 2025 y siguientes; y un mecanismo de licitaciones públicas que el Ministerio de Energía debe activar en caso que prevea que en un año determinado los proyectos ERNC en curso no vayan a ser capaces de cumplir con el porcentaje de inyecciones exigido para ese año [6]), sino también por una disminución sostenida en el costo de proyectos ERNC (sobre todo solares); un alto costo marginal de la energía; seguridad en el suministro

eléctrico; y sustentabilidad y compromiso con el medio ambiente y las comunidades. Así, en la actualidad existen cada vez más incentivos en la industria minera para el desarrollo de proyectos ERNC, ya que no solo producen beneficios a nivel social y medioambiental, sino también económicos para la empresa.

1.2.- ALCANCES Y OBJETIVO GENERAL

Frente a los beneficios que produce la inserción de ERNC en minería, es fundamental analizar cómo incorporar estas fuentes de energía en proyectos mineros. Así, se deben tener en cuenta las características de las instalaciones y procesos mineros, los que poseen particularidades que deberán modelarse oportunamente, con el propósito de representar e identificar los consumos de energía eléctrica y térmica en cada uno de los subprocesos mineros.

También se considera mejorar la herramienta computacional ya existente (Herramienta Computacional para Analizar la Inserción de ERNC en Redes Eléctricas de Plantas Mineras [7]) con el fin de incorporar las particularidades del proceso minero, tanto a nivel técnico como organizacional, permitiendo realizar un estudio sobre la incorporación de ERNC en plantas mineras que considere los desafíos actuales de la industria y la opinión de profesionales y especialistas de la minería.

A grandes rasgos, se busca apreciar y entender lo que sucede en la industria minera en relación a proyectos ERNC; encontrar características y condicionantes técnicas que afecten al desarrollo y toma de decisiones ligada a proyectos de ERNC; identificar posibles mejoras de la herramienta; implementar estas mejoras; validar la herramienta computacional; y analizar el valor práctico de la herramienta computacional con un caso de estudio real. Con esto se busca que la herramienta computacional sea de real utilidad y se produzca una retroalimentación que permita adaptar y perfeccionar el software a la industria minera.

Considerando lo anteriormente expuesto, el objetivo principal del trabajo de memoria es disponer de una base conceptual, modelamiento y herramienta computacional que permita evaluar sistemáticamente la inserción de energías renovables no convencionales en plantas mineras.

1.3.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para dar cumplimiento a los objetivos generales, los objetivos específicos planteados en el trabajo de memoria son:

- Conocer el estado del arte respecto al desarrollo de proyectos ERNC y su incorporación a la minería.
- Entender y caracterizar los procesos de la minería del cobre.
- Perfeccionar el software: seleccionar y priorizar mejoras.
- Implementar mejoras en base a la información recopilada y a las entrevistas dirigidas.
- Implementar casos de estudio para validar de manera práctica los cambios realizados a la herramienta computacional.

2.- ANTECEDENTES

2.1.- ERNC Y DESARROLLO SUSTENTABLE

Según la Declaración de Río de 1992, el desarrollo sustentable o sostenible satisface "las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades". En términos simples, esta actividad surge como una manera de responder a las exigencias de la comunidad, principalmente en las áreas ambiental, económica y social. Estas tres áreas se entrelazan entre sí formando un esquema que representa los tres pilares del desarrollo sustentable. Este esquema cambiará de acuerdo a la región donde se desee aplicar, de los problemas que aquejen a ese determinado espacio, actores a intervenir, características de dicho territorio, etc. [8].

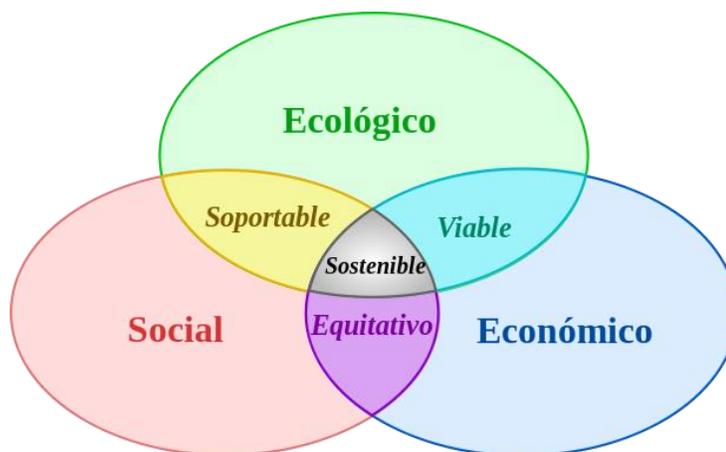


Figura 2-1: Esquema del Desarrollo Sustentable [9].

La toma de conciencia en el ámbito internacional se origina de la necesidad de hacer un uso cada vez más racional de los recursos existentes en nuestro planeta, combinado con una distribución más equitativa de la riqueza social, y así como el evitar que la acción del ser humano deteriore el medio ambiente (hasta niveles irreversibles), o que comprometan la existencia y desarrollo de las generaciones futuras [8].

Desde la declaración de Río a la fecha, el desarrollo sustentable ha adquirido una creciente relevancia a nivel mundial, lo que ha llevado a organismos internacionales, gobiernos, numerosas ONGs, académicos y empresas privadas a tomar medidas para alinearse con la causa. Dentro de los organismos que han motivado y elaborado políticas y lineamientos con respecto al desarrollo sustentable, destacan el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), la Unión Europea (UE), y la Organización de Cooperación para el Desarrollo Económico (OCDE), a través de la aplicación de una estrategia que trate de cubrir los aspectos económicos, sociales y medioambientales del crecimiento. Así, por ejemplo, la OCDE, dentro de las recomendaciones o directrices dirigidas a gobiernos y empresas multinacionales, establece la temática de "Contribuir al desarrollo sustentable generando progreso económico, social y ambiental" [8].

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID), y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), señalan que el concepto de desarrollo sostenible involucra los siguientes aspectos:

"El desarrollo sostenible, implica que la calidad medioambiental mejora el crecimiento económico, a través de varias formas: mejorando la salud de los trabajadores, creando nuevos empleos en el sector medioambiental y creando empleos en el sector dedicado a combatir la contaminación."

“El desarrollo sostenible acepta que, de todos modos, deberán existir algunos *trade – offs* si se contempla un concepto restringido de crecimiento económico, en donde se destaca el hecho que el crecimiento, está en conflicto con el medio ambiente, porque se pone poco esfuerzo en integrarlo dentro de las inversiones de capital y de otras decisiones de producción. De ambas cuestiones se resalta el hecho que no se pretende cuestionar si se crece o no, sino de cómo se crece. En este proceso y así mediante la innovación tecnológica, se puede reducir el consumo energético, o salvar recursos, al tiempo que continuar el proceso de crecimiento”.

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo sostenible, modifica el enfoque del crecimiento económico que se basa en las perspectivas tradicionales de la economía [10].

En un mercado crecientemente globalizado, los productos y servicios se transan y mueven a grandes distancias, y en la mayoría de los casos tanto importadores como consumidores finales no tienen mucha información sobre los impactos económicos, ambientales y sociales de los productos que compran.

Distintos factores como la prensa, la toma de conciencia, y las regulaciones, han incentivado una mayor trazabilidad de estos temas, permitiendo la creación de certificaciones, etiquetas y programas que los productores pueden cumplir con el fin de entregar confianza de que su producción cumple con ciertos criterios de responsabilidad.

La sustentabilidad como un modelo integral para el futuro exige la integración de tres aspectos principales: sustentabilidad económica, ambiental y social [11].

2.1.1.1.- Sustentabilidad Ambiental

La sustentabilidad ambiental considera el impacto y manejo de recursos tales como agua, suelo, paisaje, aire (incluyendo emisiones de material particulado, compuestos sulfurados y nitrogenados, dioxinas y otros contaminantes), y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las que contribuyen al calentamiento global y estimulan el cambio climático. También tiene en cuenta los impactos sobre el medio biótico; la generación y manejo de residuos; la eficiencia en el uso de los recursos, y el uso de sustancias químicas sobre las cuales existe evidencia o sospecha de que pueden tener impactos negativos, ya sea sobre los ecosistemas o sobre la salud humana (incluye el uso de pesticidas y otros agroquímicos).

2.1.1.2.- Sustentabilidad Social

La sustentabilidad social ocurre cuando los procesos, sistemas, estructuras y relaciones, tanto formales como informales, aportan activamente a las personas, creando comunidades saludables y sanas. Las comunidades socialmente sustentables son equitativas, diversas, conectadas, democráticas y proveen una buena calidad de vida.

Dentro de la dimensión social, la sustentabilidad en la práctica no es muy proactiva, está principalmente relacionada con el cumplimiento de los requisitos mínimos de las normativas legales y con acciones caritativas y bondadosas. Este desequilibrio se debe al origen del concepto sustentabilidad, que viene de los movimientos ambientales.

Algunos aspectos fundamentales, pero no exclusivos, están relacionados con: Gobernanza de la organización; derechos humanos; prácticas laborales; prácticas justas de operación; asuntos del consumidor; participación activa y desarrollo de la comunidad, y cadena de valor.

2.1.1.3.- Sustentabilidad Económica

La sustentabilidad económica describe las formas de negocio que garantizan un bienestar duradero y sólido a través de un crecimiento económico continuo y estable. El objetivo es la consideración y conciliación equilibrada del éxito económico, de la compatibilidad social y del trato cuidadoso de los recursos naturales.

La sustentabilidad económica se mide a través de tres categorías de impacto:

- Desempeño económico
- Presencia en el mercado
- Impactos económicos indirectos.
- Los indicadores del desempeño económico pretenden medir las consecuencias económicas de las actividades de una organización, y los efectos de éstos en su entorno y en los grupos de interés involucrados.

Actualmente, los Gobiernos no deben ser los únicos responsables de llevar a cabo proyectos viables en esta materia. Las empresas también deben jugar un rol importante en la viabilidad de estas propuestas sustentables. ¿De qué manera pueden lograrlo? Mejorando e incentivando cada día más los niveles sociales de sus trabajadores (salario, condiciones laborales, beneficios, cursos de aprendizaje, etc.), alineando sus actividades con el impacto social y la preservación ambiental [11].

Muchos son los ejemplos de “insustentabilidad” de nuestro desarrollo, los que se reflejan en problemas como la creciente y caótica urbanización de Latinoamérica, los cinturones de marginalidad y pobreza urbana, la industrialización sin normativa ni control ambiental, la explotación indiscriminada y el deterioro de los recursos naturales, además de la creciente contaminación del suelo, agua y aire, la desertificación y la pérdida del bosque nativo, la disminución de la capa de ozono, entre otros [12].

El desarrollo genera mayor vulnerabilidad sobre los recursos naturales y mayor contaminación. Sin embargo, esto no significa que se esté contra el desarrollo económico. Lo que ocurre es que sin políticas ambientales eficaces y sin una sociedad civil alerta, consciente, movilizadora y participativa, este desarrollo económico puede llevarnos a la pérdida de nuestro patrimonio natural y ambiental, base de muchas de nuestras fortalezas y posibilidades futuras [12].

La manera en que cada empresa enfrente el desarrollo sustentable dependerá de las condiciones ecológicas, económicas y sociales en el que se desarrolle su entorno. En un país donde imperen altas tasas de pobreza se manejará esta actividad de diferente manera, que en aquella región desarrollada donde no exista este problema, pero sí otras necesidades de tipo ambiental, por ejemplo.

Asimismo, las ERNC pueden contribuir en reducir las tendencias de crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero de nuestro país, y para ello, es imprescindible que se aprovechen integralmente todos los instrumentos que los acuerdos internacionales proveen para apoyar estas iniciativas. Así, en el contexto de estos desafíos, los instrumentos establecidos por los organismos internacionales y protocolos acordados entre naciones abren enormes oportunidades para inversionistas locales y extranjeros interesados en participar en proyectos energéticos.

2.1.1.4.- Marco Regulatorio

En el año 1982, con la promulgación de la Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE) [13], Chile crea las bases de un sistema eléctrico de carácter competitivo, pionero a nivel internacional. El marco reglamentario asociado ha sido perfeccionado a través de los años, manteniendo su definición original de un sistema operado a mínimo costo global.

Los cambios a la LGSE, oficializados en marzo de 2004 mediante la Ley Corta I (Ley 19.940) [14], modifican un conjunto de aspectos del mercado eléctrico que afecta a todos los medios de generación, introduciendo elementos especialmente aplicables a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Asimismo, el 1 de abril de 2008 entró en vigencia la Ley 20.257 [15], que establece la obligación para las empresas eléctricas que efectúan ventas a clientes finales de que un porcentaje de la energía comercializada provenga de ERNC. Mediante esta ley y su modificación de octubre de 2013 (ley 20.698) [16], se consolidan los esfuerzos emprendidos por el Estado de Chile para remoción de barreras a la incorporación de las ERNC a la matriz de generación eléctrica nacional, como una forma de aportar a los objetivos de seguridad de suministro y sustentabilidad ambiental que rigen la política energética chilena.

Estas señales también son percibidas por posibles inversionistas de proyectos ERNC, tanto aquellos actualmente presentes en el mercado eléctrico nacional como nuevos inversionistas. Lo anterior se ha manifestado en un proceso de desarrollo de proyectos de ERNC en los sistemas eléctricos nacionales [17].

2.1.2.- ERNC en Chile

La generación de energía a partir de ERNC corresponde a la energía obtenida de centrales hidroeléctricas pequeñas (menos de 20MW de potencia instalada, para el caso chileno) y de proyectos que aprovechen la energía de otras fuentes como la biomasa, el biogás, la geotérmica, la solar, la eólica y la energía de los océanos, entre otras [18].

Los primeros avances en ERNC en Chile se obtuvieron hace ya varias décadas, motivados principalmente por la familiarización con el desarrollo de grandes proyectos hidráulicos. De ahí al levantamiento de proyectos similares pero de baja escala (mini hidráulica), fue solo cuestión de tiempo. Junto con esto, la biomasa ha mostrado un fuerte desarrollo como consecuencia de la diversificación de los negocios en las empresas forestales que buscaban algún retorno y mejor uso para sus desechos. Sin embargo, no fue sino hasta la promulgación de la Ley 20.257 que se ha observado un crecimiento sostenido en la incorporación de estos proyectos a la matriz energética,

así como de otras tecnologías (eólica y solar) en la medida que comienzan a ser económicamente factibles [19].

Por otro lado, la seguridad energética se perfila como uno de los principales desafíos de Chile. El país importa casi tres cuartas partes de la energía que consume, lo que lo pone en una situación de vulnerabilidad en un contexto internacional caracterizado por una alta volatilidad en los precios de los insumos y por interrupciones en las cadenas de suministro. Por ello, el Gobierno ha impulsado acciones para abordar este nuevo escenario con miras a diversificar la matriz energética y lograr mayores grados de autonomía. En este contexto, el impulso a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) constituye un desafío de primer orden.

Sin embargo, el desarrollo de las ERNC no solamente contribuye a mejorar la seguridad de suministro nacional, sino también es fundamental para lograr un fortalecimiento de todos aquellos esfuerzos destinados a alcanzar un desarrollo sustentable, con el objeto de preservar nuestros recursos para las futuras generaciones, tanto desde una perspectiva local como global.

En Chile, al igual que ocurre en otros países, los sectores económicos que contribuyen de mayor manera a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son el transporte y la energía, debido a la utilización de combustibles fósiles. Con respecto al sector de la energía, existe un creciente interés en las ERNC, como una forma de reemplazar parte de la energía generada mediante el uso de combustibles fósiles, dado su bajo impacto en las emisiones de contaminantes globales y locales [18].

Actualmente, la capacidad instalada por fuentes ERNC interconectada a los cuatro principales sistemas eléctricos del país alcanza los 2.267 MW. Siendo liderada por la energía eólica con un 40% de la capacidad instalada ERNC, la energía solar PV en segundo lugar con un 23%, biomasa con un 19%, y mini hidro con un 16 %. El año 2015 culminará con más de 1.000 MW adicionales ERNC, de los cuales más de 800 MW serán solares. La energía proveniente de las ERNC, en lo que va del 2015, representa el 9,42% de la matriz energética nacional y la inyección reconocida por ley más que duplica la obligación establecida en la ley 20.257 [20].

Tabla 2-1: Estado de Proyectos ERNC (MW) al 31 de mayo de 2015. Fuente: CIFES, SEA, CDEC, CNE. Junio 2015 [20].

Tecnología	Operación	Construcción	Resolución ambiental aprobada	En calificación
Biomasa	422	0	134	72
Biogás	43	0	1	8
Eólica	894	212	5.613	2.161
Mini Hidráulica	371	86	337	215
Solar - PV	537	1.849	8.990	3.996
Solar - CSP	0	110	870	260
Geotermia	0	0	120	0
Total	2.267	2.257	16.073	6.705

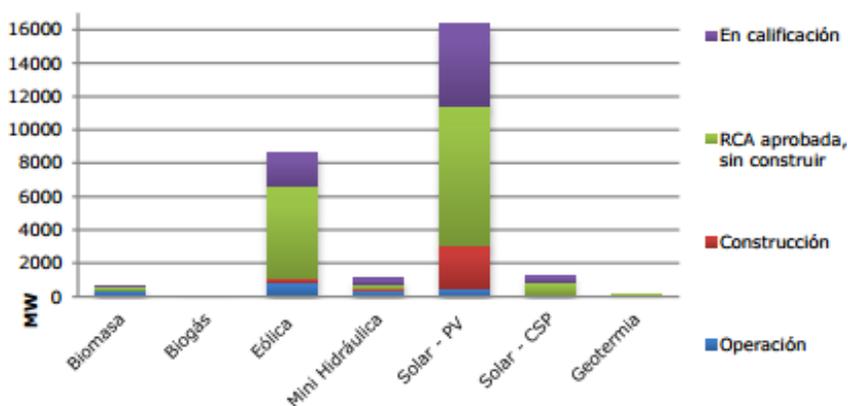


Figura 2-2: Estado Global de Proyectos ERNC (MW). Junio 2015 [20].

A partir de la vigencia de la ley 20.257, la regulación obliga a las empresas generadoras que comercializan energía, a retirar un porcentaje de electricidad proveniente de ERNC, acreditando dicho retiro mediante la presentación de certificados ERNC. No obstante, el mercado eléctrico actual está mayoritariamente exento de dicha obligación, ya que los contratos afectos a esta ley (aquellos celebrados desde 2007) sólo constituyen el 20% de los contratos de suministro entre generadoras y distribuidoras. En consecuencia deberá esperarse al 2024 para que casi todos los contratos estén sujetos a la obligación de la ley de cuota de ERNC [21].

Con respecto a las modificaciones de esta última ley, denominada como ley 20/25 (ley 20.698), se eleva la meta de inserción de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) a un 20% para el año 2025. Esto genera las condiciones para que las fuentes de energía ERNC puedan convertirse en un aporte relevante. En primer lugar, la una nueva exigencia de inyecciones de ERNC plantea una curva de crecimiento que va desde un 6% en el 2014 hasta el 20% el año 2025 y siguientes. En comparación con la exigencia vigente que estableció en su momento la Ley 20.257, la nueva curva de crecimiento incrementa en un 50% la exigencia de ERNC para 2020 y en un 100% para el 2025. El segundo cambio es un mecanismo de licitaciones públicas, que la autoridad del sector, el Ministerio de Energía, debe activar en caso que prevea que en un año determinado los proyectos

ERNC en curso no vayan a ser capaces de cumplir con el porcentaje de inyecciones exigido para ese año. Estas licitaciones públicas son neutras en tecnología y se adjudican según un criterio de evaluación basado estrictamente en precio [6].

Chile cuenta con excelentes oportunidades para materializar proyectos en base a ERNC: gran disponibilidad de potencial eólico, solar, geotérmico e hidroeléctrico; un importante grupo de inversionistas extranjeros interesados en ingresar al mercado eléctrico nacional y la opción de asociaciones con compañías locales; y una fuerte disminución del costo en el suministro de equipos, principalmente en el área solar y eólica [22].

Finalmente, dado que la energía eléctrica es un asunto estratégico y las ERNC proveen atributos deseables desde el punto de vista privado y social, tales como independencia energética, menores impactos ambientales relativos y estabilidad de precios en el largo plazo; este tipo de energías se pueden aplicar perfectamente en la industria minera una vez aseguradas las medidas de mitigación y compensación de los impactos ambientales.

2.2.- DESARROLLO SUSTENTABLE EN LA INDUSTRIA Y LA MINERÍA

La extracción y el procesamiento de minerales y metales para proveer bienes y servicios esenciales para la sociedad humana son tan antiguos como el desarrollo humano mismo. Los minerales y metales han traído grandes beneficios para nuestra sociedad – son *commodities* vitales que sirven como base de la calidad de vida material de la sociedad. En el mundo actual, el crecimiento de la población, la urbanización, el desarrollo social y económico e incluso las demandas por una economía más verde (o con menos huella de carbono), contribuyen a incrementar la demanda por minerales y metales. Sin embargo, cumplir con esta demanda logrando beneficios se consigue a un determinado costo.

La minería es una contribución clave al crecimiento económico y la mejora de la calidad de vida material. Los extensos horizontes de tiempo de la minería, la necesidad de mano de obra (calificada y no calificada), sus vínculos con la infraestructura local y el desarrollo de servicios, así como la importancia de los productos que produce, significa que puede hacer una contribución única y poderosa al desarrollo sustentable. Para asegurar que las políticas relacionadas al desarrollo de la minería se conduzcan con los mayores estándares posibles, un profundo conocimiento de las contribuciones de la minería al desarrollo sustentable es fundamental – no solo para los especialistas de la industria, gobiernos y reguladores, sino también para la ciudadanía en general. Esto requiere la consideración de las oportunidades y beneficios que se logran a través de la extracción, procesamiento y uso de los minerales y metales, así como la evaluación de los costos económicos, sociales y ambientales y el riesgo de llevarlos a cabo. Así, deben considerarse las responsabilidades y derechos de todos los grupos de interés (*stakeholders*) [23].

Una discusión interesante surge al cuestionar si la industria minera, la que se basa en el agotamiento de recursos no renovables, puede contribuir a la sustentabilidad. Más que lograr realizar una operación completamente sustentable, existen contribuciones a la sustentabilidad en cada proceso que es relevante identificar y que permiten disminuir el impacto global de la actividad minera.

La falta de entendimiento de esta contribución impide que se desarrollen políticas bien fundadas. De esta manera, capturar la contribución de la minería al desarrollo sustentable no es una tarea fácil: involucra una evaluación de los costos, los riesgos, beneficios y responsabilidades desde la perspectiva de las empresas, gobiernos, comunidades, organizaciones civiles y otros. En consecuencia, desarrollar políticas públicas, regulaciones y leyes fuertes es poco probable si no se conoce bien cuál podría ser el aporte de la minería al desarrollo sustentable [24]. Esta contribución al desarrollo sustentable debe estar presente en todo el ciclo de vida de un proyecto minero (ver Figura 2-3), desde la etapa de exploración al cierre y post-cierre de una mina.

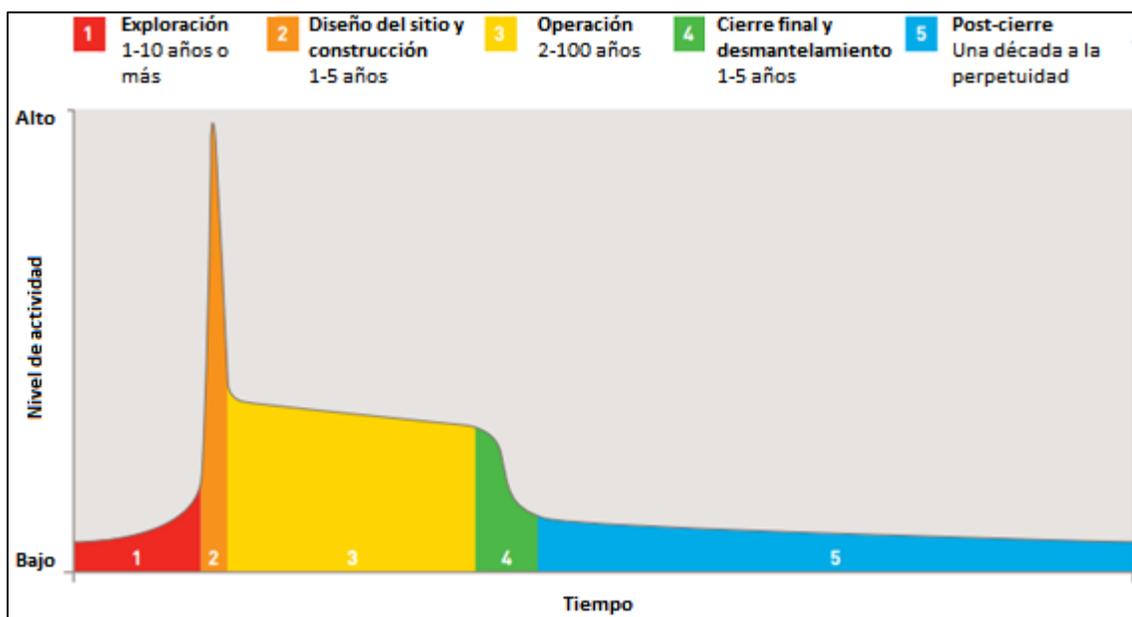


Figura 2-3: Ciclo de Vida de un Proyecto Minero [23].

A modo de ejemplo, en los años 60 y 70 en Chile, la filantropía era el mecanismo principal de expresión de preocupación por parte de las empresas de las necesidades sociales de la comunidad [25]. Sin embargo, en los últimos años ha habido una toma de conciencia por parte de organismos internacionales y los compromisos que el país ha adquirido con estas organizaciones han llevado a que la toma de conciencia llegue a todas las industrias. En el caso particular de Chile, donde el crecimiento económico depende fuertemente de la minería, resulta fundamental que se integre el desarrollo sustentable al sector, ya que la minería es una actividad que provoca impactos importantes en el entorno, que perduran en el tiempo, más allá de la duración de las operaciones de una mina [4].

Del desarrollo sustentable, han surgido conceptos como el de Responsabilidad Social Empresarial (RSE). Este tipo de herramientas de gestión empresarial tratan de incorporar las necesidades e interés de actores internos y externos a la empresa, además de factores como la transparencia, ética, retornos de capital, programas sociales, cumplimiento de regulaciones laborales y ambientales y otras, que complementan y ratifican el compromiso ético de la empresa con la sociedad. Si bien no hay una definición única e integral para la RSE, existe consenso en que es una herramienta de gestión empresarial que traspasa las fronteras de una empresa, siendo también el Gobierno parte

esta preocupación de dar respuesta a las demandas sociales y ambientales de la ciudadanía corporativa.

En Chile existen hoy en día diversas empresas representativas de los sectores productivos que han incorporado en su gestión elementos de la RSE contribuyendo por esta vía a mejorar su imagen corporativa ante las partes interesadas, la rentabilidad de sus negocios e incrementar su compromiso con la ciudadanía.

La globalización y las tendencias mundiales asociadas al desarrollo sustentable han llevado a las empresas a incorporar elementos de RSE, como un factor competitivo más de su gestión y parte integral de su misión, visión y valores de sus estrategias de negocios y para expresar su compromiso voluntario en el uso de mejores prácticas ambientales y sociales que respondan a las expectativas de los grupos de interés (*stakeholders*).

Claramente, el desarrollo que ha alcanzado el concepto de RSE, tanto a nivel internacional como nacional, revela que los grupos de interés han asumido un rol más proactivo para presionar a las empresas a ejercer una conciencia social y ambiental. Las demandas de estos grupos tienen por propósito lograr un mayor involucramiento de las empresas, instándolas a asumir un mayor compromiso ético con los temas sociales y ambientales que preocupan a la ciudadanía corporativa [25]. A su vez, esto demuestra que la RSE ha servido como una herramienta importante para introducir el concepto de desarrollo sustentable en la empresa.

Acompañado de la toma de conciencia, el desarrollo sustentable y el cumplimiento de los pactos con organismos internacionales han llevado a que las políticas ambientales sean cada vez más estrictas. En particular, se vive un momento en que distintas ONGs, activistas y la ciudadanía en general manifiestan un creciente rechazo a grandes proyectos eléctricos y mineros. La amplia cobertura que los medios de comunicación tienen sobre este tipo de proyectos hace que la definición de ampliaciones y nuevos proyectos no solo dependa del Estado, la legislación vigente y las empresas inversionistas, sino que también de una componente social que emite su opinión y se pronuncia [26].

Proyectos emblemáticos como la central térmica Barrancones, la central térmica Castilla, el proyecto hidroeléctrico HidroAysén o la expansión Andina 244 de Codelco demuestran este cambio cultural y la influencia que tienen los movimientos sociales en la aprobación de los mismos. A modo de ejemplo, uno de los más emblemáticos, HidroAysén, se rechazó de manera unánime por el Comité de Ministros debido a sus impactos sociales, ambientales y económicos [27]. La opinión pública se muestra cada vez más favorable al desarrollo de fuentes alternativas de energía como son las ERNC, además de que Chile cuenta con condiciones cada vez más favorables para el desarrollo de este tipo de energías, como la fotovoltaica o la termosolar, en términos de costos.

Esto reafirma el compromiso que la industria minera debe tener con el medioambiente, y que para lograr un desarrollo sustentable no es suficiente con cumplir con la legislación vigente. Así, dar el ejemplo y proponer nuevas políticas que permitan asegurar la sustentabilidad son claves para fomentar un ambiente de cooperación entre los distintos *stakeholders*. También corrobora que no

hay un *stakeholder* más importante que otro y que pueden incorporarse nuevos *stakeholders* a la discusión.

En esta línea, organismos como el Consejo Minero de Chile, creado en 1998 y que reúne a las empresas productoras de cobre, oro, plata y molibdeno más grandes en Chile, sugieren ciertos lineamientos en pos de alcanzar el desarrollo sustentable para sus empresas socias. Entre estos principios destacan el integrar el desarrollo sustentable como un pilar fundamental en la definición e implementación de las políticas y prácticas de las empresas, tanto en relación al proceso productivo como al entorno en que se desempeña la misma; minimizar el impacto ambiental de las operaciones en todas las fases del ciclo minero, desde la etapa de exploración hasta el cierre; contribuir al desarrollo social y económico de las comunidades donde se opera; respetar los derechos fundamentales, los valores, costumbres y cultura de quienes puedan verse afectados por la actividad de la empresa; impulsar y practicar el uso eficiente de los recursos, en especial de la energía y el agua; implementar las mejoras prácticas y estándares internacionales cuando sea posible y pertinente; y buscar el mejoramiento continuo del desempeño de la empresa, con análisis crítico en los procesos [28].

También existen organismos internacionales que agrupan a empresas de minería y metales alrededor del mundo. Es el caso del Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM por su sigla en inglés), organización liderada por directores ejecutivos de la industria y que se dedica al desarrollo sustentable. ICMM reúne a muchas empresas de la minería y metales líderes en el mundo, además de asociaciones regionales, nacionales y *commodities*. Estas empresas y asociaciones se comprometen a mejorar su rendimiento en el desarrollo sustentable y producción responsable de los recursos minerales y metales que necesita la sociedad [29].

Sintetizando esta sección, es posible apreciar que el Estado, organismos internacionales y las empresas mineras han realizado esfuerzos para que el desarrollo económico vaya de la mano con el desarrollo económico y social, logrando un desarrollo sustentable. Si además se considera el uso intensivo y creciente del agua y energía, es fundamental utilizar los recursos de manera eficiente e incorporar nuevas fuentes de energía, como las renovables no convencionales (ERNC) para fomentar el desarrollo sustentable en la minería.

2.3.- ERNC EN MINERÍA

Existen varias razones por las cuales el sector de los minerales se encuentra especialmente involucrado en los aspectos de un potencial cambio ambiental global que se relacionan con el uso de energía [30]:

- La elaboración de productos minerales básicos a partir de fuentes primarias implica el traslado y el procesamiento de grandes cantidades de material, lo que requiere una fuente de energía.
- Muchos productos elaborados que dependen de los insumos minerales para su funcionamiento consumen cantidades considerables de energía, como por ejemplo vehículos motorizados y artículos eléctricos.

- Debido a los requisitos de energía, la minería y la industria de los minerales pueden influir en las decisiones con respecto a invertir en fuentes de energía.
- Varios productos minerales básicos, cabe destacar el caso del carbón, son utilizados como combustibles.

El sector de los minerales tiene un interés fundamental en reducir su uso de energía por unidad producida, debido a las obvias implicaciones de los costos de producción. Según la operación determinada en cuestión, los costos de energía para las distintas operaciones unitarias varían considerablemente con relación a los costos totales de operación. En el caso del procesamiento de minerales, este puede ser hasta un cuarto del total.

El objetivo no es sólo aumentar la eficacia con la que se usa la energía de cualquier fuente. Una prioridad decisiva es reducir la liberación directa e indirecta de gases del efecto invernadero. Las opciones de mitigación varían entre los distintos sectores de la industria. Así, por ejemplo, la seguridad del suministro es un asunto fundamental para considerar la selección de las fuentes de energía.

2.3.1.- Competitividad en la Industria Minera del Cobre

Mantener la competitividad con respecto al resto del mundo es fundamental para mantener el liderazgo como primer país productor de cobre. Existen factores exógenos, difíciles de controlar, y otros en los que es posible intervenir. Dentro de los exógenos se encuentra la ley del mineral, la que hace años presenta una persistente caída [31] (ver Figura 2-4).

Existe una tendencia a mayores costos de la minería en Chile, observada desde el año 2009. Un indicador de competitividad es la comparación entre el costo de producción del cobre en Chile con respecto al resto del mundo (medido como C3 o costo total: *cash costs* + depreciación + intereses + costos indirectos) (ver Figura 2-5) [31].



Figura 2-4: Leyes de mineral en la minería del cobre en Chile 2003-2012 [31].

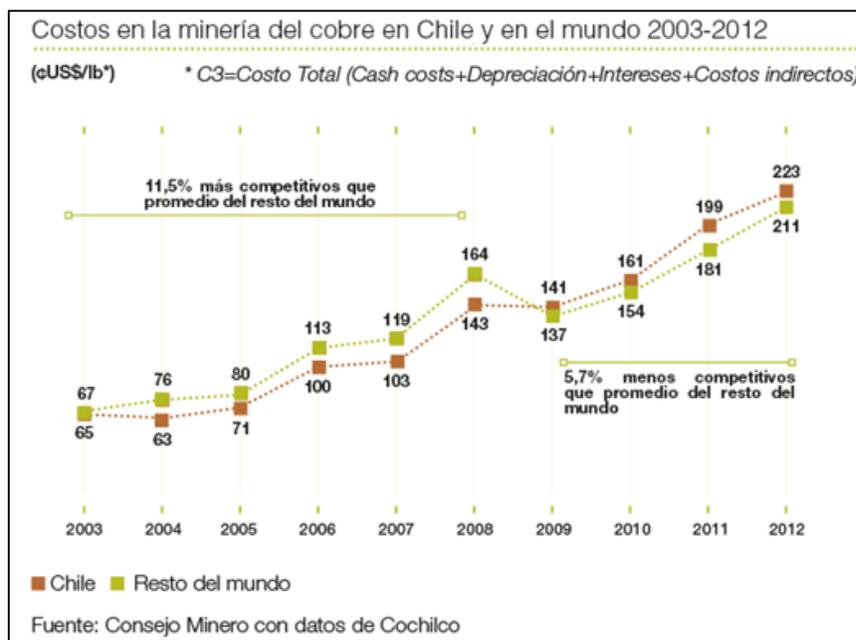


Figura 2-5: Costos en la minería del cobre en Chile vs el resto del mundo: 2003-2012 [31].

Uno de los mayores desafíos para la eficiencia energética es hacer frente a la disminución de la ley del mineral (ver Figura 2-4). Leyes más bajas inevitablemente requieren que se movilice mayores cantidades de material por unidad de producción [30]. En efecto, el consumo de energía en la industria minera está estrechamente relacionado con la cantidad de materiales que deben moverse [32].

En el caso de los proyectos de ley baja y escala media, la mano de obra en Chile es 188% más costosa que en el promedio de otros países mineros, en tanto la energía eléctrica es 67% más costosa. En el caso de los proyectos de ley baja y escala baja, la mano de obra y la energía eléctrica

también son los factores que determinan la desventaja de costos en Chile respecto a otros países mineros, con 31% y 91% de sobrecostos, respectivamente (ver Figura 2-6).

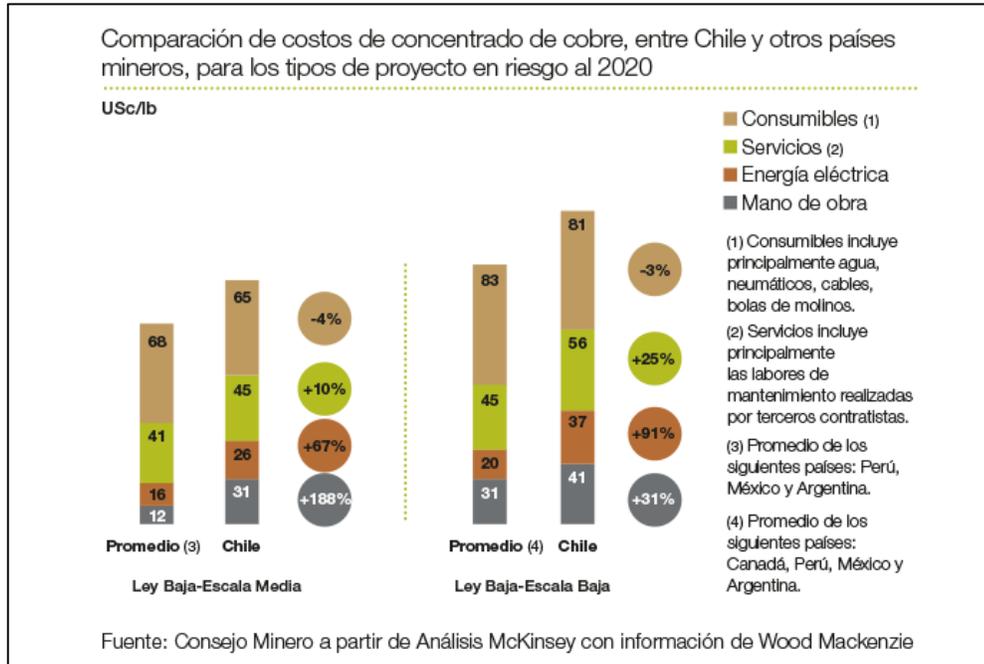


Figura 2-6: Comparación de costos de concentrado de cobre, entre Chile y otros países mineros, para los tipos de proyectos en riesgo al 2020 [31].

Esto evidencia la importancia vital que tiene el costo de la energía eléctrica en el proceso productivo del cobre y por qué las ERNC se perfilan como una alternativa ventajosa para esta industria, principalmente debido a que el factor de costos es relevante considerando un escenario de leyes y escalas de proyectos mineros a la baja [31].

Cabe destacar que las ERNC, en sus inicios, surgieron como una forma de generación limpia y de reducción de la huella de carbono, sin embargo en la actualidad adicionalmente contribuyen en la reducción de costos de suministro eléctricos para las mineras y de consumo de combustibles fósiles.

A modo de ejemplo, la planta termosolar El Tesoro, propiedad de Antofagasta Minerals (AMSA), permite reducir en un 55% su consumo de Diesel [33]; en el caso de Collahuasi, la planta solar fotovoltaica Pozo Almonte de 25 MW aporta con alrededor del 13% de la demanda de Collahuasi durante las horas del día, y durante el período del contrato con SolarPack evitará la emisión de 50.000 ton CO₂/año y generará un ahorro de MMUS\$ 20 para la compañía [34]; la planta termosolar Pampa Elvira Solar de División Gabriela Mistral de Codelco aportará con 51.800 MWh térmicos/año, reducirá la emisión de 15.000 ton CO₂/año y generará un ahorro de MMUS\$ 7 al año y una reducción del 85% del combustible fósil que se ocupaba hasta el momento de su operación [35].

2.4.- CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE LA GRAN MINERÍA DEL COBRE

2.4.1.- Minería del Cobre

2.4.1.1.- Conceptos Básicos

Existen varios términos y expresiones únicos en la minería que la caracterizan en el campo técnico. Por esta razón, es importante que los principiantes se familiaricen con el lenguaje de la minería. La mayoría de los términos explicados a continuación se nombran selectivamente y en términos generales.

Tres definiciones están estrechamente relacionadas:

- Mina: Excavación hecha en la tierra con el propósito de extraer minerales. En Chile, las minas también reciben el nombre de ‘faena’ sin distinción entre cielo abierto (rajo) o subterránea
- Minería: La actividad, ocupación, e industria preocupada de la extracción de minerales.
- Ingeniería en minas: la práctica de aplicar principios de ingeniería al desarrollo, planificación, operación, cierre y recuperación (reclamación) de minas.

Algunos términos distinguen los diversos materiales minados. Geológicamente, pueden distinguirse los siguientes:

- Mineral: Sustancia de origen natural, usualmente inorgánica, con estructura interna ordenada, composición química definida, forma cristalina y características físicas distintivas.
- Roca: Agregado formado naturalmente de uno o más tipos de partículas minerales

Económicamente, la distinción se hace de la siguiente manera:

- Mineral (o mena; en inglés, *ore*): una mena es un mineral del que se puede extraer un elemento, un metal generalmente, por contenerlo en cantidad suficiente para ser aprovechado. Así, se dice que un mineral es mena de un metal cuando mediante minería es posible extraer ese mineral de un yacimiento y luego mediante metalurgia obtener el metal de ese mineral. Las menas suelen ser óxidos, sulfuros o silicatos. La calidad del mineral es expresada según su concentración del metal de interés. En minas de cobre, esto se expresa en porcentaje de cobre %Cu contenido o ‘ley’, la que en Chile puede variar entre 0.5 y 2.0 %Cu [36].
- Ganga: las partículas minerales sin valor en un depósito mineral, que deben descartarse ya que no tienen valor económico.
- Lastre (o estéril): el material asociado a un depósito mineral que debe extraerse para poder acceder al mineral y debe luego descartarse ya que no tiene valor económico.

Una subdivisión comercial más conveniente de minerales se realiza en base al componente primario (tipo de mineral) y su uso:

- Depósitos metálicos:
 - Metales ferrosos como el hierro, manganeso, molibdeno y tungsteno.
 - Metales básicos como el cobre, plomo, zinc y estaño.
 - Metales preciosos como el oro, plata, y grupo del platino (rutenio, rodio, paladio, osmio, iridio, platino)
 - Minerales radioactivos como el uranio, torio y radio.
- Depósitos no metálicos (minerales industriales):
 - Minerales no combustibles y no metálicos
 - Incluye: fosfatos, potasa, halita, arena, grava, areniscas, azufre y muchos otros.
- Depósitos de combustibles fósiles:
 - Sustancias minerales orgánicas que pueden ser utilizadas como combustibles
 - Incluye: carbón, petróleo, gas natural, metano, arenas bituminosas.
 - Existe una industria aparte y tecnología especializada en este tipo de combustibles.

Dentro de los metales básicos se encuentra el cobre, de color rojizo. Junto a la plata y el oro, forman la “familia del cobre” (los mejores conductores de electricidad). Es posible encontrar el cobre de diversas formas en la naturaleza, tal y como se muestra en la Figura 2-7. Hace millones de años e impulsado por procesos geológicos, subió desde las profundidades de la Tierra hasta la superficie, por lo que fue uno de los primeros minerales que se trabajaron por los seres humanos, bajo la forma de cobre nativo o natural de alta pureza. Este tipo de yacimientos hoy están prácticamente agotados, por lo que habitualmente se encuentra disperso en grandes áreas y mezclado con rocas estériles y otros minerales.



Figura 2-7: Formas en que se encuentra el Cobre en la naturaleza [36].

El cobre puede clasificarse en dos grupos [37]:

- **Minerales sulfurados (minerales profundos):** Frecuentemente son mezclas de sulfuros de cobre y hierro, combinados con compuestos de otros diferentes elementos. Los sulfuros son la principal fuente de minerales de cobre que se extraen desde los yacimientos del Norte Grande de Chile. Los sulfuros, para efectos de la extracción minera, se clasifican en sulfuros de baja ley y sulfuros de alta ley. Los sulfuros de alta ley se tratan a través de procesos pirometalúrgicos, mientras que los de baja ley (sulfatos) son tratados junto a los óxidos.
- **Minerales oxidados (minerales en superficie):** Los minerales oxidados de cobre se originan en la descomposición y oxidación de los minerales sulfurados. Fueron los primeros explotados. Los minerales de este tipo se tratan a través de procesos hidrometalúrgicos.

La esencia de la minería extractiva consiste en conducir o construir una excavación desde la superficie al depósito mineral. Cuando el valor del mineral ya se ha establecido, se prefiere utilizar los términos mena y depósito de mena. Si la excavación es abierta u operada desde la superficie, se le denomina minería a cielo abierto. Si la excavación consiste en aperturas para el ingreso humano bajo la superficie, entonces se le llama minería subterránea [38], [39].

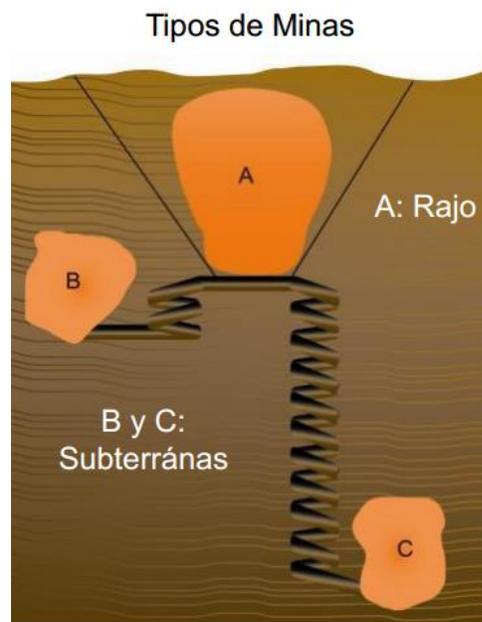


Figura 2-8: Tipos de minas [36].

Según el código chileno para la certificación de prospectos de exploración, recursos y reservas mineras:

Recurso Minero: “es una concentración u ocurrencia de material natural, sólido, inorgánico u orgánico fosilizado terrestre de tal forma, cantidad, y calidad que existe una razonable apreciación acerca de su potencial técnico-económico. La localización, tonelajes, contenidos, características geológicas y el grado de continuidad de la mineralización es estimada, conocida, o interpretada a partir de específicas evidencias geológicas, metalúrgicas y tecnológicas.”

Reserva Minera: “es aquella porción del Recurso Medido o del Recurso Indicado económicamente extraíble de acuerdo a un escenario productivo, medioambiental, económico y financiero derivado de un plan minero. La Reserva Minera incluye pérdidas y diluciones con material ajeno, circundante a esa porción de Recurso y que lo contamina por efectos de la extracción minera. La evaluación realizada puede provenir de estudios de prefactibilidad o factibilidad en el cual condiciones realistas, al momento de la evaluación, incluyen factores geológicos, metalúrgicos, geotécnicos, medioambientales, sociales y gubernamentales. Estas evaluaciones deben justificar la viabilidad extractiva y secuenciada, técnica, y económicamente, al momento en que ellas son informadas.”

Dado que un proyecto minero explota un recurso que no es renovable, se valoriza típicamente utilizando la técnica del Valor Actualizado Neto (VAN) de todos los flujos de caja proyectado por la vida útil del proyecto. La vida útil depende de las reservas mineras, que se expresa en dos factores clave: toneladas del mineral y ley media del mineral [36].

2.4.2.- Diagrama General del Proceso Minero del Cobre

A continuación se presentan diagramas que resumen el proceso minero del cobre, desde su exploración geológica hasta su exportación:

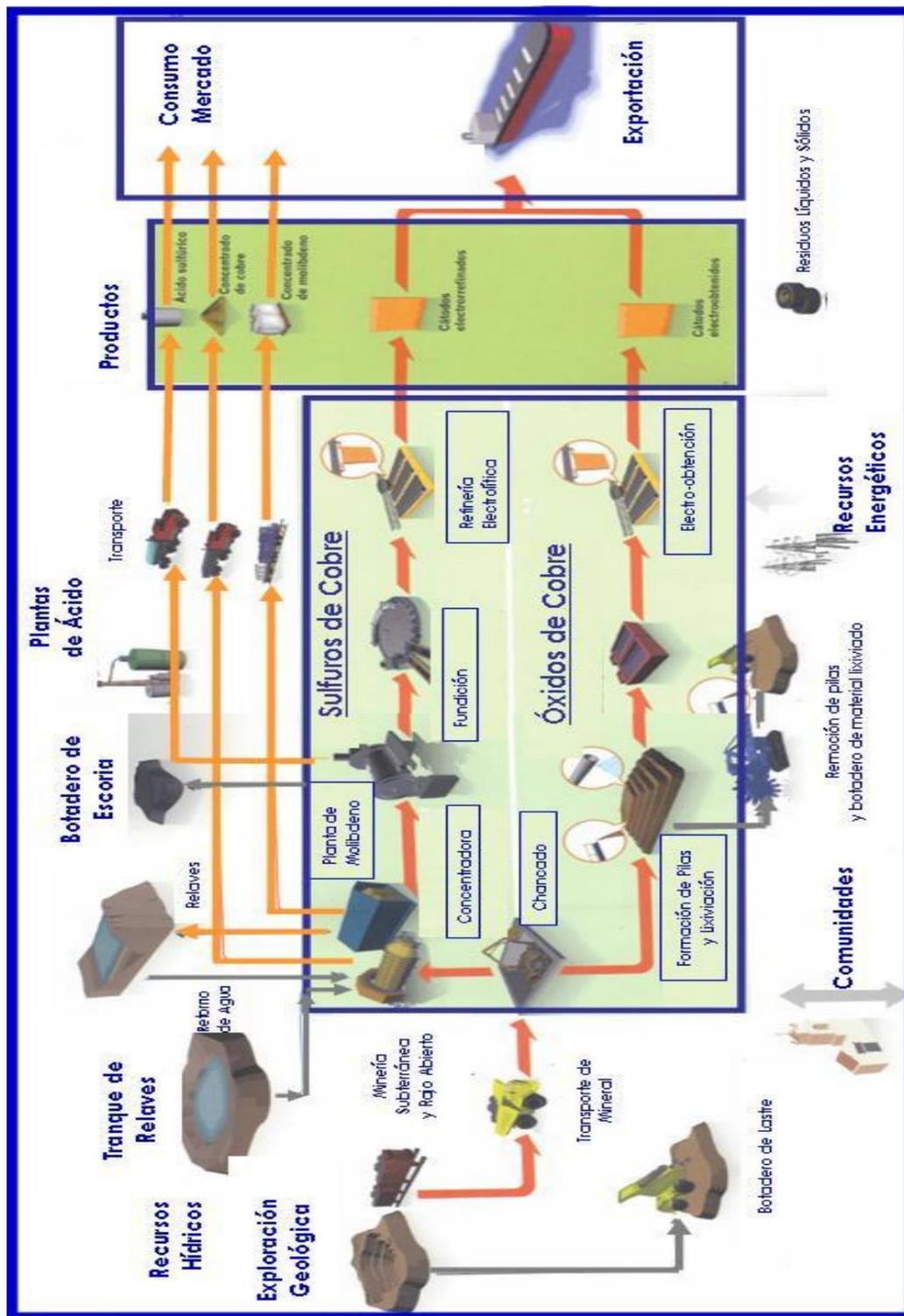


Figura 2-9: Diagrama General del Proceso Minero del Cobre [40].

En la Figura 2-10 siguiente es posible apreciar el proceso minero considerando el tipo de mineral y grado de refinación que va teniendo el cobre. El producto de cada proceso se menciona entre paréntesis. En la Tabla 2-2 es posible apreciar los equipos asociados a cada proceso minero.

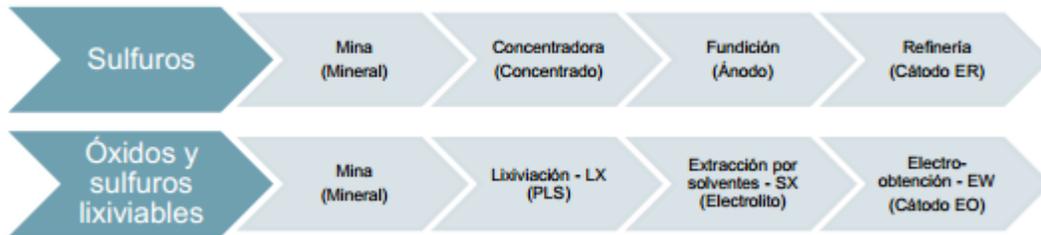


Figura 2-10: Procesos mineros según el tipo de mineral de cobre [41].

Tabla 2-2: Principales procesos y equipos de la minería del cobre [42].

Área	Proceso	Equipos
Mina	Perforación	Rotopercutores Perforadoras neumáticas, hidráulicas con martillo de cabeza, con martillo en fondo, eléctricos Deslizaderas
	Tronadura	
	Carguío	Pala de cable, hidráulica Cargadores frontales
	Transporte	Camiones de alto tonelaje Cintas transportadoras
	Auxiliares	Tractores Moto niveladoras Ventiladores
Concentradora	Chancado	Chancador giratorio, de mandíbula, de cono Bombas de agua
	Molienda	Molienda de barras, de bolas, SAG Bombas de agua
	Flotación	Celdas de flotación Compresores de aire Bombas de agua
	Mineroductos	Bombas geo
	Espesamientos y filtrado	
	Transporte	Correas transportadoras
Fundición	Recepción y muestreo	Correas transportadoras Secadores calefaccionados con vapor
	Fusión	Secadores rotatorios
	Proceso de conversión	Calderas de recuperación
	Pirorrefinación	Hornos de fusión
Refinería	Electro refinado	Celdas electrolíticas
LX / SX / EW	Aglomeración	Correas transportadoras Irrigación Esparcidor
	Lixiviación	Riego por goteo Aspersores
	Extracción por solventes	Mezclador Bombas de agua Sedimentador Equipos mezcladores decantadores
	Electro obtención / Electrolisis	Celdas de electro obtención
Servicios	Campamentos	Generadores

2.4.3.- Procesos de extracción del cobre [42]

Para obtener cobre fino, primero que todo deben moverse las rocas desde el yacimiento (mina) a la planta de proceso. Para ello se deben reducir a un tamaño manejable y que permita el transporte.

Estas operaciones conforman el llamado procesos de extracción y su objetivo es el de extraer la roca desde la mina, para ser enviada a la siguiente etapa. Este proceso se lleva a cabo en cuatro etapas:

- Perforación
- Tronadura
- Carguío
- Transporte

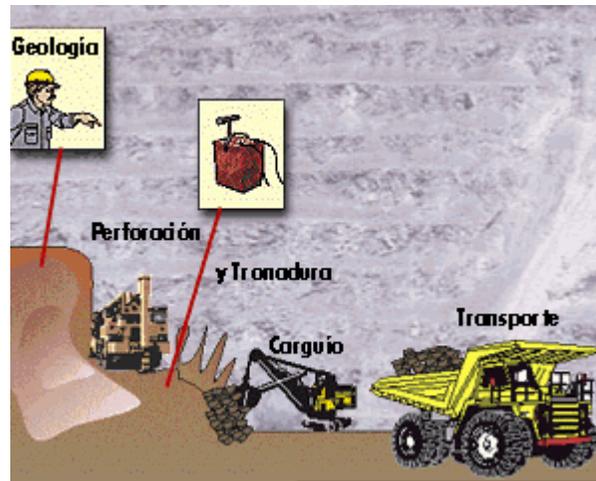


Figura 2-11: Proceso de extracción en una Mina [43].

En la minería del cobre existen dos métodos de extracción: a cielo abierto y subterráneo. La elección de uno u otro dependerá de la profundidad y forma del yacimiento.

Extracción a cielo abierto

Cuando el cobre aflora a la superficie (o está cerca de ella), la elección es el método de cielo abierto. La extracción del mineral se realiza en un rajo, que tiene forma de un anfiteatro y consiste en una excavación en la tierra con ciertas características para permitir su operación segura. Posee diferentes niveles, llamados bancos, entre los cuales se establecen caminos inclinados o rampas para la circulación de los equipos y el personal. En la extracción a rajo abierto primero se remueve el mineral desde la mina utilizando explosivos. A esta detonación se le denomina tronadura. Luego entran en operación los cargadores frontales o las palas eléctricas. Su labor consiste en cargar los camiones con el material fragmentado por la tronadura. Estos camiones llevan el mineral al chancador primario y el estéril, a los botaderos.

Extracción subterránea

Por otro lado, la minería subterránea se utiliza cuando la cantidad de material estéril sobre el yacimiento es tal que los costos de su remoción hacen inviable un proyecto minero a cielo abierto. La extracción se realiza excavando túneles y cámaras, de manera de recuperar la máxima cantidad de mineral de manera segura y eficiente. El trabajo en una mina subterránea puede ser horizontal,

vertical e inclinado, conformando túneles, galerías, rampas, piques o chimeneas, ubicándose en los diferentes niveles que permiten fragmentar, cargar y transportar el mineral desde el interior de la mina hasta la planta, generalmente situada en la superficie.

2.4.4.- Procesos de concentración [42]

A continuación de la extracción, el mineral continúa su proceso hasta la concentración, cuyo objetivo es separar el sulfuro de cobre del resto de la roca. Esto se realiza en una instalación cercana a la mina, la planta concentradora. Su producto final es el concentrado de cobre [42].

El chancado

La concentración se inicia con el chancado, cuyo objetivo es reducir y homogeneizar el tamaño de las rocas, triturándolas. El chancador primario permite reducir el tamaño de los fragmentos hasta un promedio de 20 cm de diámetro. De esta manera el mineral puede ser llevado a la planta a través de correas transportadoras.

La molienda

Después del chancado se busca reducir el tamaño del mineral mediante molinos para conseguir partículas de aproximadamente 180 μm (referencial). En esta etapa se agrega agua, lo que permite una molienda uniforme y eficiente. Junto con el agua, se agregan los reactivos que separarán el sulfuro de cobre del resto del material durante la flotación.

La flotación

Es un proceso físico-químico que separa los materiales sulfurados y otros minerales de valor económico, como el molibdeno, del resto de los elementos presentes en la pulpa. Desde la molienda llega la pulpa de cobre. El proceso de separación se inicia depositando la pulpa en unos estanques conocidos como celdas de flotación. Se hace burbujear aire desde el fondo y se agita constantemente. Gracias a la acción de los reactivos, el cobre sulfurado se pega a las burbujas, permitiendo la formación de una espuma cargada de mineral de interés, que posteriormente es retirada de la celda de flotación como un concentrado.

Proceso de fundición

Para obtener cobre puro, el concentrado debe ser sometido a un proceso de fundición que permite separar el cobre del resto de los minerales del sulfuro mediante una diferencia de densidad de las fases. Para ello se aplican altas temperaturas, hasta llevarlo a su estado líquido, y se somete a una serie de pasos que van incrementando su nivel de pureza. En los hornos se realiza la fusión, sometiendo el concentrado a altas temperaturas hasta fundirlo. Los elementos componentes se separan por peso, quedando el cobre en el fondo, parte del hierro en la superficie como escoria y el azufre en forma de gas. El líquido entonces es llevado al proceso de conversión, que se efectúa en hornos especiales, llamados convertidores. El resultado es el cobre *blister*, con una pureza de entre 96 y 99%.

Electrorrefinación

Se realiza colocando alternadamente un ánodo y un cátodo, que es una placa muy delgada de cobre puro, en piscinas con agua y ácido sulfúrico. Se hace pasar la electricidad por la solución, formando un circuito en el que el ánodo es el polo positivo y el cátodo, el negativo. Esto genera una reacción química llamada electrólisis, que libera el cobre desde el ánodo y lo pega al cátodo, dejando en la solución las impurezas. El resultado es un cátodo de 225 kg, puro en un 99,9%, listo para ser comercializado.

2.4.4.1.- Lixiviación en pilas [42]

Otro método para tratar el cobre es la hidrometalurgia, proceso que permite obtener cátodos de cobre con un 99,9% de pureza a partir de minerales oxidados y algunos tipos de sulfuros como la calcosina, aprovechando su sensibilidad química al ataque de soluciones ácidas. Este proceso consta de tres etapas: lixiviación, extracción por solventes y electroobtención.

Lixiviación (LX)

Consiste en aplicar una mezcla de ácido y agua sobre el mineral. El ácido ataca la roca y disuelve el cobre en el agua, formando una solución que es recogida para ser tratada en los procesos siguientes. Para la lixiviación se dispone del mineral en pilas o botaderos, se rocía con agua y ácido sulfúrico, y se genera un goteo constante de solución ácida sobre la pila durante unos 45 o 60 días, si es mineral oxidados, y entre 4 y 24 meses para los sulfurados.

Extracción por solventes (SX)

El resultado de la lixiviación es una solución de sulfato de cobre denominada solución rica. Esta posee impurezas que deben ser separadas antes de pasar a la electroobtención. Esta etapa intermedia se llama extracción por solventes. Para separar el cobre de las impurezas, se usa un reactivo que sólo capta cobre y no se mezcla con agua. Luego el cobre es re-extraído, haciendo el proceso inverso, a una solución rica en ácido, esta vez sin impurezas.

Electroobtención (EW)

Finalmente, la solución rica en cobre es vaciada en celdas de electroobtención, piscinas con placas de plomo o acero inoxidable, llamadas ánodos (polo positivo) y cátodos (polo negativo). Estas forman un circuito, que es alimentado por una corriente eléctrica continua de baja intensidad. El cobre en solución es atraído por el polo negativo, pegándose partícula por partícula. Después de una semana se extrae una cosecha de cátodos de cobre con una pureza de 99,9% listos para comercializar.

Dentro de los insumos críticos de una mina están el terreno, para excavaciones propias (rajo o accesos subterráneos, para deposición de botaderos, ripios y/o relaves, y para el acceso vial, tendidos eléctricos y ductos de agua o pulpas; el agua, ya que la mina genera agua industrial y consume una cantidad de agua considerable en el procesos y para consumo humano; energía, en forma de energía eléctrica para la planta de procesos, equipos eléctricos y otro servicios, además

de petróleo y otros derivados de los hidrocarburos para equipos móviles y procesos relacionados a la metalurgia [36].

2.5.- HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA ERNC

Dentro de las herramientas disponibles en el mercado se tienen dos enfoques claramente marcados: un enfoque sistémico; y otro enfocado a los proyectos ERNC en detalle, operando aislados o conectados a sistemas eléctricos pequeños.

Para el caso del primer enfoque, la herramienta se encarga de integrar la solución de ERNC en un sistema eléctrico, realizando un análisis técnico-económico que involucra el sistema de potencia en su totalidad: generación, transmisión y consumo en grandes potencias. Este tipo de programas se suelen utilizar considerando modelos de ERNC y su propósito es múltiple: análisis de sistemas eléctricos nacionales y regionales; planificación de generación y transmisión; diseño, simulación, operación, control y optimización de sistemas de potencia, entre otros. Para el segundo enfoque se analiza cada proyecto de ERNC, realizando un análisis técnico-económico de la solución aislada de la red o conectada a un sistema pequeño.

2.5.1.- Herramientas de Simulación

2.5.1.1.- TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation Program) (<http://www.trnsys.com/>) (Comercial)

Programa de simulación energética, cuyo enfoque modular lo convierte en uno de los instrumentos más flexibles disponibles. Incluye una interfaz gráfica, un motor de simulación, y una biblioteca de componentes que incluyen modelos de equipos HVAC, tecnologías de ERNC y tecnologías emergentes. TRNSYS también incluye un método para crear nuevos componentes. Este paquete de simulación se ha utilizado por más de 25 años para análisis HVAC y dimensionamiento, simulación de sistemas de potencia, diseño solar, rendimiento termal, entre otros. Además, tiene una biblioteca especial de componentes para simular generación de fuentes ERNC: sistemas fotovoltaicos, baterías, turbinas de viento, celdas de combustible, entre otros.

2.5.1.2.- INSEL (<http://www.insel.eu/>) (Comercial)

Software para planificar, monitorear y visualizar sistemas de energía. Para este propósito, INSEL provee funciones de vanguardia en forma de bloques, que pueden conectarse a una solución concreta, por ejemplo, para simular datos meteorológicos, componentes eléctricos y de energía térmica, entre otros [44].

2.5.1.3.- PV Watts (<http://pvwatts.nrel.gov/>) (Gratuita)

PV Watts calcula la energía producida por un sistema fotovoltaico (FV) conectado a la red. Desarrollado por investigadores del Laboratorio de Energías Renovables del Departamento de Energía de Estados Unidos, permite a usuarios no expertos obtener de manera fácil y rápida un rendimiento estimado de sistemas FV, considerando módulos FV, arreglos FV de estos módulos,

y su sistema inversor, de manera de entregar energía al sistema; o necesitarla cuando se excede la capacidad del sistema FV [45].

2.5.2.- Herramientas de Evaluación Económica

2.5.2.1.- HOMER (<http://www.homerenergy.com/>) (Comercial)

El software HOMER simplifica la tarea de evaluar opciones de diseño de sistemas de potencia aislado de la red o conectadas a la red para generación remota, aislada o distribuida. HOMER posee algoritmos de optimización análisis de sensibilidad que evalúan la viabilidad técnica y económica de un gran número de opciones tecnológicas, considerando variación de costos de la tecnología y disponibilidad de recursos energéticos. HOMER considera tecnologías convencionales y de energías renovables [45].

2.5.2.2.- Solar Advisor Model (SAM) (<https://sam.nrel.gov/>) (Gratuita)

SAM es un modelo económico y de rendimiento diseñado para facilitar la toma de decisiones relacionada con la industria de las energías renovables, orientado a gestores de proyectos, ingenieros, diseñadores de programas de incentivos, desarrolladores de tecnología, e investigadores [46].

2.5.2.3.- RETScreen® (<http://www.retscreen.net/>) (Gratuita)

RETScreen International es una herramienta de software de análisis de proyectos de energía limpia basada en Excel que ayuda a los gestores a determinar de manera rápida y económica la viabilidad técnica y financiera de proyectos potenciales de energía renovable, eficiencia energética y cogeneración. Es una herramienta de apoyo para la toma de decisiones desarrollada con la contribución de numerosos expertos del gobierno, industria, y académicos. El software proporcionado sirve para evaluar la producción de energía y ahorros, costos de ciclo de vida, reducción de emisiones, aspectos financieros y de riesgo de varios tipos de tecnologías de energía eficiente y renovables. El software también incluye bases de datos de productos, costos y climáticos [47].

2.5.2.4.- Herramienta computacional para analizar la inserción de ERNC en Redes Eléctricas de Plantas Mineras

Esta herramienta, desarrollada como trabajo de tesis por Marco Peirano O. de la Universidad de Chile, a cargo del profesor Rodrigo Palma B. [7], permite analizar la inserción de proyectos ERNC en plantas mineras. Ésta posee una interfaz gráfica que permite ingresar información sobre los recursos renovables (solares, eólicos o hidráulicos); una interfaz gráfica para la información relativa a la planta minera; y permite el cálculo de la potencia instalada, energía generada anualmente, factor de planta, potencia firme, reducción de pérdidas en el sistema de transmisión, reducción de emisiones de CO₂, y distancia entre la planta y el recurso renovable asociado. También se realiza un análisis económico, de manera que la herramienta considera el costo de equipos eléctricos; costo de terrenos, obras civiles, gastos financieros; costo total y costo promedio

US\$/kW; ingresos anuales por potencia, energía y venta de bonos de carbono; costo anual de operación y mantenimiento; VAN del proyecto; y periodo de recuperación de la inversión o *payback* [7].

Es posible apreciar que existen múltiples herramientas computacionales que permiten, por un lado estudiar la inserción de energías renovables a sistemas de potencia, y por otro realizar un análisis técnico-económico de proyectos individuales de energías renovables.

El aporte del software presentado en la tesis de Marco Peirano radica en considerar los efectos del sistema de transmisión, lo que es trascendental si se considera que los sistemas de transmisión de las mineras cubren grandes distancias y extensiones de terreno. De esta manera, la ubicación de un proyecto de generación renovable toma especial importancia ya que se producen impactos relacionados con las pérdidas en transmisión, lo que posibilita aceptar proyectos que antes no eran rentables y que generan ahorros evitando pérdidas de energía en las líneas [7]. Esto entrega el valor agregado más relevante si se compara con el resto de las herramientas del mercado. No obstante, esta herramienta computacional realiza un análisis de proyectos eléctricos, dejando al margen proyectos térmicos, los que han tenido un desarrollo sostenido en los últimos años y se han logrado integrar de manera exitosa a procesos mineros. Es por esta razón que una de las principales mejoras que se consideran en este trabajo es la inclusión de proyectos térmicos y su análisis en conjunto con proyectos eléctricos.

3.- METODOLOGÍA

3.1.- CONSUMOS ENERGÉTICOS EN LA GRAN MINERÍA DEL COBRE

3.1.1.- Introducción

De manera contraria al resto de la industria, donde es posible construir una fábrica en una ubicación conveniente, las compañías mineras no tienen otra alternativa: las minas deben ubicarse exactamente donde los depósitos de los recursos minerales (metales, minerales industriales, etc.) se encuentran. Dado que los depósitos minerales de fácil acceso se agotan rápidamente, y la demanda mundial de metales y minerales crece sostenidamente, las operaciones mineras se mueven constantemente a locaciones cada vez más remotas. En el caso de Sudamérica, este traslado es principalmente a zonas montañosas [48].

Las características típicas de estos sitios son las siguientes:

- Clima extremo (frío o caliente) con condiciones meteorológicas extremas;
- En la mayoría de los casos, buen acceso a terrenos;
- Accesos restringido (por ejemplo, solo a través de un camino de invierno);
- Vida útil limitada (dependiendo de las reservas y factores económicos);
- Acceso limitado al agua;
- Presencia de polvo, humedad y/o nieve (dependiendo de las condiciones climáticas);
- Escasez de mano de obra calificada y especialistas.

Los principales tipos de energía consumida en sitios remotos son:

- Diesel (predominantemente para la manipulación y transporte de mineral y estéril);
- Electricidad (predominantemente en la molienda y procesamiento);
- Calor (para procesamiento térmico y calentamiento de soluciones).

El consumo de energía en la industria está fuertemente correlacionada con la cantidad de materiales que debe moverse. Por lo tanto, las técnicas y tecnologías que reducen la cantidad de materiales manipulados pueden mejorar la eficiencia de energía por unidad de producto entregado.

- Las necesidades de energía varían mucho para cada producto extraído y dependen del tipo de mineral que se extrae, ya sea subterráneo o de superficie, y si debe ser fundido.
- Actividades mineras subterráneas requieren significativamente mayores cantidades de energía que las operaciones de minería de superficie debido al aumento de las necesidades de acarreo, ventilación, agua y bombeo.
- La mayor parte de la energía utilizada en la minería de superficie es el combustible Diesel para el transporte.
- La electricidad es una fuente importante de energía para la minería subterránea, donde el mineral debe ser trasladado a la superficie, y también para la ventilación dentro de la mina.
- La mayor parte de la electricidad se utiliza en operaciones de molienda y procesamiento.

- El uso de energía tiende a aumentar con la disminución de la ley del mineral.

3.1.2.- Consumo de Energía [41]

La minería del cobre se abastece de distintas fuentes de energía, con el propósito de llevar a cabo sus procesos. En la siguiente Figura 3-1 se muestran las fuentes:

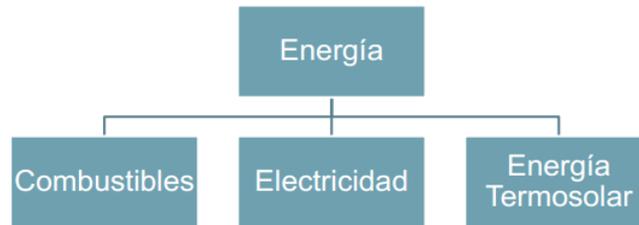


Figura 3-1: Fuentes de Energía en la Minería del Cobre [41].

Los combustibles y electricidad pueden provenir de distintas fuentes, las que se señalan en la siguiente Figura 3-2:



Figura 3-2: Tipos de combustibles y sistemas interconectados [41].

A medida que han pasado los años, la minería chilena muestra señales de envejecimiento, lo que se refleja en la evolución de los consumos unitarios de energía en la minería (es decir, cuánta energía se requiere por cada tonelada de cobre extraído). Entre las características más distintivas que impactan en el aumento del consumo de energía destacan: la disminución de leyes del mineral; una mayor profundidad de las minas y dureza del mineral; y un aumento de la cantidad de materia a transportar y de distancias de acarreo. Esto trae como consecuencia un mayor consumo de energía para producir la misma cantidad de cobre (ver Figura 3-3).



Figura 3-3: Incremento del Consumo de Energía en la Minería del Cobre [41].

Se mostrarán los resultados obtenidos en la encuesta 2012 realizada por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) y su contraste con resultados obtenidos el año 2011 [41]. Este estudio se enmarca en la comparación de datos históricos, en el que la obtención de datos se realizó por medio de una encuesta segmentada y específica, considerando las áreas, etapas y procesos característicos de cada una de las empresas.

A continuación es posible apreciar el consumo de energía en la minería del cobre y la producción de cobre fino desde los años 2001 a 2012. En el gráfico de la Figura 3-4 es posible observar que la producción de cobre prácticamente se ha mantenido constante, mientras el uso de la energía se ha visto incrementado de manera sostenida.

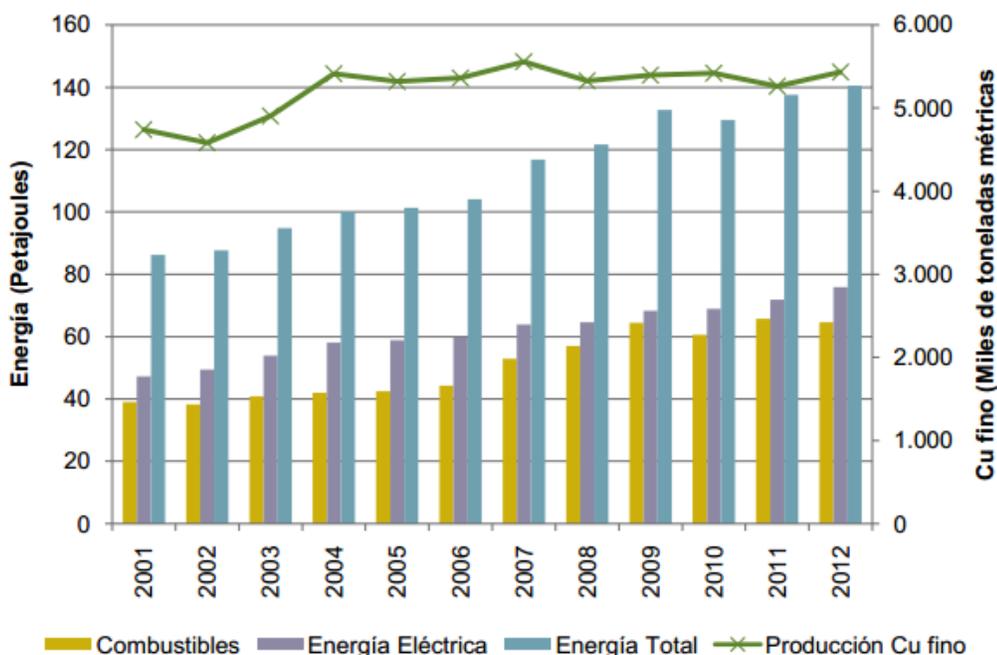


Figura 3-4: Evolución del consumo de energía en la minería del cobre y de la producción de cobre fino [41].

En efecto, el estudio señala que el consumo total de energía ha aumentado a una tasa anual promedio de 4,9%, mientras que el de combustible lo ha hecho a un 5,8%, y el de energía eléctrica un 4,2%.

El consumo unitario global de energía ha aumentado desde 18,2 GJ/TMF en el año 2001 a 25,9 GJ/TMF el 2012. Esto se traduce en un aumento del 42,1% en el consumo de energía total por tonelada de cobre fino producido. En lo que respecta al consumo unitario de energía proveniente de combustibles, ésta ha aumentado de 8,2 GJ/TMF a 11,9 GJ/TMF entre los años 2001 y 2012 equivalente a un aumento de un 44,6%. Por otro lado, para el caso del consumo unitario de energía eléctrica, se ha visto incrementado en 40%, pasando desde 10 GJ/TMF a 14 GJ/TMF para el mismo período de tiempo.

3.1.2.1.- Consumo de Combustible

A continuación, en la Figura 3-5, es posible apreciar el consumo de combustibles en el proceso minero, desde 2001 a 2012. El consumo de combustibles en la minería del cobre ha sufrido un aumento considerable, pasando de 39 PJ a 64.6 PJ entre los años 2001 y 2012, lo que equivale a un incremento del 65.8%. Es posible apreciar la energía involucrada en cada uno de los procesos en la Figura 3-6; y los porcentajes asociados respecto de la energía total en la Figura 3-7, donde el mayor porcentaje de combustible es consumido en la mina (72%):

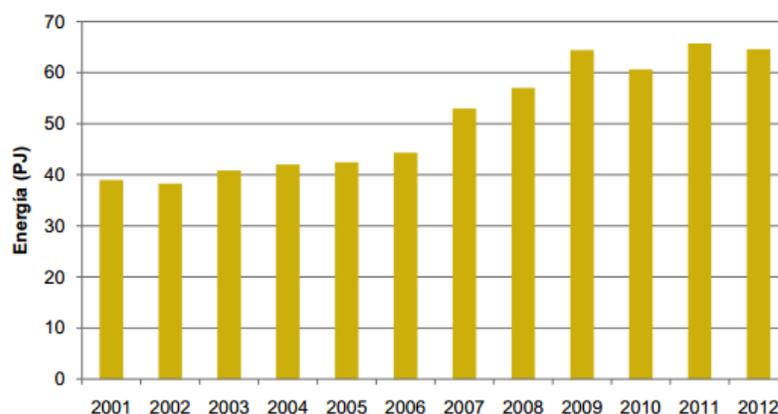


Figura 3-5: Consumo de energía asociada a combustibles a nivel país, desde 2001 a 2012 [41].

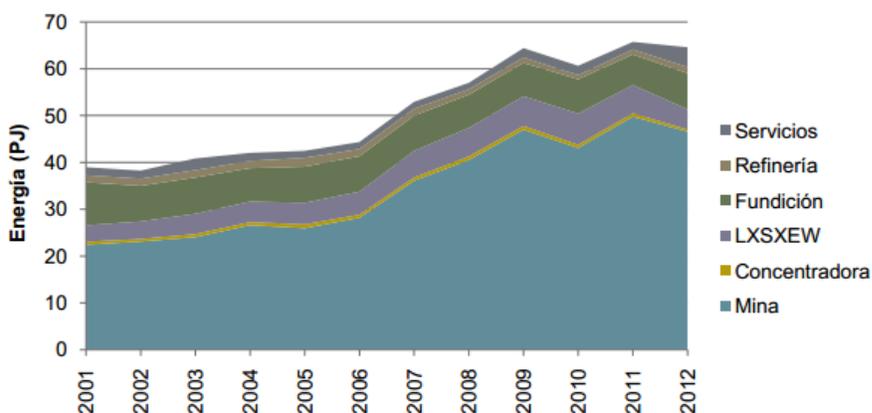


Figura 3-6: Consumo de combustible por proceso minero a nivel país, desde 2001 a 2012 [41].

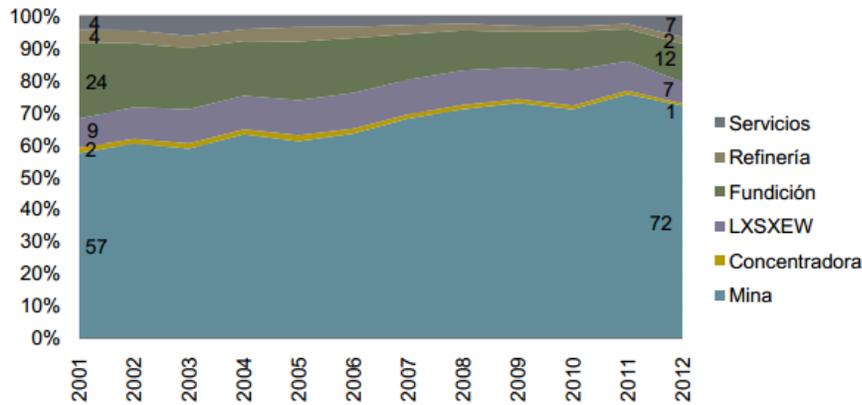


Figura 3-7: Distribución porcentual del consumo de combustible a nivel país, desde 2001 a 2012 [41].

Cabe destacar que para el año 2012, el Diesel representa el 85.1% del total de energía aportada por los combustibles, lo que lo transforma en el principal combustible utilizado en la minería del cobre. Además, en el proceso de extracción minera se consume un 85.1% del total del Diesel utilizado en la minería del cobre. En consecuencia, el Diesel consumido en la mina (subterránea y rajo) representa el 72.4% del consumo total de combustibles de la minería del cobre.

Con respecto a la variación del consumo de combustibles en el proceso minero, cabe destacar que el proceso de mina es el que más ha aumentado su consumo desde el año 2001 al 2012, teniendo un incremento del 108%, mientras que el consumo total de combustibles lo hizo en un 65.8%.

Con respecto a los consumos unitarios de combustible por tonelada de cobre fino, éstos han tenido una tendencia al alza para los procesos de extracción minera y lixiviación, mientras que el de fundición ha disminuido.

Con respecto a los consumos unitarios de combustible por tonelada de producto extraído/procesado, el proceso de extracción minera ha tenido un crecimiento sostenido, mientras que los demás muestran una tendencia a la baja.

3.1.2.2.- Consumo de Energía Eléctrica - País

El consumo de electricidad en la minería del cobre aumentó desde 47.3 PJ en el año 2001 hasta 75,9 PJ el 2012, equivalente a un incremento de un 60,5%. La tasa anual promedio de crecimiento es de un 4,2%.

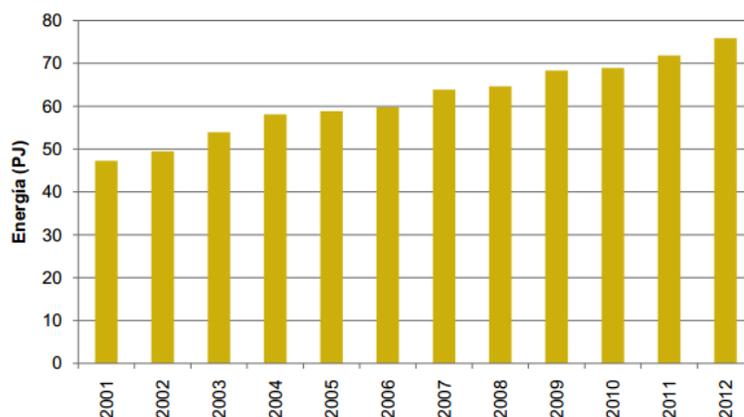


Figura 3-8: Consumo de energía eléctrica de la minería del cobre a nivel país [41].

Con respecto a su distribución por procesos, es posible apreciar que el consumo de electricidad para el año 2012 está liderado por la planta concentradora, llevándose el 51% del total de energía eléctrica, seguido por el de LXSXEW con un 27%. Cada uno de los procesos restantes consume menos del 10%.

3.1.2.3.- Consumo de Energía Eléctrica - SING

El consumo de electricidad por parte de la minería del cobre en el sistema interconectado del norte grande (SING) ha aumentado desde 27,5 PJ en el año 2001 a 43,5 PJ el 2012, equivalente a un incremento de un 57,9%. La tasa anual promedio de crecimiento es de un 4,4%.

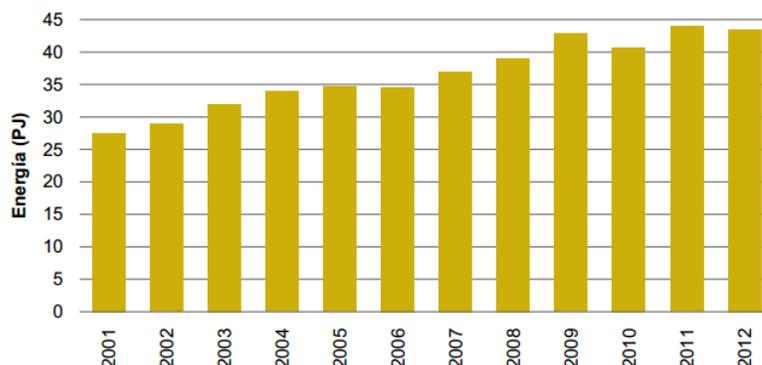


Figura 3-9: Consumo de energía eléctrica por parte de la minería del cobre - SING [41].

Con respecto a su distribución por procesos, es posible apreciar que el proceso que lidera el consumo de energía eléctrica es LXSXEW, que consumió un 41,7%, seguido por la planta concentradora con un 36,8%. El resto de los procesos consumió menos del 7,0% cada uno, lo que es posible ver en la Figura 3-10.

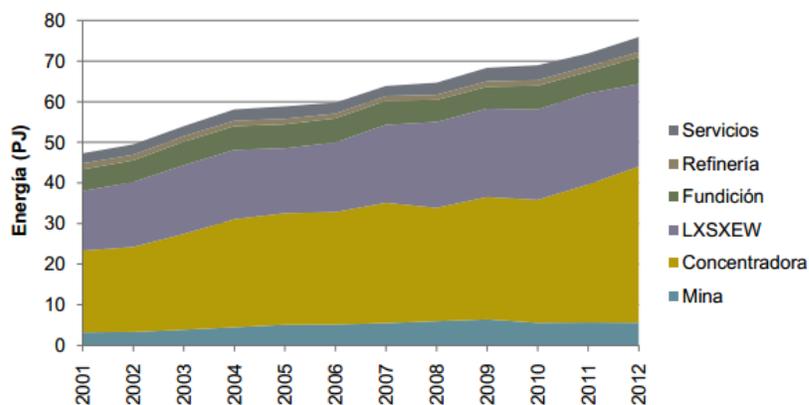


Figura 3-10: Consumo de energía eléctrica por proceso minero – SING [41].

Si se analizan aquellos procesos con aumentos considerables destacan la concentradora y la extracción minera, con un aumento del 104.4% y 87.5% respectivamente.

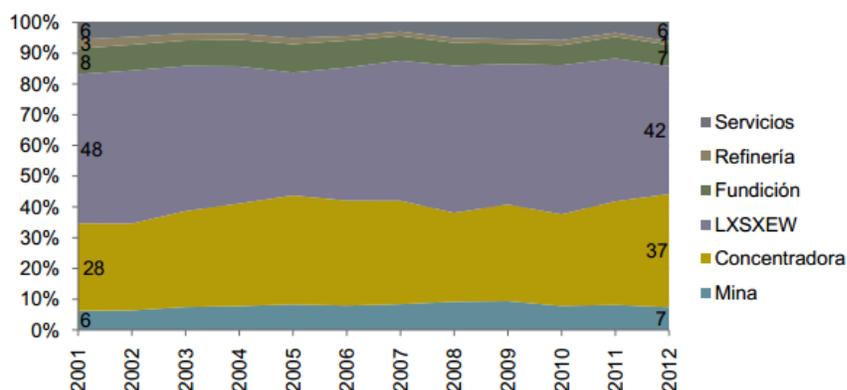


Figura 3-11: Distribución porcentual del consumo de energía eléctrica por proceso minero – SING [41].

Con respecto a los consumos unitarios de por tonelada de cobre fino (electricidad consumida para tratar/producir una unidad de producto: toneladas de cobre fino), según el estudio la planta concentradora registra un aumento del 86,8%, mientras que la mina ha aumentado en un 33,9%, ambas entre 2001 y 2012.

Con respecto al consumo unitario por tonelada de producto procesado/extraído (electricidad consumida para tratar/producir una unidad de producto: toneladas de material procesado/extraído), el proceso de LXSXEW disminuye en un 38,1% entre 2001 y 2012.

3.1.2.4.- Consumo de Energía Eléctrica - SIC

El consumo de electricidad por parte de la minería del cobre en el sistema interconectado central (SIC) ha aumentado desde 19,8 PJ en el año 2001 a 32,4 PJ el 2012, equivalente a un incremento de un 64,2%. La tasa anual promedio de crecimiento es de un 4,0%.

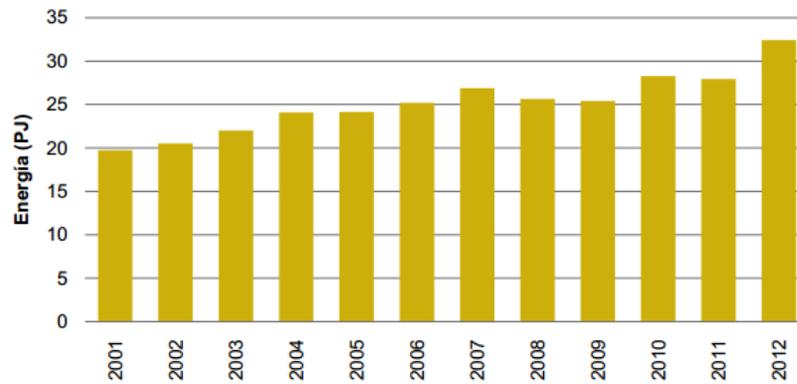


Figura 3-12: Consumo de energía eléctrica por parte de la minería del cobre – SIC [41].

Con respecto a su distribución por procesos, es posible apreciar que el consumo de electricidad para el año 2012 está liderado por la planta concentradora, llevándose el 69.2% del total de energía eléctrica, seguido por la fundición con un 11.3%. Este liderazgo se ha mantenido en el tiempo desde el año 2001. Cada uno de los demás procesos consume menos del 8%.

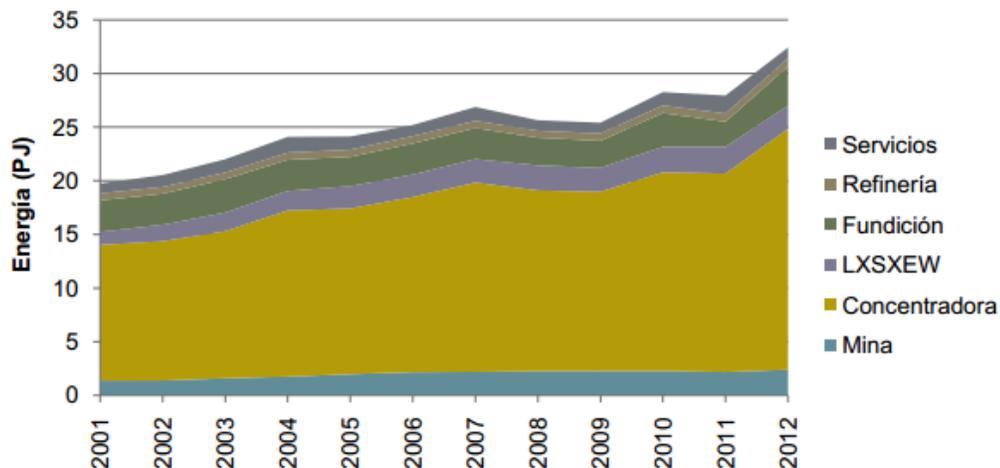


Figura 3-13: Consumo de energía eléctrica por proceso minero – SIC [41].

Si se analizan aquellos procesos con aumentos considerables destacan el proceso de LXSXEW, concentradora y extracción minera, con un aumento de 80.5%, 77.4% y 74% respectivamente, tal y como se aprecia en la Figura 3-14.

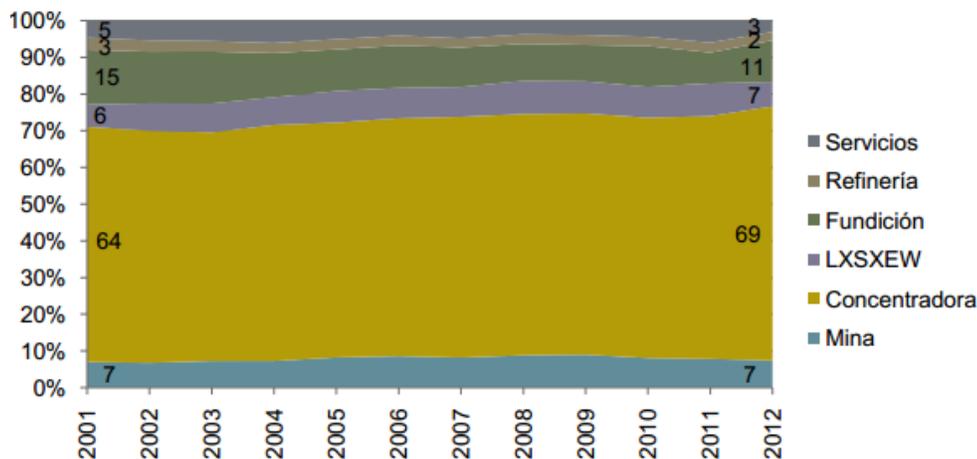


Figura 3-14: Consumo de energía eléctrica por proceso minero y su distribución porcentual – SIC [41].

Con respecto a los consumos unitarios de por tonelada de cobre fino (electricidad consumida para tratar/producir una unidad de producto: toneladas de cobre fino), según el estudio la planta concentradora registra un aumento del 71.5%; mientras la mina y LXSXEW lo hacen en un 34.3% y 33.7% respectivamente, entre 2001 y 2012.

Con respecto al consumo unitario por tonelada de producto procesado/extraído (electricidad consumida para tratar/producir una unidad de producto: toneladas de material procesado/extraído), la planta concentradora muestra una tendencia al alza aumentado un 23.9% entre 2001 y 2012.

Con esto es posible apreciar que la industria minera no está indiferente a los temas relacionados con energía, ya que es un recurso escaso que impacta directamente en los costos de producción del cobre. En particular, los aumentos sostenidos de energía, las características estructurales, y las variables internas y externas, afectan de manera importante al consumo energético y a los índices de rendimiento establecidos (consumos unitarios), que reflejan finalmente la relación entre energía utilizada y cobre extraído.

Cabe destacar que COCHILCO no solo tiene una mirada al consumo histórico de la energía, sino también una mirada a futuro considerando que la energía es un insumo clave para la minería. Es por esto que dentro de los informes elaborados por el organismo también se consideran proyecciones de energía que permiten dilucidar los consumos de energía y su desglose por área, tal y como se verá en el siguiente capítulo.

3.1.3.- Proyección del consumo de energía eléctrica al año 2025

Para obtener una mirada prospectiva de la demanda eléctrica en la minería del cobre, se considerará el informe de proyección de energía eléctrica al año 2025, elaborado por COCHILCO el año 2013 [49], en el cual se consideran proyectos mineros; operaciones vigentes; y operaciones y proyectos de plantas de desalinización e impulsión de agua a las minas. Para lograr este objetivo, se realizan estimaciones de capacidad productiva y coeficientes unitarios de consumo eléctrico de cada unidad productiva, a los cuales se aplican factores probabilísticos de que se cumplan dichas estimaciones, con la finalidad de obtener un consumo esperado de electricidad en la minería del cobre.

Para la proyección del consumo esperado de electricidad, la minería del cobre llegaría a consumir 41,1 TWh para el año 2025, siendo las faenas mineras ubicadas en el área del SING las principales demandantes al consumir 23,7 TWh, mientras que las del SIC consumirían 17,5 TWh. Las tasas de crecimiento anual serían de un 6,3%, 5,9% y 7,0% para el país, SING y SIC respectivamente. Las plantas concentradoras consumirían el 64,2% de la energía ocupada en minería, mientras que las plantas desalinizadoras y sistemas de impulsión consumirían un 15,0%.

Los proyectos nuevos consumirían 14,9 TWh para el año 2025, lo que equivale a un 36,2% del consumo esperado de electricidad por parte de la minería del cobre. Es interesante destacar que un 86% de estos proyectos parten de cero (*greenfield*), por lo que requerirían nuevos contratos para satisfacer su demanda de energía eléctrica.

3.1.3.1.- Proyección consumo total país

El consumo esperado de energía por parte de la minería del cobre va desde los 21 TWh en el año 2013 a 41.1 TWh para el año 2025, equivalente a un aumento del 95.5% con respecto al año 2013.

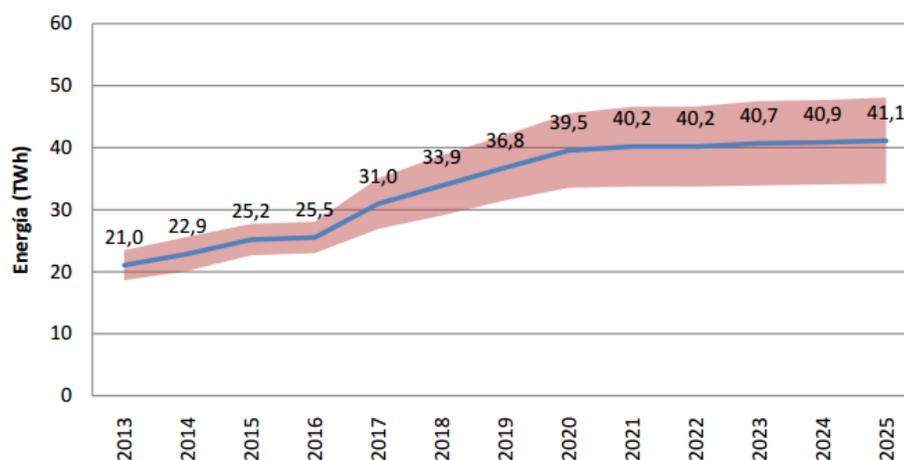


Figura 3-15: Proyección del consumo esperado de energía eléctrica por parte de la minería del cobre a nivel país [41].

3.1.3.2.- Proyección consumo esperado a nivel país por proceso

La distribución del consumo eléctrico por proceso muestra que la concentración es el proceso que más consumirá electricidad, llevándose el 64.2% (26.4 TWh) del consumo total de energía eléctrica. Otro punto a destacar es el consumo eléctrico de las plantas desaladoras y sistemas de impulsión, los que al año 2025 representarán un 15% del total del consumo eléctrico.

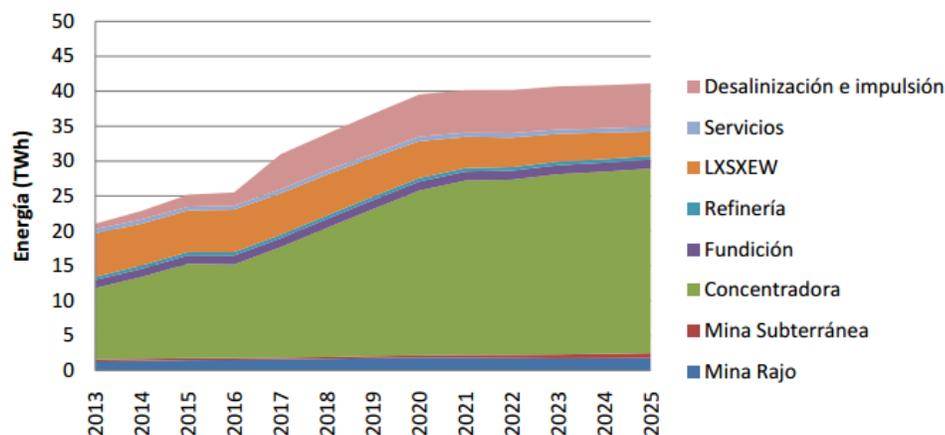


Figura 3-16: Proyección del consumo esperado de energía eléctrica por procesos a nivel país [41].

Dentro de las conclusiones sobre estos estudios destacan [49]:

- El sector minero tiene aspectos estructurales que harán que el consumo de energía eléctrica tenga un aumento creciente. También, debido a la cantidad de proyectos mineros que aumentarán la producción, el aumento en el consumo de energía eléctrica es inevitable.
- La mayor cantidad de proyectos que entrarán en operación entre el 2013 y 2025 corresponden a sulfuros de cobre, por lo que la producción de plantas concentradoras aumentará considerablemente, lo que va ligado de un aumento de consumo de energía eléctrica. Es por esto que la concentración de cobre seguirá siendo la principal demandante de energía eléctrica, pasando de un 48,6% del consumo de energía eléctrica en el año 2013 a un 64,2% del consumo esperado para el año 2025.
- Existe una declinación con respecto a la producción de cátodos electro-obtenidos, debido a que el proceso hidrometalúrgico (LXSXEX) perderá participación, pasando de un 29,7% de participación a solo un 8,5% en el año 2025.

3.2.- DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS SOLARES

A continuación se presentan las principales tecnologías desarrolladas en centrales de conversión de energía solar a calor o electricidad, basada principalmente en dos tipos de conversión: directa y térmica [50].

3.2.1.1.- Conversión directa

Se convierte la energía de los fotones directamente en electricidad. Todos estos sistemas corresponden a sistemas fotovoltaicos (PV), los que llegan a eficiencias en el rango del 13 a 30% dependiendo de la tecnología utilizada. El nivel de desarrollo de ésta es avanzado y con un alto potencial.

Mientras mayor sea la intensidad de la radiación solar incidente, mayor será el flujo de electricidad producido, pues representa el recurso esencial para la instalación de sistemas fotovoltaicos. La disponibilidad de radiación solar es oscilante a lo largo del año, aunque Chile se caracteriza por

poseer una buena recepción de radiación, en general, en todo el país. Un sistema fotovoltaico no requiere necesariamente luz brillante directa para operar, sino que también es posible generar electricidad en días nublados. Gracias a la reflexión de la luz, días ligeramente nublados pueden dar mejores resultados que días completamente despejados.

3.2.1.2.- Conversión térmica

La energía solar térmica (STE por su sigla en inglés) es una forma de energía y tecnología que aprovecha la energía solar para generar energía térmica (o eléctrica) para su uso industrial, residencial y comercial.

Los sistemas de calentamiento solar se pueden clasificar en pasivos o activos. Un sistema de calentamiento pasivo no necesita de equipamiento mecánico. Por ejemplo para un edificio, se hace circular aire a través de una superficie calentada por el sol y luego a través del edificio por convección (el aire calentado menos denso tiende a subir mientras el aire frío más denso tiende a bajar). Los sistemas de calentamiento activo requieren de un colector que absorba y colecte la radiación solar. Ventiladores o bombas se utilizan para circular el aire caliente o el fluido que absorbe el calor. Los sistemas activos suelen incluir algún sistema de almacenamiento energético.

Los colectores solares térmicos se clasifican según la Energy Information Administration (EIA) de Estados Unidos como colectores de baja, media, o alta temperatura. Los colectores de baja temperatura son generalmente de placas planas y se utilizan para calentamiento de agua. Los de mediana temperatura también suelen ser de placas planas pero se utilizan para calentamiento de agua o aire para usos comerciales y residenciales. Los colectores de alta temperatura concentran la luz del sol utilizando espejos o lentes y son generalmente utilizados para cumplir requerimientos de calor por sobre los 300°C / 20 bar de presión en industrias, y para generación eléctrica.

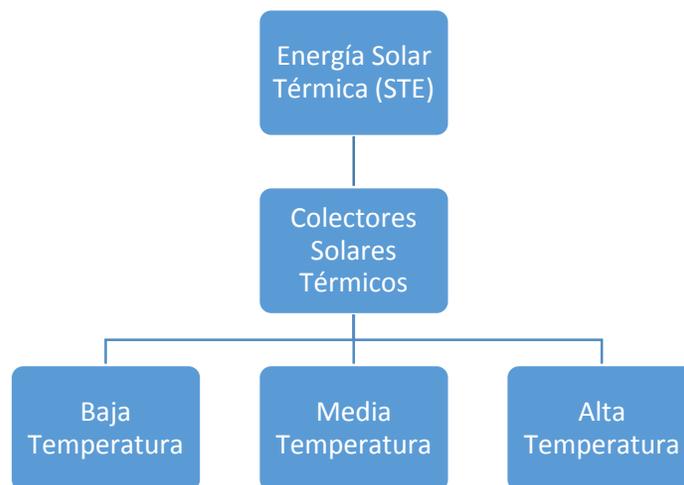


Figura 3-17: Clasificación de colectores solares térmicos según su temperatura.

Para los colectores de alta temperatura (concentrados) existe una clasificación dependiendo del tipo de energía final, la que puede ser electricidad (Concentración Solar de Potencia o CSP) o calor (Concentración Solar Térmica o CST).

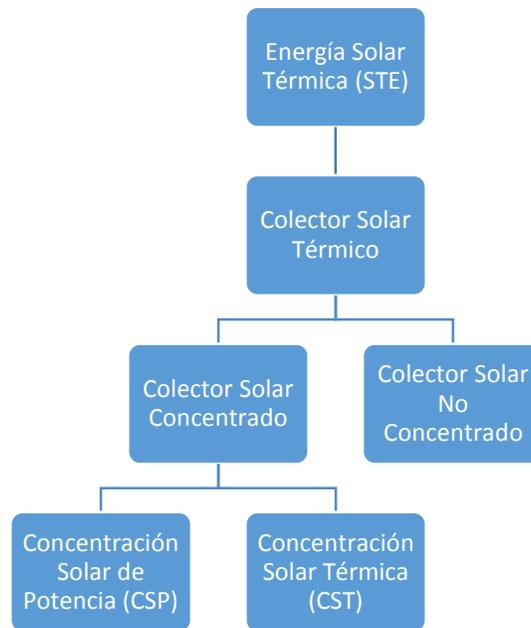


Figura 3-18: Clasificación de colectores solares térmicos dependiendo del tipo de energía final.

Los colectores solares pueden ser concentrados o no concentrados:

3.2.1.3.- Colectores no concentrados

El área del colector (el área que intercepta la radiación solar) es la misma que el área que absorbe la radiación. Los colectores de placas planas son los más comunes y se necesitan temperaturas bajo los 100°C. Existen variados diseños de colectores de placas planas, pero generalmente todos consisten en:

- Un receptor de placa plana que intercepta y absorbe la energía solar
- Una cubierta transparente que permita que la energía solar pase, pero que reduce las pérdidas de calor del receptor
- Un fluido que transporta el calor (aire o agua) para remover el calor del receptor a través de tuberías y su cubierta de aislación térmica.

3.2.1.4.- Colectores concentrados

El área interceptando la radiación solar es mayor, a veces cientos de veces mayor que el área del receptor [51].

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

- Colectores cilindro-parabólicos
- Colectores Fresnel lineal
- Colectores de Disco Stirling
- Sistema de Torre Central

En términos generales, puede hacerse una distinción entre aquellos concentradores con seguimiento en uno o dos ejes: los sistemas de un eje concentran la luz del sol en un tubo absorbente en la línea focal, mientras que los sistemas de seguimiento en dos ejes lo hacen en una superficie relativamente pequeña cerca del punto focal (ver Figura 3-19).

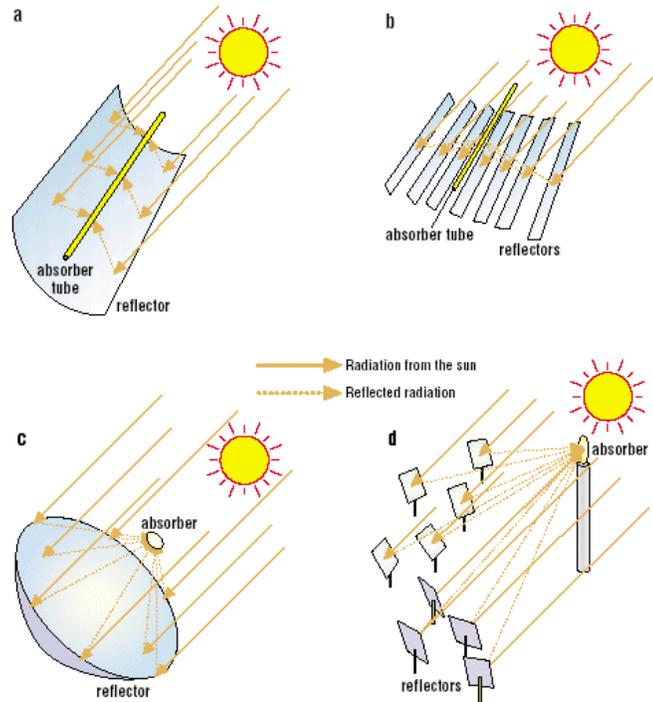


Figura 3-19: Concentración solar del tipo: (a) Colector cilindro-parabólico (b) Colector Fresnel lineal (c) Colector disco Stirling (d) Colector torre central [52].

Cabe destacar que uno de los inconvenientes de utilizar tecnologías termosolares es la necesidad de refrigeración y limpieza en el proceso, ya que las faenas se encuentran en lugares áridos, a grandes alturas y con escasez de agua.

Una de las ventajas que representan los sistemas termosolares, independiente si su fin es generar calor o electricidad, es la posibilidad de utilizar almacenamiento térmico mediante tanques, lo que permite a la planta generar calor o electricidad incluso cuando no hay energía solar disponible [52].

3.3.- ENTREVISTAS DIRIGIDAS

Se realizaron entrevistas dirigidas a un total de 5 profesionales y especialistas con el objetivo de apreciar y entender lo que sucede en la industria minera en relación a proyectos ERNC; encontrar características y condicionantes técnicas que afecten al desarrollo y toma de decisiones ligada a proyectos de ERNC; identificar posibles mejoras del software y realizar una demostración del mismo. Para lograr esto de manera exitosa, se siguió una metodología desarrollada en conjunto con el profesor Álvaro Silva, dando una estructura definida a la entrevista mediante el software Mindjet MindManager. Éste permite organizar de mejor manera las ideas e información en una sola vista para ver conexiones y sacar conclusiones rápidamente. También se recibieron por parte del profesor Silva recomendaciones generales sobre cómo enfrentar al público objetivo.

En los Anexos se incluye el formato y las respuestas a las entrevistas dirigidas que se realizaron a los siguientes profesionales y especialistas: Rodolfo Camacho, Richard Aylwin, Diego Lizana, José Tomás Morel y Emilio Castillo.

3.3.1.- Estructuración de la Entrevista

A continuación se muestra la estructuración de la entrevista confeccionada en el software Mindjet MindManager:

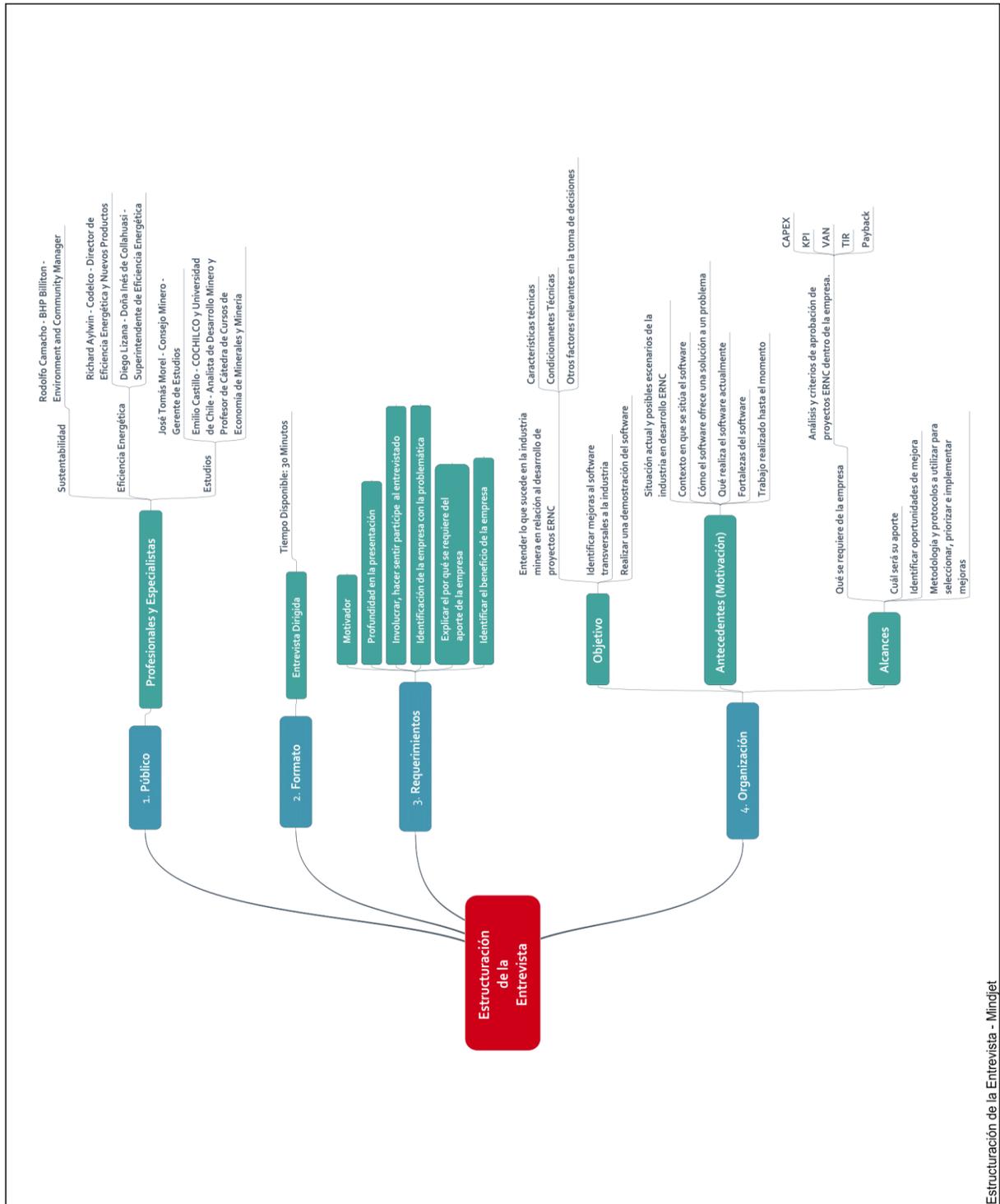


Figura 3-20: Estructuración de la entrevista.

3.3.2.- Respuestas a las Entrevistas

Las siguientes respuestas corresponden a una recopilación de los distintos comentarios recibidos:

- Respecto a las ERNC, existe preocupación por sus costos, riesgos en la inversión, y el que no sean tan competitivas como otros tipos de tecnologías (principalmente por pago por potencia). Además, el negocio de las ERNC no es el *core business* de las mineras. También se señala que la entrada de grandes bloques de ERNC podría impactar al sistema eléctrico (intermitencia).
- Se realiza financiamiento propio para proyectos pilotos. Se busca un modelo de compra-venta de energía, en el que otra empresa construye, financia, opera y vende la energía para proyectos más grandes. También se aplican modelos mixtos en proyectos tipo Kelar (obtención de permisos ambientales y luego licitación).
- Responsabilidad social y medioambiental es más determinante en empresas grandes, sin embargo aún prepondera la evaluación económica en la industria en general.
- Factores más determinantes son costos de implementación, Payback, seguridad en el suministro energético, y acceso a permisos asociados.
- La ley ERNC deja fuera la autogeneración y cogeneración, ya que no se reconocen como atributos ERNC. Respecto a los contratos, son a largo plazo y se hace difícil negociar con el generador. Precios excesivos por parte de los generadores hacen que los clientes libres asuman atributos ERNC.
- No existen protocolos establecidos para la evaluación de ERNC, pero si áreas dedicadas a energías renovables en empresas grandes.
- Dado que todavía son una excepción los proyectos de autoabastecimiento, finalmente no es tan relevante llevar un registro de cada uno de los lugares donde existe potencial renovable (salvo excepciones como Codelco o Collahuasi).
- Se ven posibles aplicaciones de ERNC en la generación de calor para agua caliente de procesos y sanitaria; generación de electricidad especialmente en puntos aislados y con potencias menores; y para generar calor en pilas de lixiviación, biolixiviación y en la electro-obtención, donde se requiere calor y se reemplaza el Diesel utilizado en las calderas.
- En general para las ERNC debe tenerse en consideración la polución y condiciones adversas que se generan cerca de una faena.
- En la mayoría de los casos es un tercero el que construye y opera la planta ERNC. La mayoría se conecta a la red eléctrica (por tanto, son despachados por los CDEC). Los que sirven de auto abastecimiento o cogeneración son de pequeña escala y se utilizan para suplir demandas propias.

3.4.- SELECCIÓN Y PRIORIZACIÓN DE MEJORAS

Tomando en consideración los antecedentes recopilados en la caracterización de procesos, descripción de tecnologías solares y entrevistas dirigidas, es posible apreciar que existe cabida para las ERNC en la minería. Así, por ejemplo, habrá cambios estructurales en la minería que harán que el consumo de energía (eléctrica y térmica) tenga un aumento creciente. Las menores leyes, las mayores distancias de acarreo y una mayor dureza del mineral harán que el consumo energético se incremente inevitablemente en los próximos años.

El programa de M. Peirano analiza de forma exhaustiva proyectos eléctricos considerando el ahorro por pérdidas que genera la inclusión de una ERNC en el punto de consumo. Sin embargo en el último tiempo se han visto muchos proyectos termosolares, tanto de colectores solares concentrados (cilindro-parabólicos como la planta El Tesoro de AMSA) como no concentrados (placas planas como Pampa Elvira Solar de Codelco).

Dado que los consumos térmicos en minería son intensivos y crecientes al igual que los eléctricos, la principal mejora que se realizará al software es la de considerar proyectos térmicos, plantas térmicas y tecnologías que permitan la conversión del recurso solar en energía térmica. Las mejoras irán en la misma línea del software de M. Peirano, esto es se mantendrá la estructura general del programa. Estas mejoras involucran una actualización en la interfaz gráfica, la base de datos, inclusión de nuevas clases (proyecto térmico, planta térmica, tecnología térmica), y análisis simultáneo de una planta con requerimientos térmicos y eléctricos. Esto abre la posibilidad a nuevas tecnologías (principalmente solares) que aborden ambos requerimientos y aprovechen los recursos solares. Así, por ejemplo, la tecnología híbrida fotovoltaica térmica (PVT por su sigla en inglés), que se explicará en la siguiente sección, permite aprovechar de mejor manera la energía solar, utilizando conversión directa (fotovoltaica) y térmica en un solo colector. Además, la exploración de estos sistemas híbridos permite teóricamente obtener una mejor eficiencia conjunta que si funcionaran por separado.

Considerando las razones expuestas anteriormente, el software abordará tecnologías térmicas (como placas planas) y tecnologías híbridas como los sistemas PVT. Debido a que la mayoría de las plantas utilizan combustibles fósiles para el calentamiento de soluciones (caso base a considerar en proyectos térmicos e híbridos), el software contempla la valorización del ahorro de combustible y su incorporación en el análisis económico de los proyectos térmicos e híbridos (el precio de los combustibles podrá ser ingresado por el usuario como un promedio mensual).

Adicionalmente, el software determinará si la generación termosolar y/o híbrida es suficiente para suplir las necesidades térmicas de la planta. En caso de que no sea suficiente, se supondrá la diferencia con el caso base de la planta, en este caso combustibles fósiles.

3.4.1.- Sistemas Híbridos Fotovoltaicos Térmicos (PVT)

Los sistemas que aprovechan la energía solar pueden clasificarse en dos grupos: sistemas que convierten energía solar en energía térmica, y sistemas que convierten energía solar en electricidad.

El primer grupo puede clasificarse en dos: sistemas que convierten energía solar en energía térmica para calentamiento y sistemas que convierten energía solar en energía térmica para generación eléctrica. Puede agregarse una tercera categoría, de tipo híbrida, que consiste en la tecnología Fotovoltaica/Térmica. Los colectores Fotovoltaicos/Térmicos combinan las dos tecnologías ofreciendo energía térmica y electricidad simultáneamente desde un solo colector solar. Una clasificación más detallada se aprecia en la siguiente figura:

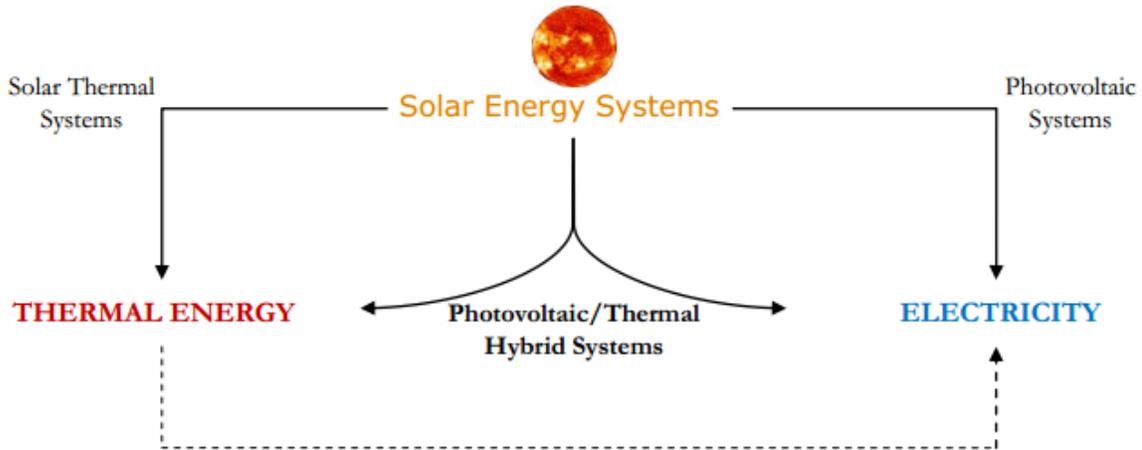


Figura 3-21: Clasificación de Sistemas Fotovoltaicos Térmicos [53].

El principio básico de funcionamiento de los colectores solares es que un fluido, que puede ser agua, aceite mineral, aire, entre otros, circula a través de un intercambiador de calor (IC). La temperatura de salida del fluido es mayor que la temperatura de entrada, y esta diferencia de temperatura es utilizada en términos de la energía térmica. En la mayoría de las aplicaciones, la energía térmica es guardada en contenedores aislados, como tanques de agua, aunque también existen aplicaciones en que se utiliza el fluido sin almacenar, como sistemas de calentamiento de aire, los que calientan el aire frío dentro de un edificio, o sistemas de calentamiento de soluciones, que requieren incrementar la temperatura de un fluido y evitar el uso (parcial) de calderas.

Por otro lado, las celdas fotovoltaicas (PV) utilizan tecnología que convierte la energía solar en electricidad utilizando semiconductores. Las celdas PV son diseñadas para transferir la energía contenida en fotones individuales que penetran el panel a electrones que son canalizados al circuito externo para energizar una carga eléctrica. Esta función se logra a través de la disposición de la estructura molecular a niveles microscópicos, y el ordenamiento de conductores en el borde de la celda a nivel macroscópico. Un arreglo de paneles consiste en utilizar múltiples celdas PV (del orden de 50 a 120 celdas) conectadas entre ellas en un circuito eléctrico que puede conectarse a un circuito exterior. Dado que cada celda PV tiene una salida limitada comparada con los consumos típicos residencial o comercial (máxima salida de cada panel del orden de 80 a 200 W), un sistema PV usualmente combina un gran número de paneles en un arreglo. Los sistemas fotovoltaicos son los mayores productores de electricidad directamente desde la energía solar en el mundo en términos de MWh producidos por año [54].

Una tecnología emergente, que combina las dos maneras de aprovechar la energía solar, es el punto de interés de este trabajo: colectores híbridos Fotovoltaicos/Térmicos (colectores PVT). Estos consisten en dos capas: un panel PV encapsulado inferior y superiormente, y una capa que facilita el intercambio térmico desde el panel PV. El fluido, que puede ser líquido (como agua) o aire, circula a través del intercambiador de calor para extraer el calor de él. En la siguiente figura se observa un colector PVT [53]:

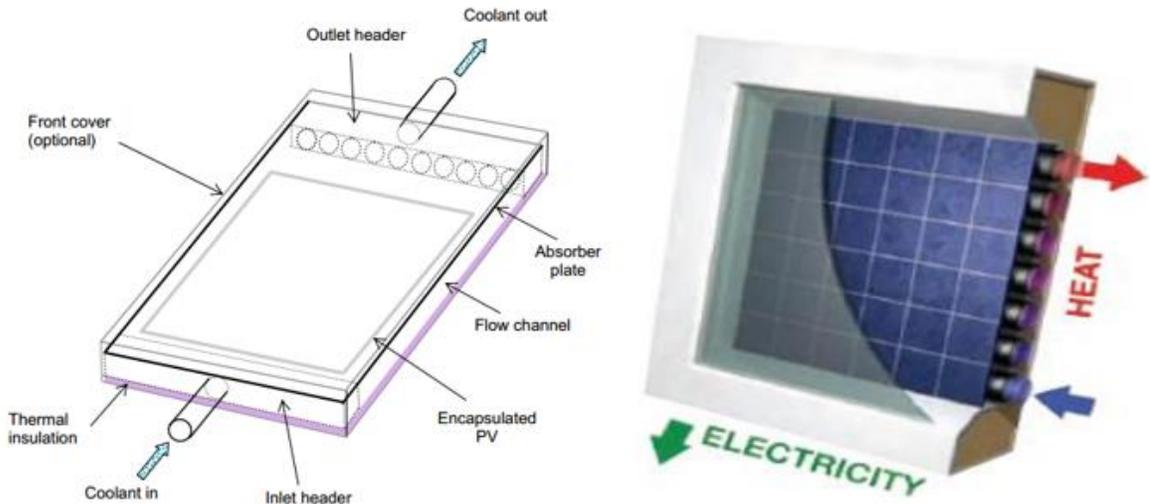


Figura 3-22: Ejemplos de colectores híbridos Fotovoltaico/Térmico [53].

La idea es contrastar la generación de los PVT (principalmente la parte térmica, ya que la eléctrica se distribuye a través del sistema eléctrico de la minera) con el consumo térmico de algún proceso minero relacionado al calentamiento de soluciones, agua caliente sanitaria o similar. En las entrevistas fue posible identificar diversas energías renovables que se utilizan en la actualidad en minería para fines térmicos y eléctricos, entre las que destacan paneles PV, aerogeneradores, concentración solar térmica (cilindro-parabólico), colectores de placas planas, y tubos de vacío para calentamiento de soluciones y agua caliente sanitaria.

De esta manera, en el presente trabajo cuando se habla de una tecnología térmica, proyecto térmico y planta térmica, también se deben considerar los sistemas PVT dentro de esta categoría, ya que poseen características térmicas y eléctricas.

Cabe destacar que el Diesel es el combustible más utilizado en la minería del cobre, representando el 85,1% de los combustibles al año 2012, por lo que abordar la problemática térmica en la herramienta computacional abre la posibilidad a reemplazar este gran porcentaje de combustibles [55].

3.5.- IMPLEMENTACIÓN EN EL SOFTWARE

Los nuevos requerimientos de la herramienta consideran la creación de nuevas clases que incorporen sistemas térmicos (solo térmicos y PVT). A pesar de que se seguirá con la línea original de diseño de la herramienta computacional, habrán actualizaciones en la interfaz gráfica (recursos, plantas, proyectos individuales y resumen de proyectos), modificación de la base de datos para el soporte de las nuevas clases y adición de nuevas funcionalidades, incorporación de combustibles y su precio, adición de plantas térmicas y PVT, y análisis técnico-económico de proyectos térmicos y PVT.

Cabe destacar que dentro de los alcances del software se considera siempre un tratamiento individual de los proyectos. De esta manera, cuando se habla de un proyecto híbrido, se refiere a que utiliza la tecnología Fotovoltaica-Térmica (PVT). Esto permite, mediante la pestaña de resumen de proyectos individuales, comparar proyectos agrupados dentro de una misma división y separados entre proyectos eléctricos, térmicos y PVT, sin que estos ocurran de manera simultánea.

El cumplimiento de los requerimientos que acá se exponen se revisará en el caso de estudio.

3.5.1.- Requerimientos Generales [7]

Los requerimientos generales de la herramienta tienen relación con el manejo de la información y la presentación gráfica de los resultados obtenidos.

- La herramienta debe tener una interfaz gráfica para ingresar información sobre recursos renovables (eólicos, solares, hidráulicos).
- La herramienta debe tener una interfaz gráfica para ingresar la información sobre plantas mineras.
- Toda la información ingresada podrá ser visualizada en una interfaz gráfica.
- La información ingresada en una sesión debe estar disponible en sesiones posteriores.
- Los resultados obtenidos en una sesión deben estar disponibles en sesiones posteriores.
- Los datos ingresados pueden ser eliminados.

3.5.2.- Requerimientos sobre la Modelación de las Plantas [7]

Para modelar las plantas mineras y sus consumos se deben considerar los siguientes aspectos:

- Cada planta debe ser identificada con un nombre.
- Cada planta debe pertenecer a una división.
- La combinación nombre planta-división debe ser única.
- Se debe conocer la ubicación de la planta en coordenadas geográficas.
- Cada planta debe estar asociada a lo menos a un recurso renovable.
- Cada planta térmica debe estar asociada a un recurso fósil.

- El consumo eléctrico de cada planta se debe caracterizar a partir de 12 perfiles diarios, cada uno representativo de un mes del año.
- El consumo térmico de cada planta se debe caracterizar a partir de 12 perfiles diarios, cada uno representativo de un mes del año.
- En los perfiles diarios se debe indicar el consumo para cada hora, desde las 00:00 hasta las 23:00.
- Se podrá indicar la potencia máxima (térmica y/o eléctrica según corresponda) consumible por la planta.
- La temperatura ambiente de cada planta PVT se debe caracterizar a partir de 12 perfiles diarios, cada uno representativo de un mes del año.
- Se debe indicar la temperatura de entrada y objetivo del fluido de cada planta híbrida PVT.

3.5.3.- Consideraciones Generales sobre los Recursos [7]

- Se deben considerar 3 tipos de recursos renovables: eólicos, solares e hidráulicos.
- Se debe considerar un recurso adicional de tipo fósil.
- Cada recurso debe ser identificado con un nombre.
- La combinación nombre recurso-tipo de recurso debe ser única.
- Se debe indicar la ubicación geográfica del recurso en coordenadas geográficas (grados, minutos y segundos).

3.5.3.1.- Recursos Renovables

- El potencial de cada recurso renovable se debe caracterizar a partir de 12 perfiles diarios, cada uno representativo de un mes del año.
- En los perfiles diarios se debe indicar el potencial para cada hora, desde las 00:00 hasta las 23:00.

3.5.3.2.- Recurso Fósil

- Se debe indicar el poder calórico inferior (PCI) del combustible en kcal/kg.
- Se debe indicar la densidad del combustible en kg/m³.
- El precio del combustible de cada recurso fósil se debe caracterizar a partir de 12 precios mensuales, cada uno representativo de un mes del año, en US\$/litro.

3.5.4.- Consideraciones Generales sobre los Proyectos [7]

- Un proyecto se genera a partir de una planta y un recurso renovable asociado a ésta. Adicionalmente, si es térmico, se debe asociar un recurso fósil.
- Para cada proyecto se deben calcular 12 perfiles de generación diarios, cada uno representativo de un mes del año.
- En los perfiles diarios debe indicarse la generación para cada hora, desde las 00:00 hasta las 23:00.

- Para cada proyecto debe calcularse la generación mensual de energía, para cada mes del año.
- Se debe generar un resumen de proyectos individuales por cada división, separados en eléctricos, térmicos y PVT. Se deben indicar los siguientes datos:
 - Planta asociada al proyecto.
 - Recurso asociado al proyecto.
 - Potencia eléctrica instalada.
 - Energía generada anualmente.
 - Factor de planta.
 - Costo de inversión.
 - Ingresos eléctricos anuales (por potencia, energía, ahorro pérdidas y venta bonos de carbono).
 - Ingresos térmicos anuales (por ahorro de combustibles).
 - VAN.
 - Periodo de recuperación de la inversión.
 - TIR.

Para cada proyecto eléctrico se deben calcular los siguientes datos técnicos:

- Potencia eléctrica instalada.
- Energía eléctrica generada anualmente.
- Factor de planta.
- Eficiencia eléctrica.
- Potencia Firme.
- Reducción de pérdidas en el sistema de transmisión.
- Reducción de emisiones de CO₂e.
- Distancia entre la planta y el recurso renovable asociado.

Para cada proyecto eléctrico se deben calcular los siguientes datos económicos:

- Costos de equipos eléctricos principales.
- Costos de terrenos, obras civiles, gastos financieros, consultoría, entre otros.
- Costo total y costo promedio (US\$/kW).
- Ingresos anuales (por potencia, energía, ahorro en pérdidas y por venta de bonos de carbono).
- Costo anual de operación y mantenimiento.
- Valor actual neto (VAN) del proyecto.
- Período de recuperación de la inversión (Payback).
- Tasa interna de retorno (TIR).

Para cada proyecto térmico se deben calcular los siguientes datos técnicos:

- Potencia térmica máxima.

- Energía térmica generada anualmente.
- Eficiencia térmica.
- Ahorro de combustible.
- Reducción de emisiones de CO₂e.
- Distancia entre la planta y el recurso renovable asociado.

Para cada proyecto térmico se deben calcular los siguientes datos económicos:

- Costos de equipos térmicos principales.
- Costo total y costo promedio (US\$/kW).
- Ingresos anuales (por ahorro en combustible y venta de bonos de carbono).
- Costo anual de operación y mantenimiento.
- Valor actual neto (VAN) del proyecto.
- Período de recuperación de la inversión (Payback).
- Tasa interna de retorno (TIR).

Para cada proyecto PVT se deben calcular los siguientes datos técnicos:

- Potencia eléctrica instalada.
- Energía total (térmica + eléctrica) generada anualmente.
- Eficiencia eléctrica.
- Eficiencia térmica.
- Reducción de pérdidas en el sistema de transmisión.
- Ahorro de combustible.
- Reducción de emisiones de CO₂e.
- Distancia entre la planta y el recurso renovable asociado.

Para cada proyecto PVT se deben calcular los siguientes datos económicos:

- Costos de equipos eléctricos principales.
- Costos de equipos térmicos principales.
- Costos de terrenos, obras civiles, gastos financieros, consultoría, entre otros.
- Costo total y costo promedio (US\$/kW).
- Ingresos anuales eléctricos (por potencia, energía, ahorro en pérdidas y por venta de bonos de carbono).
- Ingresos anuales térmicos (por ahorro en combustible y venta de bonos de carbono).
- Costo anual de operación y mantenimiento.
- Valor actual neto (VAN) del proyecto.
- Período de recuperación de la inversión (Payback).
- Tasa interna de retorno (TIR).

3.5.4.1.- Proyectos PVT

Para modelar los proyectos que utilicen tecnología fotovoltaica-térmica (PVT), se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se podrán utilizar dos tipos de paneles fotovoltaicos: policristalino o amorfo. El modelo calcula a partir de estas tecnologías la eficiencia térmica y eléctrica del conjunto PVT.
- Se podrá cambiar el terreno a utilizar por los paneles PVT.
- Se podrá cambiar el tipo de combustible que se reemplaza con el proyecto PVT.

3.5.5.- Requerimientos sobre el ahorro de combustibles

Para calcular el ahorro de combustibles derivado de la incorporación de un proyecto PVT, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Se considera un caso base térmico donde la planta suple su consumo completamente con combustibles fósiles.
- El ahorro de combustibles se debe calcular como el volumen de combustible necesario para igualar la energía térmica generada mediante el proyecto PVT, multiplicado por el precio mensual de los combustibles.
- El ahorro de combustibles se calculará de manera horaria durante el año de referencia.

Dentro de las mejoras generales al programa también destacan:

- Actualización de factores de emisión de combustibles y sistemas eléctricos.
- Actualización del impuesto de primera categoría.
- Incorporación del precio mensual de los combustibles.
- Incorporación de la tasa interna de retorno (TIR) al análisis económico de todos los proyectos.
- Si la generación renovable no es suficiente para suplir el consumo, la diferencia se asumirá con energía eléctrica proveniente del sistema eléctrico y/o con energía térmica proveniente de calderas a combustibles.

3.5.6.- Diseño de la Herramienta Computacional

En esta sección se detallará el diseño de la herramienta computacional realizado para dar cumplimiento a los requerimientos establecidos en la sección anterior. Primero se realizará una introducción al lenguaje de programación Java (utilizado como lenguaje en este programa y en Deep Edit), para luego explicar la estructura de clases de la herramienta.

3.5.6.1.- Lenguaje de Programación Java

El lenguaje de programación Java es un lenguaje de alto nivel que tiene las siguientes características:

- Sencillo
- Orientado al objeto
- Distribuido
- Multiproceso
- Dinámico
- Posee arquitectura neutral
- Portátil
- De alto rendimiento
- Robusto
- Seguro

En el lenguaje de programación Java, todo el código de fuente es escrito en archivos de texto plano con la extensión `.java`. Estos archivos de fuente son entonces compilados en archivos `.class` por un compilador llamado `javac`. Un archivo `.class` no contiene el código nativo a un procesador de computador, ya que contiene bytecodes – el lenguaje de máquina de la máquina virtual de JAVA (Java Virtual Machine). La herramienta de ejecución Java, por lo tanto, corre una aplicación en una instancia de la máquina virtual de Java.

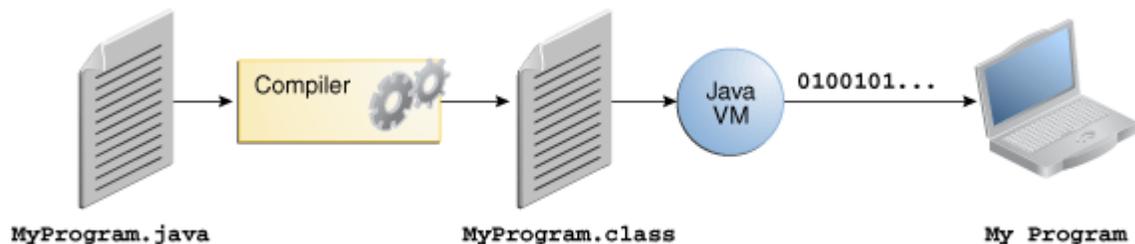


Figura 3-23: Descripción general del proceso de desarrollo de software [56].

Debido a que la máquina virtual de Java está disponible en distintos sistemas operativos, los archivos `.class` son capaces de correr en distintas plataformas. Esto permite un comportamiento multiplataforma único [56].

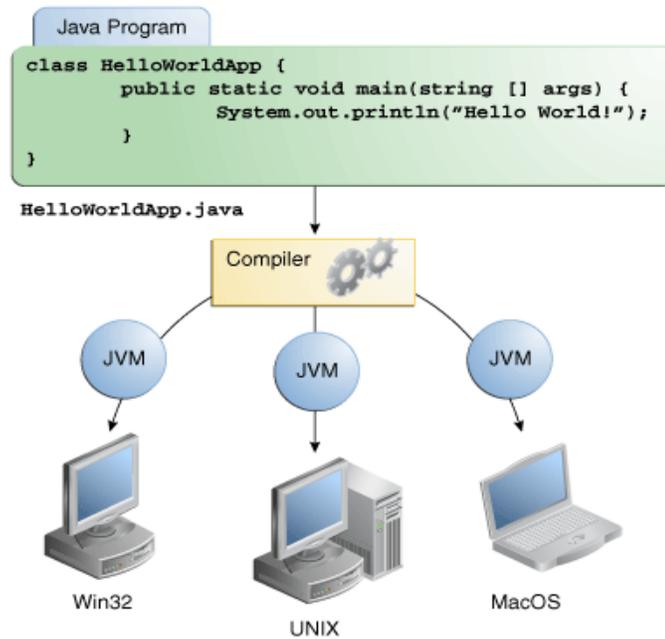


Figura 3-24: A través de la máquina virtual de Java, la misma aplicación puede correr en múltiples plataformas [56].

3.5.6.2.- Conceptos Java [57]

Si el lector nunca ha utilizado un lenguaje de programación orientado al objeto antes, necesita aprender conceptos básicos antes de escribir cualquier código. La intención de esta sección es introducir objetos, clases, herencia, interfaces y paquetes.

¿Qué es un objeto?

Los objetos son clave para entender la tecnología orientada a objetos. Mire a su alrededor y encontrará muchos ejemplos de objetos del mundo real: su perro, su escritorio, su televisión, su bicicleta.

Los objetos del mundo real comparten dos características: todos tienen estado y comportamiento. Los perros tienen estado (nombre, color, raza, hambre) y el comportamiento (ladrar, mover la cola). Las bicicletas también tienen estado (marcha actual, ritmo de pedaleo actual, la velocidad actual) y comportamiento (cambiar de marcha, el cambio del ritmo de pedaleo, la aplicación de los frenos). Identificar el estado y el comportamiento de los objetos del mundo real es una gran manera de empezar a pensar en términos de la programación orientada a objetos.

Tome un minuto en este momento para observar los objetos del mundo real que se encuentran en su área inmediata. Para cada objeto que se ve, hacerse dos preguntas: "¿Qué estados posible este objeto puede estar?" y "¿Qué posible comportamiento puede realizar este objeto?". Asegúrese de anotar sus observaciones. Mientras lo hace, se dará cuenta de que los objetos del mundo real varían en complejidad; su lámpara de escritorio puede tener sólo dos estados posibles (dentro y fuera) y dos comportamientos posibles (encender, apagar), pero su radio de escritorio podría tener otros

estados (encendido, apagado, volumen actual, la estación actual) y comportamiento (encender, apagar, subir el volumen, bajar el volumen, buscar, analizar y ajustar). También se puede notar que algunos objetos, a su vez, también contienen otros objetos. Estas observaciones del mundo real todo se traducen en el mundo de la programación orientada a objetos.

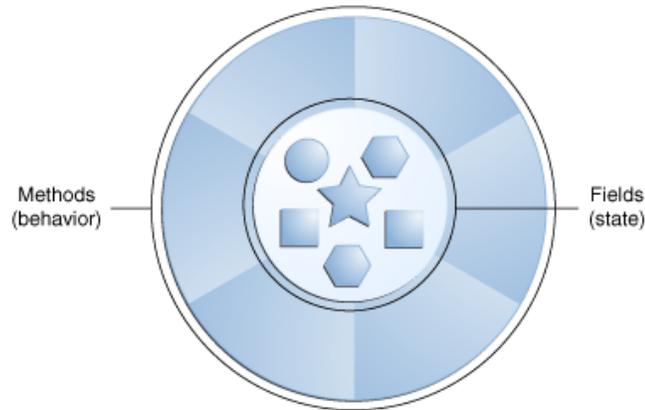


Figura 3-25: Objeto de un software. Posee estado y comportamiento [57].

Los objetos de software son conceptualmente similares a los objetos del mundo real: ellos también tienen estado y comportamiento. Un objeto almacena su estado en campos (variables en algunos lenguajes de programación) y expone su comportamiento a través de métodos (funciones en algunos lenguajes de programación). Los métodos operan en el estado interno de un objeto y sirven como el principal mecanismo para la comunicación de objeto a objeto. Ocultar el estado interno y la interacción que se requiere para lograrlo se realiza a través de un proceso conocido como encapsulación de datos - un principio fundamental de la programación orientada a objetos.

Considere una bicicleta, por ejemplo:

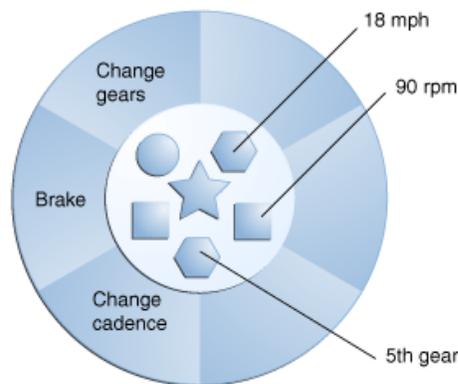


Figura 3-26: Una bicicleta modelada como un objeto de software [57].

Atribuyendo estado (velocidad actual, la cadencia de pedaleo actual y la marcha actual) y proporcionar métodos para cambiar ese estado, permite que el objeto permanezca en control de su interacción con el mundo exterior. Por ejemplo, si la bicicleta sólo tiene 6 engranajes, un método para cambiar de marcha podrían rechazar cualquier valor que es menor que 1 o mayor que 6.

¿Qué es una clase?

En el mundo real, a menudo encontrará muchos objetos individuales, todos los de la misma clase. Puede haber miles de otras bicicletas, todos de la misma marca y modelo. Cada bicicleta se construyó a partir del mismo conjunto de planos y, por tanto, contiene los mismos componentes. En términos de orientación a objetos, decimos que la bicicleta es una instancia de la clase de objetos conocidos como bicicletas. Una clase es el modelo a partir del cual se crean objetos individuales.

¿Qué es una herencia?

Diferentes tipos de objetos a menudo tienen una cierta cantidad en común con cada otro. Las bicicletas de montaña, bicicletas de carretera y bicicletas tándem, por ejemplo, todos comparten las características de las bicicletas (velocidad actual, ritmo de pedaleo actual, velocidad actual). Sin embargo, cada uno también define características adicionales que los hacen diferentes: las bicicletas tándem tienen dos asientos y dos conjuntos de manillas; las bicicletas de carretera tienen manillares de caída; algunas bicicletas de montaña tienen un anillo de cadena adicional, dándoles una relación de transmisión más baja.

La programación orientada a objetos permite que las clases hereden estado y el comportamiento de uso común de otras clases. En este ejemplo, la bicicleta se convierte ahora en la superclase de MountainBike, RoadBike y TandemBike. En el lenguaje de programación Java, le permite a cada clase tener una superclase directa, y cada superclase tiene el potencial para un número ilimitado de las subclases:

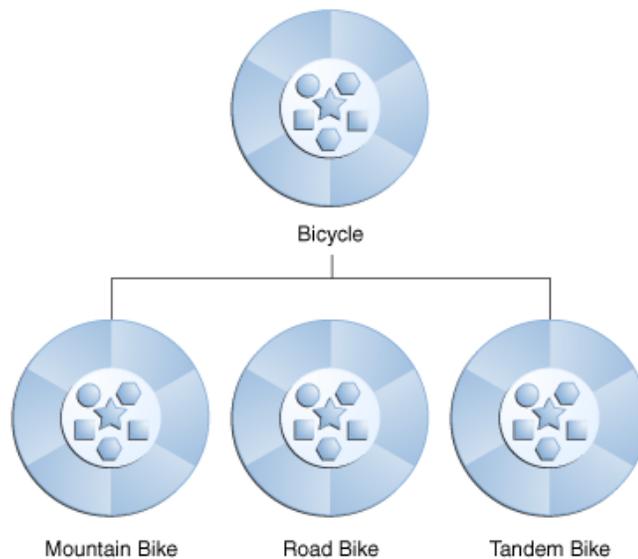


Figura 3-27: Una jerarquía de clases de bicicleta [57].

3.5.6.3.- Estructura de Clases

En esta sección se detallarán las clases que modelan los requerimientos planteados en el software. Los nuevos requerimientos de la herramienta consideran la creación de nuevas clases que

incorporen sistemas térmicos (solo térmicos y PVT). Se distinguen principalmente dos tipos de clases:

1. Aquellas que modelan el problema y que representan los conceptos más importantes:
 - a. Plantas mineras.
 - b. Recursos renovables (eólicos, solares, hidráulicos).
 - c. Recurso fósil.
 - d. Proyectos de ERNC eléctricos (eólicos, solares fotovoltaicos, mini hidráulicos).
 - e. Proyectos de ERNC térmicos (solares térmicos).
 - f. Proyectos de ERNC híbridos (solares fotovoltaicos-térmicos).
 - g. Tecnologías de generación (eólica, fotovoltaica, mini hidráulica, solar térmica, fotovoltaica-térmica).
2. Aquellas que son netamente operacionales y permiten el correcto funcionamiento de la herramienta:
 - a. Conexión a la base de datos.
 - b. Interfaz gráfica de todas las pestañas.
 - c. Conexión con Deep Edit.
 - d. Conexiones con tecnologías y análisis económico desde la interfaz gráfica.
 - e. Elaboración de gráficos.
 - f. Ejecución del programa.
 - g. Motor de la herramienta.

Los proyectos termosolares han tenido un desarrollo importante y sostenido dentro de los últimos años, integrándose de manera exitosa a los procesos mineros y abriendo una ventana a nuevas tecnologías.

El valor agregado que aporta esta versión del software, en comparación con el resto de las herramientas del mercado y el trabajo de tesis de Marco Peirano, radica en que no solo se realiza un análisis eléctrico de los proyectos, y por tanto se valoriza el impacto por ahorro en pérdidas de transmisión, sino que también se realiza un análisis térmico de los proyectos, lo que permite valorizar el impacto por ahorro de combustibles en el punto de consumo.

El ahorro de combustibles se calcula a partir de la incorporación de un proyecto térmico o híbrido PVT en el lugar donde se sitúa la planta con consumo térmico. La ERNC térmica que se plantea se instalará justo en el punto en que realiza el consumo térmico, debido a que resulta difícil transportar energía térmica a grandes distancias. El caso base térmico consiste en una caldera de combustible, la que utiliza un combustible definido por el usuario y posee una eficiencia térmica. El ahorro de combustible se calcula como el volumen de combustible necesario para igualar la generación térmica que el proyecto termosolar (solo térmico o PVT), multiplicado por el precio mensual del combustible. Este ahorro se calcula de manera horaria durante el año de referencia y se incorpora al análisis económico de los proyectos térmicos y PVT. Además, dentro del análisis técnico se incorpora el combustible a reemplazar, el ahorro de combustible (volumen) y la reducción de CO₂e.

Cabe destacar que, en caso de que la generación térmica o PVT no sea suficiente para suplir el consumo térmico de la planta, se supondrá que esta diferencia se suple mediante el combustible fósil. En este último caso, el proyecto representa un reemplazo parcial de la generación fósil. En caso de que la energía termosolar supla completamente los consumos térmicos de la planta, el proyecto representa un reemplazo total de la generación fósil.

Lo anteriormente expuesto se explica en el siguiente diagrama, en donde es posible apreciar el caso base sin proyecto, luego la generación que es desplazada por el proyecto renovable y finalmente el impacto por ahorros. Además se señalan el caso base, proyecto e impacto dependiendo si se trata de un proyecto eléctrico, térmico o híbrido. Mencionar nuevamente que el tratamiento de estos proyectos se realiza de manera individual (Eléctrico, Térmico o Híbrido de manera excluyente).

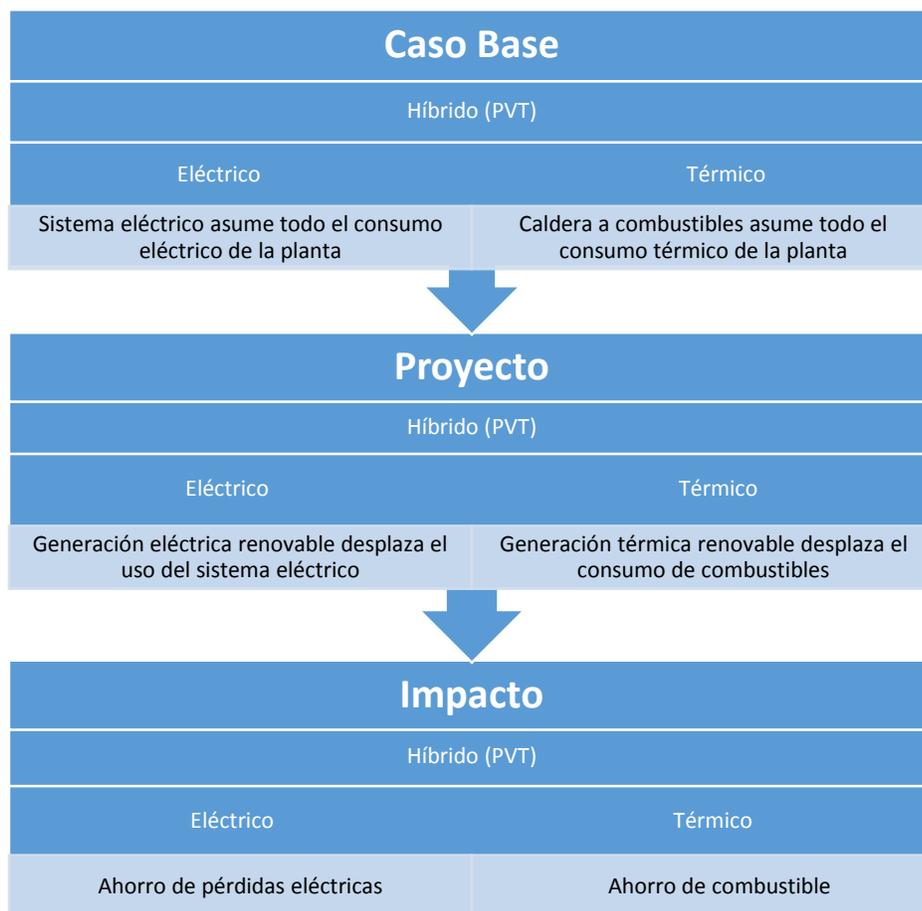


Figura 3-28: Diagrama de funcionamiento de la herramienta - Caso base e impacto de los proyectos.

Clases Principales de la Herramienta

Para describir el funcionamiento general de la herramienta, se explicará cómo se crea un proyecto de generación renovable. La creación de un proyecto involucra la interacción de las clases principales del programa. A pesar de que no son las únicas clases que actúan, si explican conceptual y estructuralmente el diseño de la herramienta.

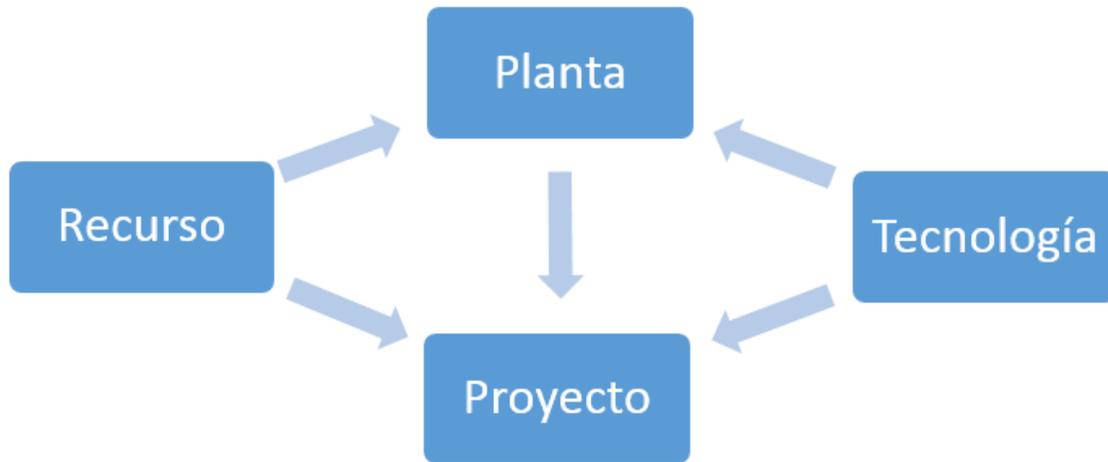


Figura 3-29: Proceso de creación de un proyecto.

En la Figura 3-29 se muestra un diagrama explicativo del proceso de creación de proyectos; cada “Proyecto” (Eléctrico o Térmico) está asociado a una “Planta”, un “Recurso” y una “Tecnología”. Para poder crear un “Proyecto” es necesario entonces disponer de un objeto de cada una de estas clases, y en particular se deben tener recursos y tecnologías del mismo tipo (eólico, solar, hidráulico), además de un recurso fósil asociado para proyectos térmicos. Por ejemplo, para un proyecto solar híbrido, se deben disponer de recursos solares, tecnología PVT (solar PV y solar térmica en una sola tecnología), y un recurso fósil que indique el tipo y precio de los combustibles con el que se va a comparar la generación térmica.

Todos los proyectos que se crean pertenecen a una determinada “Planta” y ésta contiene toda la información relevante para posteriormente configurarlos técnica y económicamente. En este sentido, la “Planta” actúa como elemento coordinador que gestiona la interacción entre las distintas clases de la herramienta. Efectivamente en la Figura 3-29 es posible apreciar cómo la “Planta” sirve de elemento vinculador entre un “Recurso”, “Tecnología” y “Proyecto”.

A continuación se explicarán las distintas clases estructurales que posee la herramienta:

Clase Planta

Clase Planta



- **Atributos para identificación:** Nombre, Tipo de Planta, Ubicación, División
- **Proyectos de generación asociados:** Eléctricos (Eólicos, Solares, Hidráulicos), Térmicos (Solares), Híbridos (Fotovoltaicos-Térmicos)
- **Datos económicos:** Precios (Energía, Potencia, Bono de Carbono), IPC, Tasa de Descuento
- **Datos de Consumo:** Perfiles de Consumo (Eléctricos y Térmicos)
- **Datos de Temperaturas:** Temperatura ambiente (Híbrido), Temperatura Entrada Fluido (Híbrido), Temperatura Objetivo Fluido (Híbrido)
- **Tecnologías de Generación:** Eléctricas (Eólicas, Solares, Hidráulicas), Térmicas (Solares), Híbridas (Fotovoltaicas-Térmicas)
- **Datos Financieros:** VAN, Payback, TIR, Inversión, Vida Útil
- **Recursos Asociados:** Eólicos, Solares, Hidráulicos, Fósiles
- **Datos Globales:** Perfiles de Generación (Eléctricos y Térmicos), Ingresos de Generación (Eléctricos y Térmicos),

Figura 3-30: Clase planta.

La clase Planta tiene distintos tipos de atributos: Están los datos que se ingresan por el usuario para la identificación de la planta, el tipo de planta, los consumos térmicos y/o eléctricos, los recursos renovables y fósiles asociados, ubicación, potencias máximas (térmicas y/o eléctricas), y temperaturas entrada y objetivo del fluido (proyecto híbrido PVT). A partir de los datos ingresados por el usuario, se generan automáticamente los proyectos de generación, las tecnologías (por defecto) que estos utilizan, y los datos de generación térmica y/o eléctrica. También se generan los datos económicos y financieros. De esta manera, es posible apreciar que el objeto Planta representa el elemento central de las clases estructurales y el que sirve de nexo entre los Recursos, Tecnologías y Proyectos.

Clase Recurso

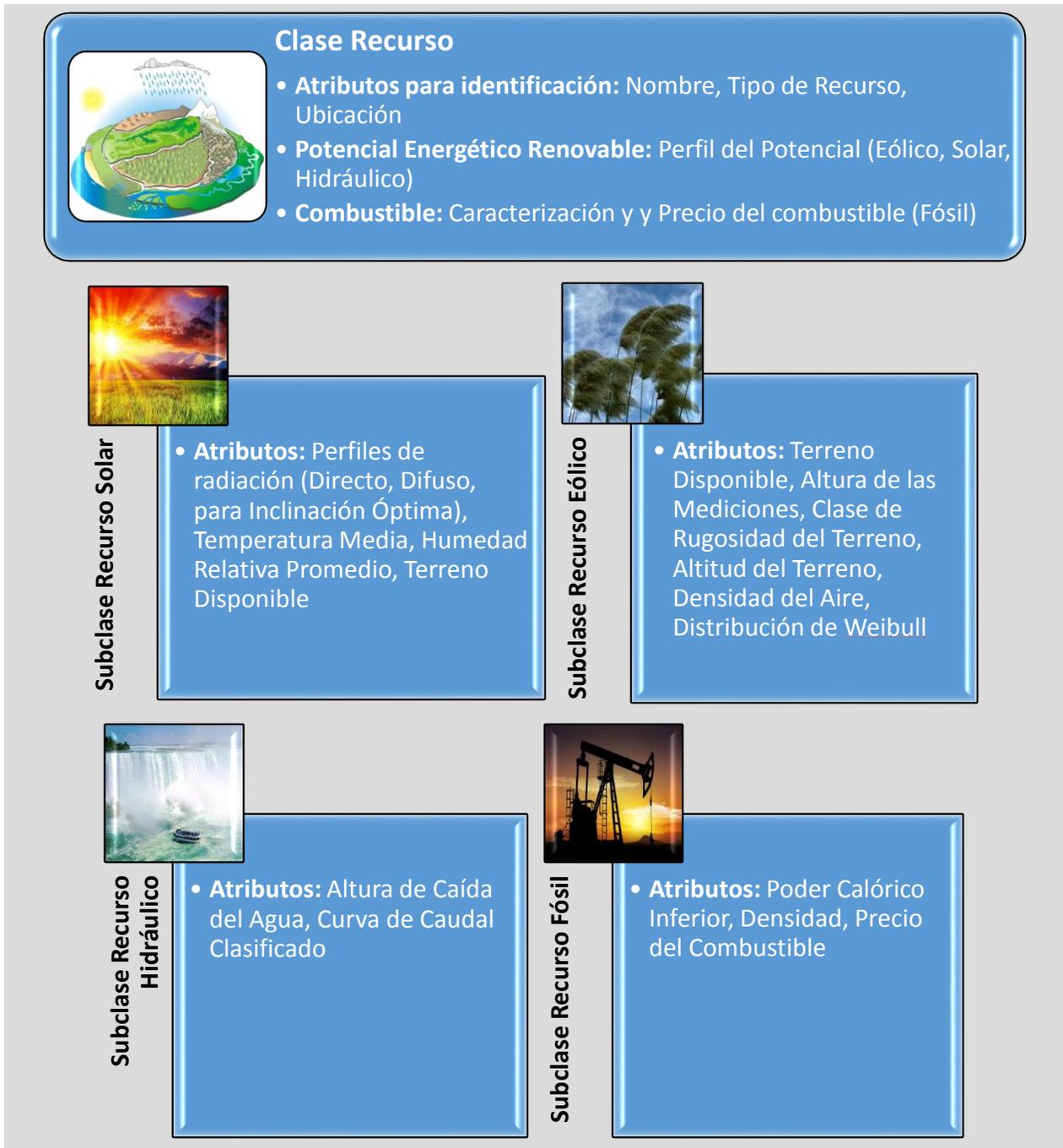


Figura 3-31: Clase recurso y sus subclases.

Para representar los recursos, se creó una clase denominada Recurso, a la que se le asignan atributos comunes a todos los recursos. Para cada tipo de recurso se crearon las subclases Recurso Solar, Recurso Eólico, Recurso Hidráulico y Recurso Fósil, las que incorporan las características de su superclase Recurso. La estructura jerárquica que acá se muestra es una de las características de la programación en Java y permite que las subclases hereden las características de sus superclases.

Clase Proyecto



Figura 3-32: Clase proyecto y sus subclases.

Se creó una clase Proyecto, la que contempla Proyectos Eléctricos, Térmicos e Híbridos. De esta manera se crearon las subclases Proyecto Eólico, Proyecto Fotovoltaico, Proyecto Hidráulico, Proyecto Termosolar y Proyecto Híbrido PVT.

Clase Tecnología

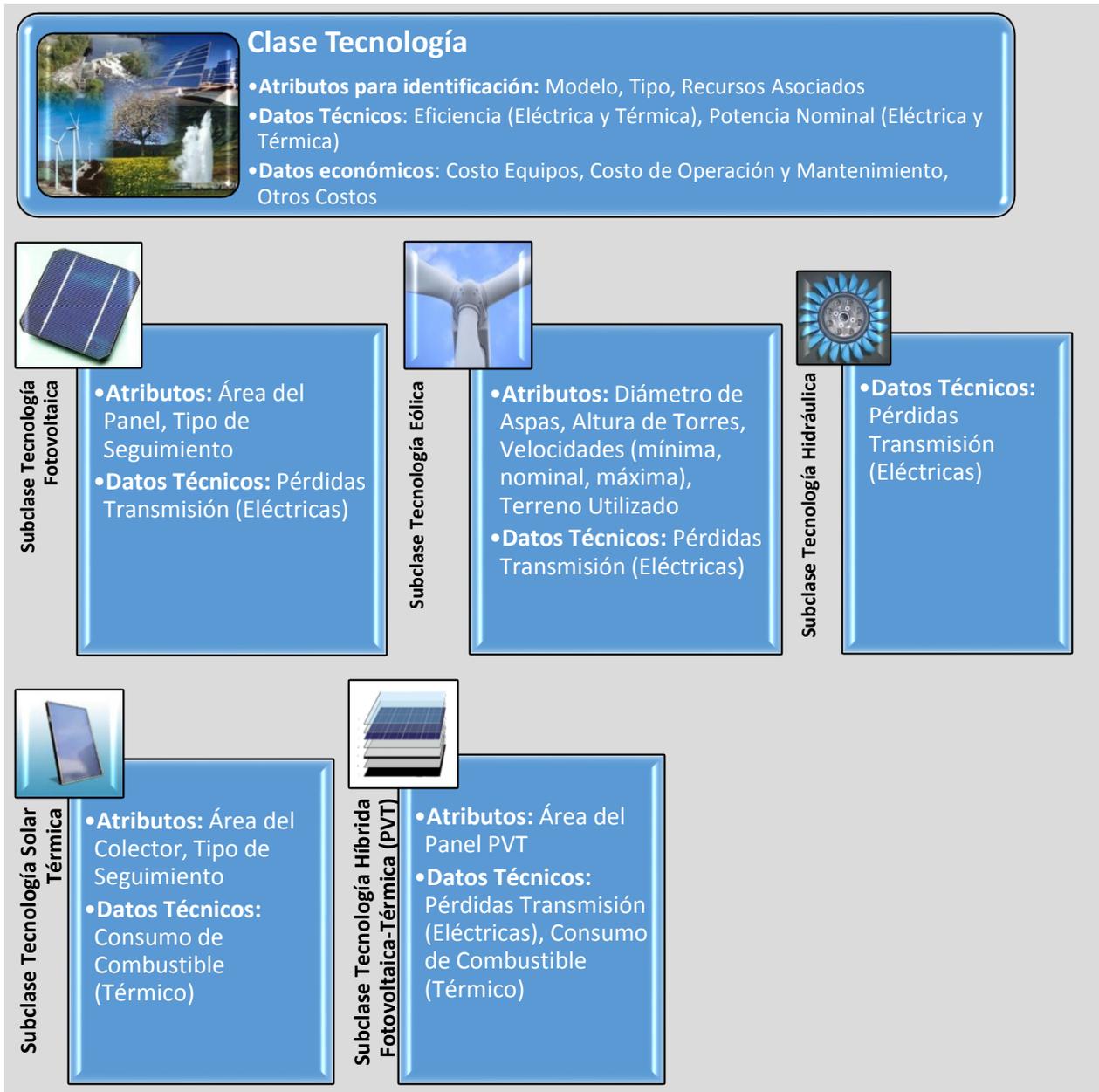


Figura 3-33: Clase tecnología y sus subclases.

Para representar las tecnologías, se creó la clase Tecnología. Las subclases que se consideraron para la clase Tecnología son: Tecnología Fotovoltaica (Eléctrica), Tecnología Eólica (Eléctrica), Tecnología Hidráulica (Eléctrica), Tecnología Solar Térmica (Térmica) y Tecnología PVT (Híbrida). Al igual que las clases anteriores, hay aspectos comunes a todas las tecnologías y otros particulares de cada una. Cabe destacar que dentro de las tecnologías térmicas se considera el consumo de combustibles, ya que a partir de las mismas se obtiene el equivalente al ahorro de combustibles.

3.5.6.4.- Modelación de la Generación PVT

A continuación se elabora un ejemplo de aplicación que permite calcular la energía térmica y eléctrica que es capaz de generar un sistema PVT. De esta manera, incorporando la tecnología PVT y utilizando un modelo, es posible determinar las eficiencias eléctricas y térmicas dependiendo del tipo de panel PV utilizado, a partir de la temperatura ambiente, de entrada y salida del fluido, área de apertura y radiación solar global. Esto permite calcular la energía térmica y eléctrica que se genera, y contrastar la energía térmica con un caso equivalente utilizando combustibles fósiles. El contraste con combustibles fósiles se realiza calculando el volumen de combustible necesario para alcanzar la misma energía térmica generada por el sistema PVT.

Así, el software primero que todo calculará la generación térmica (solo térmica o PVT según corresponda), y obtendrá su equivalente en volumen de combustible según el combustible que el usuario defina. A partir de este ahorro en volumen, se calcularán los ingresos percibidos por el reemplazo parcial o total del calentamiento usando combustibles.

Costo de la Energía Térmica – PVT

Para determinar la eficiencia térmica de un sistema PVT genérico, se define la eficiencia térmica en función de la radiación solar global (G), la temperatura de entrada del fluido (T_{in}) y la temperatura ambiente (T_a). La eficiencia eléctrica de un sistema PVT se determina como función de la temperatura de operación (T_{PVT}) [58].

Las eficiencias térmicas y eléctricas para las tecnologías de silicio policristalino y amorfo son las siguientes:

$$\begin{aligned} pc - Si : \eta_{th} &= 0.71 - 0.0904(\Delta T/G) \quad \eta_{el} = 0.1457 - 0.00094(T_{PV})_{eff} \\ a - Si : \eta_{th} &= 0.75 - 0.0883(\Delta T/G) \quad \eta_{el} = 0.0485 - 0.00011(T_{PV})_{eff} \end{aligned}$$

$$\Delta T = T_i - T_a$$

$$(T_{PV})_{eff} = T_{PV} + (T_{PV/T} - T_a)$$

Para esta última expresión, se utilizan las siguientes temperaturas de paneles fotovoltaicos (T_{PV}):

$$\begin{aligned} pc - Si : T_{PV} &= 30 + 0.0175(G - 300) + 1.14(T_a - 25) \\ a - Si : T_{PV} &= 30 + 0.0175(G - 150) + 1.14(T_a - 25) \end{aligned}$$

De esta manera, es posible determinar (T_{PVTeff}) aproximando $T_{PV/T}$ a la temperatura media del fluido a $\frac{T_{in}+T_{out}}{2}$, con lo que se obtiene la eficiencia eléctrica para ambos tipos de paneles PV.

Así, los datos de entrada necesarios para calcular las eficiencias eléctricas y térmicas son:

- Radiación solar global (G)
- Temperatura de entrada del fluido (T_{in})

- Temperatura de salida del fluido (T_{out}) (temperatura objetivo)
- Temperatura ambiente (T_a)

Las salidas que se obtienen en este ítem son las siguientes:

- Eficiencia térmica (η_{th})
- Eficiencia eléctrica (η_{el})

Con la información de las eficiencias es posible obtener la potencia térmica usable (y el calor multiplicando por el tiempo) generado mediante la siguiente ecuación:

$$Q_u = \eta_{th} \cdot A_{ap} \cdot G$$

También es posible obtener la potencia eléctrica (y energía eléctrica multiplicando por el tiempo) generada mediante la siguiente expresión:

$$P_u = \eta_{el} \cdot A_{ap} \cdot G$$

Así, los datos de entrada necesarios para calcular la energía generada por el colector PVT son:

- Área de apertura (A_{ap})
- Radiación solar global (G)

Las salidas que se obtienen en este ítem son las siguientes:

- Potencia térmica generada (Q_u)
- Potencia eléctrica generada (P_u)
- Energía térmica generada (E_{th})
- Energía eléctrica generada (E_{el})

Costo de la Energía Térmica – Caldera Diesel

Tabla 3-1: Precio de combustibles al por mayor - Semana 30/10 al 5/11. Fuente: CNE.

Precio combustibles al por mayor - Semana 30/10 al 5/11	
Diesel (Región Metropolitana)	591,5 (CLP\$/litro)
Gas Licuado de Petróleo (Concón)	267,5 (CLP\$/litro)
Gas Natural Licuado (Región Metropolitana, Metrogas)	341 (CLP\$/m3)

El poder calorífico de los combustibles nombrados anteriormente es:

Tabla 3-2: Poder calorífico combustibles más utilizados.

COMBUSTIBLE	Peso Específico (kg/dm ³)	Poder calorífico (kJ/kg)	
		Superior	Inferior
Combustible Diesel	0,845	45640	42700

COMBUSTIBLE	Poder calorífico a 0 °C y 760 mmHg	
	Superior (kJ/m ³)	Inferior (kJ/m ³)
Gas por cañería Santiago	--	18431
Gas licuado (Propano - Butano)	--	92131

Haciendo las conversiones respectivas se llega a los siguientes valores en kWh/litro:

$$PCI_{Diesel} = 10,02 \left[\frac{kWh}{litro} \right]$$

$$PCI_{GNL} = 5,12 \left[\frac{kWh}{m^3} \right]$$

Cabe destacar que PCI significa poder calorífico inferior, lo que equivale a decir que no se aprovecha la energía de condensación del agua. El poder calorífico inferior, la densidad y el precio del combustible se podrán acceder a través de la pestaña de recursos. Esto permite caracterizar un combustible, que no necesariamente esté en la base de datos, e incorporarlo a la base de datos para su uso posterior.

La energía térmica generada, suponiendo la eficiencia de la caldera, es la siguiente:

$$E_{térmica (caldera)} = \eta_{caldera} \cdot PCI_{combustible} \cdot volumen\ combustible$$

Así, por ejemplo, es posible determinar la cantidad de volumen necesario de combustible para generar 1 [kWh] térmico en una caldera con una eficiencia del 90% (para el software el cálculo se realizará con lo generado por la tecnología térmica o PVT). Así, se tiene lo siguiente para el Diesel:

$$E_{térmica (caldera Diesel)} = \eta_{caldera Diesel} \cdot PCI_{Diesel} \cdot litros Diesel$$

$$E_{térmica (caldera Diesel)} = 0,9 \cdot 10,02 \left[\frac{kWh}{litro} \right] \cdot litros Diesel = 1 kWh$$

$$\Rightarrow litros Diesel = \frac{1}{0,9 \cdot 10,02} = 0,1109 litros$$

Este mismo análisis puede realizarse para el GNL o GLP, con la siguiente expresión para la energía térmica:

$$E_{t\acute{e}rmica (caldera\ GNL)} = \eta_{caldera\ GNL} \cdot PCI_{GNL} \cdot m^3$$

Para efectos de la herramienta, se realizará el siguiente cálculo:

$$E_{generada\ termosolar} = E_{t\acute{e}rmica\ (caldera)} = \eta_{caldera} \cdot PCI_{combustible} \cdot volumen\ combustible$$

$$volumen\ combustible = \frac{E_{generada\ termosolar}}{\eta_{caldera} \cdot PCI_{combustible}}$$

Siguiendo las ecuaciones recientemente planteadas, es posible calcular el volumen de combustible, y multiplicado por el precio de los combustibles, el ahorro de combustibles derivado del proyecto termosolar. Esto permitirá, teniendo un caso base de demanda horaria térmica para un proceso o agua caliente sanitaria, calcular la cantidad de volumen necesario de combustible que se está ahorrando con la operación térmica o PVT del nuevo proyecto. Cabe destacar que el programa considera una evaluación horaria de la generación térmica durante un año, por lo que el volumen de combustible también se calcula horariamente durante un año.

Los datos de entrada necesarios son los siguientes:

- Energía termosolar generada (solo térmica o PVT).
- Eficiencia de la caldera ($\eta_{caldera}$)
- Poder calórico inferior (PCI)
- Precio del combustible

Con esto es posible obtener como salidas:

- Cantidad de litros de combustible utilizados.
- Valorización monetaria del ahorro de combustibles.

4.- CASOS DE ESTUDIO

La última etapa consiste en evaluar el valor práctico de la herramienta computacional mediante la implementación de un caso de estudio. Esta etapa se realizará con datos estadísticos y de operación de una central termosolar que permitirán establecer el beneficio económico de incorporar una ERNC térmica a un proceso, y un análisis de escenarios posibles que considere la variación de factores internos y externos que afecten a la empresa.

Se dispone de información de la planta termosolar Pampa Elvira Solar, propiedad de Codelco y perteneciente a la división Gabriela Mistral, y construida por el consorcio chileno-danés Energía Llama Sunmark. El proyecto tuvo una inversión aproximada de US\$ 26 millones y consiste en 2.928 paneles de 15 m² cada uno, equivalente a un área de 43.920 m² de paneles termosolares, distribuidos en una superficie total de 90.000 m². Su producción anual es de 54 GWht, con lo que se reduce la emisión en aproximadamente 15.000 toneladas de CO₂ al año. Se estima que la planta termosolar permite ahorrar aproximadamente US\$ 7 millones al año, reduciendo en un 85% el combustible fósil que se utiliza en la actualidad [35], [59].

Pampa Elvira Solar se construyó bajo un contrato de suministro de energía térmica a diez años con División Gabriela Mistral luego de un riguroso proceso de licitación internacional. Para este proyecto, el modelo de negocios de Codelco y Energía Llama–Sunmark consiste en la compra venta de calor a una tarifa estable, lo que permite a Codelco proyectar en el largo plazo sus costos de energía a un precio determinado y evita los efectos de las fluctuaciones en el precio de los combustibles [59].

Pampa Elvira suministra energía térmica para los procesos de electro-obtención de la División Gabriela Mistral de Codelco, suministrando el 100% de los requerimientos térmicos del proceso debido a que cuenta con calentadores de respaldo. Desde el punto de vista energético, el proceso de electro-obtención es intensivo en el uso de combustible diésel para el calentamiento del electrolito, que necesita de una temperatura de 50°C, aproximadamente. Para el proceso de calentamiento del electrolito, antes de la inauguración de la planta termosolar, el consumo anual de Diesel rondaba los 8.000 m³ [60], [61].

Datos técnicos:

- Área de colectores: 43.920 m²
- Área de cada panel: 15 m²
- Cantidad de paneles: 2.928
- Producción Anual: 54 GWht.
- Potencia máxima de cada panel: 12,29 kWt
- Potencia máxima de la planta: 36 MWt
- Reemplazo combustible Diesel: 8.000 m³, equivalente al 85% del consumo total de Diesel antes del proyecto.
- Almacenamiento calor: 4.300 m³
- Reducción CO₂e: 15.000 ton/año

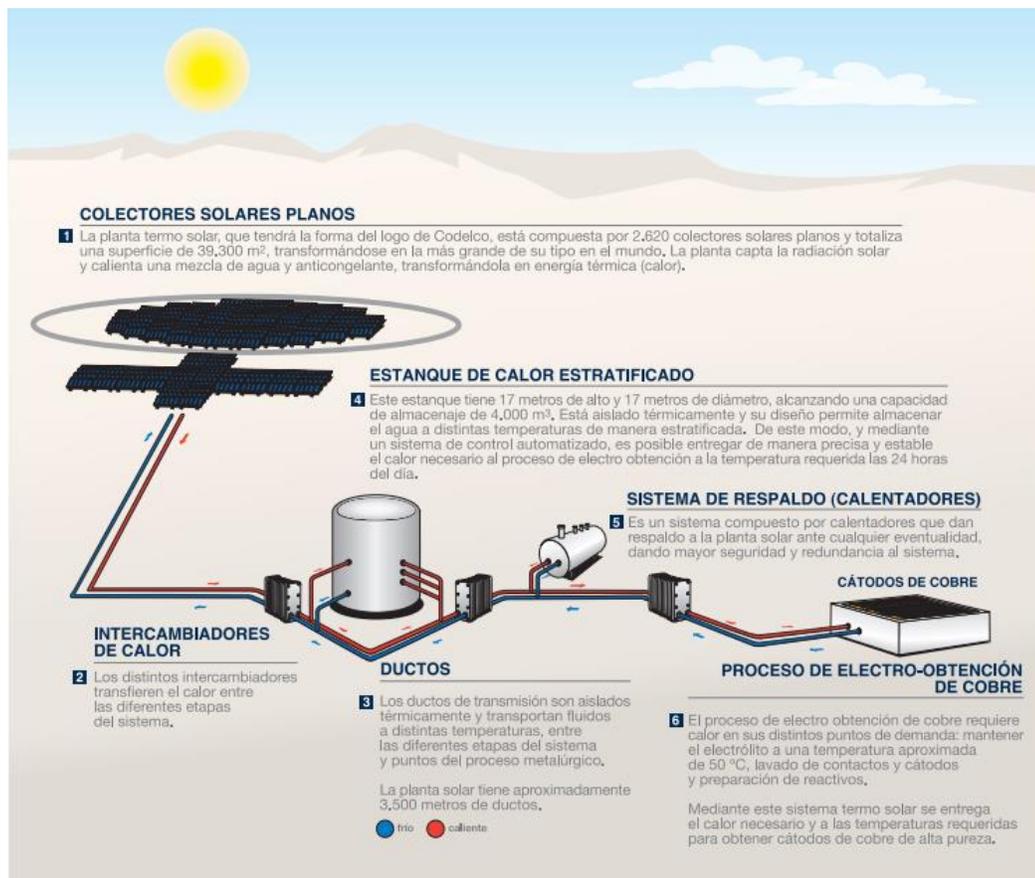


Figura 4-1: Diagrama planta termosolar Pampa Elvira de Codelco¹.

Con estos datos de referencia, se procederá a realizar dos casos de estudio: un caso de estudio netamente térmico que simule la planta termosolar Pampa Elvira, que se valide con los datos técnicos-económicos disponibles sobre la planta termosolar y considere los recursos solares del lugar, el precio de los combustibles actualizado y el consumo térmico de la planta; y otro donde se utilice la tecnología híbrida fotovoltaica-térmica, que considere los recursos solares del lugar, el precio de los combustibles actualizado, el consumo térmico y eléctrico de la planta, la temperatura ambiente, temperatura de entrada y salida del fluido, y que con estos datos realice un análisis técnico-económico de un proyecto PVT a partir del modelo presentado en Costo de la Energía Térmica – PVT.

La información con la que se cuenta tiene relación con la estación meteorológica Gaby, cuyos datos de interés son el recurso solar disponible en la zona (radiación solar promedio horaria del año 2010) y la temperatura ambiente (temperatura promedio horaria del año 2010). Adicionalmente, se tiene información de las temperaturas de los flujos que permiten el calentamiento del electrolito a alrededor de 50 °C, y el precio aproximado del Diesel (a precio mayorista, puesto en Concón). Dado que se cuenta con más información de la necesaria para el programa, el procedimiento consiste en obtener el promedio de ese período e ingresar este promedio a la herramienta

¹ Hubo una modificación al proyecto y se instalaron alrededor de 300 paneles adicionales a los que se indican en el diagrama.

computacional. Por ejemplo, se dispone de información horaria durante un año del recurso solar en Gaby, sin embargo el programa recibe un promedio horario mensual, lo que se traduce en 288 entradas anuales. De esta manera, el usuario debe calcular el promedio para un mes y hora determinada (por ejemplo el promedio para todos los registros de las 13.00 horas durante Enero), que es lo que se ingresa al programa.

4.1.- CASO DE ESTUDIO TÉRMICO

La planta termosolar Pampa Elvira se ubica en la comuna de Sierra Gorda, en la Provincia de Antofagasta de la región de Antofagasta. Su latitud es $23^{\circ} 31' 0,12''$ y su longitud $68^{\circ} 55' 0,12''$ [62]. A continuación se realizará un caso de estudio denominado Proyecto Pampa Elvira Solar 2010, que simula la evaluación técnico-económica de la planta antes de su instalación en la división Gabriela Mistral. Para efectos del caso de estudio, el calentamiento del electrolito se realiza solo con calderas Diesel (caso base).

4.1.1.- Agregar Recursos

En esta sección se explicará cómo se ingresaron los recursos solares y fósiles del caso de estudio térmico Pampa Elvira.

Para ingresar el recurso solar, primero que todo se debe seleccionar la pestaña Recursos y elegir en Tipo de Recurso la opción Solar, tal y como se aprecia en la Figura 4-2. Luego, se debe indicar el Nombre del Recurso (en este caso PampaElviraSolar2010), Terreno Disponible, Temperatura media y humedad relativa. En la esquina inferior izquierda, se debe indicar la Irradiación Solar en W/m^2 . Finalmente, en la esquina inferior derecha, se debe indicar la latitud y longitud de la estación meteorológica, y concluir agregando el Recurso a la base de datos.

Cabe destacar que la temperatura media, humedad relativa, e irradiación solar fueron extraídas del documento “Meteorología Gaby 2010”.

Para ingresar el recurso fósil, se debe seleccionar la pestaña Recursos y elegir en Tipo de Recurso la opción Fósil, tal y como se aprecia en la Figura 4-3. Luego, se debe indicar el Nombre del Recurso (en este caso PrecioDiesel2014), Poder Calórico Inferior en kcal/kg y la Densidad en kg/m^3 . Cabe destacar que estas unidades se eligieron ya que son las que se utilizan en la página del Ministerio de Energía para identificar a los combustibles más utilizados en Chile [63].

Cabe destacar que los precios del Diesel fueron extraídos de la tabla de precios de paridad que la Empresa Nacional del Petróleo calcula semana a semana, y corresponden al precio aproximado del Diesel (a precio mayorista, puesto en Concón), los que incluyen costos de logística de transporte y almacenamiento [64].

Inicio Recursos Plantas Proyectos Individuales Resumen Proyectos Individuales

AGREGAR RECURSOS

Tipo de Recurso: Solar

Nombre del Recurso: PampaElviraSolar2010

Terreno Disponible [ha]: 9

Temperatura media [°C]: 13

Húmedad Relativa [%]: 25

Irradiación Solar Horizontal [W/m²] (Hora Solar)

HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	4
07:00	62	21	7	2	1	0	0	1	13	69	112	107
08:00	253	195	156	100	61	32	34	73	168	279	336	296
09:00	496	415	369	287	250	201	210	275	385	506	567	528
10:00	752	660	581	467	437	380	418	501	611	735	806	769
11:00	903	814	745	629	596	532	560	646	777	883	943	908
12:00	1008	935	883	737	704	638	667	767	901	1001	1037	996
13:00	1049	1018	927	796	753	681	721	822	950	1053	1074	1050
14:00	1046	997	924	761	729	660	718	801	927	1017	1043	1034
15:00	969	932	845	675	636	576	643	724	829	911	931	945
16:00	829	779	698	512	495	446	510	587	664	733	757	791
17:00	649	566	503	353	309	281	337	402	462	517	544	583
18:00	411	358	287	167	100	88	135	195	236	278	316	360
19:00	178	141	75	14	1	1	2	12	28	50	97	153
20:00	17	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ubicación
 Latitud: 23 ° 31 ' 0.12 " S
 Longitud: 68 ° 55 ' 0.12 " O

Agregar Recurso a la base de datos:

Agregar

Figura 4-2: Ingreso del recurso solar – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.

Inicio Recursos Plantas Proyectos Individuales Resúmen Proyectos Individuales

AGREGAR RECURSOS

Tipo de Recurso: Fósil

Nombre del Recurso: PrecioDiesel2014

Poder Calórico Inferior [kcal/kg]: 10273

Densidad [kg/m3]: 840

Precio del Combustible [US\$/litro]												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precio	0.81	0.84	0.81	0.82	0.82	0.82	0.8	0.79	0.76	0.7	0.67	0.53

Ubicación
 Latitud: 23 ° 31 ' 0.12 " S
 Longitud: 68 ° 55 ' 0.12 " O

Agregar Recurso a la base de datos:
 Agregar

Figura 4-3: Ingreso del recurso fósil – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.

Con los recursos ya ingresados, se procederá a mostrar la curva de irradiación solar disponible en Gaby, a modo de perfil diario mensual, tal y como se aprecia en la Figura 4-4. Acá también es posible ver el terreno disponible, temperatura media, humedad relativa y ubicación, las que se han guardado correctamente en la base de datos. Toda la información ingresada por el usuario queda disponible para sesiones posteriores.

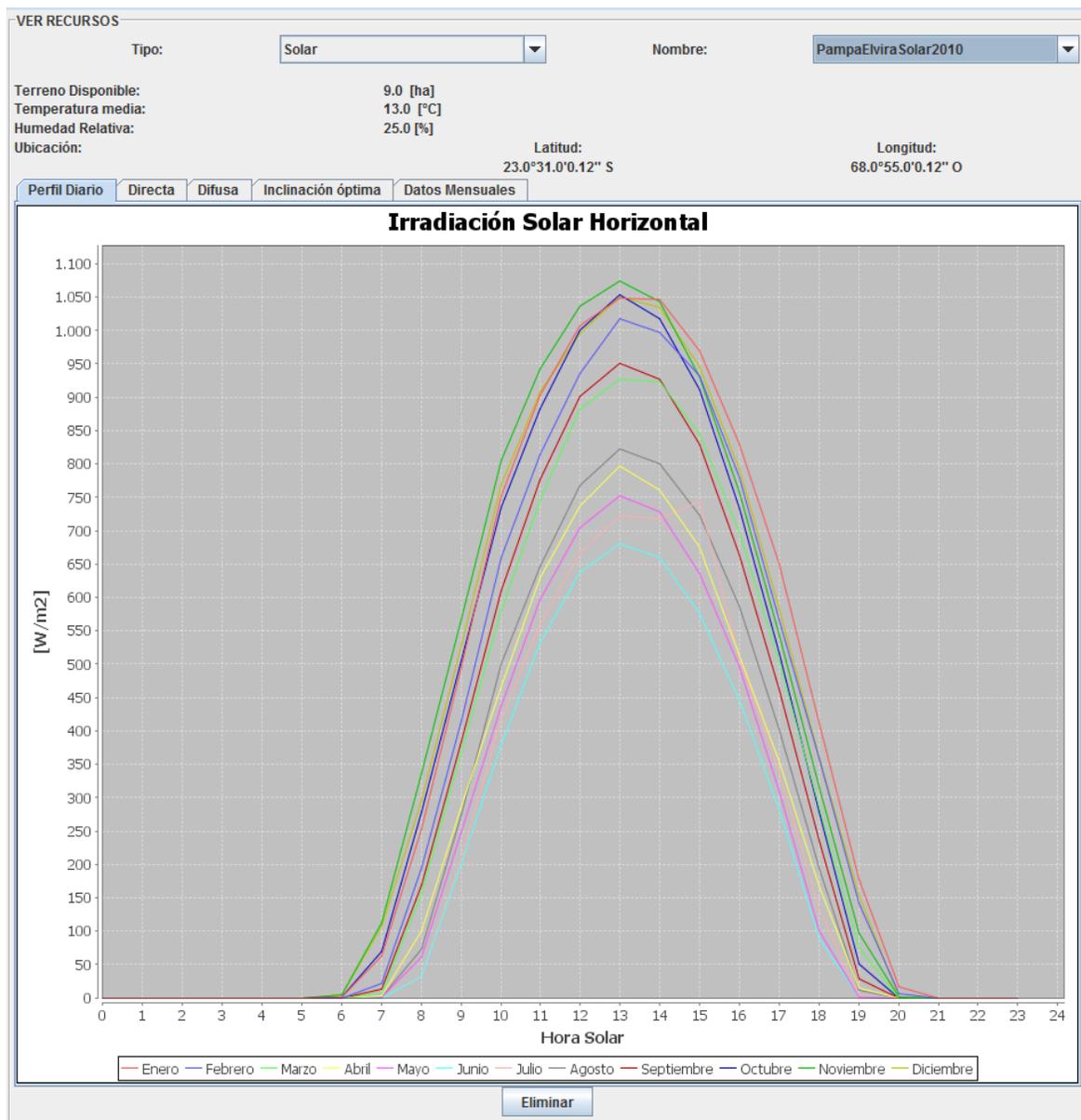


Figura 4-4: Perfil diario de irradiación solar horizontal – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.

4.1.2.- Agregar Consumo (Planta)

A continuación se agregó el consumo térmico correspondiente a la planta. La potencia térmica necesaria para el calentamiento del electrolito es de 19 MWt y de 3 MWt para el agua de procesos, por lo que se considerará la suma de este valor en el caso de estudio de Pampa Elvira [65]. La eficiencia de la caldera Diesel, considerada como caso base para este proyecto, se considerará de un 90% [66].

Para ingresar una planta, primero que todo se debe seleccionar la pestaña Planta y elegir en Tipo de Planta solo Térmica, tal y como se aprecia en la Figura 4-5. Luego, se debe indicar el nombre de la planta (en este caso PlacasPlanasGaby), asociar los Recursos Solares (PampaElviraSolar2010) y Fósiles (PrecioDiesel2014). A continuación se debe indicar la latitud y

longitud de la planta. En la esquina inferior izquierda se debe ingresar el consumo térmico horario mensual (288 registros) y a la derecha la Potencia Máxima MWt Térmica de la planta. Para concluir se debe agregar la Planta a la base de datos. En el momento en que la Planta se guarda de manera exitosa en la base de datos, se crea un Proyecto Individual al que es posible acceder en la pestaña Proyectos Individuales, tal y como se aprecia en la Figura 4-6.

Inicio Recursos **Plantas** Proyectos Individuales Resumen Proyectos Individuales

AGREGAR PLANTA

Nombre:

Tipo de Planta: Eléctrica Térmica

Recursos Renovables asociados:

Recursos Eólicos:

Recursos Solares:

Recursos Hidráulicos:

Recursos Fósiles:

Ubicación:

Latitud: ° ' " S

Longitud: ° ' " O

Consumo Térmico Temperatura Ambiente

Consumo Eléctrico

Consumo Térmico [MWt]												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
01:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
02:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
03:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
04:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
05:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
06:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
07:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
08:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
09:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
10:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
11:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
12:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
13:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
14:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
15:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
16:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
17:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
18:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
19:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
20:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
21:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
22:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
23:00	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22

Potencia Máxima [MW] (Eléctrica)

Potencia Máxima [MWt] (Térmica)

Temperatura Entrada Fluido:

Temperatura Objetivo Fluido:

Agregar a una División:

Existente Nueva

Agregar

Figura 4-5: Consumo térmico – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.

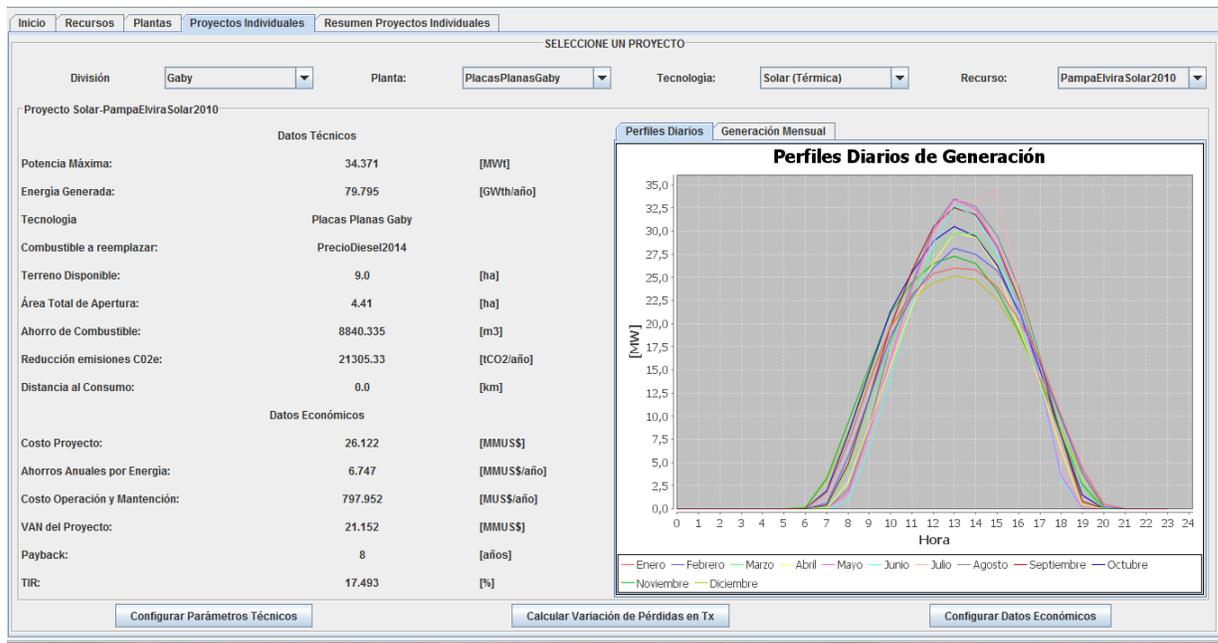


Figura 4-6: Análisis técnico-económico y perfiles de generación - Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.

En el Proyecto Individual es posible revisar todos los datos técnico-económicos. El botón Configurar Parámetros Técnicos permite realizar ajustes relacionados a las tecnologías disponibles en la base de datos y en el tipo de combustible a reemplazar, como se aprecia en la Figura 4-7 (a pesar de que se asoció un recurso fósil al proyecto, es posible cambiarlo en esta ventana). Así, por ejemplo, si surgió un nuevo modelo de placa plana con mayor eficiencia, el usuario podrá ingresar este nuevo modelo en la base de datos. También permite realizar un análisis de sensibilidad con el Costo de la Tecnología en US\$/kW, el Costo de Operación y Mantenimiento US\$/MWh y el Uso del Terreno en %. Apretando el botón Configurar Tecnología, se actualizan los valores técnicos y económicos en el Proyecto Individual.

La eficiencia de los colectores solares se fijó en un 72% debido a colectores solares similares con eficiencias cercanas [67]. Igualmente, tomando en cuenta una radiación de 1000 W/m² en el lugar y una generación térmica por panel de aproximadamente 12,29 kWt con un área de 15 m² cada uno, se obtiene una eficiencia cercana al 82%, sin embargo se prefirió ser más conservador y considerar la eficiencia de un panel comercial.

Sobre el Costo de la Tecnología, se eligió un precio que represente la inversión de US\$ 26 millones que realizó el consorcio Energía Llaima-Sunmark. De esta manera se dividieron los US\$ 26 millones en los 2.928 paneles, con lo que considerando la potencia máxima térmica generada de 34,4 MWt, se obtuvo un precio aproximado de 760 US\$/kW:

$$\text{Costo} = \frac{\text{PotMax} \cdot \text{Costo Tecnología} \cdot 1000}{1000000} = \frac{34,371 \cdot 760 \cdot 1000}{1000000} = \text{MMUS\$ } 26.122$$

Esto, por cierto, considera que la inversión es realizada solo en los paneles, obviando intercambiadores de calor, ductos y sistemas de respaldo. Por tanto, los 760 US\$/kW incorporan también el costo asociado a estas inversiones.

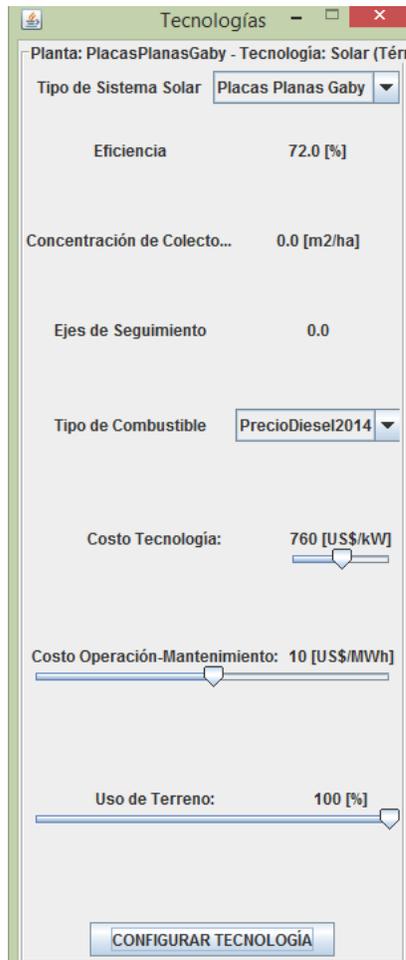


Figura 4-7: Botón configurar parámetros técnicos – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.

4.1.3.- Análisis y Validación de Resultados

La intención de esta sección es analizar y comparar los resultados obtenidos en el caso de estudio Proyecto Pampa Elvira Solar 2010 con los antecedentes reales que se manejan de la planta. En la Figura 4-8 siguiente es posible apreciar el análisis técnico-económico que la herramienta arrojó para el presente caso de estudio. A continuación se realizará un análisis de cada uno de estos resultados:

Proyecto Solar-PampaElviraSolar2010		
Datos Técnicos		
Potencia Máxima:	34.371	[MWt]
Energía Generada:	79.795	[GWth/año]
Tecnología	Placas Planas Gaby	
Combustible a reemplazar:	PrecioDiesel2014	
Terreno Disponible:	9.0	[ha]
Área Total de Apertura:	4.41	[ha]
Ahorro de Combustible:	8840.335	[m3]
Reducción emisiones CO2e:	21305.33	[tCO2/año]
Distancia al Consumo:	0.0	[km]
Datos Económicos		
Costo Proyecto:	26.122	[MMUS\$]
Ahorros Anuales por Energía:	6.747	[MMUS\$/año]
Costo Operación y Mantenición:	797.952	[MUS\$/año]
VAN del Proyecto:	21.152	[MMUS\$]
Payback:	8	[años]
TIR:	17.493	[%]

Figura 4-8: Análisis técnico-económico – Proyecto Pampa Elvira Solar 2010.

4.1.3.1.- Análisis Técnico

La potencia máxima calculada por la herramienta computacional es de 34,37 MWt. Para este cálculo se considera la generación horaria de todo el año y, dependiendo principalmente de la irradiación solar máxima registrada (fija óptima en este caso), se guarda la potencia máxima calculada para toda la planta termosolar. Considerando que el cálculo de la potencia máxima de cada panel es de aproximadamente 12,29 kWt ², para los 2.928 paneles el máximo ronda los 36 MWt, por lo que el resultado es razonable y representa el 96% del máximo que se maneja en los antecedentes.

Con respecto a la energía generada calculada por la herramienta computacional, es de 79,8 GWht durante el año. La estimación inicial que se maneja en los antecedentes es de 54 GWht, por lo que la energía calculada representa un 48% adicional si se compara con esta cantidad de energía. Esto se debe a que la eficiencia térmica del 72% se considera constante para todo el año (existen variaciones de la eficiencia relacionadas con la temperatura). Otro factor que puede afectar es que

² Este cálculo proviene de los antecedentes de la planta termosolar Pampa Elvira, dada su potencia máxima total conocida: 32,2 MWt / 2.620 paneles = 12,29 kWt [61].

la radiación solar real (medida por la estación meteorológica) sea mejor que la que se había proyectado al inicio del proyecto y que el funcionamiento de la planta, para el caso de la herramienta computacional, se considera para los 365 días del año.

Con respecto a la tecnología, se ingresó directamente en la base de datos un nuevo colector solar de tipo placa plana de 15 m² y una eficiencia del 72%, considerando directamente los antecedentes que se manejaban de la planta termosolar.

El combustible a reemplazar indica la asociación que el proyecto tiene con el recurso fósil y corresponde al precio del Diesel promedio mensual durante el 2014. Este es el precio con el que se valoriza el ahorro de combustibles.

Con respecto al terreno disponible, en los antecedentes se señala que el total disponible es de 90.000 m², sin embargo el uso efectivo de los colectores es de aproximadamente un 49% del total. Por lo tanto, se utilizó este porcentaje para calcular el área efectiva de los colectores de placa plana, cálculo que equivale a 44.100 m².

El ahorro de combustibles fue calculado a partir de la generación térmica anual y corresponde a 8.840 m³. Este resultado es cercano a los 8.000 m³ que contemplaba el proyecto y equivale a aproximadamente un 11% adicional a este valor. Asociado a este resultado y tomando en cuenta el factor de emisión del Diesel [63], la reducción de emisiones equivale a 21.305 ton CO₂/año. Los antecedentes indican que esta reducción es de aproximadamente 15.000 ton CO₂/año, lo que significa un 42% más de reducción de emisiones. Esto se debe a que el factor de emisión que se utilizó en los antecedentes es menor al que se presenta en la página del Ministerio de Energía, siendo el de los antecedentes 1.875 kg CO₂/m³ y el utilizado en la herramienta de 2.676 kg CO₂/m³.

4.1.3.2.- Análisis Económico

Es posible apreciar que el costo del proyecto es de US\$ 26,12 millones, muy cercano a los US\$ 26 millones de inversión considerados en los antecedentes. Esto se debe a que se ajustó el precio de la tecnología para que el valor de la inversión fuera cercano al realizado por Energía Llama-Sunmark.

Los ahorros anuales por energía, valorizados al precio del Diesel del año 2014, ascienden a US\$ 6,75 millones, valor muy cercano a los US\$ 7 millones que se muestran en los antecedentes. La diferencia radica principalmente en la diferencia del precio del Diesel, que en el año 2014 tuvo una baja sostenida en comparación a años anteriores.

Los costos de operación y mantenimiento se consideraron en 10 US\$/MWh. Datos de referencia fueron extraídos de la caracterización de una planta termosolar de colectores parabólicos, la que posee costos entre 10 y 14 US\$/MWh según su potencia. A pesar de que esta planta es una planta termosolar, requiere menos mantenimiento que una de colectores parabólicos, por lo que se consideró su valor más bajo [68].

El VAN del proyecto es de US\$ 21,15 millones, el payback de 8 años y la TIR de 17,49 %. Esto nos indica que, primero que todo, el proyecto es rentable y se debe realizar desde el punto de vista financiero ($VAN > 0$ y $TIR > 10\%$). Con respecto al período de recuperación, el contrato de largo plazo entre Energía Llaima-Sunmark y Codelco es de 10 años, por lo que la empresa inversora recupera su dinero en 8 años y obtiene US\$ 14 millones de beneficio antes de que termine su contrato con Codelco.

4.2.- CASO DE ESTUDIO HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-TÉRMICO

La planta termosolar Pampa Elvira se ubica en la comuna de Sierra Gorda, en la Provincia de Antofagasta de la región de Antofagasta. Su latitud es $23^{\circ} 31' 0,12''$ y su longitud $68^{\circ} 55' 0,12''$ [62]. A continuación se realizará un caso de estudio denominado Proyecto PVT Gaby, que simula la evaluación técnico-económica de una planta con tecnología híbrida fotovoltaica-térmica en la división Gabriela Mistral. Para efectos del caso de estudio, el calentamiento del electrolito se realiza solo con calderas Diesel (caso base) y este caso de estudio viene a reemplazar parcialmente estas calderas.

4.2.1.- Agregar Recursos

En esta sección se explicará cómo se ingresaron los recursos solares y fósiles del caso de estudio PVT Gaby. Cabe destacar que el modelo, en ese caso, utiliza la radiación global, por lo que el programa calcula esta radiación como la suma entre la radiación directa y difusa.

Al igual que el CASO DE ESTUDIO TÉRMICO anterior, se utiliza como recurso solar la radiación promedio obtenida de la estación meteorológica Gaby (PampaElviraSolar2010). Cabe destacar que la temperatura media, humedad relativa, e irradiación solar fueron extraídas del documento “Meteorología Gaby 2010”.

También se utilizará el mismo recurso fósil que el CASO DE ESTUDIO TÉRMICO, correspondiente al tipo Diesel y con sus precios promedio mensuales del año 2014. Cabe destacar que los precios del Diesel fueron extraídos de la tabla de precios de paridad que la Empresa Nacional del Petróleo calcula semana a semana.

4.2.2.- Agregar Consumo (Planta)

A continuación se agregó el consumo térmico y eléctrico correspondiente a la planta. La potencia térmica necesaria para el calentamiento del electrolito es de 19 MWt y de 3 MWt para el agua de procesos, por lo que se considerará la suma de este valor en el caso de estudio de Pampa Elvira [65]. La eficiencia de la caldera Diesel, considerada como caso base para este proyecto, se considerará de un 90% [66]. Por el momento no se definirá una potencia máxima eléctrica ni un consumo eléctrico ya que la generación eléctrica es netamente función de lo que se genere térmicamente (se diseña el sistema para suplir un consumo térmico y se obtiene como “subproducto” la energía eléctrica).

Para ingresar una planta, primero que todo se debe seleccionar la pestaña Planta y elegir en Tipo de Planta Eléctrica y Térmica, tal y como se aprecia en la Figura 4-9. Luego, se debe indicar el nombre de la planta (en este caso PVTGaby), asociar los Recursos Solares (PampaElviraSolar2010) y Fósiles (PrecioDiesel2014). A continuación se debe indicar la latitud y longitud de la planta. En la esquina inferior izquierda se debe ingresar el consumo térmico horario mensual, temperatura ambiente y consumo eléctrico (288 registros cada uno). A la derecha se debe indicar la Potencia Máxima Eléctrica (MW) y Térmica (MWt), y la Temperatura de Entrada y Objetivo del Fluido, en este caso el electrolito que alimenta las celdas de Electro-Obtención (EW). Para concluir se debe agregar la Planta a la base de datos. En el momento en que la Planta se guarda de manera exitosa en la base de datos, se crea un Proyecto Individual al que es posible acceder en la pestaña Proyectos Individuales, tal y como se aprecia en la Figura 4-10.

Con respecto a la temperatura ambiente, se disponía de información horaria durante un año extraída del documento “Meteorología Gaby 2010”, y que corresponde a los datos medidos por la estación meteorológica Gaby. El método a seguir es análogo al utilizado con la radiación global y consiste en calcular el promedio para un mes y hora determinada (por ejemplo el promedio para todos los registros de las 14.00 horas durante Abril), que es lo que se ingresa al programa.

Con respecto a la temperatura de entrada y salida del fluido, el sistema de Electro-Obtención (EW) se compone de una serie de flujos e intercambiadores de calor. El sistema PVT se encargará de calentar la nave de EW desde el estanque de electrolito rico (promedio de 27,2 °C) hasta la alimentación de las celdas de EW, las que necesitan de una temperatura de entrada de 49 °C. Se supone que solo un tipo de fluido pasará por el sistema PVT: el electrolito pasa directamente por los colectores. De esta manera el sistema termosolar calienta agua y mediante intercambiadores de calor llega al electrolito que alimenta las celdas EW.

Inicio Recursos Plantas Proyectos Individuales Resumen Proyectos Individuales

AGREGAR PLANTA

Nombre: PVTGaby

Tipo de Planta: Eléctrica Térmica

Recursos Renovables asociados:

Recursos Eólicos: Chagres
CurvaPotencia
VientoEP3

Recursos Solares: PampaElviraSolar2010
Pucon
Santiago

Recursos Hidráulicos: Lo Ermita

Recursos Fósiles: Diesel test 2
PrecioDiesel2014
test 3

Ubicación:

Latitud: 23 ° 31 ' 0.12 " S

Longitud: 68 ° 55 ' 0.12 " O

Consumo Eléctrico		Consumo Térmico		Temperatura Ambiente											
Temperatura Ambiente [°C]															
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic			
00:00	13.24	14.18	13	10.54	7.57	6.46	4.1	7.23	7.35	8.47	9.3	10.94	4		
01:00	12.16	13.42	11.36	9.4	7.11	5.44	3.38	6.01	6.16	6.96	7.27	9.5			
02:00	11.47	12.65	10.47	8.64	6.75	5.2	2.75	5.33	5.67	6.2	6.43	8.77			
03:00	10.54	12.03	10	7.91	6.1	4.99	2.13	4.55	4.99	5.49	5.8	7.94			
04:00	9.74	11.44	8.95	7.58	5.73	4.65	1.88	4.16	4.21	4.66	5.17	7			
05:00	8.92	10.78	7.98	7.47	5.53	4.53	1.58	3.91	3.58	4.31	4.42	6.31			
06:00	8.2	10.36	7.22	6.94	5.54	4.1	1.48	3.64	3.5	3.84	3.96	5.63	22		
07:00	8.3	9.89	8.21	6.61	5.57	3.97	1.3	3.98	3.43	4.63	5.4	6.53			
08:00	11.4	11.94	8.59	7.69	6.1	4.2	2	4.92	5.93	8.74	10.25	10.73			
09:00	16.65	16.81	14.32	12.45	9.4	6.9	5.16	9.25	11.26	14	15.15	15.4	27.2		
10:00	18.89	19.5	18.93	17.36	13.05	12.1	10.35	15.1	15.96	16.72	17.03	17.2			
11:00	20.4	20.9	20.38	18.98	15.01	14.98	12.84	16.86	17.6	18.29	18.82	18.65			
12:00	22.3	22.81	22.58	20.73	16.77	16.83	14.63	18.71	19.03	19.73	20.45	20.54			
13:00	23.88	24.39	24.22	22.25	17.98	17.97	16.02	20.05	20.16	20.7	21.58	21.89			
14:00	24.79	25.23	25.11	22.93	18.66	18.42	16.64	20.67	20.78	21.26	22.19	22.82			
15:00	25.15	25.5	25.36	23.1	18.66	18.51	16.69	20.91	20.89	21.28	22.27	23.1			
16:00	24.86	25.19	25	22.68	18.41	18.14	16.33	20.62	20.56	20.95	21.74	22.86			
17:00	24.05	24.37	24.02	21.73	17.64	17.39	15.61	19.95	19.81	20.04	20.55	21.81			
18:00	22.21	22.9	22.4	19.95	15.88	15.57	13.81	18.37	18.29	18.31	18.61	19.98			
19:00	20.13	20.79	19.89	17.06	13.29	12.6	10.55	15.1	15.34	15.6	16.21	17.71			
20:00	17.66	18.32	17.01	14.6	11.58	10.67	8.37	12.43	12.4	12.9	13.62	15.18			
21:00	15.59	16.28	15.1	13.2	10.13	9.41	6.84	10.96	10.8	11.1	11.59	13.16			
22:00	14	14.93	14.19	12.21	8.95	8	5.31	9.28	9.4	10.13	10.69	11.83			
23:00	13.24	14.18	13	10.54	7.57	6.46	4.1	7.23	7.35	8.47	9.3	10.94			

Potencia Máxima [MW] (Eléctrica) 4

Potencia Máxima [MW] (Térmica) 22

Temperatura Entrada Fluido: 27.2

Temperatura Objetivo Fluido: 49

Agregar a una División: Existente Nueva

Gaby

Agregar

Figura 4-9: Consumo térmico y temperatura ambiente – Proyecto PVT Gaby.

En el Proyecto Individual es posible revisar todos los datos técnico-económicos. El botón Configurar Parámetros Técnicos permite realizar ajustes relacionados a las tecnologías disponibles en la base de datos y en el tipo de combustible a reemplazar, como se aprecia en la Figura 4-15 (a pesar de que se asoció un recurso fósil al proyecto, es posible cambiarlo en esta ventana). Así, por ejemplo, es posible cambiar el colector PVT por uno de menor costo o mayor área. También permite realizar un análisis de sensibilidad con el Costo de la Tecnología en US\$/m², el Costo de Operación y Mantenimiento US\$/MWh y el Uso del Terreno en %. Apretando el botón Configurar Tecnología, se actualizan los valores técnicos y económicos en el Proyecto Individual.

Se realizan dos proyectos individuales: uno con tecnología PVT policristalina y otro con tecnología PVT amorfa. En el paper del que se extrae el modelo a utilizar por los PVT se utilizan estas dos

tecnologías, y una de las principales conclusiones de su estudio es que la tecnología policristalina tiene una mejor generación de energía eléctrica si se compara con la amorfa. No obstante, en términos de energía térmica, la tecnología amorfa presenta una ventaja con respecto a la policristalina (al ser menos eficiente, se calienta más el colector) [58].

Otra de las referencias indica que el precio de la tecnología policristalina es mucho mayor a la amorfa si se construye un arreglo fotovoltaico-térmico. Esto impacta fuertemente el análisis económico y transforma a priori al panel PVT amorfo en el más rentable económicamente [69].

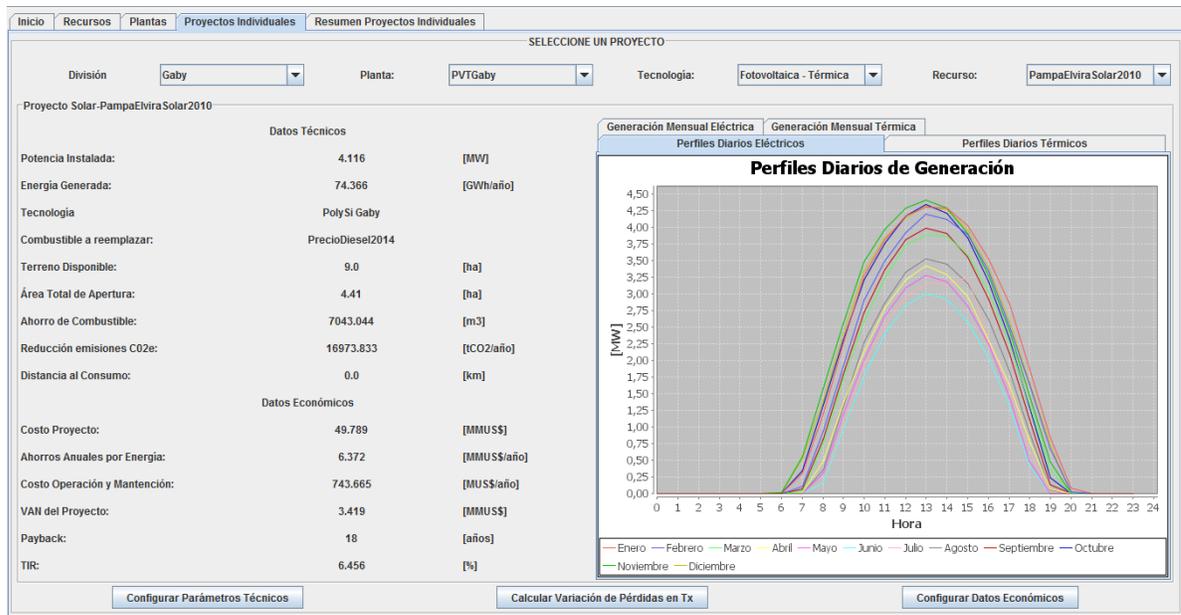


Figura 4-10: Análisis técnico-económico y perfiles de generación – Panel PVT policristalino – Proyecto PVT Gaby.

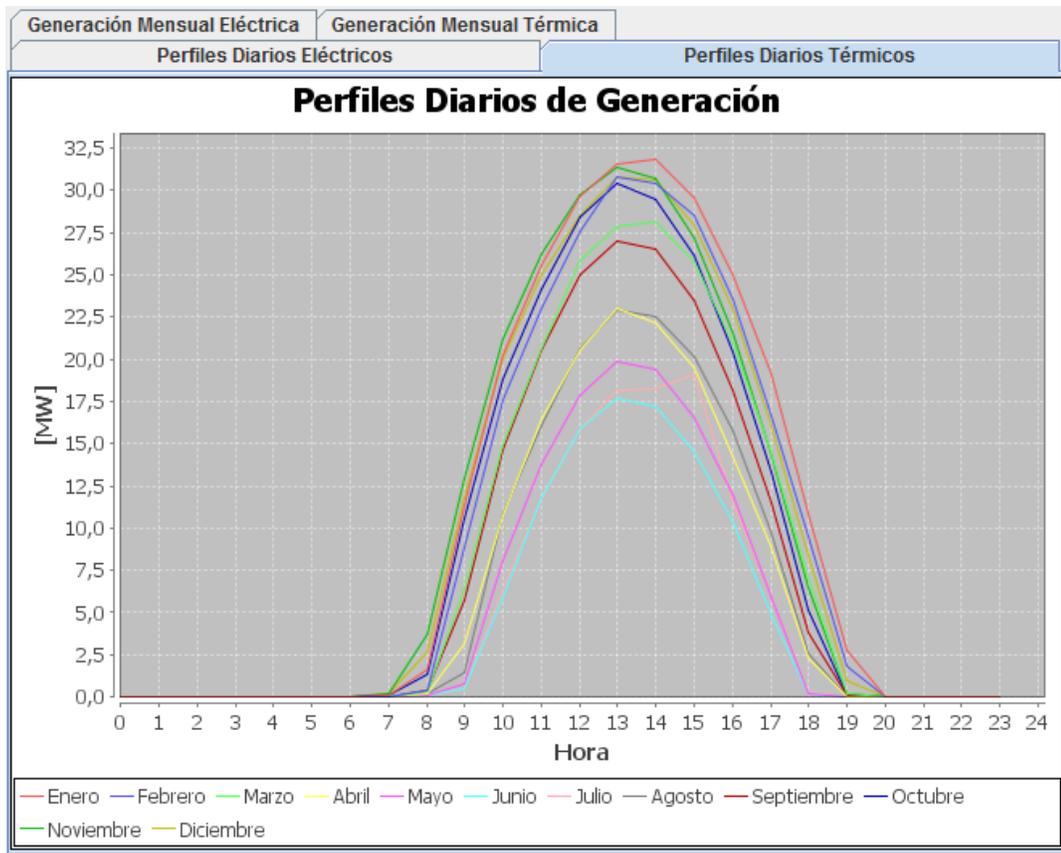


Figura 4-11: Perfil diario de generación térmica - Panel PVT policristalino – Proyecto PVT Gaby.

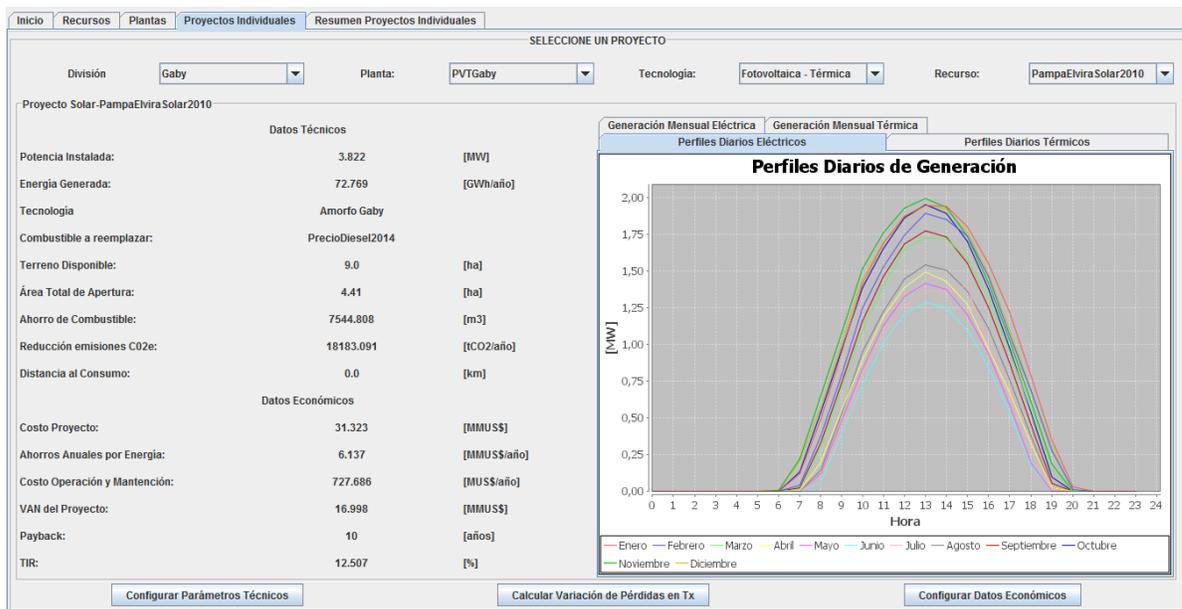


Figura 4-12: Análisis técnico-económico y perfiles de generación – Panel PVT amorfo – Proyecto PVT Gaby.

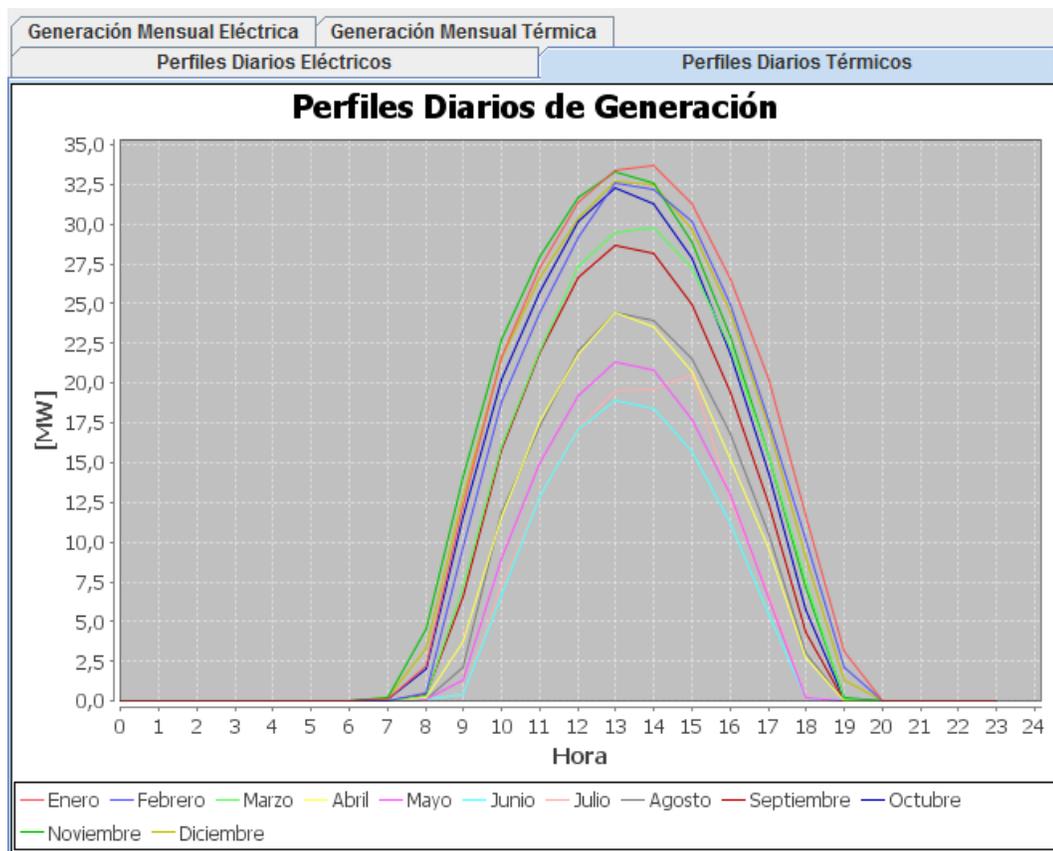


Figura 4-13: Perfil diario de generación térmica - Panel PVT amorfo – Proyecto PVT Gaby.

4.2.3.- Análisis y Validación de Resultados

La intención de esta sección es analizar los resultados obtenidos en el caso de estudio Proyecto PVT Gaby. En la Figura 4-10 y Figura 4-12 siguientes es posible apreciar el análisis técnico-económico que la herramienta arrojó para el presente caso de estudio: policristalino y amorfo. A continuación se realizará un análisis de cada uno de estos resultados.

4.2.3.1.- Análisis Técnico

Con respecto a la eficiencia de los colectores PVT, a diferencia del caso netamente térmico, ésta no es constante y depende si es policristalino o amorfo y sus modelos asociados, tal y como se revisó en Costo de la Energía Térmica – PVT. La eficiencia promedio que se muestra en la Figura 4-15 corresponde al promedio de las 24 horas del día. Así, las eficiencias térmicas y eléctricas cuando hay radiación son mucho mayores a estos valores promedio. Esto también calza con que las temperaturas ambiente a esas horas son mucho más altas, por lo que el esfuerzo que debe realizar el sistema para calentar el electrolito es menor que si lo hiciera durante la noche. Para el caso de la tecnología amorfa, la eficiencia térmica en el peak de radiación es de un 73%, mientras la eficiencia eléctrica no supera el 4,5%. Para el caso de la tecnología policristalina, la eficiencia térmica en el peak de radiación es de un 69%, mientras que la eficiencia eléctrica de un 11%.

La potencia máxima eléctrica que se calculó fue de 4,11 MW para la tecnología policristalina y de 3,82 MW para la tecnología amorfa. Para este cálculo se considera la generación horaria de todo el año y, dependiendo principalmente de la irradiación solar máxima registrada (fija óptima en este caso), se guarda la potencia máxima calculada para toda la planta PVT.

A pesar de que las eficiencias eléctricas son variables a lo largo del día, es posible realizar un simil entre los proyectos fotovoltaicos del norte del país con la generación eléctrica de las tecnologías PVT. Así, por ejemplo, la planta fotovoltaica Calama Solar 3 de Codelco tiene un peak de 4 MW, mientras que el factor de planta en proyectos del norte del país bordea el 25% [70], [71].

Con respecto a la energía generada calculada por la herramienta computacional, es de 63,57 GWht y 10,79 GWh para la tecnología policristalina; y de 68,1 GWht y 4,67 GWh para la amorfa. Destacar que esta energía corresponde a energía térmica y eléctrica respectivamente.

Con respecto a la tecnología (ver Figura 4-15), se ingresó directamente en la base de datos un nuevo colector solar de tipo PVT de 15 m², tanto policristalino como amorfo, con una eficiencia variable dependiendo del modelo y una potencia nominal eléctrica de 1400 W y 1300 W respectivamente.

Con respecto a los ahorros por transmisión, se simuló un sistema eléctrico de dos barras (barra de generación Slack y barra de consumo), con un conductor de 3 km de largo en 23 kV (con $R=0,9 \Omega/\text{km}$ y $X=0,385 \Omega/\text{km}$). Para el caso policristalino, el ahorro fue de 288,66 MWh/año, mientras que para el caso amorfo fue de 169,57 MWh/año. Esto concuerda con que la generación eléctrica del policristalino es mayor que la del amorfo. El aporte del ahorro por pérdidas es del orden de los miles de dólares (a 100 US\$/MWh), por lo que el ahorro es marginal comparado con el costo de las tecnologías. Un aumento en la distancia entre barras impactaría en mayor medida al ahorro.

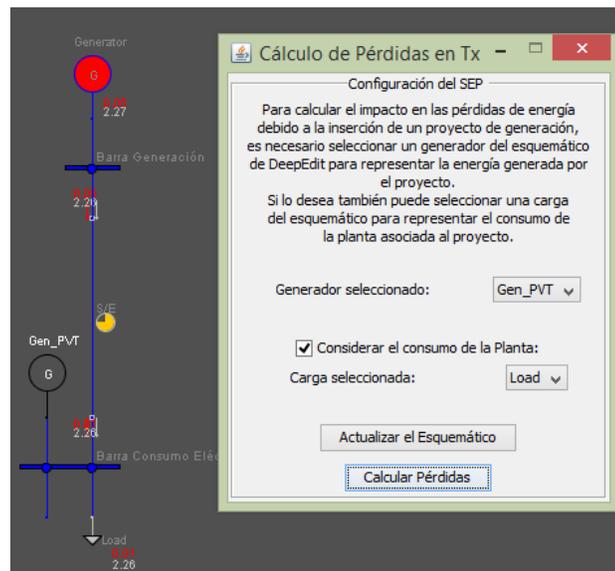


Figura 4-14: Sistema eléctrico en DeepEdit - Proyecto PVT Gaby



Figura 4-15: Botón configurar parámetros técnicos - Panel PVT policristalino y amorfo – Proyecto PVT Gaby.

El combustible a reemplazar indica la asociación que el proyecto tiene con el recurso fósil y corresponde al precio del Diesel promedio mensual durante el 2014. Este es el precio con el que se valoriza el ahorro de combustibles y por tanto el ahorro de la parte térmica. Por el lado eléctrico, el ahorro se genera a partir de la generación valorizada a un precio de la potencia y la energía.

Con respecto al terreno disponible, en los antecedentes se señala que el total disponible es de 90.000 m², sin embargo el uso efectivo de los colectores es de aproximadamente un 49% del total. Por lo tanto, se utilizó este porcentaje para calcular el área efectiva de los colectores de placa plana, cálculo que equivale a 44.100 m².

El ahorro de combustibles fue calculado a partir de la generación térmica anual y corresponde a 7.043 m³ para el policristalino y 7.545 m³ para el amorfo. Este resultado es cercano a los 8.000 m³ que contemplaba el proyecto original de Pampa Elvira Solar (12% y 6% menos respectivamente). Tomando en cuenta el factor de emisión del Diesel [63], la reducción de emisiones equivale a 16.974 ton CO₂/año para el policristalino y de 18.183 ton CO₂/año para el amorfo. Esto supera la meta anual propuesta en los antecedentes para el proyecto Pampa Elvira Solar, que equivale a una reducción de 15.000 ton CO₂/año.

4.2.3.2.- Análisis Económico

Sobre el Costo de la Tecnología, se eligió un precio que sea consecuente con lo recopilado en los antecedentes (ver referencia [69]). Así, para proyectos de gran escala, la tecnología policristalina tiene un precio aproximado de 1.040 US\$/m², mientras la amorfa de 623 US\$/ m². Esto implica que la inversión que se debe realizar para los 44.100 m² disponibles es de US\$ 45,86 millones y de US\$ 27,47 millones respetivamente, considerando paneles de 15 m² cada uno y una ocupación de terreno de los colectores de un 49% del total (90.000 m²). Cabe destacar que se utilizó un modelo de prueba de PVT, separando los precios para proyectos de pequeña y gran escala. En particular, considerando un proyecto de gran escala, cada panel de 15 m² policristalino cuesta aproximadamente US\$ 15.600 y cada amorfo US\$ 9.345, a los que para efectos del proyecto se suman otros costos adicionales.

Es posible apreciar que el costo del proyecto es de US\$ 49,78 millones para el policristalino y de US\$ 31,32 millones para el amorfo. Para el caso policristalino, se excede en prácticamente un 100% el costo del proyecto con placas planas, sin embargo el proyecto amorfo se encuentra solo a 5 millones de dólares. Esto hace que dos proyectos con inversiones cercanas como el de placas planas y el PVT amorfo sean rentables con un período de recuperación razonable, sin embargo el PVT policristalino tiene un período de recuperación de 18 años, más del doble que el de placas planas. A pesar de las ventajas que presentan los sistemas PVT, el sistema de placas planas sigue teniendo un período de recuperación menor, una TIR mayor y un VAN mayor que los proyectos PVT.

Los ahorros anuales por energía, valorizados al precio del Diesel del año 2014 y al precio de la energía de 100 US\$/MWh, ascienden a US\$ 6,13 millones para el amorfo y US\$6,37 millones para el policristalino, valor muy cercano a los US\$ 7 millones que se muestran en los antecedentes. La gran ventaja que presentan los proyectos PVT es que no solo generan ingresos por el ahorro de combustibles, sino también por la energía eléctrica que venden al sistema de la minera. En consecuencia, la diferencia radica principalmente en que el policristalino genera más del doble de la energía eléctrica que el amorfo. Adicionalmente, sumando la energía eléctrica y térmica, el policristalino genera aproximadamente 2 GWh/año más que el amorfo. Esto se traduce en la diferencia de US\$ 200 mil entre ambas tecnologías.

Los costos de operación y mantenimiento se consideraron en 10 US\$/MWh. Datos de referencia fueron extraídos de la caracterización de una planta termosolar de colectores parabólicos, la que posee costos entre 10 y 14 US\$/MWh según su potencia [68].

El VAN del proyecto es de US\$ 3,42 millones para la tecnología policristalina y de US\$ 17 millones para la tecnología amorfa, con un payback de 18 y 10 años respectivamente, y una TIR de 6,45% y 12,51% respectivamente. Esto nos indica que, primero que todo, el proyecto amorfo es rentable y se debe realizar desde el punto de vista financiero (VAN > 0 y TIR > 10%). Con respecto al proyecto policristalino, el proyecto se debe realizar según el criterio del VAN (VAN > 0), pero descartar según el criterio de la TIR (TIR < 10%). Con respecto al período de recuperación del

proyecto PVT amorfo, el contrato de largo plazo entre Energía Llama-Sunmark y Codelco es de 10 años, por lo que la empresa inversora alcanza a recuperar su dinero en el tiempo del contrato.

Se comprueba, tal y como se plantea en el modelo de [58], que los paneles PVT amorfos presentan una mejor eficiencia térmica que los policristalinos. Por el contrario, los paneles PVT policristalinos poseen una mejor eficiencia eléctrica comparado con los amorfos.

5.- CONCLUSIONES

En la realización de este trabajo de memoria se plantean objetivos relacionados con la inclusión de la perspectiva térmica en el desarrollo de proyectos ERNC dentro de plantas mineras, siguiendo el trabajo desarrollado por Marco Peirano.

En la primera parte se aborda el estado del arte en relación a las ERNC, al desarrollo sustentable y cómo este tipo de conceptos se han ido insertando en Chile. También se destaca cómo las ERNC dejaron de ser una alternativa que solo genera beneficios ambientales y sociales, incorporando el componente económico. Se entrega una visión actualizada del tema identificando los elementos que relacionan la actividad minera con las ERNC. Esto ha permitido el desarrollo de múltiples proyectos ERNC por empresas que ya no solo buscan cumplir con la legislación vigente, sino dar el ejemplo y realizar proyectos sustentables y competitivos a la vez.

A continuación, se revisa la perspectiva minera de las ERNC, y se concluyó que el sector tiene un interés fundamental en reducir su uso de energía por unidad producida, debido a las obvias implicaciones de los costos de producción. Otra de las prioridades es reducir la liberación directa e indirecta de gases de efecto invernadero. Los proyectos ERNC, sin embargo, aún no logran integrarse completamente al proceso minero.

Con respecto a la implementación, se puede corroborar que a través del diseño de la herramienta computacional se da cumplimiento a los requerimientos generales, sobre plantas, proyectos y recursos, además de establecer los requerimientos relacionados al ahorro de combustibles.

El diseño de la herramienta permite tomar un caso base eléctrico que consiste en suplir el consumo con el uso del sistema eléctrico. Incorporando el proyecto renovable eléctrico, se desplaza el uso del sistema eléctrico, provocando ahorros por energía y potencia, pero además un impacto por ahorros en pérdidas de transmisión. El caso base térmico consiste en suplir el consumo con calderas de combustible. Incorporando el proyecto renovable térmico, se desplaza el uso de combustible, provocando ahorros en combustibles.

En cuanto a los casos de estudio, estos permiten validar y aplicar los desarrollos realizados, además de verificar el cumplimiento de los requerimientos. Los casos de estudio sirven para comparar resultados con proyectos en operación como Pampa Elvira Solar, así como también para el caso de proyectos híbridos PVT, comparar con el análisis técnico-económico que se plantea en los papers relacionados con tecnologías híbridas.

Con respecto a la tecnología PVT, se plantea un modelo que depende de la radiación solar global, la temperatura de entrada del fluido, la temperatura objetivo del fluido, y la temperatura ambiente. Las eficiencias eléctricas y térmicas dependen de los parámetros anteriores. El modelo se utiliza en los casos de estudio, los que arrojan que los paneles PVT amorfos presentan una mejor eficiencia térmica que los policristalinos, y que estos últimos poseen una mejor eficiencia eléctrica comparado con los amorfos en base a la información disponible. El alto costo de los colectores PVT policristalinos hace que sea más atractivo económicamente realizar un proyecto con PVT amorfos.

El sistema PVT no es más atractivo económicamente que un sistema de placas planas, pero si es una muy buena opción si se dispone de una superficie limitada para generar calor y electricidad a la vez. En una minera, donde podría disponerse de superficies reducidas, es una buena opción para presentar dos alternativas energéticas sin la necesidad de convertir energía eléctrica a térmica o viceversa.

Con respecto al trabajo futuro, se recomienda incorporar a la herramienta almacenamiento térmico y eléctrico, considerar un tratamiento mixto de proyectos (2 o más proyectos simultáneamente), incorporar nuevas fuentes de generación renovable, e implementar la generación térmica a partir de eléctrica y viceversa.

6.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Banco Central de Chile, «Cuentas Nacionales de Chile - Evolución de la actividad económica primer trimestre de 2014,» Santiago, 2014.
- [2] Comité de Inversiones Extranjeras, «Oportunidades de Inversión en Minería - CIE Chile,» [En línea]. Available: <http://www.inversionextranjera.cl/category/oportunidades-de-inversion/mineria/?open=in>. [Último acceso: Junio 2014].
- [3] Ministerio de Minería - Gobierno de Chile, «Chile País Minero: Una Oportunidad Laboral,» 2012. [En línea]. Available: http://www.expomin.cl/marketing/pdf/2012/presentacion_ministro_solminihac.pdf. [Último acceso: Junio 2014].
- [4] Departamento de Medio Ambiente - Banco Mundial, «Libro de Consulta para Evaluación Ambiental. Volumen I: Políticas, Procedimientos y Problemas Intersectoriales,» Washington, D.C., 1992.
- [5] Memoria Chilena, Biblioteca Nacional de Chile, «El impacto ambiental de la minería en Chile - Una toma de conciencia tardía,» [En línea]. Available: <http://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-3388.html#presentacion>. [Último acceso: Junio 2014].
- [6] C. Finat, «Nueva Ley 20/25: Aspectos y consideraciones,» Revista Electro Industria, [En línea]. Available: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2161>. [Último acceso: Junio 2014].
- [7] M. Peirano Ocharán, «Herramienta Computacional para Analizar la Inserción de ERNC en Redes Eléctricas de Plantas Mineras,» 2011. [En línea]. Available: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102636>.
- [8] OECD, «OECD Guidelines for Multinational Enterprises, Global Instruments for Corporate Responsibility,» 2001. [En línea]. Available: <http://www.oecd.org/corporate/mne/globalinstrumentsforcorporateresponsibility-2001-annualreportontheoecdguidelinesformultinationalenterprises.htm>.
- [9] Fundación Wikimedia, «Desarrollo Sostenible,» 2014. [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Desarrollo_sostenible.
- [10] A. Díaz de Iparraguirre, «Formación del capital humano: su relación con la competitividad y el desarrollo sostenible.,» 2009.
- [11] ProChile - Gobierno de Chile, «Sustentabilidad ProChile,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.prochile.gob.cl/sustentabilidad/sustentabilidad/>. [Último acceso: Junio 2014].

- [12] Hernán Durán de la Fuente - Comisión Económica para América Latina (CEPAL), «Políticas Ambientales y Desarrollo Sustentable,» [En línea]. Available: <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/6/4496/duran.htm>.
- [13] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, «Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE),» 1982. [En línea]. Available: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=258171>.
- [14] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, «Ley Corta I (Ley 19.940),» 2004. [En línea]. Available: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=222380>.
- [15] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, «Ley 20.257 (ERNC),» 2008. [En línea]. Available: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=270212>.
- [16] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, «Ley 20.698,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1055402>.
- [17] R. Palma Behnke, G. Jiménez Estévez y I. Alarcón Arias, «Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico chileno,» Marzo 2009. [En línea]. Available: http://www.cne.cl/images/stories/public%20estudios/raiz/ERNCMercadoElectrico_Bilingue_WEB.pdf.
- [18] Enzo E. Sauma - Centro de Políticas Públicas UC, «Políticas de fomento a las energías renovables no convencionales (ERNC) en Chile,» Santiago, 2012.
- [19] Centro de Energías Renovables, «Manual de Aspectos Claves en la Gestión de Proyectos ERNC,» Santiago, Diciembre 2013.
- [20] Reporte ERNC, «Estado de Proyectos ERNC en Chile,» CIFES - Ministerio de Energía, Junio 2015. [En línea]. Available: <http://cifes.gob.cl/wp-content/uploads/2015/06/Reporte-junio.pdf>.
- [21] O. Cid, «Proyectos Eléctricos Sustentables en Chile,» ACERA A.G., Santiago, 2011.
- [22] ACERA, «Minuta ACE,» Junio 2011. [En línea]. Available: http://www.energiaciudadana.cl/libro/chile-necesita-una-gran-reforma-energetica/capitulo-no5-recursos-ernc-explotables-en-chile#.VVAf1_mqo68.
- [23] International Council on Mining & Metals, «Mining's contribution to sustainable development - an overview,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.icmm.com/minings-contribution>.
- [24] International Council on Mining & Metals (ICMM), «Annual Review 2012,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.icmm.com/page/91795/icmm-releases-annual-review-2012-building-trust>.

- [25] COCHILCO, «Implementación de la Responsabilidad Social Corporativa en el Sector de la Gran Minería y sus Implicancias Tributarias,» Santiago, 2006.
- [26] H. Rudnick, G. Alvarado y G. Muñoz, «Experiencia internacional en grandes proyectos electricos - Diseño social eficiente,» [En línea]. Available: <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno12/expinter/index.html>.
- [27] Senado de la República de Chile, «Hidroaysén: reafirman postura de rechazo a mega proyecto hidroeléctrico,» [En línea]. Available: http://www.senado.cl/hidroaysen-reafirman-postura-de-rechazo-a-mega-proyecto-hidroelectrico/prontus_senado/2014-06-09/161459.html.
- [28] Consejo Minero, «Principios del desarrollo sustentable del Consejo Minero para sus empresas socias,» [En línea]. Available: <http://www.consejominero.cl/quienes-somos/principios-de-desarrollo-sustentable/>.
- [29] International Council on Mining & Metals (ICMM), «Acerca de ICMM,» [En línea]. Available: <http://www.icmm.com/languages/espanol>.
- [30] International Institute for Environment and Development (IIED), «Abriendo Brecha: Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable,» Earthscan Publications Ltd., Londres, Reino Unido, 2002.
- [31] Consejo Minero de Chile, «Competitividad de la Minería Chilena,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.consejominero.cl/competitividad/>.
- [32] International Institute for Environment and Development (IIED), «Energy and Sustainable Development in the Mining and Minerals Industries,» Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD), Colorado, USA, 2001.
- [33] Revista Minería Chilena, «ERNC en Minería: Fuente para mitigar costos,» 2 Septiembre 2013. [En línea]. Available: <http://www.mch.cl/reportajes/ernc-en-mineria-fuente-para-mitigar-costos/>.
- [34] Compañía Minera Collahuasi, «Comienza la construcción de a planta solar fotovoltaica de 25 MWp Pozo Almonte Solar,» [En línea]. Available: <http://www.collahuasi.cl/espanol2/noticias2/planta-solar-p-almonte.asp>.
- [35] SERC Chile, «Se inauguró la planta Pampa Elvira Solar para la división Gaby de Codelco,» [En línea]. Available: http://www.sercchile.cl/?page_id=1607. [Último acceso: Marzo 2015].
- [36] SONAMI - Grupo Antofagasta Minerals, «Etapas del Proceso Productivo de una Mina,» Santiago de Chile, 2012.
- [37] CODELCO Educa, «¿Qué es el Cobre?,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.codelcoeduca.cl/cobre/queeselcobre.asp>.

- [38] H. L. Hartman, *Introductory Mining Engineering*, Tuscaloosa, Alabama: Wiley-Interscience, 1987.
- [39] W. Kracht y J. M. Ortiz, «Curso Minería,» Ingeniería de Minas - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - Universidad de Chile, Santiago, 2012.
- [40] S. Riquelme P., «Proceso Productivo del Cobre y Cuidado del Medio Ambiente,» Gerencia Corporativa de Sustentabilidad - Codelco, [En línea]. Available: https://www.codelcoeduca.cl/noticias/descargas/cobre_medioambiente.pdf.
- [41] COCHILCO, «Actualización de Información Sobre el Consumo de Energía Asociado a la Minería del Cobre al Año 2012,» Santiago de Chile, 2013.
- [42] Consejo Minero, «Buscando un yacimiento,» [En línea]. Available: <http://www.consejominero.cl/buscando-un-yacimiento/>. [Último acceso: 2015].
- [43] InfoAcero - CAP, «Proceso de Extracción Minal El Romeral,» 2000. [En línea]. Available: <http://www.infoacero.cl/procesos/mina.htm>.
- [44] PV Resources, «Photovoltaic Software,» 25 Junio 2014. [En línea]. Available: <http://www.pvresources.com/siteanalysis/software.aspx>.
- [45] The Stella Group, Ltd., «Renewable Energy Modeling Tools, Calculators and Design Guides,» Septiembre 2010. [En línea]. Available: <http://www.thestellagroupltd.com/wp-content/pdf/RenewableEnergyModelingTools.pdf>.
- [46] National Renewable Energy Laboratory (NREL), «System Advisor Model (SAM),» Abril 2010. [En línea]. Available: <https://sam.nrel.gov/>.
- [47] Natural Resources Canada, «RETScreen International - Descripción General,» Enero 2014. [En línea]. Available: <http://www.etscreen.net/es/centre.php>.
- [48] J. Paraszczak y K. Fytas, «Renewable energy sources – a promising opportunity for remote mine sites?,» Department of Mining, Metallurgical and Materials Engineering - Université Laval, Quebec, Canadá, 2012.
- [49] Comisión Chilena del Cobre, «Proyección del Consumo de Energía Eléctrica de la Minería del Cobre en Chile al 2025,» Santiago de Chile, 2013.
- [50] R. Gacitua Rivera, «Estudio de Factibilidad del Uso de Energía Solar en Procesos de la Gran Minería del Cobre,» Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas - Universidad de Chile, Santiago de Chile, Diciembre 2011.
- [51] Energy Information Administration (EIA), «Solar Basics,» U.S. Energy Information Administration, [En línea]. Available:

http://www.eia.gov/KIDS/energy.cfm?page=solar_home#solar_thermal_collectors-basics.
[Último acceso: Septiembre 2014].

- [52] Renewable Energy World, «Solar thermal power plants - Technology Fundamentals - pp. 109-113,» Volker Quaschnig, [En línea]. Available: http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals2/index_e.php.
- [53] M. Kaya, «Thermal and Electrical Performance Evaluation of PV/T Collectors in UAE,» KTH School of Industrial Engineering and Management, 13 Mayo 2013. [En línea]. Available: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:621183/FULLTEXT01.pdf>. [Último acceso: 2014].
- [54] F. Vanek, L. Albright y L. Angenent, Energy Systems Engineering: Evaluation and Implementation, McGraw-Hill Professional, 2012.
- [55] COCHILCO, «Actualización Información GEI 2012,» 2013. [En línea]. Available: http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/energia/Actualizacion-info-emisiones-gases-invernadero_2012.pdf. [Último acceso: 2014].
- [56] Oracle, «About the Java Technology,» [En línea]. Available: <http://docs.oracle.com/javase/tutorial/getStarted/intro/definition.html>. [Último acceso: Febrero 2015].
- [57] Oracle, «Object-Oriented Programming Concepts,» [En línea]. Available: <http://docs.oracle.com/javase/tutorial/java/concepts/index.html>. [Último acceso: Febrero 2015].
- [58] Y. Tripanagnostopoulos y S. Kalogirou, «Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production,» Science Direct, 2006. [En línea]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406000409>. [Último acceso: 2014].
- [59] CODELCO, «Pampa Elvira Solar de División Gabriela Mistral premiada por Fundación Recyclápolis y El Mercurio,» [En línea]. Available: http://www.codelco.com/pampa-elvira-solar-de-division-gabriela-mistral-premiada-por-fundacion-recyclapolis-y-el-mercurio/prontus_codelco/2014-11-06/094222.html. [Último acceso: Marzo 2015].
- [60] CODELCO, «Presidente Sebastián Piñera inauguró planta termosolar en División Gabriela Mistral,» 14 Octubre 2013. [En línea]. Available: http://www.codelco.com/presidente-sebastian-pinera-inauguro-planta-termsolar-en-division-gabriela-mistral/prontus_codelco/2013-10-14/172808.html.
- [61] Sunmark - Energía Llaima, «Pampa Elvira Solar,» [En línea]. Available: http://www.solartermico.cl/?page_id=960. [Último acceso: Marzo 2015].

- [62] Dices.net, «Ubicación localidad Pampa Elvira,» [En línea]. Available: <http://www.dices.net/mapas/chile/mapa.php?nombre=Pampa-Elvira&id=13589>. [Último acceso: Marzo 2015].
- [63] Ministerio de Energía, «Factores de emisión de los combustibles más utilizados en Chile,» 2009. [En línea]. Available: <http://huelladecarbono.minenergia.cl/combustibles>. [Último acceso: Marzo 2015].
- [64] Empresa Nacional del Petróleo, «Tabla de precios de paridad,» [En línea]. Available: http://www.enap.cl/pag/66/991/tabla_de_precios_de_paridad. [Último acceso: Marzo 2015].
- [65] R. Aylwin, «Energía Sustentable en Codelco,» SONAMI - CODELCO, Septiembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.sonami.cl/files/presentaciones/543/10.-%20ENERGIA%20SUSTENTABLE%20EN%20CODELCO.pdf>. [Último acceso: Marzo 2015].
- [66] Alibaba, «90 percent efficiency Diesel hot water heater,» [En línea]. Available: http://www.alibaba.com/product-detail/90-efficiency-Diesel-hot-water-heater_1408860125.html. [Último acceso: Marzo 2015].
- [67] ESOL Energía Solar, «Colector solar placa plana tipo flat,» [En línea]. Available: http://www.esol.cl/productos_colector-solar-plano-flat.htm. [Último acceso: Marzo 2015].
- [68] N. Carrasco Argomedo, «Caracterización de una planta termosolar de colectores parabólicos para generación de energía eléctrica - Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista,» Profesor guía: Luis Vargas Díaz, Abril 2009. [En línea]. Available: http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/carrasco_n/sources/carrasco_n.pdf.
- [69] S. Tselepis y Y. Tripanagnostopoulos, «Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with standard PV modules,» Centre for Renewable Energy Sources - University of Patras, [En línea]. Available: https://www.google.cl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2Fstathis_Tselepis%2Fpublication%2F242323472_ECOMOMIC_ANALYSIS_OF_HYBRID_PHOTOVOLTAICTHERMAL_SOLAR_SYSTEMS_AND_COMP. [Último acceso: Marzo 2015].
- [70] El Mercurio, «Consortio chileno-alemán construirá planta de energía fotovoltaica en el desierto chileno,» 4 Julio 2012. [En línea]. Available: <http://www.emol.com/noticias/economia/2012/07/04/549055/consorcio-chileno-aleman-construira-planta-con-100000-paneles-solares-en-la-i-region.html>.
- [71] Red de Eneergía Solar Fotovoltaica de Latinoamérica y el Caribe, «Planta Fotovoltaica Calama Solar 3,» [En línea]. Available: <http://redsollac.org/nuevo/chile-region-de-antofagasta-1mw-calama-solar-3/>. [Último acceso: Marzo 2015].

- [72] Centro de Energía, «DeepEdit,» [En línea]. Available: http://www.centroenergia.cl/ce-fcfm/?page_id=662.
- [73] AETS Sudamérica S.A.; ECONOLER, «Estudio de Mercado de Eficiencia Energética en Chile,» Santiago de Chile, Septiembre 2010.
- [74] Red de Energía Solar Fotovoltaica de Latinoamérica y el Caribe, «Planta Fotovoltaica Calama Solar 3,» [En línea]. Available: <http://redsollac.org/nuevo/chile-region-de-antofagasta-1mw-calama-solar-3/>. [Último acceso: Marzo 2015].
- [75] Codelco División Gabriela Mistral, «Diagrama global nave EW,» Datos proporcionados por el Centro de Energía de la Universidad de Chile, Santiago, 2011.

7.- ANEXOS

7.1.- ENTREVISTA DIRIGIDA – SOFTWARE DE INTEGRACIÓN ERNC EN MINERÍA

Autor: Rodrigo Rothen Véliz. Memorista de Ingeniería Civil Eléctrica de la U. de Chile.

Tema de memoria: Inserción de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) en Plantas Mineras

Profesor guía: Dr. Rodrigo Palma Behnke

Target de la entrevista: Apreciar y entender lo que sucede en la industria de la gran minería del cobre en relación a proyectos ERNC. Encontrar características y condicionantes técnicas que afecten al desarrollo y toma de decisiones ligada a proyectos de ERNC. Identificar las ERNC más utilizadas en la industria minera y aquellas que entrarán de manera inminente. Identificar posibles mejoras del software.

- ▶ ¿Cuál cree que son las razones principales por la que no se llevan a cabo proyectos de ERNC en las grandes empresas mineras?
- ▶ ¿Quiénes estudian, preparan y aprueban proyectos de ERNC en las empresas mineras? ¿Cómo se financian estos proyectos? ¿Qué métricas se utilizan en la evaluación de estos proyectos?
- ▶ ¿La responsabilidad social y medioambiental es un factor que prima por sobre la evaluación económica en estas empresas?
- ▶ Según su apreciación, ¿Cuáles son los factores más determinantes al evaluar una alternativa de ERNC? (Por ejemplo, costos medios de la tecnología a evaluar, *payback* del proyecto, financiamiento, uso de la energía, responsabilidad social, etc.)
- ▶ ¿Cuál cree que son las principales barreras para desarrollar proyectos de ERNC? ¿Cree que existen barreras en la ley de ERNC (20.698) o en los contratos de suministro?
- ▶ ¿Cree que las empresas mineras cuentan con los protocolos necesarios para evaluar proyectos de ERNC aplicados a minería? ¿Cuál cree que son las fortalezas y debilidades de la metodología que utilizan?
- ▶ ¿Las empresas llevan un registro de aquellos puntos con potencial renovable? ¿De qué manera se trabaja con esta información? ¿Qué tanta importancia tiene este registro para el desarrollo de proyectos?
- ▶ ¿En qué subprocesos considera más adecuado integrar ERNC? ¿qué complicaciones prevé al integrarlas a un proceso minero?
- ▶ Con respecto a los proyectos de ERNC ya desarrollados en la industria y de los que tenga información, ¿quiénes generan y operan el proyecto? ¿está a cargo de terceros o de una filial de la empresa? ¿Cuál es su uso y qué problema soluciona? ¿abastece un subproceso

completamente o cogenera? ¿Es de pequeña o gran escala? ¿el proyecto se utiliza para suplir demandas propias o para vender energía?

✓ Sobre la herramienta computacional:

Objetivo: Se dispone de un modelo de análisis y una herramienta computacional para el estudio de la inserción de energías renovables en redes eléctricas de plantas mineras. Sin embargo se requiere mejorarla adicionando o modificando funcionalidades que sean de utilidad para las empresas mineras y acerquen lo más posible la herramienta a la industria.

Resumen: La herramienta posee una interfaz gráfica y actualmente en ella es posible ingresar datos sobre los recursos renovables, tecnologías y plantas, con lo cual se generan los proyectos ERNC. Luego se configuran los proyectos: se seleccionan las tecnologías a utilizar, se establecen los costos asociados y se fijan las variables económicas relevantes. Para terminar, se estima el impacto que genera el proyecto en las pérdidas del sistema de transmisión de la empresa minera.

- ▶ De acuerdo a la información que maneja, ¿las empresas mineras cuentan actualmente con un software para evaluar proyectos de ERNC o similares?
- ▶ Si existiera una herramienta computacional que evaluara la integración de ERNC en plantas mineras, ¿qué aspecto considera fundamental que incorpore? ¿considera relevantes otros aspectos? ¿qué fortalezas y debilidades ve en esta herramienta computacional?
- ▶ ¿Cree que esta herramienta aportará para evaluar de mejor manera proyectos de ERNC en empresas mineras?

7.2.- MANUAL DE USUARIO

El propósito de este manual es orientar al usuario en sus primeros pasos en Java y garantizar el buen funcionamiento del programa en cualquier computador con Windows.

Se adjunta a este trabajo la carpeta DeepEdit, que contiene dos carpetas en su interior: run y Srcjava. La primera corresponde a la compilación de los archivos de fuente por un compilador llamado javac. La extensión de los archivos de la carpeta run es .class, y contiene bytecodes – el lenguaje de máquina de la máquina virtual de Java (Java Virtual Machine). Esto permite que los archivos .class puedan correr en distintas plataformas. La otra carpeta, denominada Srcjava, corresponde al código de fuente escrito en archivos de texto plano que utilizan la extensión .java. Este es el código de fuente que el programador trabaja en entornos de desarrollo como Netbeans o Eclipse y compila para generar los archivos ejecutables.

Dentro de la carpeta run se incluye una carpeta denominada ELPM, la que incluye la herramienta computacional que se presenta en este trabajo, además de las bibliotecas necesarias para su correcta ejecución (carpeta Lib). El resto de archivos .java dentro de la carpeta run corresponden a Deep Edit, la plataforma orientada al objeto para la toma de decisiones en mercados eléctricos competitivos [72], desarrollada por el Centro de Energía de la Universidad de Chile. La herramienta computacional utiliza Deep Edit para modelar los sistemas eléctricos y para calcular el impacto en

las pérdidas que los proyectos renovables generan, utilizando como referencia el sistema eléctrico de las instalaciones en las que se realiza el proyecto.

La carpeta DeepEdit debe ubicarse en el disco duro del sistema operativo (C: en la mayoría de los computadores con Windows). Para asegurar el correcto funcionamiento de estos archivos ejecutables, el usuario debe primero que todo instalar Java Development Kit (JDK), que es un software que provee las herramientas de desarrollo para la creación de programas en Java, en su versión 1.6. La última actualización disponible de esta versión es la 45, por lo que el usuario debe descargar de la página de Oracle³ el archivo JDK 6u45 en sus versiones de 32 y 64 bits para Windows. Una vez descargados, el usuario debe instalar ambas ya que el entorno de programación utiliza 32 bits, mientras que el de ejecución utiliza 64 bits.

Para acceder a ELPM se debe ejecutar en la carpeta run el archivo ejecutable runNew_ELPM. Esto abrirá el programa DeepEdit. A continuación, utilizando el acceso directo Ctrl+M, se abrirá la herramienta computacional. DeepEdit y la forma de ingresar a la herramienta computacional ELPM se ven representadas en la siguiente Figura 7-1.

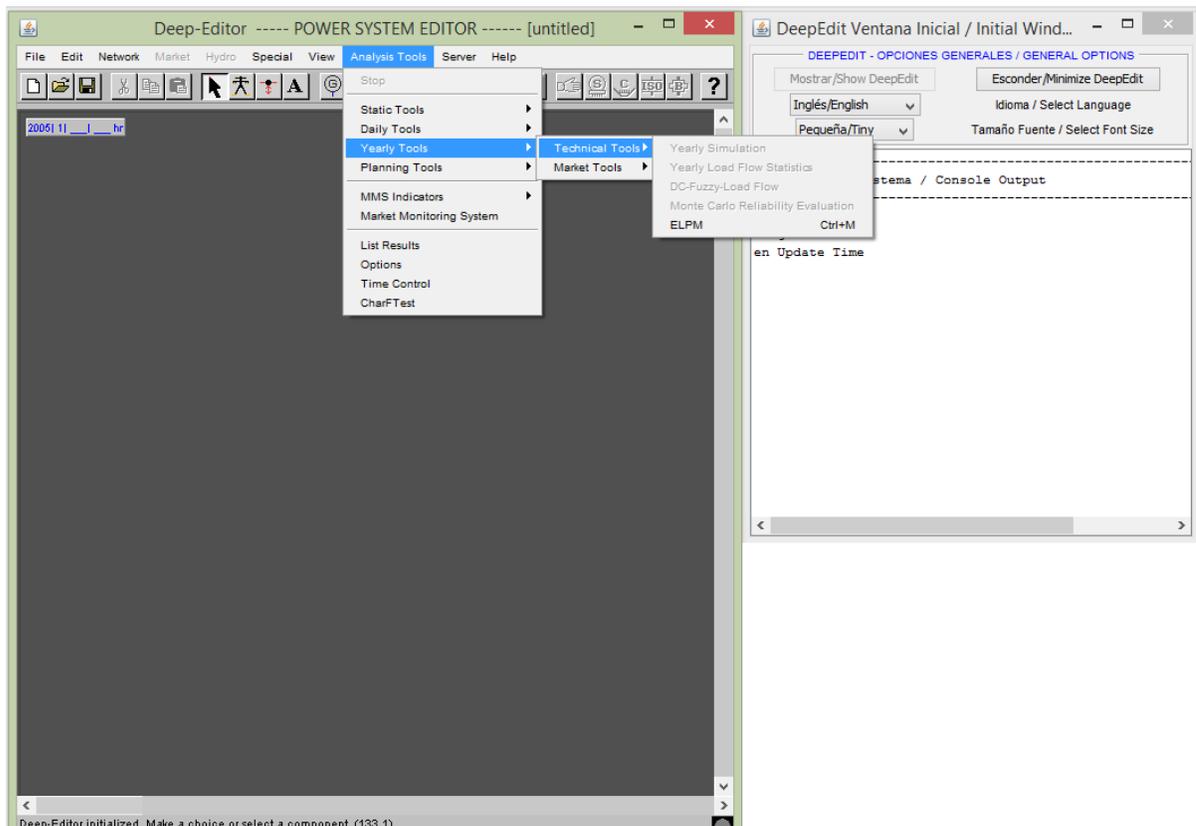


Figura 7-1: Ejecución de DeepEdit y ELPM.

³Link de descarga para Java SE Development Kit 6u45:

<http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/java-archive-downloads-javase6-419409.html#jdk-6u45-oth-JPR>

7.2.1.- Ingreso de Datos

Para configurar un proyecto, el usuario antes debe ingresar los datos de entrada para los recursos y plantas. Destacar que el concepto que se ocupa de planta corresponde al de planta minera, por lo que esta pestaña caracteriza los consumos eléctricos y térmicos.

En la izquierda de la Figura 7-2 se muestra la interfaz gráfica que permite ingresar los datos relacionados a los recursos renovables y fósiles. Para esto se debe seleccionar el tipo de recurso a ingresar (solar, eólico, hidráulico o fósil) y el nombre del recurso. El resto de opciones se van habilitando dependiendo del tipo de recurso que se seleccione. Más abajo se visualiza una tabla de 12x24 registros, la que sirve para caracterizar el recurso renovable de manera horaria mensual. La excepción a esta tabla es el recurso fósil, que admite 12 registros anuales (uno por mes) del precio de los combustibles. A la derecha de estas tablas, se pide la latitud y longitud del recurso. Finalmente, para agregar el recurso a la base de datos, se debe presionar el botón “Agregar”. Si la información no es correcta o falta algún dato, se mostrará un mensaje en que se señala que el recurso no pudo ser guardado. Si la información es correcta, se guarda el recurso y es posible visualizarlo en el lado derecho de la Figura 7-2.

Si el usuario quiere eliminar un recurso de la base de datos, en la parte inferior del panel de visualización se encuentra el botón Eliminar, el que remueve el recurso de la base de datos. Cabe destacar que al guardar el recurso en la base de datos, éste queda disponible para sesiones posteriores.

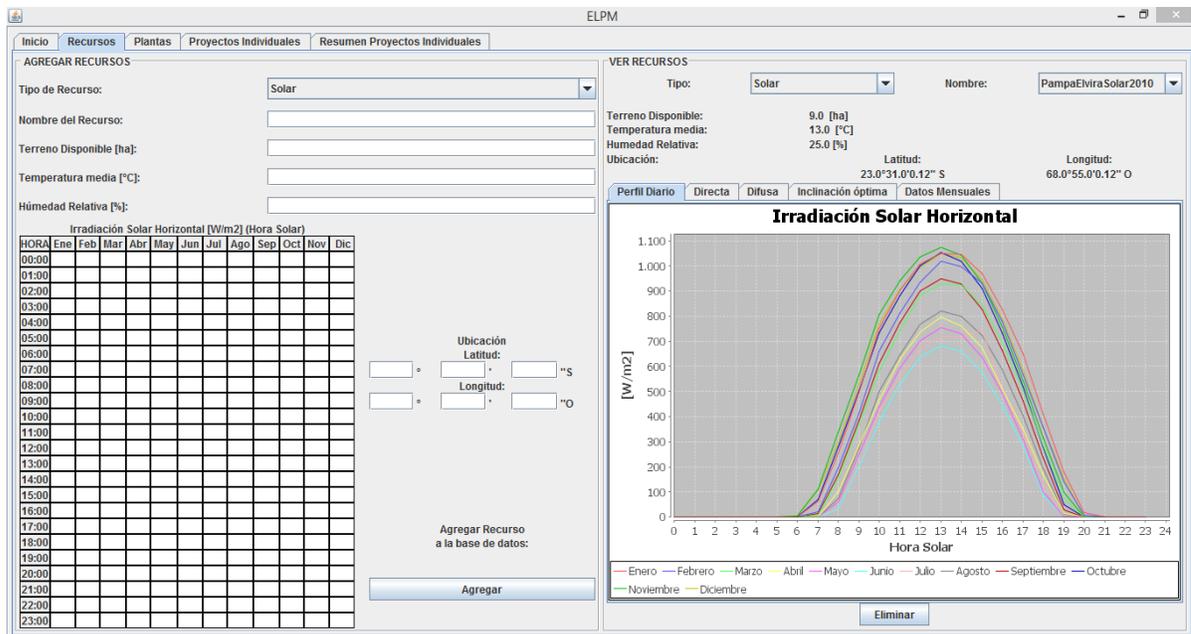


Figura 7-2: Interfaz gráfica para agregar recursos renovables a la base de datos.

En la izquierda de la Figura 7-3 se muestra la interfaz gráfica que permite ingresar los datos relacionados a las plantas mineras. Para esto se debe seleccionar el tipo de planta (eléctrica, térmica o híbrida) y el nombre de la planta. A su vez, se deben asociar a esta planta minera los recursos

según corresponda. Para las plantas eléctricas, podrán asociarse recursos eólicos, solares e hidráulicos. Para plantas térmicas e híbridas podrán asociarse recursos solares y fósiles. Más abajo se visualiza la ubicación geográfica de la planta y una tabla de 12x24 registros, la que sirve para caracterizar los consumos eléctricos y térmicos según corresponda. Además, para proyectos híbridos, se agrega una pestaña de temperatura ambiente, la que permite utilizar el modelo PVT presentado en este trabajo. A la derecha de esta tabla, se debe ingresar la potencia máxima eléctrica y/o térmica de la planta según corresponda, además de la temperatura de entrada y objetivo para los proyectos híbridos. Cabe destacar que las opciones de cada tipo de planta se van habilitando dependiendo de la planta que se haya seleccionado. Más abajo se visualiza la división a la que se incorporará la planta (división Andina, división Chuquicamata, división El Teniente, etc.), por lo que el concepto de división se asocia a un lugar geográfico que puede tener varias plantas en su interior. Finalmente, para agregar la planta a la base de datos, se debe presionar el botón “Agregar”. Si la información no es correcta o falta algún dato, se mostrará un mensaje en que se señala que el recurso no pudo ser guardado. Si la información es correcta, se guarda el recurso y es posible visualizarlo en el lado derecho de la Figura 7-3/Figura 7-2.

Si el usuario quiere eliminar una planta de la base de datos, en la parte inferior del panel de visualización se encuentra el botón Eliminar, el que remueve la planta de la base de datos. Cabe destacar que al guardar la planta en la base de datos, ésta queda disponible para sesiones posteriores.

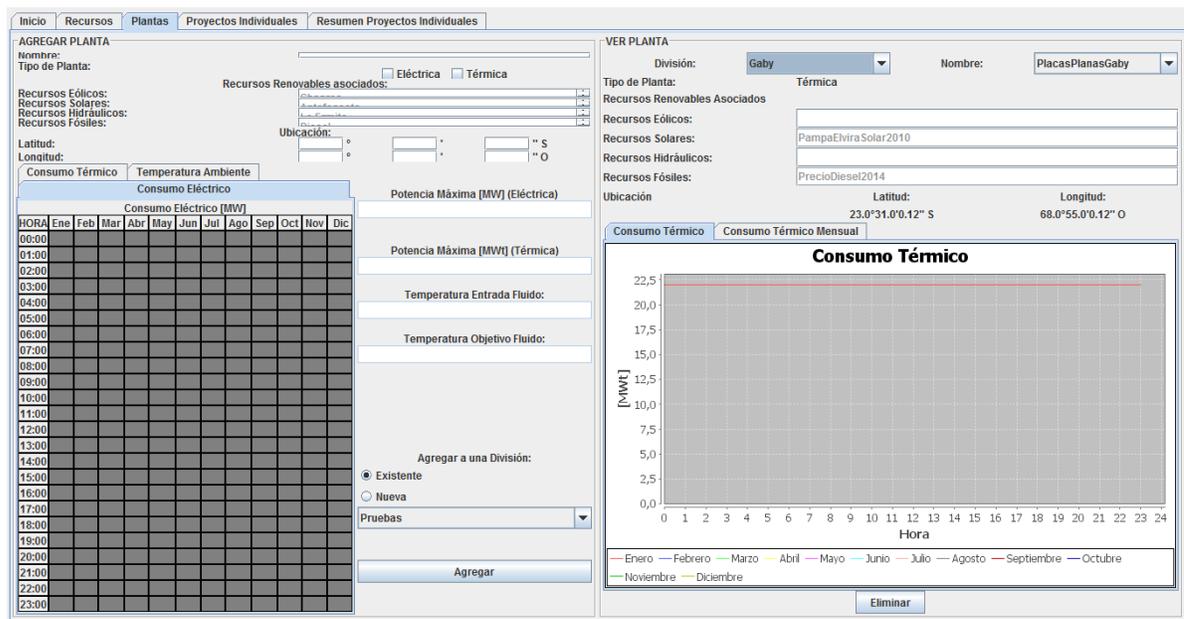


Figura 7-3: Interfaz gráfica para agregar plantas mineras a la base de datos.

7.2.2.- Configuración de Proyectos Individuales

Al momento en que se ingresa una planta y se guarda en la base de datos de manera exitosa, la herramienta genera un proyecto individual correspondiente al tipo de planta seleccionado y con los recursos que el usuario asoció en el ingreso de datos. Con esto, el usuario puede cambiar a la

pestaña de proyectos individuales y encontrar el proyecto asociado a los recursos y planta que acaba de crear. Para llegar al proyecto recién ingresado, se debe indicar la división, planta, tecnología y recurso al que corresponde, como se visualiza en la parte superior de la Figura 7-4.

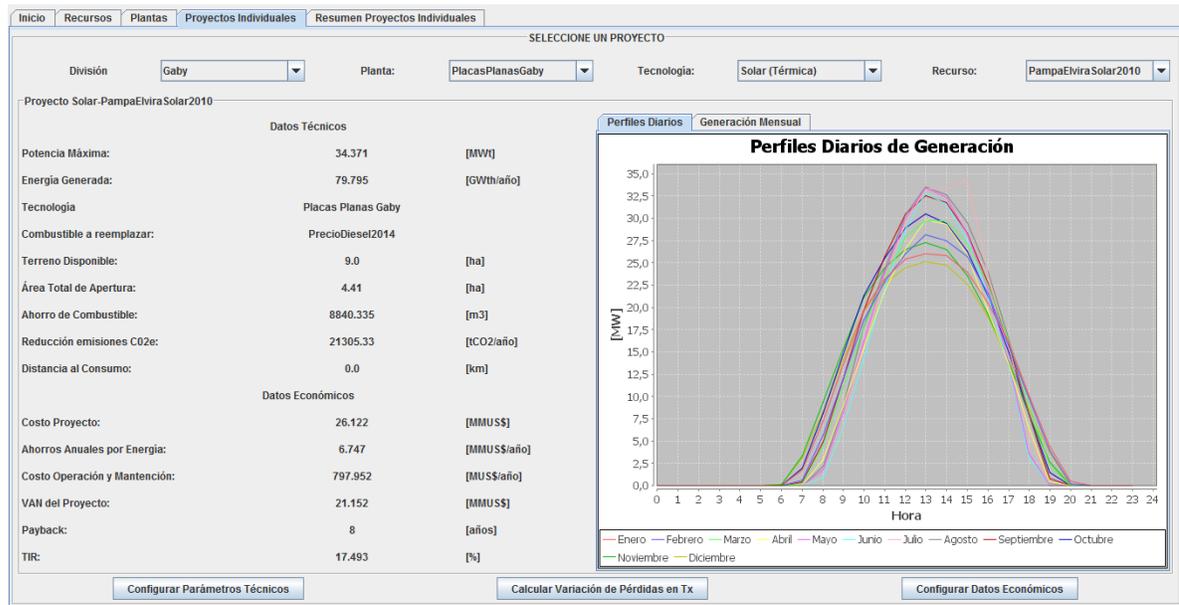


Figura 7-4: Interfaz gráfica para visualizar los proyectos individuales.

En la Figura 7-4 es posible apreciar el proyecto solar Pampa Elvira, perteneciente a la división Gaby, asociado a la planta PlacasPlanasGaby, utilizando la tecnología solar térmica y asociado al recurso solar PampaElviraSolar2010. A la izquierda es posible visualizar los datos técnicos, donde se señala el tipo de tecnología que se utilizó y el combustible a reemplazar (recurso fósil que se asoció a la planta), en este caso PrecioDiesel2014.

Si el proyecto se visualiza por primera vez, habrá que configurar sus parámetros técnicos y económicos. Existen valores por defecto para cada tipo de proyecto, razón por la que el usuario debe corroborar la información apretando el botón Configurar Parámetros Técnicos y Configurar Datos Económicos.

En el caso de un proyecto térmico, la interfaz para configurar los datos técnicos posee las siguientes opciones según se visualiza en la Figura 7-5: tipo de sistema solar, tipo de combustible, costo de la tecnología US\$/kW], costo de operación y mantenimiento US\$/MWh], y uso del terreno %].

En el caso de un proyecto híbrido, la configuración de los datos técnicos es prácticamente idéntica, con la diferencia de que la eficiencia (eléctrica y térmica) es un promedio que depende del modelo PVT, y que el costo de la tecnología tiene como unidad US\$/m²].



Figura 7-5: Interfaz gráfica para la configuración de parámetros técnicos – Proyecto solar térmico.

Para todos los proyectos la interfaz para configurar los datos económicos posee las siguientes opciones según se visualiza en la Figura 7-6: Precio de la Energía (US\$/MWh), Precio de la Potencia (US\$/MW mes), Precio Bono Carbono (US\$/tonCO₂e), Variación anual del IPC (%/año), Tasa de Descuento (%) y Vida Útil (años). Cabe destacar que los dos primeros se utilizan solo en proyectos eléctricos e híbridos.

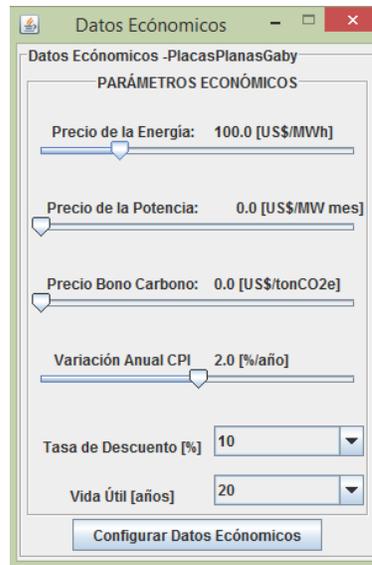


Figura 7-6: Interfaz gráfica para la configuración de parámetros económicos - Proyecto solar térmico.

A su vez, dependiendo de la división en que se haya localizado, se podrá visualizar el proyecto en la pestaña resumen de proyectos individuales, donde se clasifica por división y tipo de proyecto, como se aprecia en la Figura 7-7. Esto permite un análisis de varios proyectos dentro de una división y contrastar sus características técnico-económicas más relevantes.

RESUMEN DE PROYECTOS										
División: Gaby										
Proyectos Eléctricos		Proyectos Térmicos		Proyectos Híbridos						
Planta	Proyecto	Pnom [MW]	E [GWh/año]	F.P. [%]	Inv [MMUS\$]	Ing [MMUS\$/año]	VAN [MMUS\$]	Payback [años]	TIR [%]	
PlacasPlanasGaby	Solar-PampaElviraSol.	34.371	79.795	26.502	26.122	4.759	21.152	8	17.493	

Figura 7-7: Interfaz gráfica para visualizar el proyecto individual en el resumen de proyectos.

7.2.3.- Impacto por Pérdidas del Sistema de Transmisión [7]

Para el cálculo del impacto en las pérdidas en el sistema de transmisión se hace necesario disponer de una representación de dicho sistema en DeepEdit, a modo de diagrama unilineal. Esta representación debe tener al menos los siguientes elementos:

- Carga (Load) que representa el consumo eléctrico de la planta minera: El SEP debe poseer al menos una carga que represente el consumo asociado a la planta minera.
- Generador renovable que represente el proyecto: En la misma barra en que se conecta la carga, se debe agregar un generador renovable que represente la generación de energía eléctrica en el punto de consumo.
- Generador de referencia (Slack): Los sistemas eléctricos mineros se abastecen, por lo general, de un sistema eléctrico mayor, el que debe representarse como un generador Slack. Este tipo de generadores tiene la característica de adaptar su generación de energía de manera de cumplir con los requerimientos del sistema eléctrico de la minera. Este generador debe situarse en el punto en que se mide el consumo del sistema eléctrico analizado.

Presionando el botón Calcular Variación de Pérdidas en Tx se abre la ventana que aparece en la Figura 7-8. Si no hay ningún sistema eléctrico seleccionado, se debe crear un sistema eléctrico o seleccionar uno desde un archivo que cumpla con los requisitos mínimos. Una vez que se ingrese el sistema eléctrico en DeepEdit, en la ventana deberá seleccionarse el botón Actualizar el Esquemático, lo que actualizará los generadores y cargas del sistema eléctrico. A continuación, deben seleccionarse el generador y la carga para calcular las pérdidas, las que se verán reflejadas en el proyecto eléctrico o híbrido.

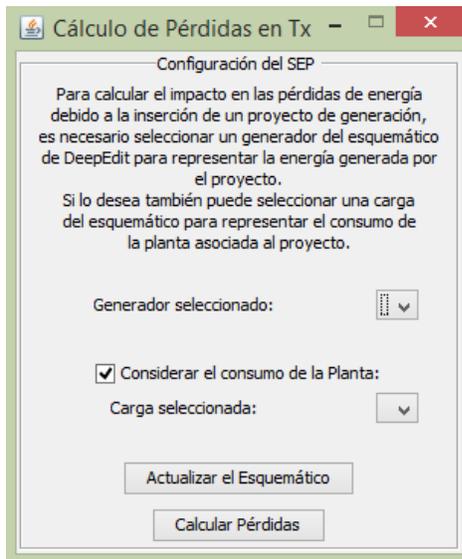


Figura 7-8: Interfaz gráfica para el cálculo de pérdidas en transmisión.

7.3.- RECOMENDACIONES AL PROGRAMADOR

Clases Operativas de la Herramienta

- **Clases de Interfaces Gráficas: ELPMFrame.java, FrameDE.java, FrameEco.java, FrameTecno.java.** Corresponden a las interfaces gráficas de todo el programa, de manera que esta clase realiza la interacción entre el usuario y el Motor de la herramienta. Las interfaces gráficas que se crearon fueron la principal (todas las pestañas del programa, datos, botones, campos, etc. También se crearon interfaces gráficas para configurar los parámetros técnicos de los proyectos y para configurar los datos económicos de los proyectos. Adicionalmente se creó una interfaz para realizar la interacción con DeepEdit con el propósito de calcular la variación de pérdidas en transmisión.
- **Clase Conexión Base de Datos: ConexionBD.java.** Esta clase se encarga de establecer la comunicación entre la herramienta computacional y la base de datos. Tanto el ingreso como rescate (y eliminación) de la información de la base de datos se realiza a través de esta clase. También tiene la funcionalidad de recuperar la información ingresada para sesiones posteriores, cargando Recursos, Plantas y Proyectos (y toda su información asociada) al momento en que se ejecuta el programa. El programa se ejecuta utilizando una base de datos elaborada Microsoft Access, razón por la cual es necesario contar con los drivers de Access que permiten la correcta comunicación entre este programa y Java.
- **Clase Motor: Motor.java:** Consiste en el elemento central de la herramienta que funciona como motor, y que por tanto permite el correcto funcionamiento de todas las clases.
- **Clase Gráficos: Graficos.java.** Debido a la gran cantidad de gráficos a realizar, se creó una clase especial para representar los gráficos. En esta clase destaca el uso de la biblioteca de clases para gráficos JFreeChart.

A continuación se muestra el diagrama de clases estructurales de la herramienta computacional:

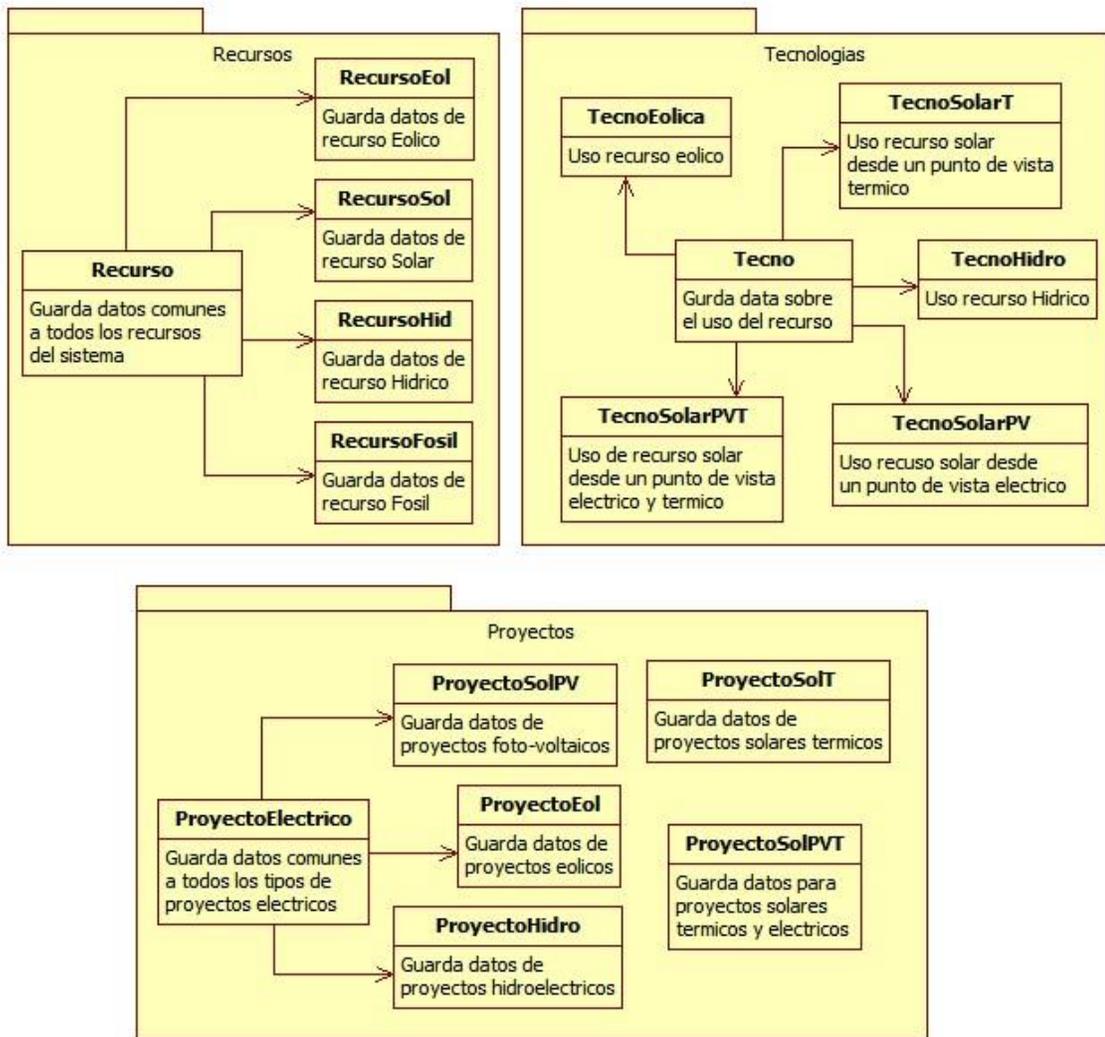


Figura 7-9: Diagrama de clases estructurales de la herramienta computacional.

El proceso interno para almacenar y visualizar la información se aprecia en la Figura 7-10. Cabe destacar que el usuario, a través de la Interfaz Gráfica, indica la información que quiere almacenar, visualizar o borrar. Motor identifica el objeto que se necesita y envía una solicitud de información a ConexionBD, la que se comunica directamente con la Base de Datos y almacena, recupera o borra el objeto que Motor solicitó.

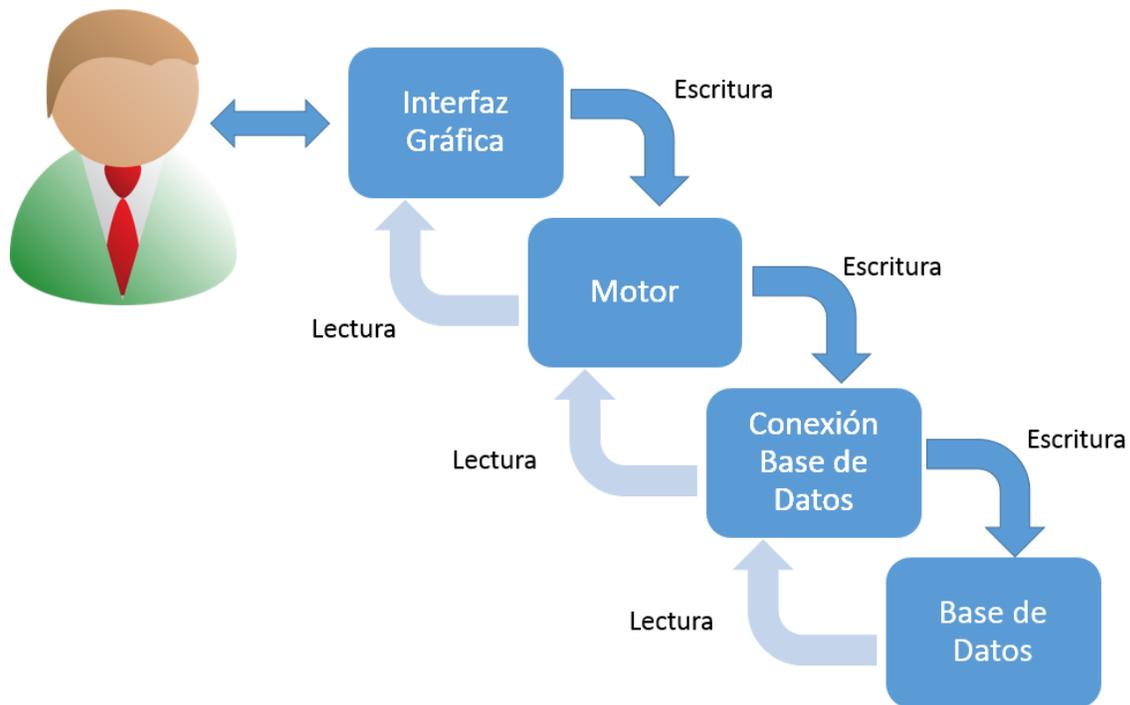


Figura 7-10: Cómo se guarda y extrae la información de la base de datos.

El programa se debe compilar siguiendo los siguientes pasos:

1. Ubicar todos los archivos de fuente en la carpeta ELPM del Srcjava.
2. Se recomienda borrar todos los archivos .class que tengan el nombre de algún archivo de ELPM.
3. Ejecutar el archivo makes_ELPM.
4. Makes ELPM fija el directorio de Java y las bibliotecas que utilizará, de manera que si se agrega una biblioteca nueva se debe agregar a este ejecutable. Luego se ejecuta el archivo Main.java, de manera de compilar todas las clases de ELPM y generar archivos .class en la carpeta run.
5. Si los archivos de fuente se compilaron con éxito, aparecerá un mensaje diciendo que se generaron archivos .class y se movieron a la carpeta run. Si el usuario se dirige a la carpeta run, se encontrará con los archivos .class recientemente creados y movidos.
6. Si se desea compilar DeepEdit, se deben realizar los mismos pasos con la diferencia que el archivo a ejecutar se denomina makes_DE, el que compila todas las clases de DeepEdit y genera dos archivos .class que se mueven a la carpeta run.
7. Finalmente ejecute el programa con runNew_ELPM. Si DeepEdit se abre correctamente, los archivos .class pertenecientes a DeepEdit están correctamente compilados en la carpeta run. Si se abre correctamente ELPM desde DeepEdit, los archivos .class pertenecientes a ELPM están correctamente compilados en la carpeta run.