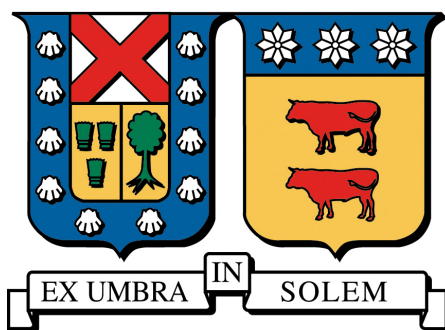




**OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA DE COLECTORES SOLARES TÉRMICOS
PLANOS CON ALGORÍTMOS GENÉTICOS PARA DIFERENTES PERFILES
DE DEMANDA ENERGÉTICA**

Tesis de Grado presentado por

RODRIGO ENRIQUE ARAYA IBACETA

como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil Industrial

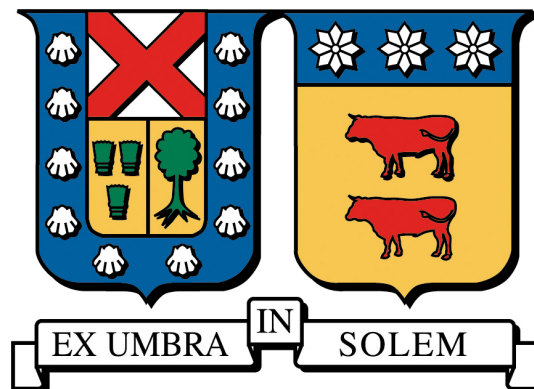
y al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Industrial

Profesor Guía:

Dr. ANDRÉS FUENTES CASTILLO

ENERO, 2017

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS



**OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA DE COLECTORES SOLARES TÉRMICOS
PLANOS CON ALGORÍTMOS GENÉTICOS PARA DIFERENTES PERFILES
DE DEMANDA ENERGÉTICA**

Tesis de Grado presentado por

RODRIGO ENRIQUE ARAYA IBACETA

como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil Industrial

y al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Industrial

Profesor Guía:

Dr. ANDRÉS FUENTES CASTILLO

ENERO, 2017

TITULO DE LA TESIS:

**OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA DE COLECTORES SOLARES TÉRMICOS
PLANOS CON ALGORÍTMOS GENÉTICOS PARA DIFERENTES PERFILES
DE DEMANDA ENERGÉTICA**

AUTOR:

RODRIGO ENRIQUE ARAYA IBACETA

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Industrial de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. ANDRÉS FUENTES CASTI-
LLO

Dr. JORGE CONTRERAS RODRÍ-
GUEZ

Dr. AYMERIC GIRARD

Valparaíso, Chile. Enero de 2017



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar dedicar y agradecer este trabajo a mi familia, y en especial a mis padres, Enrique y Anakena, por todo el apoyo y cariño que me han dado siempre. Muchas gracias gracias por aguantarme en los momentos de mal humor, por las palabras y su ayuda. Sin ustedes no sería lo que soy hoy en día. También a mis hermanos, que siempre han confiado en mí.

A Gabriela, por su apoyo, cariño y paciencia a pesar de la distancia. A mis amigos, con quienes compartimos muchos buenos momentos, noches sin dormir, alegrías y desiluciones, y que hicieron que ir a la universidad sea un agrado.

A mis profesores, quienes me han entregado los conocimientos para estar donde estoy hoy en día y estar seguro de mis capacidades profesionales. Agradecer especialmente a Andrés, mi profesor guía, por su ayuda y consejo, y a Jorge y Fabián, quienes me ayudaron en la elaboración de este trabajo.

Finalmente agradecer al Departamento de Industrias y la Universidad Técnica Federico Santa María por la oportunidad que se brindó para poder dar este postgrado con todas las facilidades posibles.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio se enmarca en la investigación y evaluación económica de la energía solar térmica para el país. Un total de 182 locaciones en Chile son analizadas con el objetivo de determinar la combinación óptima entre el área colectora y el volumen de acumulación de agua que maximice el Life-Cycle Saving (LCS) de una Planta de Colectores Solares Térmicos Planos (PCSTP), utilizando algoritmos genéticos (AG) como método de optimización, implementado en MATLAB.

Son analizados seis tipos de perfiles de consumo diferentes para determinar su influencia en el resultado económico. Para la evaluación financiera, se considera un horizonte de evaluación de 20 años con una tasa de descuento del 10 %. Los resultados arrojan que para todos los perfiles estudiados se tiene un comportamiento similar respecto a los resultados de LCS obtenidos a lo largo y ancho de Chile. Esto es, en las zonas costeras los resultados son menores que en las zonas cordilleranas, y éstos tienden a disminuir conforme se aumenta de latitud. En la zona norte de Chile existe un gran potencial para el desarrollo de sistemas solares térmicos, donde se destacan las zonas que están por sobre los 2000 msnm, las cuales tienen resultados sobresalientes con respecto a otra zona que se encuentra a la misma latitud. La locación de Mina Escondida obtiene el mejor promedio de LCS para todos los perfiles estudiados: 719.3 kUSD.

El Perfil 1 (Consumo constante las 24 horas) arroja el mejor promedio de LCS para todas las locaciones analizadas (546.97 kUSD), y es un 9.96 % superior al Perfil 6 (Consumo intensivo entre las 1 P.M. y 5 P.M, perfil con los resultados más bajos.

Posteriormente, un análisis de sensibilidad se lleva a cabo en las locaciones con mayor y menor LCS para evaluar la dependencia de los resultados financieros con la incertidumbre de los parámetros de entrada. Este análisis de sensibilidad es realizado sobre parámetros del modelo energético (cantidad de agua y temperatura requerida), de optimización y del modelo financiero.

Los cambios en la temperatura de consumo se hacen relevantes para el caso en que la radiación solar es mayor, obteniendo mejores resultados a medida que aumenta la cantidad de agua de consumo y la temperatura de ésta, los mejores resultados para el caso de 80°C.

En cuanto a los parámetros de la optimización, los tiempos de convergencia del AG varían considerablemente bajo las distintas configuraciones estudiadas, con diferencias de casi el 300 % entre la configuración más rápida y la más lenta, mientras que el LCS varía solo un 3 % entre la mejor y peor configuración. Finalmente, los resultados financieros arrojan que para el 100 % de los casos analizados los resultados serán positivos.

Palabras Clave: Planta de Colectores Solares Térmicos Planos, Radiación solar, Life-Cycle Savings, Algoritmos Genéticos, Optimización

ABSTRACT

This study is part of the research and economic evaluation of solar thermal energy for the country. A total of 182 locations in Chile were analyzed with the objective of determining the optimum combination between the collecting area and the storage tank volume that maximize the life-cycle saving (LCS) of a Flat-plate solar collector (PCSTP) plant, using genetic algorithms (AG) as an optimization method, implemented in MATLAB.

Six different types of consumption profiles were analyzed to determine their influence on economic performance. For the financial evaluation, a 20-year evaluation horizon with a discount rate of 10 % is considered. The results for all the studied profiles have a similar behavior with respect to the LCS results obtained in the length and width of Chile. That is, in the coastal zone the results are lower than in the andean zone, and tend them to diminish as it increases of latitude. In the north of Chile there is great potential for the development of solar thermal systems, where the areas that are above 2000 meters above the sea level, which have outstanding results with respect to another zone that is at the same latitude. The location of Mina Escondida obtains the best LCS average for all profiles studied: 719.3 kUSD.

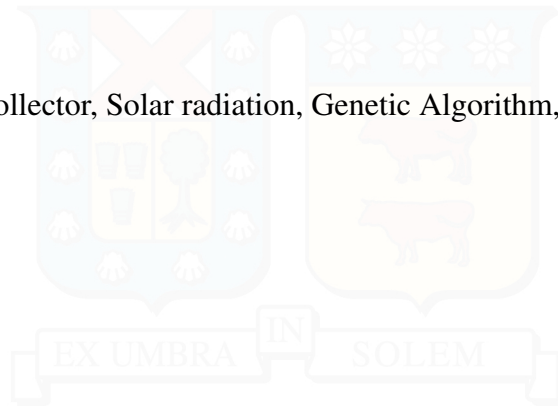
Profile 1 (Constant consumption at 24 hours) yields the best LCS average for all locations analyzed (546.97 kUSD), and is 9.96 % higher than Profile 6 (intensive consumption between 1 P.M. and 5 P.M.), profile with lowest Results.

Subsequently, a sensitivity analysis is carried out at locations with higher and lower LCS to evaluate the dependence of financial results with the uncertainty of the input parameters. This sensitivity analysis is performed on parameters of the energy model (quantity of water and temperature required), optimization (AG parameters) and financial parameters.

The changes in the temperature of consumption become relevant for the case in which the solar radiation is greater, obtaining better results as the quantity of water of consumo and the temperature of this one increases, the best results for the case of 80°C. As for the parameters of the optimization, AG convergence times vary considerably under the different configurations studied, with almost 300 % difference between the fastest and the slowest

configuration, while the LCS varies only by 3 % between best and worst settings. Finally, the financial results show that for 100 % of the analyzed cases the results will be positive.

Keywords: Flat-Plate Solar Collector, Solar radiation, Genetic Algorithm, Optimization, Life-Cycle Saving



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Antecedentes generales	1
1.1. Mercado Eléctrico Chileno e Institucionalidad	2
1.2. Contexto Energético en Chile y el Mundo	4
1.3. El Calentamiento Global y los problemas ambientales	7
1.4. Tipos de Fuentes Energéticas	9
1.4.1. Energías No Renovables	10
1.4.2. Energías Renovables	13
1.5. Ley 20.365: Beneficio Tributario para Sistemas Solares Térmicos	18
1.6. Justificación de este trabajo	19
2. Análisis Bibliográfico	21
2.1. Tópicos sobre la Energía Solar	22
2.1.1. El Sol	22
2.1.2. Radiación Solar	22
2.1.3. Radiación Solar Sobre Planos Inclinados	23
2.1.4. Ángulos solares	24
2.1.5. Factores que inciden en la recepción de energía solar en la Tierra	25
2.2. Datos Meteorológicos	29
2.3. Colectores Solares Térmicos Planos	31
2.3.1. Historia de los Colectores Solares Térmicos	31
2.3.2. Funcionamiento	34
2.3.3. Modelo de Energía	35
2.4. Planta de Colectores Solares Térmicos Planos	36
2.5. Dimensionamiento de una Planta de Colectores Solares Térmicos Planos	39
2.5.1. Método ϕ	42
2.5.2. Método $f - \text{chart}$	43
2.5.3. Transient System Simulation Tool (TRNSYS)	47
2.6. Almacenamiento de la Energía en Plantas de Colectores Solares Térmicos Planos	50
2.6.1. Estratificación en el Estanque de Acumulación	51
2.7. Optimización de Plantas de Colectores Solares Planos con Algoritmos Genéticos	55
3. Objetivos	61
3.1. Objetivo Principal	62
3.2. Objetivos Secundarios	62

4. Metodología	63
4.1. Modelo de Energía	64
4.1.1. Descripción de la PCSTPP	64
4.2. Datos Meteorológicos Locales y Perfiles de Consumo	67
4.2.1. Perfiles de Consumo	67
4.3. Evaluación Financiera	70
4.4. Optimización mediante Algoritmos Genéticos	72
4.5. Análisis de Sensibilidad y Riesgos	74
4.5.1. Análisis sobre la Temperatura y Factor de Carga	75
4.5.2. Análisis sobre parámetros de Control de los AG	75
4.5.3. Análisis Financiero y de Riesgo	75
5. Resultados	77
5.1. Comparación con Modelo Kalogirou	78
5.2. Generación de Mapa Termosolar para Chile	80
5.3. Análisis de Sensibilidad	84
5.3.1. Temperatura y Factor de Carga	84
5.3.2. Parámetros de Control Algoritmo Genético	86
5.3.3. Resultados Financieros y Análisis de Riesgo	86
6. Conclusiones	89
Bibliografía	93
A. RESULTADOS DIFERENTES PERFILES	101

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Resumen de los métodos de diseño para PCSTP (Elaboración propia)	41
2.2. Comparación de distintos estudios para PCSTP que utilizan Algoritmos Genéticos. (Elaboración propia)	59
4.1. Características del Colector Solar [1].	65
4.2. Parámetros del Estanque de Almacenamiento	66
4.3. Parámetros Económicos	72
4.4. Parámetros del AG a sensibilizar	76
5.1. Comparación de modelos	78
5.2. Parámetros Financieros Utilizados para la Validación	79
5.3. Resultados de la optimización para la PCSTP según zona y perfil (kUSD)	80
5.4. Resultados Parámetros de Control AG	86



ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Producto interno bruto y consumo energético per cápita en tep	5
1.2. Composición de la matriz energética primaria año 2014	6
1.3. Composición de la matriz de generación eléctrica para los principales Sistemas Interconectados de Chile. (Fuente: Energía Abierta)	7
1.4. Media global del cambio de temperatura superficial (tierra y mar) para el período 1880-2015, respecto a la media de 1951-1980	8
2.1. Irradiancia espectral sobre la Tierra a la distancia promedio del Sol	23
2.2. Ángulos solares	26
2.3. (a) Promedio según hora de Radiación Global Horizontal para Santiago (b) Promedio según mes de Radiación Global Horizontal para Santiago. (Fuente: Elaboración propia)	27
2.4. Trayectoria terrestre alrededor del Sol	28
2.5. Energía Solar según zona geográfica	29
2.6. Esquema de metodología para obtener mapas GHI	31
2.7. El primer horno solar con lentes concentradoras de vidrio	32
2.8. Sección Transversal Colector Solar Plano	34
2.9. Sistema Termosifón o Convección Natural	37
2.10. Sistema de circulación forzada directo	38
2.11. Sistema de circulación forzada indirecto	38
2.12. Sistema con Intercambiadores de calor externo	39
2.13. Rendimiento característico de un colector solar térmico	43
2.14. Sistema de calefacción solar basado en líquidos estándar para calefacción y agua caliente	44
2.15. Gráfica de f para sistemas térmicos solares para calentamiento de agua	46
2.16. Sistema solar térmico estándar para calentamiento de agua	46
2.17. Diagrama de flujo para un PCSTP en TRNSYS	49
2.18. Sistema típico de almacenamiento de agua sin estratificación	50
2.19. Balance de energía para un estanque sin estratificación	52
2.20. (a) Estratificación del estanque (b) Balance de energía en nodo j	53
2.21. Esquema de funcionamiento de los AG	58
4.1. Diagrama PCSTP	64
4.2. Promedio anual de la Radiación Solar Global en Chile	68
4.3. Perfiles generados	70
4.4. Representación esquemática del proceso de optimización	74

5.1. Perfil 1. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ). (Fuente: Elaboración propia)	81
5.2. Comparación de resultados según perfil para ciudades ubicadas al norte (Calama, 22°88'S 68°55'O)), centro (Santiago, 33°27'S 70°40'O) y sur (P. Montt, 41°46'S 72°94'O) de Chile (a) LCS y fracción solar (b) Inversión y SOI.	83
5.3. Analisis de sensibilidad para el perfil 1 ante cambios en la cantidad de agua y la temperatura en el mejor (a) y peor (b) escenario. (Fuente: Elaboración propia)	85
5.4. Resultados de la sensibilización OAT para el Perfil 1	87
5.5. Resultados análisis de riesgo Monte Carlo en Mina Escondida	88
A.1. Perfil 2. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ). (Fuente: Elaboración propia)	102
A.2. Perfil 3. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ). (Fuente: Elaboración propia)	103
A.3. Perfil 4. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ). (Fuente: Elaboración propia)	104
A.4. Perfil 5. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ). (Fuente: Elaboración propia)	105
A.5. Perfil 6. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ). (Fuente: Elaboración propia)	106

Nomenclatura

A_c	Área colectora	m^2
$A_{s,fl}$	Área transversal del fluido	m^2
$A_{s,j}$	Area superficial de nodo j-ésimo	m^2
$A_{s,w}$	Área transversal de la pared del estanque	m^2
$A_{tr,j}$	Área transversal del nodo j-ésimo	m^2
c_p	Calor específico	$J/kg^\circ C$
c_c	Costo del colector por unidad de área	USD/m^2
c_{fixed}	Costo fijo	USD
C_{fuel}	Costo combustible	USD/J
$C_{O\&M}$	Costo anual de operación y mantenimiento	USD
c_s	Costo del estanque de almacenamiento por unidad de volumen	USD/m^3
C	Inversión inicial	USD
d	Diámetro estanque de acumulación	m
D	Pago anual de la deuda	USD
f	Fracción solar	-
f_d	Apalancamiento	%
H	Altura del estanque	-
I_T	Irradiancia global sobre una superficie inclinada	W/m^2
k_f	Conductividad térmico del agua	$W/m^\circ C$
k_w	Conductividad térmico de la pared del estanque	$W/m^\circ C$
$\dot{m}_c$	Flujo másico de agua desde el colector	kg/s
$\dot{m}_l$	Flujo másico de agua hacia el consumo	kg/s
$\dot{m}'_l$	Flujo másico de agua hacia el consumo	kg/hr
m_s	Masa de agua en el estanque	kg
N	Período de evaluación	año
n_{month}	Número del mes	-
N'	Período de la deuda	año

No	Cantidad de nodos del estanque	-
Q	Energía	J
$\dot{Q}_{aux}$	Tasa de energía otorgada por el sistema auxiliar	W
$\dot{Q}_{down}$	Tasa de energía neta descendente entre dos nodos adyacentes del tanque	W
$\dot{Q}_{end}$	Tasa de energía a partir de la diferencia entre el flujo másico proveniente de la red de cañerías y el flujo másico de salida hacia el colector en el último nodo del estanque	W
$\dot{Q}_{load}$	Tasa de energía requerida para el consumo	W
$\dot{Q}_{loss}$	Tasa de pérdida de energía desde el estanque hacia el ambiente	W
$\dot{Q}_{one}$	Tasa de energía a partir de la diferencia entre el flujo másico proveniente del colector y el flujo másico de salida hacia el consumo en el primer nodo del estanque	W
$\dot{Q}_{up}$	Tasa de energía neta ascendente entre dos nodos adyacentes del estanque	W
$\dot{Q}_u$	Tasa de energía útil que entrega el colector	W
r	Tasa de descuento anual	%
r_d	Tasa de interés anual de la deuda	%
r_e	Tasa de inflación anual del combustible	%
r_i	Tasa de inflación anual	%
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C
$T_{in,c}$	Temperatura de entrada del agua al colector	°C
T_{load}	Temperatura requerida para el consumo	°C
T_{max}	Temperatura máxima en el mes	°C
T_{min}	Temperatura mínima en el mes	°C
$T_{out,c}$	Temperatura de salida del agua desde el colector	°C
$T_{s,j}$	Temperatura del agua en el nodo j-ésimo del estanque	°C
T_{sup}	Temperatura del agua de la red de cañerías	°C

U_s	Coeficiente global de pérdidas del estanque	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
U_L	Coeficiente global de pérdidas del colector	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
V_s	Volumen estanque de acumulación	m^3
Δx	Ancho del nodo del estanque	m
ϕ	Utilizability	-
ρ	densidad del agua	kg/m^3
$\tau\alpha$	Producto transmitancia-absortancia del colector	-
AG	Algoritmo genético	-
AMT	Año Meteorológico Típico	
ERNC	Energías Renovables No Convencionales	-
LCC	Life-Cycle Cost (Costo del ciclo de vida)	USD
LCS	Life-Cycle Savings (Ahorro del ciclo de vida)	USD
PCSTP	Planta de Colectores Solares Térmicos Planos	-
PWF	Present worth factor (Valor presente neto)	-
SOI	Savings over investment (Ahorro por sobre la inversión)	-
SST	Sistemas solares térmicos	-

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, en los últimos 40 años, el consumo y la producción energética se han duplicado principalmente debido a factores como el crecimiento económico mundial, el incremento de la capacidad productiva de los países, el mayor tamaño del sector transporte y un aumento de la población mundial. Chile no es la excepción, y según el balance del Ministerio de Energía, entre 1990 y 2015 el consumo de electricidad creció 339,3 % (desde 16.431 GWh a 72.175 GWh) [2].

La matriz energética de Chile aún es altamente carbonizada, de los 20.375 MW instalados al 2015, el 58 % es termoelectricidad, 29,6 % es hidroelectricidad convencional y solo 12,4 % son Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Ahora bien, en la actualidad se encuentra en un proceso de cambio de la matriz energética con el fin de que las ERNC tengan una participación importante, con una meta clara para el año 2025: El 20 % de la matriz de generación eléctrica en Chile será en base a ERNC. Este rumbo en la política energética se basa en estudios acabados de los impactos positivos que tendrían sobre el medio ambiente y la sociedad, junto a una menor dependencia de aquellas fuentes de energía fósiles que son altamente contaminantes y generan constantes problemas sobre la comunidad.

El presente trabajo se enmarca dentro de las ERNC: la energía solar térmica. La mayoría de los países tienen sistemas de energía que convierten las fuentes primarias de energía en electricidad y parte de ella la utilizan para calentar o enfriar. De hecho, la calefacción y la refrigeración representan alrededor del 46 % del consumo mundial de energía y casi la mitad de todo el consumo de energía final en Europa es calor [3]. Las Plantas de Colectores Solares Térmicos Planos (PCSTP) para producir calor a baja-media temperatura (40 a 80 °C) son hoy en día una tecnología madura. Donde existe suficiente radiación solar, una PCSTP es una alternativa competitiva económicamente cuando es comparada con el calor producido mediante otros medios. Sin embargo, cuando una gran cantidad de calor es requerida, grandes PCSTP deben ser instaladas, y la eficiencia de la planta es altamente influenciada por el modo de operación, el volumen de líquido almacenado y el área colector.

El Norte de Chile tiene un gran potencial para el uso de esta fuente energética la cual

no ha sido aprovechada. Esta zona es alimentada por el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), el cual tiene una capacidad instalada de 3.97 GW, del cual el 95 % se genera a partir de combustibles fósiles [2]. El SING abastece en gran medida a la industria y a la minería, esta última intensiva en el uso de agua y de energía. En 2016 se realizó un análisis sobre el uso de energía en la industria minera chilena, y el potencial uso de tecnologías termosolares, y se concluye que es recomendable la instalación de colectores solares planos para el proceso de electrowinning de la actividad minera [4].

Las PCSTP tienen una amplia gama de usos: residencial, agricultura, hospitales, lavanderías, centros deportivos u otras actividades industriales [5]. Sus usos más importantes para estas aplicaciones son: la producción de calor para uso de procesos industriales, refrigeración solar y aire acondicionado, secado solar y desalinización de agua marina [6], con rangos de operación entre los 40 a 80°C para colectores de vidrio, y hasta los 120°C para los colectores de tubo al vacío.

A mediados del siglo XX comenzó el estudio formal para determinar el rendimiento de los colectores solares planos, motivados por la alta inversión inicial que requerían los sistemas solares térmicos para uso doméstico. En este sentido, a finales de la década de los '50 Hottel y Willier desarrollaron la primera técnica de simulación para sistemas de colectores solares planos, el método ϕ [7], el cual sería ampliado por Liu y Jordan [8] y Klein [9] en las décadas siguientes. Por otro lado, en el Laboratorio de Energía Solar de Wisconsin-Madison se desarrolló TRNSYS [10], un software que realiza una detallada simulación utilizando un enfoque modular, en el cual cada componente del sistema es modelado independientemente y es el usuario quien debe señalar la manera en que éstos deben estar conectados. Klein y Beckman encontraron que existe una correlación entre la incidencia solar, las pérdidas de los colectores solares, y la fracción promedio de energía proporcionada por el sol al sistema. Así desarrollaron el método $f - chart$ [11], el cual proporciona la fracción solar mensual a partir de las ganancias y pérdidas térmicas del colector.

Hoy en día, las técnicas estocásticas o métodos de búsqueda aleatoria han generado un gran interés entre los investigadores para la estimación, predicción y optimización de los diversos sistemas de energía solar, debido a que generan mejores resultados en menores

tiempos que los modelos deterministas [12]. En 1995, Kennedy y Eberhart [13] propusieron la optimización por enjambre de partículas, donde las posibles soluciones son representadas por partículas que se mueven por dentro de las restricciones del problema, siguiendo la misma raíz de las actuales soluciones óptimas. Así, cada partícula tiene memoria, lo que hace que recuerden la mejor solución en el espacio de búsqueda. Otro método estocástico de optimización son los algoritmos genéticos (AG), descritos por Holland [14] en 1975. Holland se inspira en el principio Darwiniano de la supervivencia del más apto, en el que el individuo más preparado de la población tiene la posibilidad más alta de sobrevivir. De esta manera crea una serie de pasos que se basan en la mecánica de la selección y genética natural, donde cada generación de individuos son evaluados en la función objetivo hasta que las soluciones del problema converjan. Los GA son mayormente utilizados en problemas de optimización discretos, tal como lo es la optimización de sistemas térmicos solares de agua caliente [5].

En general, un sistema de calentamiento de agua con energía solar debería ser preferido por los responsables de la toma de decisiones de las organizaciones si el sistema es económicamente competitivo con el sistema de energía convencional bajo condiciones competitivas del mercado, o bien, si existen incentivos gubernamentales para los sistemas de ERNC, o penalizaciones por el uso de energía convencional, lo suficientemente grandes para que los primeros sean más atractivos [15]. Una manera de determinar económicamente la competitividad de estas tecnologías es obtener los costos en que incurren los sistemas de calentamiento de agua con energía convencional y con energía solar, y obtener el Life-Cycle Saving (LCS), el cual es un parámetro financiero que señala el ahorro que se incurre a lo largo de todo el ciclo de vida de los sistemas al hacer un cambio de tecnología.

En el presente trabajo discute un modelo de simulación modular basado en los principios de la evolución genética y natural, que permite encontrar una combinación óptima entre el área colectora y el volumen de líquido almacenado que maximiza el LCS para evaluar una PTCSP a lo largo y ancho de Chile. El objetivo es utilizar el modelo de simulación para generar un mapa termosolar de Chile que muestre los diferentes niveles de LCS que puede alcanzar una PCSTP bajo diferentes perfiles de consumo y una temperatura de consumo constante. Para la generación del mapa termosolar 182 puntos geográficos

fueron considerados. Para la selección de estas zonas de muestreo se consideraron tres puntos de un área delimitada por paralelos y meridianos, privilegiando centros con mayor densidad poblacional y distantes entre sí. Para obtener el dimensionamiento de la CSTP se utiliza la técnica de optimización GA, en la que se busca maximizar el LCS según la mejor combinación entre el área colectora y el volumen de acumulación, ya que son éstos los parámetros más importantes para obtener buenos rendimientos del sistema [16].

En el Capítulo 1 se muestra el panorama general sobre la energía en Chile y el mundo, la composición del mercado eléctrico en Chile, las instituciones relacionadas al Ministerio de Energía, problemáticas ambientales que se sufren hoy en día, los tipos de fuentes energéticas con que cuenta el planeta, y cual es la situación actual de la energía termosolar en Chile.

En el Capítulo 2 se hace una revisión bibliográfica sobre los tópicos más relevantes para llevar a cabo la investigación, pasando por la radiación y los factores que influyen para que ésta sea aprovechada; los colectores solares planos, estudiando su historia, composición, modelo de energía; el estanque de acumulación de agua y los modelos numéricos para aproximar el comportamiento del agua en su interior; los métodos de dimensionamiento para las PCSTP; y finalmente los AG, el modelo de optimización utilizado.

En el Capítulo 3 se explican los objetivos de esta investigación y la motivación que hay detrás de ella. En el Capítulo 4 se explica la metodología utilizada para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos planteados, y en los Capítulos 5 y 6 se encuentran los resultados y conclusiones respectivamente.



CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES GENERALES



1.1. Mercado Eléctrico Chileno e Institucionalidad

El año 1982 fue promulgada la Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE), la cual desagrega en tres partes el mercado eléctrico: generación, transmisión y distribución, y que además introduce la competencia y privatización del sector eléctrico chileno. Se establece un modelo de operación a mínimo costo global, y se fomenta que las empresas de generación puedan suscribir independientemente contratos de abastecimiento con clientes libres y empresas distribuidoras [17]. El Estado ejerce funciones de regulación, fiscalización y de planificación sobre las empresas privadas que participan en la generación y transmisión. Las partes que componen el mercado eléctrico son:

- **Generación:** Segmento constituido por un conjunto de empresas eléctricas propietarias de centrales generadoras de electricidad y que están encargadas de inyectar energía al sistema.
- **Transmisión:** Corresponde al conjunto de líneas, subestaciones y equipos destinados al transporte de electricidad desde los puntos de generación (producción) hasta los centros de consumo o distribución. El sistema de transmisión se divide en sistemas troncales y sistemas de sub-transmisión.
- **Distribución:** Corresponde al conjunto de líneas, subestaciones y equipos que permiten prestar el servicio de distribución de la electricidad a baja tensión (menor a 23 kV) hasta los consumidores finales, localizados en cierta zona geográfica explícitamente limitada.

Esta ley ha sido modificada constantemente a través de los años, creando reglamentos y normas que han buscado perfeccionar el sistema. El año 2004 se introducen una serie de reformas mediante la Ley 19.940, las cuales modifican un conjunto de aspectos que afecta a todos los medios de generación, introduciendo elementos especialmente aplicables a las energías renovables. Posteriormente, el año 2008 entra en vigencia la Ley 20.257, o "Ley ERNC", introduciendo formalmente el término de Energías Renovables No Convencionales y estableciendo la obligación para las empresas eléctricas que efectúan ventas de energía a

clientes finales para que acrediten que un porcentaje de la energía comercializada provenga de ERNC [17].

Con todos los cambios realizados ha sido necesario la creación de instituciones y organismos públicos encargados de monitorear y controlar el sector eléctrico. El año 2010 fue creado el Ministerio de Energía con el objetivo de elaborar y coordinar los planes, políticas y normas para el buen funcionamiento y desarrollo del sector energético, facilitando la participación de personas e instituciones en este proceso. Además, debe asesorar al Gobierno en todas aquellas materias relacionadas con la energía [18].

Además, existen otras cinco instituciones públicas e independientes que se relacionan con el ministerio en su labor reguladora [18]:

- Comisión Nacional de Energía (CNE): Organismo técnico encargado de analizar precios, tarifas y normas técnicas a las que deben ceñirse las empresas de producción, generación, transporte y distribución de energía, con el objeto de disponer de un servicio suficiente, seguro y de calidad.
- Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC): Organismo fiscalizador. Tiene como misión vigilar que las personas cuenten con productos y servicios seguros y de calidad en los sistemas de electricidad y combustibles, impulsando a los mercados energéticos hacia estándares más altos, a través del mejoramiento de la normativa y su fiscalización.
- Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables (CIFES): Organismo cuyo objetivo es apoyar al Ministerio de Energía y a la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) en el diseño, implementación, seguimiento, evaluación y promoción de programas y proyectos estratégicos con financiamiento público de innovación y fomento en energías sustentables, en particular, en la implementación de la política y plan de acción de innovación en energía.
- Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN): Institución que tiene como misión regular, fiscalizar y controlar, desde el punto de vista de la seguridad nuclear y radiológica, las instalaciones nucleares y radiactivas relevantes en todo el país. Las

actividades que se desarrollan al interior de la CCHEN, impactan en diversas áreas del quehacer nacional, siendo las más relevantes salud, industria, minería, agricultura y alimentación.

- Agencia Chilena de Eficiencia Energética (ACHEE): Fundación de derecho privado, sin fines de lucro, cuya misión es promover, fortalecer y consolidar el uso eficiente de la energía, articulando a los actores relevantes, a nivel nacional e internacional, e implementando iniciativas público privadas en los distintos sectores de consumo energético, contribuyendo al desarrollo competitivo y sustentable del país.

1.2. Contexto Energético en Chile y el Mundo

La ONU define Desarrollo Sustentable como: "El desarrollo que cumple las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades". Uno de los principales factores que contribuyen al desarrollo sustentable de las naciones es que el suministro de los recursos energéticos sea plenamente sustentable [19].

El funcionamiento de las sociedades modernas depende casi por completo de una adecuada disponibilidad de energía, ya sea para la realización de las actividades cotidianas de la población, como para el correcto desarrollo de las actividades económicas y productivas, por lo que la energía es considerada un agente primario en la generación de bienestar y un factor significativo en el desarrollo económico de los países [20] (Figura 1.1). Así, el crecimiento económico mundial, el incremento de la capacidad productiva de los países, el mayor tamaño del sector transporte y un aumento de la población mundial han provocado que el consumo y la producción energética aumenten, proyectándose que el consumo mundial de energía crecerá un 56 % entre 2010 y 2040 [21].

En la Figura 1.1 se puede apreciar que existe una correlación positiva entre el PIB de un país y el consumo energético, lo cual se debe a que la energía es primordial para el crecimiento y desarrollo de las naciones. Huang et al (2008) concluye que los países en vías de desarrollo, como Chile, poseen una correlación fuertemente positiva entre el PIB y la demanda de energía [22].

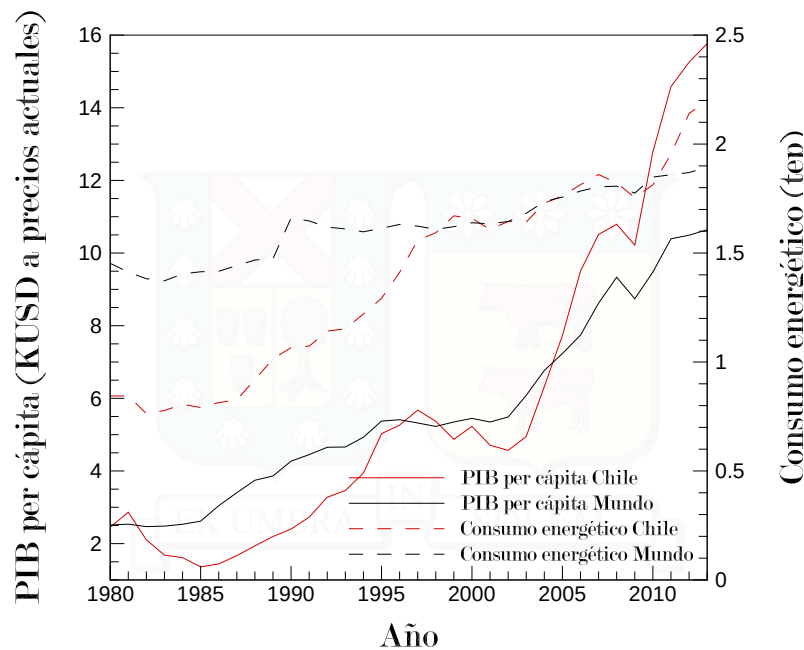


Figura 1.1: Producto interno bruto y consumo energético per cápita en tep
(Fuente: Banco Mundial)

Los avances tecnológicos que se han vivido durante los últimos años han generado cambios en la histórica composición de la matriz energética de los países, debido a la revolución tecnológica en el ámbito de las energías renovables y, también, en los combustibles fósiles [23]. Las energías renovables y la energía nuclear son las fuentes de energía que crecen más rápido en el mundo, con un aumento en la matriz energética cercano al 2.5 % por año. Pese a esto, proyecciones indican que para el 2040 los combustibles fósiles seguirán suministrando casi el 80 % de la energía mundial. Esto se debe a que en general, el precio de la energía generada por cada unidad de combustible es menor si se compara con otras fuentes de energía [21].

Históricamente en Chile se han utilizado principalmente los combustibles fósiles para satisfacer la demanda energética, los cuales son importados casi en su totalidad. Para el año 2014 la matriz de energía primaria, la cual representa el aprovisionamiento energético del país, alcanzó un total de 314.163 (TCal), del cual el 69 % proviene de los combustibles fósiles (petróleo crudo, gas natural y carbón) y el resto lo conforman las fuentes renovables, principalmente biomasa (24 %) e hidroelectricidad (6 %) [2] (Figura 1.2).

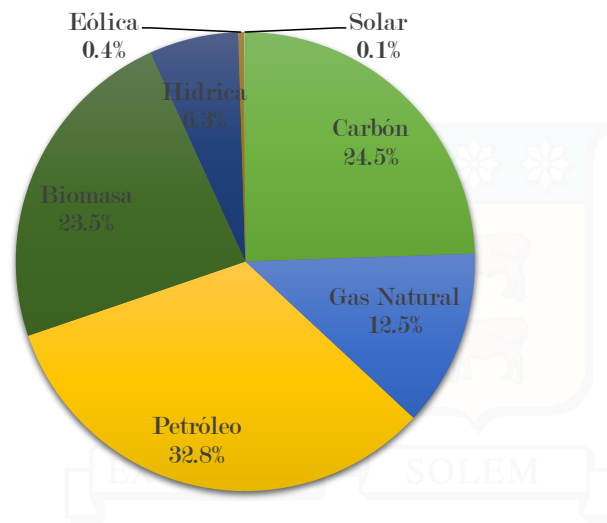


Figura 1.2: Composición de la matriz energética primaria año 2014. (Fuente: CNE)

En cuanto a la generación eléctrica, Chile posee cinco sistemas interconectados: el Sistema Interconectado Central (SIC), el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), y los Sistemas Medianos de Aysén, Magallanes e Isla de Pascua. Al año 2015, la capacidad instalada total es de 20.375 MW, la cual se encuentra separada principalmente en el SIC y el SING, con un 77,7 % y un 21,5 % de la capacidad instalada respectivamente [23] .

La generación promedio entre los años 2010 – 2014 para el SING fue casi completamente a partir de termoeléctricas, alcanzando un 98 % de la generación. En el SIC el escenario es un poco diferente, donde la generación es principalmente hidro-térmica. La componente térmica genera el 52 %, mientras que la componente hidroeléctrica el 43 % de los 48.207 GWh generados en el SIC para este mismo período [23]. Estos datos reflejan la fuerte dependencia de los precios internacionales de los combustibles, puesto que Chile no posee reservas de combustibles fósiles capaces de satisfacer la demanda interna.

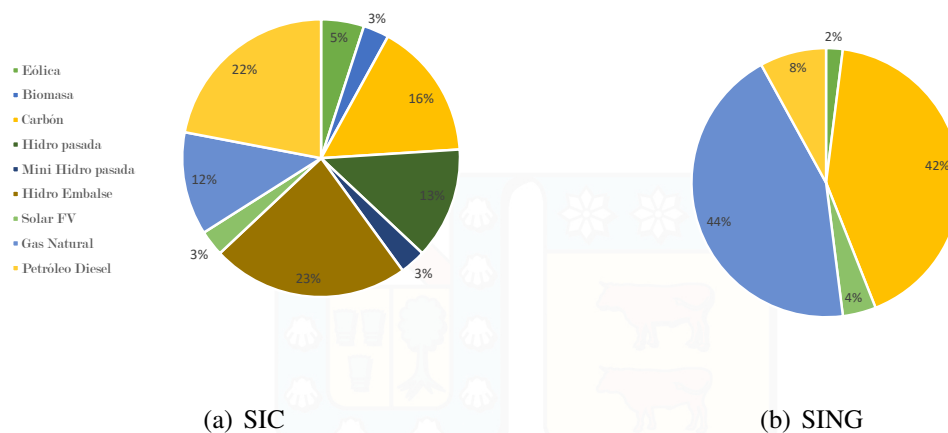


Figura 1.3: Composición de la matriz de generación eléctrica para los principales Sistemas Interconectados de Chile. (Fuente: Energía Abierta)

1.3. El Calentamiento Global y los problemas ambientales

Desde el siglo XIX se tienen conocimientos y definiciones sobre el calentamiento de la superficie de la tierra. Fourier, J (1824) fue el primero en hablar de *efecto invernadero*, cuando calculó que la Tierra sería más fría si no hubiera atmósfera [24]. El efecto invernadero es el calentamiento que se produce cuando ciertos gases de la atmósfera de la Tierra retienen el calor, dejando pasar la luz pero manteniendo el calor en el interior, tal como las paredes de cristal de un invernadero. De manera natural, el vapor de agua y las nubes contribuyen a este efecto, pero son los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI) quienes son el principal problema debido al aumento desproporcionado por la actividad humana. Fue el Premio Nobel sueco Arrhenius (1896) el primero en teorizar sobre el impacto del CO₂ en el clima de la Tierra, ideas que fueron inicialmente recibidas con críticas.

Se entiende por Calentamiento global al aumento de temperatura del sistema climático de la Tierra en los últimos siglos (Figura 1.4). La temperatura promedio de la superficie de la Tierra ha aumentado alrededor de 0,8 °C desde 1880 [25] y podría llegar a elevarse entre 2,6 a 4,8 °C durante este siglo [26]. Es por ello que la comunidad internacional ha puesto especial atención en la descarbonización de la matriz energética con el objetivo de reducir las emisiones de GEI para limitar por debajo de los 2°C el aumento de la

temperatura durante este siglo [27].

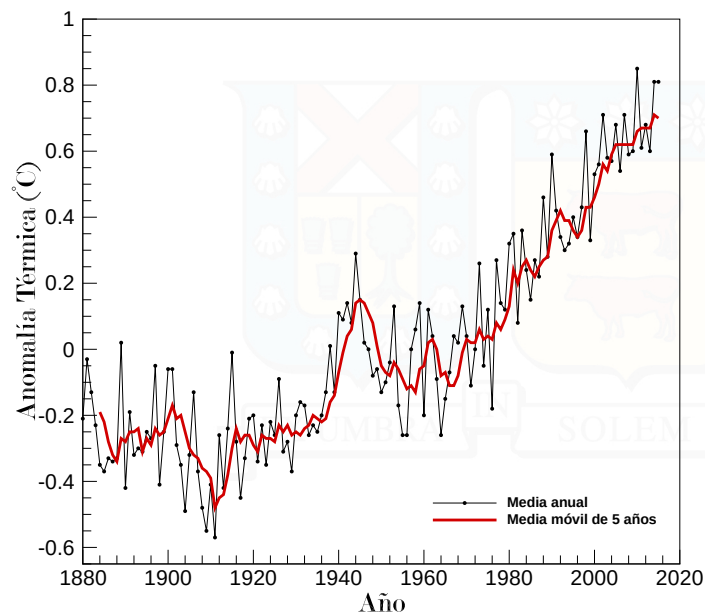


Figura 1.4: Media global del cambio de temperatura superficial (tierra y mar) para el período 1880-2015, respecto a la media de 1951-1980. (Fuente: NASA)

El principal GEI es el CO_2 , el cual se estima que contribuye al 50 % del efecto invernadero antropogénico [19], pero también se encuentran en esta categoría el CH_4 , N_2O , O_3 , halones (compuestos orgánicos clorados y bromados) y CFCs (Clorofluorocarbonados) entre otros, los cuales son producidos por las actividades domésticas e industriales, resultando en un aumento de la temperatura de la Tierra.

Pero el calentamiento global o cambio climático no es el único problema que se vive debido a la actividad humana. [19] señala que la lluvia ácida y el debilitamiento de la capa de ozono estratosférico son otras problemáticas ambientales relevantes.

La lluvia ácida se le denomina al fenómeno en el que el ácido (SO_2 y NO_x) cae a la tierra a través de la precipitación. El ácido en la atmósfera pueden transportarse a grandes distancias y caer en ecosistemas extremadamente vulnerables a daños por exceso de acidez. Las emisiones de SO_2 y NO_x son producidas principalmente por la combustión de combustibles fósiles (Calderas industriales y vehículos de transporte, entre otros), por lo tanto, la forma más fácil para reducir la lluvia ácida es reduciendo el consumo de

combustibles fósiles y de energía en general.

El debilitamiento de la capa de ozono estratosférico, la cual se encuentra a una altitud de entre 12 y 25 km, es causada por la emisión de CFC, halones y NO_x . La capa de Ozono cumple un papel en la absorción de la radiación ultravioleta (UV) y de la radiación infrarroja, por lo que su deterioro incrementaría los niveles de radiación UV que llegan a la Tierra. Los principales agentes que causan la degradación de la capa de ozono son los CFC, los cuales están principalmente presentes en equipos de refrigeración y aire acondicionado como fluido refrigerante.

En los últimos años ha resurgido la atención por el uso y manejo de la energía. En la década de los '70 se enfocó en el precio de la energía y en la manera de disminuir la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles, especialmente del petróleo, debido a la crisis que se vivió. Hoy en día, el interés no solo se basa en reducir los precios de los combustibles, sino que también en disminuir las emisiones y el impacto negativo que pueden producir ciertas actividades humanas que requieren grandes cantidades de energía, como las industriales [28].

1.4. Tipos de Fuentes Energéticas

La energía es el potencial de producir cambios, es decir, la capacidad de obrar, transformar o de poner en movimiento, y se manifiesta de diversas maneras. En un comienzo el hombre utilizaba la fuerza bruta, luego, la de los animales. Posteriormente se descubrió de que la energía se encuentra almacenada en diversas formas en la naturaleza: carbón, petróleo, gas natural, en "almacenes energéticos naturales" que aparentemente eran de libre disposición y no habían límites para su uso. Sólo en las últimas décadas la humanidad ha comenzado a experimentar otras fuentes energéticas inagotables, provenientes del Sol, el viento y el agua.

Se estima que si el ritmo de extracción del carbón sigue al de la década de 1980 (2,8 Gt/año), quedarían 250 años de reservas. El caso del petróleo es más crítico, ya que a al ritmo de extracción de mediados de la los '80 solo quedarían entre 50 y 120 años de reservas. Es decir, en cualquier caso el ciclo del petróleo será mucho más corto que el de

carbón. Lo mismo ocurre con las reservas de gas, cuyo ciclo será mucho más corto que el del petróleo [29].

Es el carácter de "limitado" que pueda tener una fuente energética en la Tierra el que genera dos clases de fuentes energéticas: Las Energías No Renovables, también conocidas como Convencionales debido al alto conocimiento y uso que se tiene sobre ésta tecnología; y las Energías Renovables, o No Convencionales.

1.4.1. Energías No Renovables

Las energías convencionales o energías no renovables son las fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas, las cuales, una vez consumidas en su totalidad, no pueden sustituirse, ya que no existe sistema de producción o de extracción económicamente viable [30]. Se distinguen dos tipos de energías convencionales: En base a combustibles fósiles y la energía nuclear.

Combustibles Fósiles

Se llama combustibles fósiles a los hidrocarburos (petróleo y gas) y al carbón. Estos recursos se formaron a partir de materia orgánica proveniente de plantas, microorganismos, bacterias y algas. Su uso y extracción se remonta a la Revolución Industrial en el siglo XVIII, por lo que llevan siendo usadas durante muchos años.

La ventaja y gran uso que se tiene de los combustibles fósiles es que son ampliamente conocidos por el hombre, haciendo que sus procesos de extracción o de producción generen energías más baratas y continuas. Ahora bien, su uso actual es cuestionado por la sociedad debido a la emisión de gases contaminantes en la atmósfera que resultan tóxicos para la vida, y además tienen fecha de caducidad.

- **Petróleo:** Es la principal fuente energética del mundo desarrollado. En estado puro (crudo) tiene poca utilidad, por lo que pasa por un proceso de destilación que genera varios subproductos, entre los que se destacan el diésel, querosén, plástico, asfaltos, etc. Las termoeléctricas que utilizan diésel como combustible tienen un factor de planta entre 80-90 % y además su patrón de generación es regular.

El petróleo y sus derivados tienen una participación relevante en la matriz energética primaria de Chile, donde el 99 % del consumo energético que utiliza el sector Transporte proviene de este recurso.

En la generación eléctrica, existen 3751 MW construidos entre el SING y el SIC, lo que representan el 19 % de la capacidad instalada para estos sistemas. Se estima que las emisiones nacionales para este tipo de generación produjo entre 0,5 y 1,3 kg de CO₂ por kWh en el año 2010 [31]. Por otro lado, Magallanes utiliza petróleo solo en el 15,8 % de su potencia neta, en tanto que las centrales de Aisén generan el 52,7 % de la potencia neta en base a diésel. La Isla de Pascua tiene 100 % de su generación eléctrica en base a diésel [32].

- **Carbón:** El carbón es una roca sedimentaria formada por carbono, mezclado con otras sustancias. Fue el primer combustible usado a gran escala por la humanidad, siendo el principal motor durante la Revolución Industrial debido a la disponibilidad de grandes depósitos, su bajo costo de extracción y su facilidad para ser transportado. Su alto valor energético hace que las industrias que requieren altas cantidades de energía (calor) lo utilicen en abundancia. Sus principales problemas están asociados a que tanto la extracción como la quema del combustibles son muy contaminantes y a que su extracción es muy peligrosa, debido al gas grisú, el cual es altamente inflamable.

En Chile su explotación a gran escala se inició en el siglo XIX, en la Región del Biobío, siendo un agente relevante para la economía al abastecer a las industrias, ferrocarriles y barcos que pasaban a abastecerse al país. En la actualidad es el combustible fósil de mayor participación en la matriz energética nacional, con un 22 % de la capacidad instalada. Durante el 2010 se generaron entre 0,95 y 1,4 kg de CO₂ por kWh, siendo el agente más contaminante de la matriz energética. Los Sistemas de Aisén, Magallanes e Isla de Pascua, no utilizan carbón en sus centrales.

- **Gas Natural:** El gas natural está compuesto entre un 70 y un 90 % de metano, el cual le da el valor energético a este recurso. Es el segundo recurso energético más importante a nivel mundial, especialmente debido a su disponibilidad, eficiencia y a

su fama de ser el más limpio entre los combustibles fósiles. Los avances tecnológicos para su exploración y explotación han producido un aumento en las estadísticas de las reservas de este recurso, haciéndolo cada vez más económico. Al igual que sus pares en base a diésel, las termoeléctricas que utilizan gas natural como combustible tienen un factor de planta entre 80-90 % y además su patrón de generación es regular, haciendo de éstas una fuente energética barata y confiable.

Su participación en la matriz primaria de energía se ve reducido, alcanzando un 11 % destinado principalmente a calefacción. Por otro lado, representa el 17 % de la capacidad de generación eléctrica instalada en Chile. Las emisiones de CO₂ durante el 2010 producidos por la generación de electricidad en Chile son entre 0,3 y 0,6 kg de CO₂ por kWh.

En la actualidad, el petróleo junto con el gas natural se han convertido en los recursos energéticos fundamentales de las sociedades y todavía no se han encontrado fuentes alternativas para reemplazarlo, a pesar de que por ser un recurso no renovable en algún momento se van a agotar.

Energía Nuclear

La energía nuclear es la energía que se encuentra en el núcleo de un átomo y es la que mantiene unidos neutrones y protones. Ésta energía se puede obtener de dos formas: fusión nuclear y fisión nuclear. En la fusión nuclear, la energía se libera cuando los átomos se combinan o se fusionan entre sí para formar un átomo más grande, mientras que en la fisión nuclear, los átomos se separan para formar átomos más pequeños, liberando energía grandes cantidades de energía.

Las centrales nucleares utilizan la fisión nuclear para producir electricidad, siendo éste uno de los métodos más eficientes y limpios para obtener energía eléctrica, ya que no emite GEI durante su funcionamiento. Sin embargo, los desastres de Chernobyl o Fukushima la han puesto en el centro del debate, siendo altamente cuestionada por los graves riesgos potenciales que se pueden producir, generando catástrofes naturales irreparables. Por otro lado, el principal problema de las centrales nucleares es que sus residuos son altamente

contaminantes y, que además, no desaparecen con el tiempo.

Existen 448 reactores en operación, los que producen alrededor del 11,5 % de la electricidad mundial. Francia es el país con mayor participación de energía nuclear en su matriz de generación eléctrica, donde el 76,34 % de su electricidad es de origen nuclear [33].

Por otro lado, en Chile, no existe generación eléctrica mediante este recurso. Existen dos reactores nucleares en el país, los cuales están a cargo de la Comisión Chilena de la Energía Nuclear (CCHEN), destinados para investigación y formación de profesionales en el ámbito de la energía nuclear.

1.4.2. Energías Renovables

Las energías renovables son aquellas que producen energía útil a partir de los fenómenos naturales. Además, se caracterizan porque en sus procesos de transformación y aprovechamiento de la energía útil no se consumen ni se agotan recursos en una escala humana.

Las energías renovables han ido adquiriendo cada vez mayor importancia como respuesta a las problemáticas ambientales discutidas anteriormente, y por la diversificación de la matriz energética. Chile no se ha quedado atrás, y discusiones sobre el futuro de la generación eléctrica han puesto en el tapete la independencia energética y cambio climático.

Respondiendo a estas demandas, el año 2008 se promulgó la Ley N° 20.257 o "Ley ERNC", la cual entre otras medidas clasifica a las energías renovables en convencionales y no convencionales, según sea el grado de desarrollo de las tecnologías para su aprovechamiento y la penetración en los mercados energéticos que presenten. Así, dentro de las convencionales, la más importante es la hidráulica a gran escala, mientras que en las no convencionales se encuentran la solar, eólica, biomasa, geotérmica, mareomotriz e hidráulica inferior a 20 MW. En un principio esta ley establecía que para el año 2025 el 10 % de la matriz de generación eléctrica sería mediante ERNC. Las presiones hicieron que el año 2013 se promulgue la Ley N° 20.698 en la que se aumenta la exigencia de 10 a 20 % entre otras cosas [2].

Actualmente, la capacidad instalada de ERNC es de 2.550 MW, que corresponden al

12,5 % de la capacidad instalada, la cual un 90 % pertenece al SIC. En junio 2016 se tienen 47 proyectos de ERNC que están declarados en construcción y que suman 2.336 MW de potencia, y se prevé que éstos comiencen a operar antes de agosto 2018 [34].

Energía Solar

Es la energía que se obtiene a partir de la radiación solar. La energía proveniente del sol se puede aprovechar de diferentes maneras, dentro de las cuales se puede clasificar:

- **Energía Solar Fotovoltaica:** Se genera electricidad a través de la luz solar, por medio de células solares o fotovoltaicas. Éstas células se componen de una capa semiconductor que produce el efecto fotovoltaico, es decir, transforma la luz solar en energía eléctrica.
- **Energía Solar Térmica:** La radiación solar genera calor, el cual es traspasado hacia algún fluido de trabajo, siendo el agua el más común. Los colectores solares usan la radiación difusa y directa para acumular energía en la placa absorbidora, la cual por conducción transfiere el calor al fluido.
- **Concentrador Solar de Potencia(CPS):** Es una tecnología térmica, ya que se usa un fluido de trabajo, pero se utiliza para la generación de electricidad mediante el calentamiento de sales fundidas o aceites que van a un intercambiador de calor, el que genera vapor para una turbina, la cual genera electricidad. Así, esta tecnología tiene dos módulos: el sistema de cilindros parabólicos, conformado por los espejos, y la torre de concentración solar.

La tecnología fotovoltaica es la que actualmente tiene mayor difusión y es en la que más se investiga para lograr mayores eficiencias y menores costos. Actualmente en Chile se encuentran en operación 1.267 MW y hay otros 1.676 MW en construcción [34]. El año 2012 CODELCO inauguró Calama Solar 3, la cual fue la primera planta fotovoltaica industrial del país con 1 MW de potencia instalada.

Energía Eólica

Los sistemas de energía eólica aprovechan la energía cinética de los vientos para producir electricidad por medio de la energía mecánica que producen el movimiento de las aspas de los molinos. Uno de sus mayores obstáculos es la imposibilidad de predecir con precisión la fuerza y dirección de los vientos. Es por ello que para la ubicación de parques eólicos – con aerogeneradores sobre 1,5 MW– se recomienda una velocidad media del viento mínima de 6 m/s. Este es uno de los principales requisitos para cuantificar la potencialidad de los lugares para instalar parques eólicos.

En 2014, la generación de electricidad por el viento alcanza casi el 10 % de toda la producida en el mundo. China es el país que más energía eólica genera, con una capacidad instalada de 114,6 GW, seguido por Estados Unidos con 65,8 GW [35].

Por otro lado, en Chile representa la segunda ERNC con mayor capacidad instalada, con un total de 947 MW en operación y otros 477 MW en construcción [34].

Energía de la biomasa

La biomasa, definida como la materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma, es la materia prima para la producción de bioenergía en sus diferentes formas: energía eléctrica, energía térmica y biocombustibles [36]. Se puede obtener energía mediante la quema de los productos orgánicos, o bien, mediante el aprovechamiento de los gases, especialmente metano, que genera el material orgánico.

La bioenergía es la fuente de energía renovable más versátil, puesto que es capaz de proveer energía térmica, electricidad y combustibles. Los países con mayor capacidad eléctrica instalada con fuentes provenientes de la bioenergía, a diciembre de 2013, fueron Estados Unidos, Alemania, China, Brasil e India [36].

En Chile, cumple un rol fundamental en la matriz primaria energética, alcanzando una participación del 24 %, la que es principalmente utilizada por el sector residencial para calefacción y cocina, debido a su precio y disponibilidad.

En cuanto a la generación eléctrica, existen 470 MW instalados para plantas de biomasa

y biogas, la que se concentra principalmente en los residuos y subproductos forestales para sistemas de cogeneración, los que cubren en gran medida sus requerimientos térmicos y eléctricos, además de permitir vender sus excedentes de energía eléctrica al sistema eléctrico del país. De hecho, es la fuente de ERNC que más electricidad aporta al SIC.

Energía Mini Hidráulica

Los sistemas hidroeléctricos convierten la energía potencial y cinética del agua en energía eléctrica, mediante el uso de una turbina que acciona un generador. Para que sean consideradas ERNC la potencia máxima debe ser inferior a 20MW. Se diferencian dos tipos de centrales hidroeléctricas:

- Hidroeléctricas de embalse: Captan agua y la acumulan de manera natural (lago) o artificial (dique o presa) en un embalse, para aprovechar su energía cinética y una vez utilizado su potencial, el agua es restituida al río.
- Hidroeléctricas de pasada: Desvían una porción del agua del río, aprovechando su fuerza motriz para hacer funcionar turbinas y generar electricidad, para luego regresarla al río.

En la práctica solo se consideran las hidroeléctricas de pasada, ya que las centrales de embalse siempre son proyectos de gran magnitud para el aprovechamiento de economías de escala. Así, si bien las mini hidráulicas de pasada no pretenden reemplazar a las grandes centrales generadoras, son consideradas soluciones competitivas para la producción de energía. Cuentan con altos niveles de automatización y telemando, lo que garantiza una explotación óptima del recurso hídrico disponible, y permite aprovechar el potencial energético de pequeños cursos de agua con costos de explotación relativamente bajos [37].

Actualmente en Chile existen 435 MW en operación y 25 MW en construcción para centrales mini de pasada [34].

Energía Geotérmica

Es aquella que puede obtenerse mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. La principal ventaja con respecto a las otras ERNC es que no depende de las

estaciones ni del clima, por lo que se puede obtener energía de manera sostenida y regular.

Dependiendo de la temperatura que pueda alcanzar el reservorio natural, se clasifican:

- Baja entalpía: temperatura menor a 90°C
- Media entalpía: Entre 90 y 150°C
- Alta entalpía: sobre los 150°C

Actualmente no hay centrales geotérmicas en operación, pero se está construyendo una central de 48 MW en Cerro Pabellón, Antofagasta, y se estima que el potencial en nuestro país sería cercano a 3000 MW.

Las principales barreras para el desarrollo de la energía geotérmica en Chile son los altos costos de inversión en las etapas de exploración (perforación principalmente), la lejanía a los centros urbanos (líneas de transmisión) y la escasez de personal cualificado en el país, entre otros [38].

Energía Mareomotriz

Es aquella que proviene del movimiento de las mareas, ya sea en forma de corrientes mareales o aprovechando los cambios en los niveles de las mareas.

La energía proveniente de las mareas es producida por el ascenso y descenso de las aguas del mar, producto de las acciones gravitatorias del Sol y de la Luna sobre nuestro planeta. Su funcionamiento es similar al de una Hidroeléctrica de embalse. Cuando la marea está en un nivel alto (Pleamar), se almacena agua en una represa; al bajar la marea (Bajamar), se libera el agua haciéndola pasar a través de turbinas hidráulicas de baja altura, que mediante generadores eléctricos transforman finalmente la energía en electricidad.

Por otro lado, aquella que proviene de las corrientes mareales, aprovecha las grandes corrientes marinas a través de turbinas mareomotrices. Su principio de funcionamiento es igual al de los parques eólicos, y para que sean rentables, las corrientes deben ser mayores a 4 m/s.

Si bien la costa chilena ofrece condiciones interesantes desde el punto de vista del recurso mareomotriz, especialmente en el sur, donde destacan el Canal del Chacao en

la Región de Los Lagos y el Estrecho de Magallanes en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, no existen centrales en Chile que utilicen esta tecnología [39].

1.5. Ley 20.365: Beneficio Tributario para Sistemas Solares Térmicos

En el año 2010 entró en vigencia la Ley 20.365, la cual busca el desarrollo de mercado de los Sistemas Solares Térmicos (SST) mediante estimulación de la demanda, ya que a pesar de que se considera una tecnología madura y competitiva, existe un bajo nivel de desarrollo en el país [40].

El beneficio consiste en un crédito tributario para financiar SST destinados al calentamiento de agua sanitaria, el cual es imputado ante el Servicio de Impuestos Internos como un descuento a la declaración de impuesto a la renta de las empresas constructoras. En un comienzo se estableció que el beneficio duraría desde 2010 hasta 2013 y sería escalonado según el valor de la vivienda:

- 100 % si el valor de la vivienda es inferior a 2000 UF.
- 40 % si el valor de la vivienda esta entre 2000 UF y 3000 UF.
- 20 % si el valor de la vivienda esta entre 3000 UF y 4500 UF.
- 0 % si el valor de la vivienda es superior a 4500 UF.

Durante el período 2010-2013 se construyeron 38.351 viviendas con SST, de las cuales el 57 % son departamentos y el 43 % casas. Además, la gran mayoría de las construcciones corresponden a viviendas menores a 2000 UF en costo de construcción más terreno que perciben el beneficio del 100 % y prácticamente no se usaron los tramos del 40 % y 20 % [40].

En el año 2015 se aprobó la extensión del beneficio tributario para el período 2015-2019 con varias modificaciones. La escala del beneficio tributario para el valor de la vivienda se reestructura, manteniendo el 100 % para viviendas inferiores a 2000 UF, y un decremento

lineal desde el 100 % al 0 % para las viviendas entre 2000 y 3000 UF, eliminando así el beneficio para las viviendas superiores a 3000 UF.

Además, introduce un subsidio directo para viviendas sociales nuevas, con cargo al presupuesto fiscal, para financiar la instalación de SST en viviendas nuevas subsidiadas por el Estado, el cual se podrá asignar dentro del período 2015 a 2019.

Las proyecciones del gobierno son que para el nuevo período de beneficio tributario se construyan 48.654 viviendas bajo subsidio tributario (constructoras privadas) y 17.884 viviendas con subsidio directo por parte del Estado.

A pesar de tener una amplia gama de usos más allá de la residencial, extendiéndose a la agricultura, hospitales, lavanderías, centros deportivos y otras actividades industriales [5], no existen incentivos tributarios para el uso de ésta tecnología, y tampoco existe una estadística de organizaciones que hayan adoptado el uso de SST.

El proyecto de mayor envergadura que hay en el país está en la minera Gabriela Mistral, propiedad de CODELCO, ubicada en Sierra Gorda, II Región. La planta solar se llama Pampa Elvira Solar, inaugurada en 2013, y cuenta con un área colectora de 35.000 m^2 distribuidos en 90.000 m^2 de terreno, y 4.300 m^3 para la acumulación del agua caliente. Se estima que entrega 54.000 MWh/año calóricos promedio y permite el ahorro anual de 15 mil toneladas de CO_2 . Se utiliza para el proceso electro-obtención en el cual se necesita calentar el electrolito a unos 50°C , aproximadamente.

1.6. Justificación de este trabajo

Es un hecho que de mantener las características de consumo que tiene la sociedad hoy en día la vida en el planeta será insostenible en el mediano plazo. El creciente consumo energético que se tiene hoy en día es insostenible puesto los graves problemas que genera: calentamiento global, disminución de la capa de ozono, y lluvia ácida y tres tipos de contaminación atmosférica que se produce por la generación de energía, y el consumo irresponsable. Es por ello que políticas de incentivo a fuentes de energías renovables y de eficiencia energética deben estar en el foco de las autoridades públicas e investigadores para desarrollar mecanismos que permitan contribuir a este proceso.

Chile posee características privilegiadas para el desarrollo de tecnologías que permitan aprovechar al energía solar. El desierto de Atacama posee una de las tasas de irradiación solar más grandes del mundo y cielos que permanecen despejados la mayoría de los días del año, lo que lo convierte en uno de los mejores lugares para el desarrollo y aplicación de tecnologías solares. Por otro lado, esta zona concentra gran parte de la actividad minera del país, la cual es la principal actividad económica de Chile, siendo altamente intensiva en el uso de energía.

Si bien el mercado solar en Chile ha tomado un fuerte impulso en los últimos años, con políticas que fomentan las ERNC, políticas estatales para subsidiar sistemas solares térmicos, o la ley de NetBilling, que permite a los usuarios vender exedentes de energía a la red central, aún no se ha explotado el verdadero potencial de las tecnologías solares. La inversión inicial sigue siendo alto, desincentivando el uso de éstas.

Esta investigación busca generar un mapa que permita distinguir cuales son las zonas del país que tienen un mayor potencial para el uso de tecnologías termosolares, y además, discutir sobre la influencia del patrón de consumo energético sobre el rendimiento económico de este tipo de proyectos.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO



2.1. Tópicos sobre la Energía Solar

2.1.1. El Sol

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y es el elemento de mayor tamaño y más relevante del Sistema Solar. Es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente, la cual tiene una temperatura superficial de 5777 K aproximadamente. Su composición química está dada principalmente por átomos de hidrógeno, que constituyen el 92,1 % de su composición, los cuales están constantemente reaccionando químicamente, formando helio y liberando grandes cantidades de energía en el proceso.

Su diámetro es de $1,39 \cdot 10^6$ km, y se encuentra a una distancia promedio de la tierra de $1,5 \cdot 10^8$ km. La energía total generada por el Sol es del orden de $3,8 \cdot 10^{20}$ MW, que equivale a 63 MW/m² en la superficie solar, que es emitida al espacio en todas direcciones de manera difusa. A pesar de que la Tierra recibe una pequeña fracción de la radiación total emitida, equivalente a $1,7 \cdot 10^{11}$ MW, se estima que 84 minutos de radiación solar incidente en la Tierra equivalen a la demanda mundial de un año (cerca de $900 \cdot 10^{12}$ MJ) [41].

2.1.2. Radiación Solar

La materia en cualquiera de sus estados; ya sea sólido, líquido o gaseoso; que se encuentren a una temperatura por sobre el cero absoluto (0K ó -273,15°C), emiten energía a través de ondas electromagnéticas. La radiación es un proceso de transmisión de energía a través de ondas o partículas que viajan por el espacio o algún medio. Así, la radiación solar es el conjunto de ondas electromagnéticas emitidas por el Sol.

La radiación solar que incide sobre la superficie terrestre se distinguen dos componentes: directa, difusa. La radiación directa es aquella que proviene del disco solar sin ser dispersada por la atmósfera (y que produce sombra), mientras que la radiación difusa se origina por la dispersión de la radiación directa en la atmósfera y proviene de todo el cielo, excepto el disco solar. En esta última se incluye la radiación reflejada, que corresponde a la radiación que se refleja en los distintos objetos y superficies. La radiación difusa se produce principalmente por la presencia de nubes, donde los rayos solares chocan y cambian su dirección en muchos

sentidos; por esta razón en días nublados no se observa sombra. La energía contenida en la radiación directa es mucho mayor que la que entrega la radiación difusa, lo que se hace evidente en días soleados, cuando la temperatura ambiente sube considerablemente. De esta manera, la radiación global es la suma de ambas [42].

La radiación proveniente del Sol es emitida en distintas longitudes de ondas. Se conoce como Espectro de Irradiancia Solar a la cantidad de energía proveniente del Sol, para cada longitud de onda individual. En la Figura 2.1 se puede apreciar que la radiación proveniente del Sol no está repartida de manera homogénea en las distintas longitudes de onda, la que pueden ser clasificadas en ultravioleta (menor que 400 nm), espectro visible (400 a 700 nm), e infrarroja (superior a 700 nm). La longitud de onda está relacionada con la energía de cada fotón de luz, donde el rango de longitud de onda relevante para aplicaciones solares, va desde los 200 nm a 2000 nm.

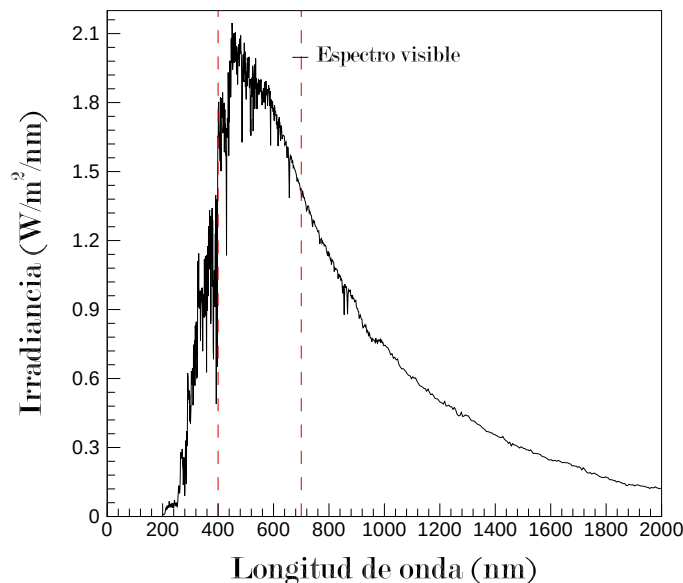


Figura 2.1: Irradiancia espectral sobre la Tierra a la distancia promedio del Sol.
(Fuente: [43])

2.1.3. Radiación Solar Sobre Planos Inclınados

La cantidad de radiación que se recibe por unidad de área depende del ángulo de incidencia de los rayos con respecto a la superficie receptora, por lo que en general, las

aplicaciones solares son instaladas con un ángulo de inclinación (δ) para obtener un mejor rendimiento. Se le denomina radiación normal incidente, a la energía electromagnética recibida en una superficie perpendicular a los rayos provenientes del sol. La radiación horizontal, en cambio, es la radiación que se recibe en una superficie perpendicular al radio de la Tierra. Para calcular la radiación global sobre un plano inclinado, se debe sumar la radiación normal incidente en la superficie inclinada y la radiación difusa, la cual es medida siempre se manera horizontal, pues es la radiación proveniente de todo el semi-hemisferio.

Existen básicamente dos tipos de instrumentos para cuantificar la radiación proveniente del Sol, según la longitud de onda del espectro solar que se quiera medir y la dirección en que llegan los fotones a una superficie (radiación directa, difusa o global). El Piranómetro se utiliza para medir la radiación total (directa y difusa) dentro de su campo de visión hemisférico, para las longitudes de ondas entre 0.3 y $3 \mu m$ del espectro solar. El piranómetro también puede medir solo la radiación solar difusa si el sensor es puesto a la sombra, sin que lleguen los rayos solares directamente. El otro instrumento utilizado es el Pirheliómetro, el cual se utiliza para medir la radiación normal incidente. Este instrumento debe apuntar directamente al Sol, por lo que debe ser acoplado a un sistema móvil que siga la trayectoria del Sol en el cielo a través del día.



(a) Piranómetro.



(b) Pirheliómetro.

2.1.4. Ángulos solares

Las relaciones geométricas entre un plano de cualquier orientación particular con respecto a la Tierra en cualquier momento (ya sea que ese plano esté fijo o moviéndose con relación a la Tierra) y la radiación solar del haz entrante, es decir, la posición del Sol

relativa a ese plano, puede describirse en términos de varios ángulos [44].

- Latitud (ϕ): Representa la ubicación angular al norte o al sur del Ecuador. Se utiliza el norte como referencia positiva positivo: $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.
- Declinación (δ): Es la posición angular del sol en el mediodía solar (cuando el Sol está en el meridiano local) con respecto al plano del Ecuador. Se utiliza el norte como referencia positiva: $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$. La declinación, δ , en grados, puede ser obtenida para cada día (n) del año a través de la ecuación de Cooper [45]:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.1)$$

Donde n corresponde al día del año

Por otro lado, aquellos que describen la posición del sol en el cielo son [46]:

- Zenit Solar (θ): Es el ángulo entre la vertical y la línea al Sol, es decir, el ángulo de incidencia de radiación de haz sobre una superficie horizontal.
- Altitud Solar (α): Corresponde al ángulo entre la horizontal y la línea al Sol, siendo el ángulo complementario al Zenit Solar.
- Azimut Solar (γ): Representa el ángulo entre la proyección de los rayos solares en el plano horizontal medido desde el sur hacia el hemisferio norte, siendo el oeste la orientación positiva.

2.1.5. Factores que inciden en la recepción de energía solar en la Tierra

Ya se mencionó que la Radiación Solar corresponde a un mecanismo de transferencia de calor, por el cual llega energía a la Tierra proveniente del Sol. La Irradiación (W/m^2) por su parte, corresponde a la energía que incide sobre un área en un tiempo determinado, la cual es en promedio, 1353 W/m^2 antes de ingresar a la atmósfera [46]. A este valor de energía solar se le denomina Constante Solar.

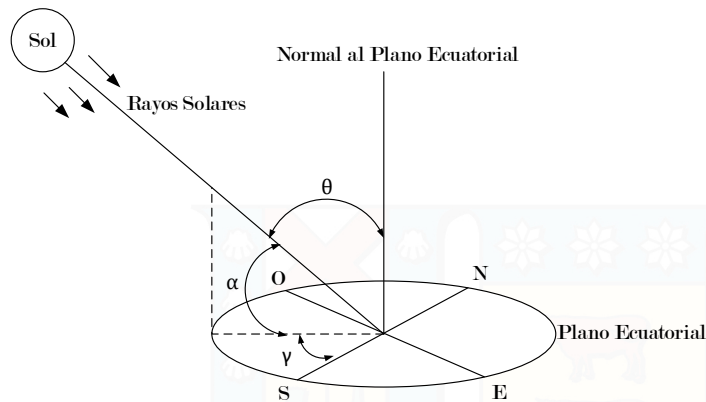


Figura 2.2: Ángulos solares.

(Fuente: Adaptado de [28])

Esta energía que llega a la Tierra proveniente del Sol es en parte absorbida, reflejada y dispersada por las nubes, las partículas y las moléculas que componen la atmósfera terrestre. Así, la composición y grosor de la atmósfera influyen en la cantidad de energía solar que llega a la superficie del planeta en cada punto y en cada momento. Por otro lado, cuando el Sol está directamente sobre un sitio (cerca de medio día), la radiación alcanza su máximo, y disminuye mientras más cerca del horizonte se encuentre el sol, debido al ángulo cenital de los rayos solares. El mismo efecto ocurre durante el año, alcanzándose el máximo de radiación en verano y el mínimo en invierno, como se puede apreciar en la Figura 2.3.

A continuación se detallan diferentes tipos y naturalezas de factores que influyen en la energía solar que llega a la Tierra

Factores Astronómicos

La Tierra no se encuentra inmóvil, sino que está sometida a movimientos de diversa índole con distintas velocidades y repercusiones. Se pueden destacar tres tipos de movimientos: rotación, traslación y precesión.

El movimiento de rotación es el giro que hace la Tierra sobre su eje en un período de 24 horas. Este movimiento genera el día y la noche, lo cual alterna períodos de luz y oscuridad, haciendo que el planeta reciba la radiación solar en forma diferenciada.

El movimiento de traslación es el desplazamiento que hace la Tierra en una órbita

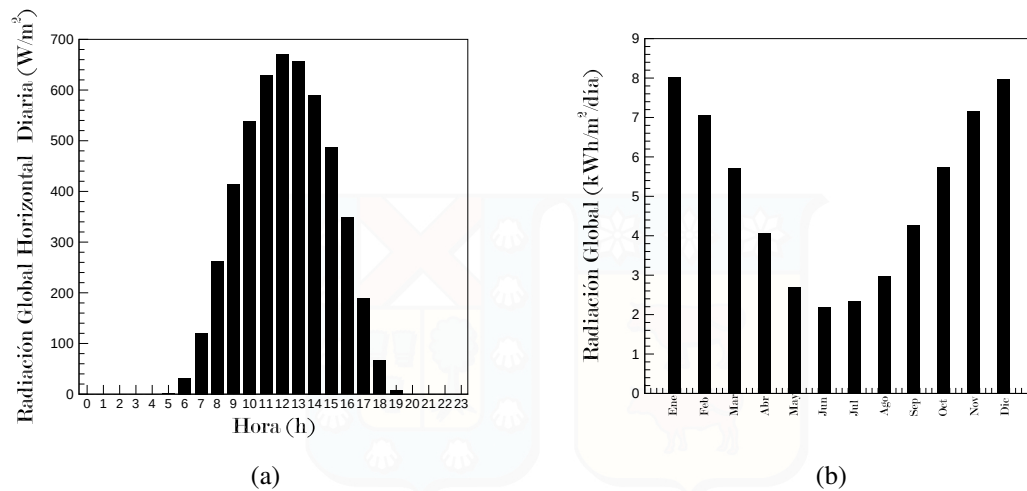


Figura 2.3: (a) Promedio según hora de Radiación Global Horizontal para Santiago (b) Promedio según mes de Radiación Global Horizontal para Santiago.

(Fuente: Elaboración propia)

elíptica alrededor del Sol en 365,25 días. La órbita elíptica hace que exista una época del año en que la Tierra está más cerca del Sol (perihelio), producida los primeros días de enero y que alcanza una distancia de 148 millones km; y otra en que está más alejada (afelio), alcanzando el máximo de 152 millones de km y que se produce los primeros días de julio. Esta diferencia de distancia entre el Sol y la Tierra produce una pequeña variación del orden de 3,5 % en la energía que llega al planeta.

El movimiento de precesión es el desplazamiento en la orientación del eje de rotación de la Tierra, causado por la acción gravitacional del Sol, la Luna y los otros planetas y que hace que la posición que indica el eje de la Tierra se desplace alrededor del polo de la eclíptica, trazando un cono y recorriendo una circunferencia completa cada 25.776 años. Su movimiento es contrario a la rotación terrestre. La inclinación actual del eje de la Tierra es de 23,5°.

Es el movimiento de traslación de la Tierra, sumado a la inclinación del eje terrestre con respecto al plano orbital, los que causan que el hemisferio norte y sur reciban diferentes cantidades de energía durante el año, donde los solsticios y los equinoccios son los hitos que marcan los cambios de estaciones, y por ende, las cantidades de energía que recibe cada porción de la Tierra.

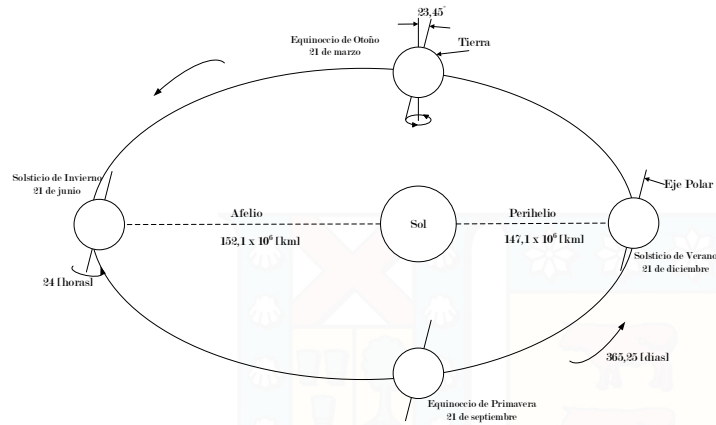


Figura 2.4: Trayectoria terrestre alrededor del Sol
(Fuente: [41])

Factores Geográficos

La latitud, el grosor de la atmósfera y el relieve o altura por sobre el nivel del mar de una localidad son tres factores que inciden en la cantidad de radiación solar que recibe el planeta. La forma esférica de la Tierra hace que la forma en que llegan los rayos solares a la superficie dependan de la latitud, donde en las zonas cercanas al ecuador se reciben directamente los rayos solares y cada vez en forma más oblicua hacia las polares. En otras palabras, a medida que aumenta la latitud, mayor es el ángulo cenital, por lo que aumenta el área iluminada por un haz de luz, y por tanto, la energía es distribuida sobre un área mayor (Figura 2.5). De este modo, la latitud es un factor determinante en este aspecto y permite distinguir tres zonas geográficas:

- Zona Intertropical: Ubicada entre ambos trópicos, los que se localizan a $23^{\circ}27'$ de latitud Norte y Sur, siendo el área que recibe mayor cantidad de energía solar y presenta los climas más calurosos.
- Zonas Templadas: Ubicadas en la zona entre los trópicos y los círculos polares, en el rango $[23^{\circ}27'; 66^{\circ}33']$ Norte y Sur.
- Zonas Polares: Ubicadas entre los círculos polares y los polos, en el rango $[66^{\circ}33': 90^{\circ}]$, siendo las tierras más frías del planeta debido a que los rayos solares caen en estas zonas en ángulos muy oblicuos.

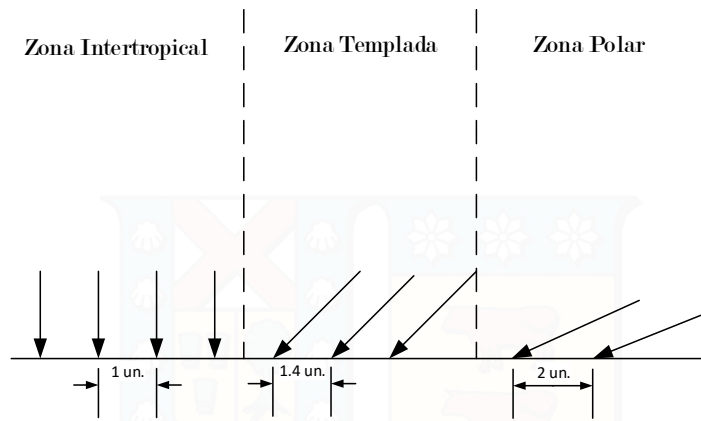


Figura 2.5: Energía Solar según zona geográfica. Los rayos verticales concentran la irradiación en el espacio más reducido, mientras que los rayos solares oblicuos reparten la irradiación en un espacio más extenso. (Fuente: [47])

Por otro lado, la atmósfera terrestre refleja y absorbe los rayos solares, actuando como un filtro. Así, mientras más densa sea la atmósfera, menor energía recibirá la superficie terrestre. En la zona ecuatorial el espesor alcanza el máximo grosor, de unos 14 km , la cual va adelgazando hacia las zonas polares, en donde se tienen cerca de ocho km de espesor. Es debido al papel de filtro solar que cumple la atmósfera que la altura también es un factor a considerar, puesto que a mayor altitud, el grosor de la atmósfera será más reducido. Por este motivo la energía recibida en las altas cordilleras es mayor que en las zonas bajas del relieve.

Las principales sustancias absorbentes de la radiación solar son el ozono atmosférico (O_3), el vapor de agua (H_2O) y en menor medida el Dióxido de Carbono (CO_2). La absorción de la radiación solar por el ozono en la región UV del espectro (superior a 700 nm) permite el desarrollo de la vida sobre la superficie del planeta.

2.2. Datos Meteorológicos

El Ministerio de Energía en conjunto con la Universidad de Chile desarrollaron el Explorador de Energía Solar, el cual presenta la información pública más detallada que existe actualmente sobre el recurso solar en Chile [48], con una base de datos que se

extiende para el período 2004-2015. Apesar de ésto, en Chile aún no se ha hecho un Año Meteorológico Típico (AMT), el cual se define como un año que resume toda la información climática de un período tan largo como la vida media del sistema [49]. El AMT es necesario para tener una base de datos confiable y de alta calidad que recopile en un año la información de un vasto período de tiempo. En este sentido, históricamente no ha existido una recopilación meteorológica con datos reales de baja incertidumbre disponibles para las autoridades públicas o de planificación, y es parte de las razones por las que la energía solar no ha sido considerada en Chile como una importante fuente de energía [50].

El Explorador Solar utiliza métodos numéricos, donde la radiación solar global es obtenida con el modelo CLIRAD-SW y la temperatura con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF). La metodología CLIRAD-SW [51] es un modelo de transferencia radiativa para calcular la radiación solar global y sus componentes directa y difusa, en cielo despejado. Posteriormente el modelo incorpora la interacción de la radiación con los distintos tipos de nubes, cuyas características son estimadas a partir de imágenes del satélite geoestacionario GOES EAST, a través de un modelo empírico basado en la red de observaciones locales de irradianza superficial [48]. El proceso para la obtención de la radiación se muestra en la Figura 2.6.

Por su parte, el modelo de WRF para la estimación de la temperatura, es un sistema de predicción numérica diseñado tanto para la investigación atmosférica como para las necesidades operacionales de predicción. El modelo sirve a una amplia gama de aplicaciones meteorológicas a través de escalas de decenas de metros a miles de kilómetros [52].

Además del Explorador Solar, existe el Registro Solarimétrico para la República de Chile [53], a partir del cual se pueden obtener la irradiación total horaria en superficie horizontal o inclinada para cada hora por extensos períodos de tiempo.

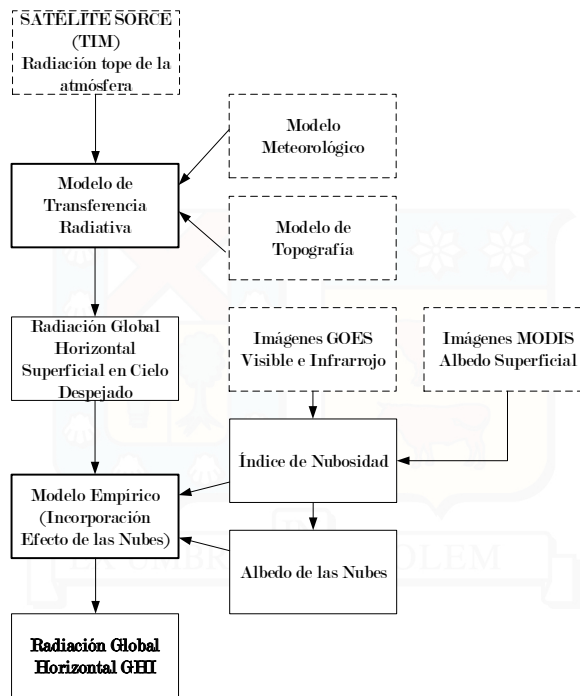


Figura 2.6: Esquema de metodología para obtener mapas GHI
(Fuente: [48])

2.3. Colectores Solares Térmicos Planos

2.3.1. Historia de los Colectores Solares Térmicos

La energía solar es la fuente de energía más antigua utilizada por la humanidad. El Sol fue adorado por prácticamente todas las civilizaciones antiguas, el cual otorgaba calor, iluminación y comida. La primera aplicación práctica conocida, fue en el secado para la conservación de alimentos. Por otro lado, los griegos y romanos utilizaron recipientes parabólicos con el interior reflejante llamados Skaphia, los cuales utilizaban para prender antorchas en rituales religiosos. Hoy en día, la antorcha olímpica que se prende antes de dar inicio a los Juegos Olímpicos es prendida por medio de una Skaphia, en conmemoración al origen griego de los juegos.

La primera aplicación a gran escala es para fines militares, cuando Arquímedes, filósofo y matemático griego, quema la flota romana en la bahía de Siracusa mediante una serie de espejos dispuestos en las murallas de la ciudad. Esta concentración de la radiación solar

provoco que las naves romanas se incendiaran en pocos segundos y quedasen destruidas, con lo que se logró repeler el ataque romano. Lamentablemente no hay pruebas que demuestren que lo haya logrado efectivamente, y ha sido un evento que se ha discutido durante siglos. En el siglo XIII, Vitelio, un matemático polaco, describe en su libro Óptica la quema de la flota romana con detalle: "El vidrio ardiente de Arquímedes compuesto de 24 espejos, que transmitía los rayos del sol en un foco común y produjo un grado extraordinario de calor" [54].

En el siglo XVIII el suizo Horace de Saussure creó una "Caja Caliente" que llegó a alcanzar los 109°C. Este horno era una caja acristalada con el interior pintado de negro, el cual contaba con una capa de aislante que retenía el calor producido en su interior. Este sería el primer registro del colector solar térmico, a partir del cual surgirían todos los desarrollos posteriores de calentadores solares. Por otro lado, los colectores de concentración solar fueron ampliamente desarrollados. Durante el siglo XVIII, fueron ampliamente utilizados en Europa y el Medio Oriente los hornos solares de concentración solar, los cuales eran capaces de fundir hierro, cobre, y otros metales. Una de las primeras aplicaciones a gran escala fue el horno solar construido por el químico francés Antoine Lavoisier, quien, hacia 1774, construyó poderosos lentes para concentrar la radiación solar (ver Figura 2.7). Este alcanzaba una increíble temperatura de 1750°C. El horno utilizaba una lente de 1,32 m de diámetro más una lente secundaria 0,2 m de diámetro para obtener dicha temperatura, que resultó ser la máxima alcanzada durante 100 años [54].

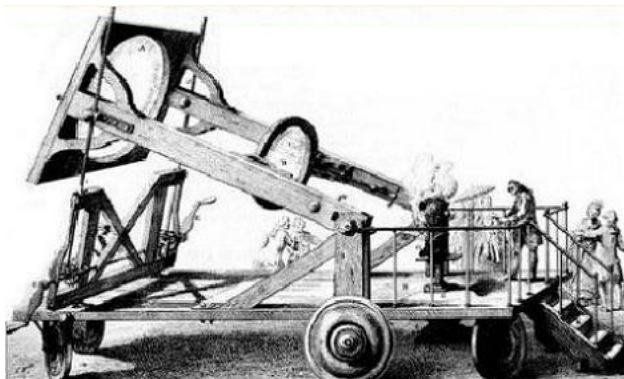


Figura 2.7: El primer horno solar con lentes concentradores de vidrio, construido por F. Lavoisier

En 1874 se construyó en Chile la primera central de colectores solares para uso indus-

trial en un país. El inglés Charles Wilson diseñó y dirigió una instalación con una superficie de captación superior a los 4.000 m^2 para la destilación del agua marina en el desierto de Atacama para la Salitrera Lastenia Salinas. Esta central era capaz de proporcionar un promedio de 22.500 litros de agua diarios y estuvo en funcionamiento hasta el año 1907.

Durante el siglo XIX, Augustin Mouchot fue pionero en la construcción y operación de las máquinas de vapor a través de la energía solar entre los años 1864 y 1878, ya que no creía que el carbón pudiera sostener en un futuro el vigoroso desarrollo industrial de la época, comprendiendo que la energía solar era más barata y abundante. La máquina de vapor alimentada por energía solar de Mouchot consistía en un gran receptor parabólico que tenía un diámetro de $5,4\text{ m}$ y una superficie de captación de $18,6\text{ m}^2$, recubierto de espejos que concentraban la radiación del Sol en un solo punto. El calor generado activaba un motor de vapor.

Otra aplicación surgió durante el siglo XIX como alternativa a los costosos calentadores de gas o carbón para agua sanitaria. La idea surgió en Estados Unidos y consistía en pintar de negro contenedores expuestos al Sol para que se calentasen. Sin embargo para obtener agua caliente suficiente se requería de días muy soleados y en cuanto llegaba la noche el agua se enfriaba muy rápidamente. La fabricación de calentadores solares de agua para uso doméstico se comenzó a masificar la década de 1960, expandiéndose rápidamente en muchos países del mundo. Estos calentadores solares de agua constaban típicamente de dos colectores solares de placa plana que tienen un área de absorción entre 3 a 4 m^2 y un tanque de almacenamiento con capacidad de entre 150 a 180 litros, todos instalados sobre un armazón adecuado. Un calentador auxiliar se instala para suplir los periodos de baja radiación solar.

Otro tipo importante de calentador de agua solar es el tipo de circulación forzada. En este sistema, sólo los paneles solares son visibles en el techo de los hogares, el tanque de almacenamiento de agua caliente se encuentra en el interior en una habitación de la planta, y el sistema se completa con la tubería, una bomba, y un termostato. Obviamente, este tipo es más atractivo, principalmente por razones arquitectónicas y estéticas, pero también es más caro, especialmente para pequeñas instalaciones [55].

2.3.2. Funcionamiento

Los colectores solares térmicos transforman la radiación solar en energía y la transmite a un fluido que circula en su interior. Normalmente se utiliza agua como fluido de trabajo, la cual es posteriormente almacenada en un estanque de acumulación.

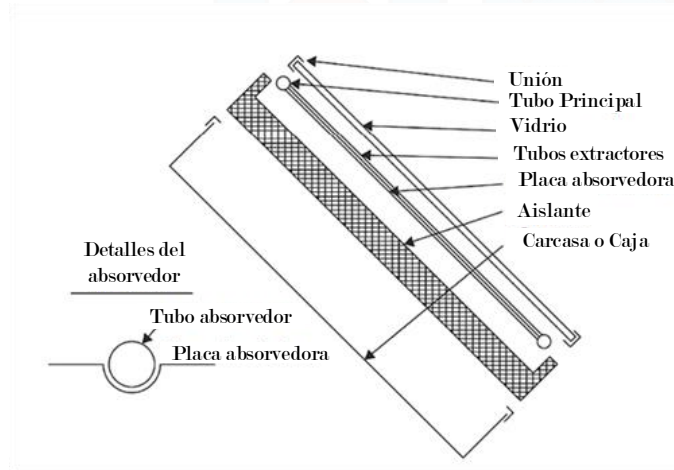


Figura 2.8: Sección Transversal Colector Solar Plano.

(Fuente: [55])

Un colector plano se compone de los siguientes elementos, los cuales se pueden observar en la Figura 2.8:

1. Cubierta de Vidrio: Es la cubierta transparente, la cual genera el efecto invernadero en el colector, dejando pasar la mayor parte de la radiación solar incidente y reteniendo la radiación infrarroja generada en la placa absorbente. Es de vidrio templado.
2. Unión: Junta la cubierta de vidrio con la carcasa, y debe asegurar la impermeabilidad del colector, impidiendo la penetración del agua cuando llueva.
3. Placa de absorción: Es la parte del colector donde la energía se transmite al fluido. Es de metal negro (pintado o tratado) para mejorar su coeficiente de absorción de radiación solar. La placa se recubre generalmente con una capa de alta absorción y baja emisión.
4. Tubos Colectores: Los tubos son generalmente de cobre y soldados (o integrados) a la placa de absorción, con el objetivo de asegurar una transferencia de calor eficaz entre las placas y el fluido que circula en el interior de los tubos.

5. Aislante: La aislación térmica se utiliza para minimizar la pérdida de calor de la parte posterior y laterales del colector.
6. Caja o Carcasa: Contiene todos los otros elementos del colector antes mencionados y los protege del exterior. Puede ser de distintos tipos de materiales.

Los colectores solares planos están basados en el "efecto invernadero", el cual se genera en el interior de éste gracias a la cubierta de vidrio. La radiación solar, tanto directa como difusa, incide en el colector y es absorbida por la placa que comienza a aumentar su temperatura. Al aumentar la temperatura de la placa, ésta comienza a emitir radiación de onda larga en el espectro infrarrojo, la que no puede salir al exterior, ya que la placa de vidrio refleja gran parte de ésta (aproximadamente el $85 \pm 10 \%$, dependiendo del material) y vuelve a la placa aumentando la eficiencia del colector. Este calor que obtiene la placa, es transferido al circuito de fluido de trabajo (agua o glicoles según el funcionamiento). Todo este sistema debe estar debidamente aislado para disminuir las pérdidas, especialmente por el contenedor del colector, que es por donde se pierde la mayor cantidad de energía.

2.3.3. Modelo de Energía

H. Hottel fue el primer investigador que estudió los colectores solares, cuando junto con B. Woertz [56], presentaron su publicación denominada "El rendimiento de los colectores de calor solar de placa plana" en 1942. En esta investigación entregan los resultados de años de pruebas a un sistema de calentamiento de agua provisto de un colector solar plano. Posteriormente, en 1958, junto con su alumno de doctorado A. Whillier publicaron "Evaluación del rendimiento de un colector solar de placa plana", basados en la primera publicación de Hottel, en el cual presentan un modelo para caracterizar un colector solar de placa plana. En esta publicación presentan la Ecuación de Hottel y Whillier, la cual es la base para todo el desarrollo posterior de este particular tipo de intercambiador de calor desde el punto de vista del análisis térmico, y que sigue siendo utilizada hoy en día [7]. La ecuación representa la ganancia útil de energía del colector, $\dot{q}_u$:

$$\dot{q}_u = A_c F_r [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_{in,c} - T_{amb})]^+ \quad (2.2)$$

Donde A_c representa el área del colector solar, F_r representa el factor de remoción de calor colector solar, I_T corresponde a la irradiancia global sobre un plano inclinado (W/m^2), $(\tau\alpha)$ es el producto transmitancia-absortancia, U_L es el coeficiente de pérdida global de calor ($W/m^2\text{ }^\circ C$), $T_{in,c}$ y T_{amb} representan la temperatura de entrada al colector solar y la temperatura ambiente respectivamente ($^\circ C$). El término $+$ implica que si la diferencia entre la ganancia por radiación solar y las pérdidas del colector es mayor a cero, se puede utilizar esta diferencia y en caso contrario, la ganancia de energía del colector será cero ($\dot{q}_u = 0$). El factor $(\tau\alpha)$ representa el cociente transmisión-absorción de la radiación solar entre cubierta transparente y superficie absorbente.

Además, se puede obtener el rendimiento del colector si la Ecuación 2.2 se divide por la energía total recibida por el colector.

$$\eta = \frac{\dot{q}_u}{A_c I_T} = F_r \left[(\tau\alpha) - \frac{U_L (T_{in,c} - T_{amb})}{I_T} \right] \quad (2.3)$$

2.4. Planta de Colectores Solares Térmicos Planos

Un sistema de calentamiento de agua con energía solar consiste básicamente en un arreglo de colectores solares planos conectados a un tanque de almacenamiento, el cual debe soportar temperaturas elevadas y estar muy bien aislado para disminuir las pérdidas térmicas con el ambiente y lograr un mejor desempeño. El fluido calentado por la energía solar incidente sobre los colectores es transportada al estanque de acumulación. El agua caliente permanece almacenada en el estanque hasta que se necesite. Si el agua no tiene la temperatura requerida a la hora del consumo, el sistema auxiliar se acciona para alcanzar la temperatura deseada.

Según el mecanismo a través del cual el agua va de un lugar a otro, se identifican dos tipos: Termosifón y Circulación forzada. El sistema Termosifón se aprovecha la diferencia

de temperaturas del agua para que se desplace por diferencia de densidades. El agua caliente pesa menos que el agua fría, por lo que al pasar por el colector y calentarse tiende a subir, por ello en los sistemas por termosifón es necesario que el depósito se encuentre por encima del panel, evitando así la bomba de circulación. El sistema de Circulación forzada incluye una bomba de circulación, controlada por un sistema de control que registra las temperaturas a la salida de los colectores y en la parte más fría del tanque de almacenamiento y las compara para activar o detener la bomba. A continuación se detallan las configuraciones más comunes [55]:

Sistema de calentamiento de agua « termosifón » directo: Circulación del agua en los colectores por efecto de convección natural. El estanque debe ubicarse por encima del colector para que el agua caliente fluya desde el colector al estanque de almacenamiento.

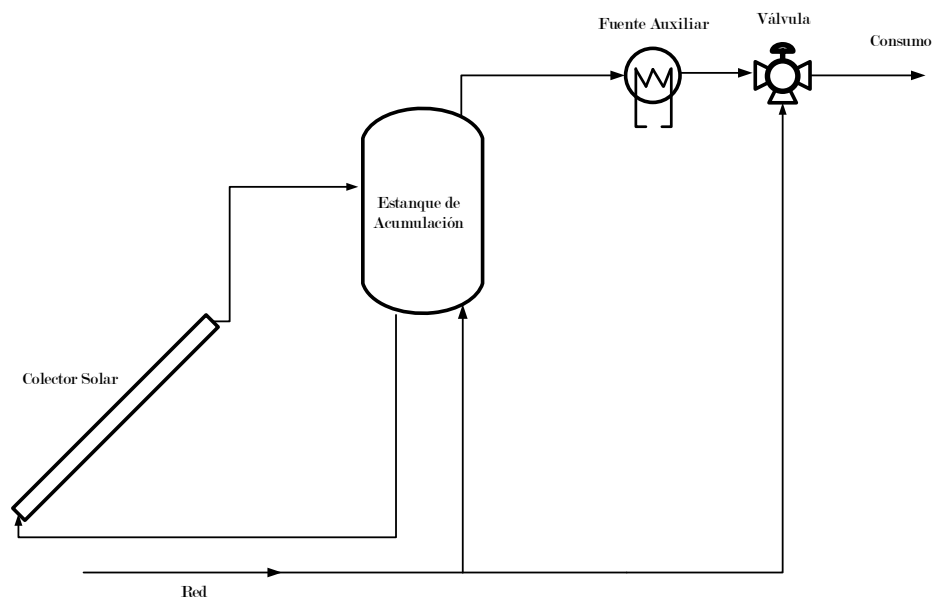
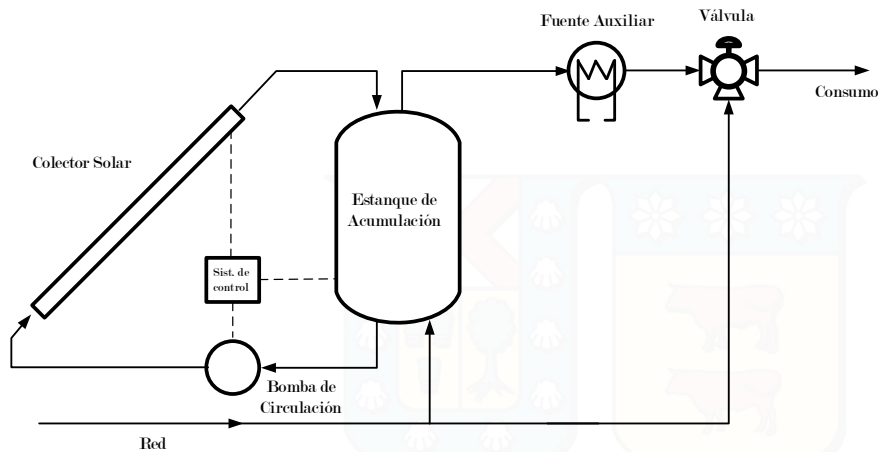


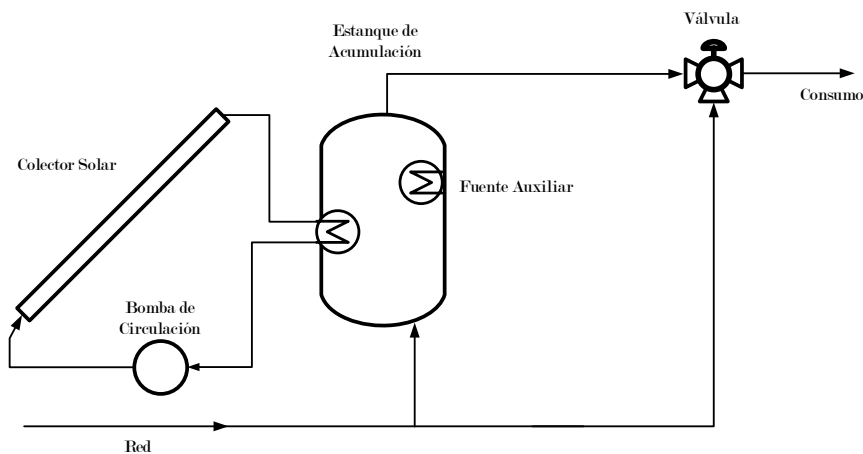
Figura 2.9: Sistema Termosifón o Convección Natural
(Fuente: [46])

Sistema de calentamiento de agua directo a circulación forzada: Circulación forzada mediante una bomba y un sistema de control, el cual activa cuando entra y sale agua en el colector. En el método directo es el agua quien es calentada y almacenada directamente.

**Figura 2.10:** Sistema de circulación forzada directo.

(Fuente: [46])

Sistema de calentamiento de agua indirecto a circulación forzada: Circulación forzada mediante una bomba, de un líquido caloportador en los colectores. El método indirecto hace referencia al uso de fluidos con un alto poder calorífico.

**Figura 2.11:** Sistema de circulación forzada indirecto.

(Fuente: [46])

Sistema de calentamiento de agua indirecto a circulación forzada con intercambiador externo: Sistema de circulación forzada con circuito anticongelante y intercambiador de calor externo.

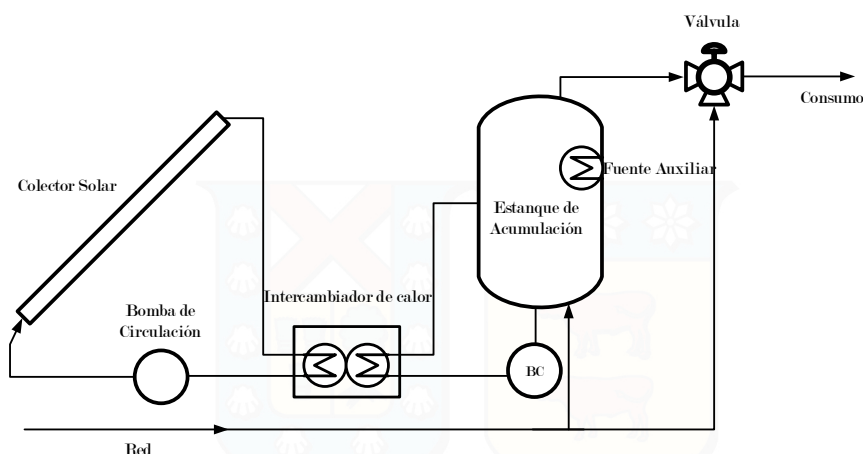


Figura 2.12: Sistema con Intercambiadores de calor externo.

(Fuente: [46])

En climas donde se pueden alcanzar temperaturas de congelación del agua, los diseños de las Figuras 2.9 y 2.10 no son recomendados, y se deben utilizar los métodos indirectos (con fluido anticongelante). El intercambiador de calor de la fuente auxiliar se puede ubicar dentro o fuera del estanque. Ésta se puede conectar la instalación solar a una caldera existente, independiente de la fuente de energía que utilice, gas, electricidad u otra, o bien, instalar una resistencia eléctrica o de un intercambiador conectado a una caldera en la parte superior del tanque de almacenamiento. Por otro lado, cualquiera de estos sistemas deben estar equipados con válvulas de templado que mezclen el agua de suministro frío con agua caliente para poner un límite superior a la temperatura del agua caliente que va al sistema de distribución.

2.5. Dimensionamiento de una Planta de Colectores Solares Térmicos Planos

Los altos costos de inversión inicial y los largos períodos de payback de las PCSTP, han motivado que desde mediados del siglo XX se desarrollen una serie de técnicas de simulación y optimización para determinar su diseño óptimo, técnicas que van desde simples y económicas hasta las más complejas y costosas. Los primeros en ser desarrollados fueron

los métodos de correlación, los cuales en base a las condiciones ambientales de un lugar, al área colectora y al volumen del estanque de acumulación predicen el rendimiento del sistema. La preocupación principal del diseño de un sistema solar térmico es la determinación del área del colector que optimiza el sistema desde un punto de vista económico. Esto requiere el conocimiento de la relación entre el rendimiento del sistema, usualmente caracterizado por la fracción de carga solar anual y el área del colector.

Una serie de métodos para el dimensionamiento de sistemas de agua caliente solar fueron ampliamente desarrollados, diferenciando dos tipos de metodologías: Basados en la correlación y basados en la simulación. Los métodos basados en la correlación incluyen el método ϕ [7], el método ϕ generalizado [8], el método $\bar{\phi}$ [9], [57],[58], el método $f - chart$ [11] y el método $\phi, f - chart$ [59]. Por otra parte, aquellos basados en simulación son complejos softwares computacionales entre los que destacan TRNSYS [10], [60], WATSUN [61] y SOLCOST [62], entre otros. En la Tabla 2.1 se resumen los métodos descritos, y posteriormente se detallan el método $\phi, f - chart$, y el método de simulación de TRNSYS.

TABLA 2.1: Resumen de los métodos de diseño para PCSTP (Elaboración propia)

		Método	Comentarios	Referencia
Métodos de Diseño	Métodos de Correlación	ϕ	Calcula la energía solar útil en base en una radiación estadística que está por sobre cierto nivel requerido. Se utiliza en los casos en que la temperatura de funcionamiento del colector es conocida o se puede estimar y para la cual se pueden establecer niveles críticos de radiación.	[7]
		$\bar{\phi}$	Es el método generalizado y mejorado de ϕ , ya que eliminó la necesidad de cálculos por hora necesarios en el método ϕ , reduciendo la complejidad.	[9]
		<i>f-chart</i>	Permite estimar la fracción solar para ciertas configuraciones de sistemas estándar para calentamiento de agua, espacios o mixtos. Para ésto utiliza datos meteorológicos promedios mensuales, y considera homogénea la temperatura en estanque de almacenamiento.	[11]
		$\bar{\phi}, f\text{-chart}$	Método para sistemas térmicos de ciclo cerrado, utilizado para space heating. Éste método no se restringe para calentar espacios a temperaturas cercanas a 20°C como el método <i>f-chart</i> .	[59]
	Métodos de Simulación	TRNSYS	Software de enfoque modular que funciona mediante subprogramas que representan los componentes en una PCSPP. Posee una amplia librería que permite al usuario elegir entre una gran variedad de configuraciones, componentes y modelos de energía que utiliza cada componente.	[10], [60]
		SOLCOST	Simula un día despejado y un día nublado y luego pesa los resultados según la nubosidad media para obtener una estimación mensual del rendimiento del sistema. Se compararon los resultados de SOLCOST con los de <i>f-chart</i> para diversas locaciones y sistemas, los cuales varían entre 0 a 20 % según la locación [63].	[62]
		WATSUN	El enfoque del programa es la simulación de los sistemas de energía solar y las interacciones entre el sistema y su entorno sobre una base horaria. El programa fue validado con TRNSYS utilizando diferentes casos, donde las diferencias en las predicciones de energía anual entregada fue menos del 1.2 % en todas las configuraciones probadas [64].	[61]

2.5.1. Método ϕ

A finales de la década de los '50 Hottel y Willier desarrollaron la primera técnica de simulación para sistemas de colectores solares planos, el ϕ – *method* [7], el cual fue ampliado por Liu y Jordan [8] y Klein [11] en las décadas siguientes. El método se basa en la idea que si sólo es útil la radiación por encima de una intensidad crítica o umbral, entonces se puede definir una radiación estadística ("utilizability"), como la fracción de la radiación total que se recibe a una intensidad superior a dicho nivel crítico. Así, si se multiplica la radiación promedio de un período por esta fracción, es posible encontrar la energía total utilizable.

El método se basa en la ecuación de la tasa de recolección de energía útil ($\dot{q}_u$), descrita en la Ecuación 2.2 y que es reordenada de la siguiente manera:

$$\dot{q}_u = A_c F_r (\tau\alpha) [I_T - I_c]^+ \quad (2.4)$$

Donde I_c es el nivel crítico de radiación, el cual indica el nivel de radiación necesaria para poder mantener la placa de absorción a la misma temperatura con que el agua ingresa al colector. Esto es:

$$I_c = \frac{F_r U_L}{F_r (\tau\alpha)} (T_{in,c} - T_{amb}) \quad (2.5)$$

Tomando una base horaria para el análisis, "utilizability" (ϕ) se define como la fracción de la radiación horaria a largo plazo, que está por encima del nivel crítico de la radiación solar necesaria para mantener la placa del colector a la temperatura del fluido que entra al colector y puede escribirse como:

$$\phi = \frac{\sum^N [I_T - I_c]^+}{\sum^N I_T} \quad (2.6)$$

Donde N representa un gran número de observaciones horarias de la radiación suficiente para representar las ediciones promedio a largo plazo.

La principal restricción de este método es el requisito de un nivel de radiación crítica constante, es decir, una temperatura de entrada del fluido del colector constante. En la prác-

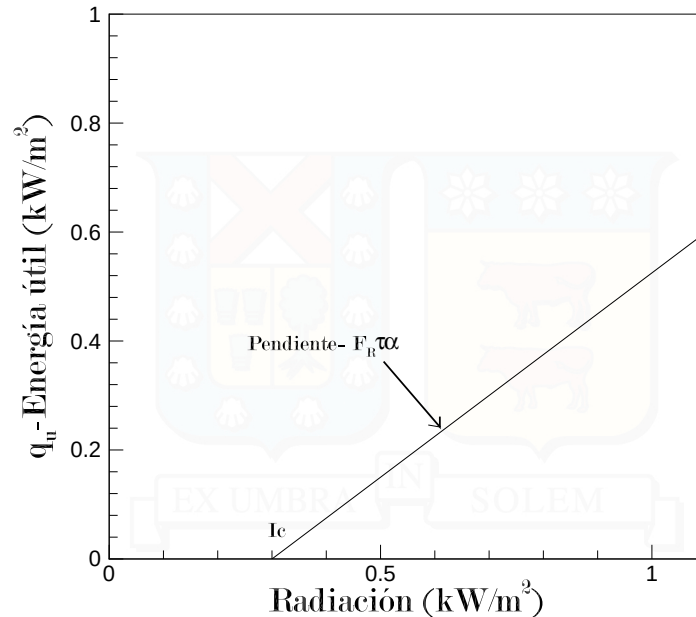


Figura 2.13: Rendimiento característico de un colector solar térmico.
(Fuente: Adaptado de [65])

tica, la temperatura de entrada del fluido del colector no se conoce normalmente y variará considerablemente con la temperatura del agua en el estanque de almacenamiento. Otra restricción importante es que el método sólo proporciona la cantidad de calor suministrado, y no permite modelar la estratificación del tanque de almacenamiento [65].

Posteriormente, el método fue generalizado para cualquier locación y orientación del sistema por Liu et al. [8], para así ser nuevamente mejorado por Klein et al. [9], con su método $\bar{\phi}$, el cual eliminó la necesidad de cálculos por hora necesarios en el método ϕ al utilizar una base diaria para el *utilizability*, reduciendo gran parte de la complejidad y mejorando la utilidad del método.

2.5.2. Método $f - \text{chart}$

En el Laboratorio de Energía Solar de Wisconsin-Madison se desarrolló TRNSYS [10], un software que realiza una detallada simulación utilizando un enfoque modular, en el cual cada componente del sistema es modelado independientemente y es el usuario quien debe señalar la manera en que éstos deben estar conectados. El método $f - \text{chart}$ nace luego

de hacer correr aproximadamente 300 veces TRNSYS [66], a partir de las cuales Klein y Beckman encontraron que existe una correlación entre la incidencia solar, las pérdidas de los colectores solares, y la fracción promedio de energía proporcionada por el sol al sistema. De esta manera, el método $f - chart$ proporciona la fracción solar mensual a partir de las ganancias y pérdidas térmicas del colector [11].

El método F-chart se desarrolló ampliamente para sistemas domésticos de calefacción de aire, calentamiento de agua sanitaria y sistemas mixtos, y está completamente descrito por Beckman et al. [67]. Los sistemas térmicos solares que se utilizaron para el estudio son para el calentamiento de aire y agua y con una configuración del tipo visto en la Figura 2.14. En dicha configuración, el sistema utiliza líquido con anticongelante en el bucle colector y agua para el almacenamiento de calor. El sistema considera dos estanques de almacenamiento, donde el primero es para el pre-calentamiento de agua.

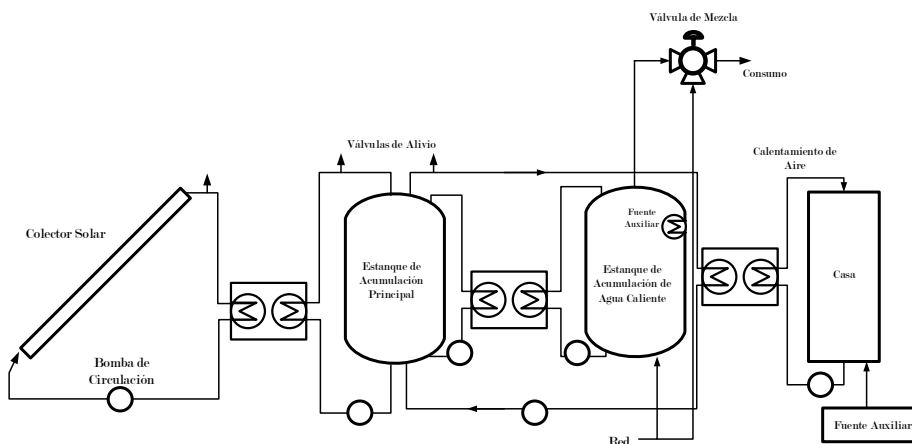


Figura 2.14: Sistema de calefacción solar basado en líquidos estándar para calefacción y agua caliente. (Fuente: [46])

El método $f - chart$ entrega por resultado la fracción solar (f), que corresponde a la fracción de la carga de calentamiento mensual (para calefacción de aire y agua caliente) suministrada por energía solar, es decir, el porcentaje de la energía requerida que se satisface con energía solar, en función de dos parámetros adimensionales: Una se vincula con la relación de pérdidas de colector con cargas de calentamiento (X), y la otra está ligada con la relación de radiación solar absorbida a cargas de calentamiento (Y). Estos dos parámetros

adimensionales se dan como:

$$X = \frac{F'_R U_L (T_{ref} - T_{amb}^-) A_c \Delta t}{L} \quad (2.7)$$

$$Y = \frac{F'_R (\tau \bar{\alpha}) \bar{H}_T N}{L} \quad (2.8)$$

Donde

- F'_R = Factor de eficiencia del intercambiador de calor del colector.
- U_L = Coeficiente de pérdida global del colector ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).
- A_c = Área Colectora (m^2).
- T_{ref} = Temperatura de referencia derivada empíricamente ($100^\circ C$).
- T_{amb}^- = Promedio mensual de la temperatura ambiente ($^\circ C$).
- Δt = Número de segundos en un mes (s).
- L = Corresponde a la carga total mensual de calefacción y agua caliente (J).
- $\bar{H}_T$ = Corresponde al promedio mensual de radiación diaria incidente en la superficie del colector por unidad de área (J/m^2).
- N = Días del mes.
- $(\tau \bar{\alpha})$ = Es el producto de transmitancia-absorción media mensual.

De esta manera, la fracción solar mensual queda definida como:

$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 - 0,0018X^2 + 0,0215Y^3 \quad (2.9)$$

En sistemas solares térmicos que sólo se utilizan para el calentamiento de agua (Figura 2.16) también se puede utilizar el metodo $f - chart$, pero necesita de ciertas modificaciones. En esta configuración el rendimiento de los sistemas solares de calentamiento de agua se ve

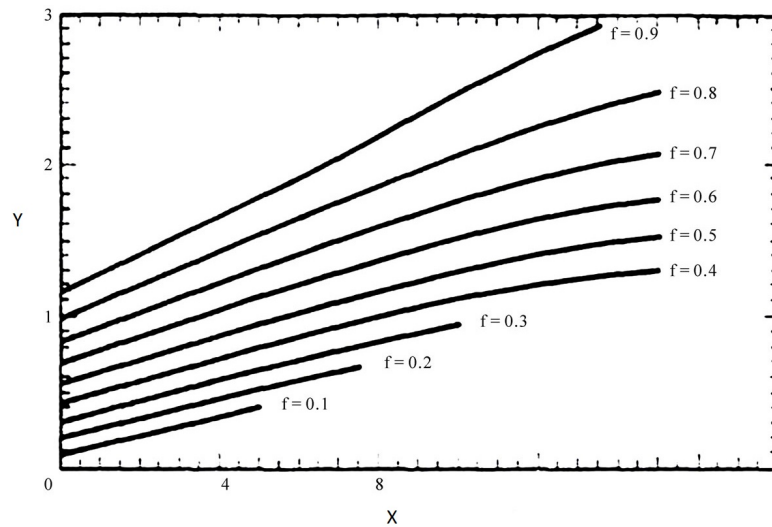


Figura 2.15: Gráfica de f para sistemas térmicos solares para calentamiento de agua
(Fuente: [68])

afectado por la temperatura del agua de la red pública (T_m), y la temperatura mínima aceptable del agua caliente (T_w), las cuales afectan a la temperatura media de funcionamiento del sistema y, por tanto, a las pérdidas de energía del colector (No se alteran las ganancias del colector). Así, el factor X corregido se expresa como:

$$X_c = \frac{F'_R U_L A_c (11,6 + 1,8T_w + 3,96T_w - 2,32T_{amb}^-) \Delta t}{L} \quad (2.10)$$

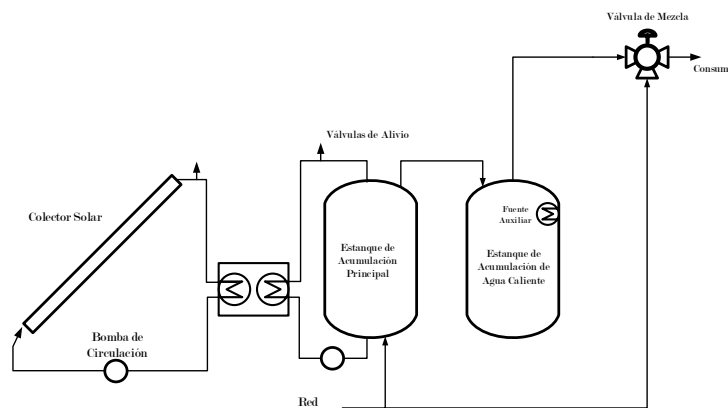


Figura 2.16: Sistema solar térmico estándar para calentamiento de agua.
(Fuente: [46])

El método f -chart permite estimar rápidamente el rendimiento de los sistemas de

energía solar de configuraciones estándar para un largo período de evaluación, de mínimo un mes, y no se puede aplicar para estimaciones de tipo semanal o diario. Los datos de entrada necesarios son la radiación media mensual y la temperatura, la carga mensual requerida, y los parámetros de desempeño del colector obtenidos de las pruebas estándar de colectores, los cuales en general, son de fácil obtención. Ahora bien, existen varias limitaciones e incertidumbres del método.

En primer lugar, los datos meteorológicos utilizados, son promedios mensuales, por lo que es imposible conocer el rendimiento diario del sistema, y además, no considera la curva diaria de radiación y temperatura, lo que puede hacer variar considerablemente el rendimiento de éste según el patrón de consumo del hogar. Además, las simulaciones hechas consideraron todos los días simétricos sobre el mediodía solar, haciendo estimaciones conservadoras sobre el rendimiento del sistema. En segundo lugar, se asume que los estanques de almacenamiento están perfectamente aislados, y el fluido al interior de éste se encuentra perfectamente mezclado, haciendo una sobrestimación de la temperatura de entrada del colector. La incertidumbre final está relacionada con la construcción y las cargas de agua caliente, que dependen fuertemente de las condiciones climáticas y de los hábitos de los ocupantes [46].

Posteriormente, el método se combinó con la noción de *utilizability*, creando el ϕ, f – *chart* [59]. Este método es muy restrictivo, el cual solo sirve para sistemas térmicos de ciclo cerrado y es utilizado para el calentamiento de ambientes. Presenta la mejoría con respecto al método f – *chart* aplicado a sistemas de calentamiento de aire que no se restringe para calentar espacios a temperaturas cercanas a 20°C.

2.5.3. Transient System Simulation Tool (TRNSYS)

TRNSYS es un programa de simulación utilizado principalmente en los campos de la ingeniería de las energías renovables y la simulación de sistemas solares, ya sean fotovoltaicos o térmicos [10]. Fue desarrollado en la Universidad de Wisconsin por Klein et al. [60], y actualmente es uno de los programas de simulación y optimización más utilizado por los investigadores [69].

TRNSYS posee un enfoque modular, y se diferencian dos grandes partes. El primero es

un motor (Kernel) que lee y procesa el archivo de entrada, iterativamente resuelve el sistema, la convergencia, y plots variables del sistema. Este motor funciona a través de subrutinas que modelan los componentes del subsistema (módulos). Los modelos matemáticos para los componentes del subsistema se dan en términos de sus ecuaciones ordinarias diferenciales o algebraicas programadas en FORTRAN. La gran adaptabilidad de TRNSYS, que tiene la capacidad de interconectar los componentes del sistema de muchas maneras diferentes, reduce todo el problema de la simulación del sistema a un problema de identificar todos los componentes que forman el sistema particular y formular una descripción matemática general de cada uno.

La segunda parte de TRNSYS es una extensa biblioteca de componentes, cada uno de los cuales modela el rendimiento de una parte del sistema. La biblioteca estándar incluye aproximadamente 150 modelos que van desde bombas a edificios multizona, turbinas eólicas a electrolizadores, procesadores de datos meteorológicos a rutinas económicas, y equipos básicos de HVAC a tecnologías emergentes de vanguardia. Los modelos se construyen de tal manera que los usuarios pueden modificar los componentes existentes o escribir sus propios, ampliando las capacidades del entorno y modificando las configuraciones de acuerdo a las necesidades específicas de cada evaluación.

El enfoque modular utilizado en el programa TRNSYS tiene varias ventajas que hacen que sea atractivo para los investigadores:

- Reduce la complejidad de la formulación de modelos de simulación para los sistemas, convirtiendo un problema grande en varios problemas más pequeños, los cuales pueden ser resueltos más fácilmente de manera independiente.
- Proporciona un formato en el que varias personas pueden trabajar en múltiples aspectos del problema, cada uno enfocado en los subsistemas previamente definidos. Además, muchos componentes son comunes a varios sistemas diferentes.
- La biblioteca de modelos de componentes que cuenta TRNSYS reduce en gran medida el tiempo y el esfuerzo que implica la formulación de un modelo de un nuevo sistema.

En la Figura 2.17 se puede observar un diagrama básico de una instalación de PCSTP.

Para llevar a cabo la simulación se deben ingresar los datos meteorológicos, siendo el más relevante el "Año Meteorológico Típico", el perfil de consumo de agua caliente, la temperatura a la cual se utilizará, etc. Una vez que todos los componentes del sistema han sido identificados, se debe realizar descripción matemática de cada uno, los cuales pueden ser cargados desde la librería de TRNSYS, o bien, modelar manualmente el componente. Todos los componentes y las interacciones de éstos, son representados en un diagrama de flujo, el cual tiene por objetivo facilitar la identificación de los componentes y el flujo de información entre ellos.

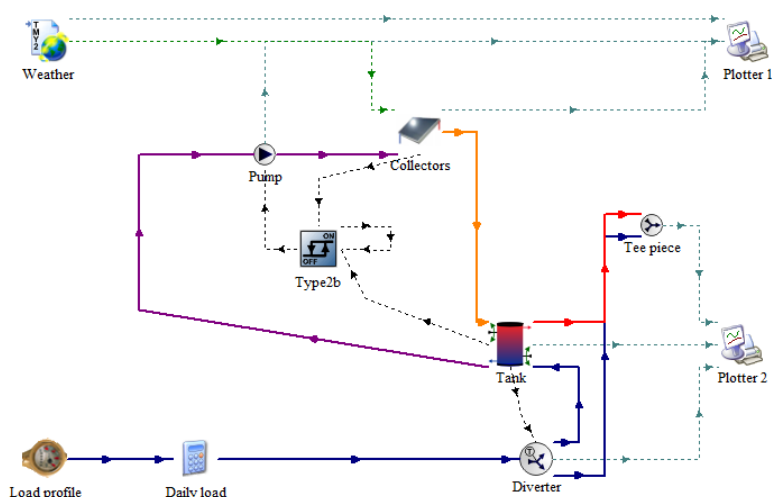


Figura 2.17: Diagrama de flujo para una PCSTP en TRNSYS.

(Fuente: Extraído de programa TRNSYS)

La principal desventaja de un programa de simulación general que utiliza el enfoque modular es su alto coste informático en relación con un programa para un propósito específico. El coste de una simulación por ordenador de un sistema en el que el rendimiento del sistema se calcula a intervalos de tiempo reducidos durante períodos prolongados puede ser significativo. Para reducir los costos de computación, es posible formular un modelo de simulación para un sistema específico de manera que requiera menos computación que la necesitada por un programa de simulación general. El enfoque modular a menudo introduce una necesidad de soluciones iterativas de ecuaciones que se pueden evitar en un programa menos general. El esquema computacional incorporado al programa TRNSYS está diseñado para minimizar el esfuerzo computacional requerido para resolver, las ecuaciones algebraicas y diferenciales simultáneas que describen el rendimiento del sistema.

2.6. Almacenamiento de la Energía en Plantas de Colectores Solares Térmicos Planos

El almacenamiento de energía en forma de calor es una de las soluciones que poseen las PCSTP para entregar energía en cualquier momento del día, sin importar si es de día o de noche. Las características principales de un sistema de almacenamiento de energía térmica son su capacidad por unidad de volumen; el rango de temperatura sobre el cual opera, es decir, la temperatura a la cual se agrega calor y se elimina del sistema; los medios de adición o eliminación de calor y las diferencias de temperatura asociadas con los mismos; estratificación de la temperatura en la unidad de almacenamiento; los requisitos de potencia para la adición o eliminación de calor; los contenedores, tanques u otros elementos estructurales asociados con el sistema de almacenamiento; los medios para controlar las pérdidas térmicas del sistema de almacenamiento; y su costo [46].

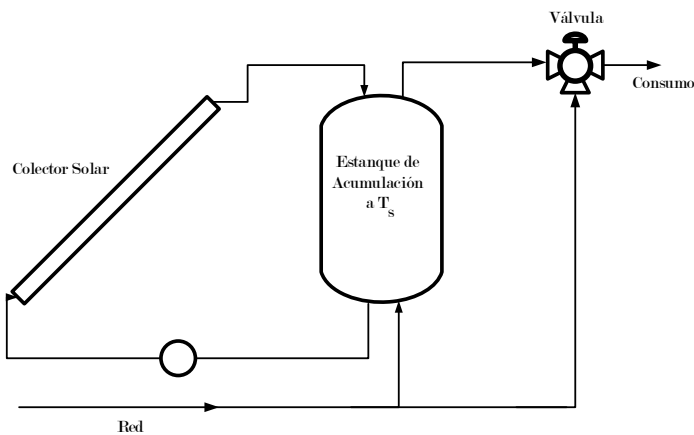


Figura 2.18: Sistema típico de almacenamiento de agua sin estratificación.
(Fuente: [46])

Para muchos sistemas solares, el agua es el material ideal para almacenar el calor utilizable. La energía se añade y se retira de este tipo de unidad de almacenamiento mediante el transporte del propio medio de almacenamiento, eliminando así la caída de temperatura entre el fluido de transporte y el medio de almacenamiento. En la Figura 2.18 se muestra un sistema típico en el que se utiliza un tanque de agua como medio de almacenamiento, y que es la misma agua que pasa a través del colector solar, pero que

también podría utilizar un intercambiador de calor con un fluido para calentar el agua del estanque. La energía almacenada en un estanque de agua a una temperatura uniforme (completamente mezclada o no estratificada) es dado por:

$$Q_s = m_s c_p \Delta T_s \quad (2.11)$$

Así, el balance de energía queda expresado por:

$$m_{s,j} c_p \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_u - \dot{L}_s - U_s A_s (T_s - T_{amb}) \quad (2.12)$$

Donde $\dot{Q}_u$ es la ganancia de energía proveniente del colector, $\dot{L}_s$ es la energía que se entrega a la Carga, U_s es el coeficiente de pérdida global del estanque, A_s es el área superficial del estanque, T_s es la temperatura del agua dentro del estanque, la cual es completamente homogénea, y T_{amb} es la temperatura ambiente.

La ecuación 2.12 debe integrarse en el tiempo para determinar el rendimiento a largo plazo del estanque de almacenamiento y el proceso solar en general. Para esto, se utilizan métodos de integración numérica, como la integración de Euler, es decir, reescribiendo la derivada de temperatura como $\frac{(T_s^+ - T_s)}{\Delta t}$, donde T_s^+ representa la temperatura del estanque al final de un incremento temporal. Así, la ecuación queda:

$$T_s^+ = T_s + \frac{\Delta t}{m_s c_p} (\dot{Q}_u - \dot{L}_s - U_s A_s (T_s - T_{amb})) \quad (2.13)$$

La disponibilidad de datos meteorológicos permiten que los cálculos sean desarrollados para periodos de una hora, por lo que la temperatura al final de una hora se calcula a partir de la temperatura que tenía al comienzo. Todos los datos y ratios utilizados deben estar en base horaria.

2.6.1. Estratificación en el Estanque de Acumulación

Es bien sabido que las propiedades del agua a diferentes temperaturas cambian, entre ellas la densidad. Esto hace que en un estanque de acumulación el agua no se encuentre perfectamente mezclada, si no que existen gradientes de temperatura, desde la parte

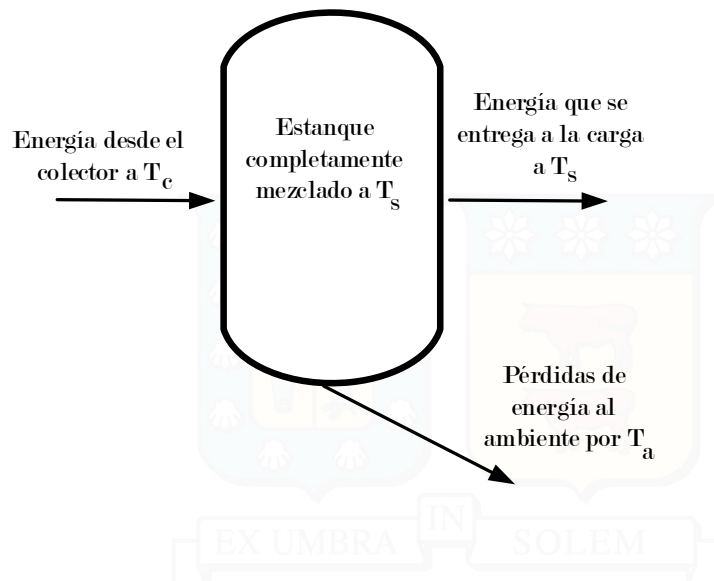


Figura 2.19: Balance de energía para un estanque sin estratificación.
(Fuente: [46])

superior a la parte inferior. Los tanques de agua pueden operar con grados significativos de estratificación, es decir, con la parte superior del tanque más caliente que el fondo. El enfoque multinodal de la estratificación modela al estanque en secciones (nodos), con balances energéticos escritos para cada sección del estanque. El resultado es un conjunto de N ecuaciones diferenciales que se pueden resolver para las temperaturas de los N nodos como funciones del tiempo. El grado de estratificación en un tanque real dependerá del diseño del estanque, esto es tamaño, ubicación, diseño y caudal de las entradas y salidas de agua caliente y fría.

En general, los estanques son de forma cilíndrica, dispuestos de manera vertical con el fin de aumentar la estratificación para obtener agua caliente desde la parte superior y entregar agua fría al sistema de colectores solares desde la base del estanque, lo que aumenta la eficiencia del colector solar [70]. El depósito está diseñado para que sea capaz de almacenar el calor útil proveniente de los colectores solares y de satisfacer la demanda de calor para diferentes momentos del día.

El modelo unidimensional se basa en una serie de supuestos:

1. El flujo de líquido dentro del tanque es unidimensional.
2. La temperatura y densidad del fluido en cada nodo es uniforme y constante durante el

paso del tiempo.

3. Las corrientes de fluido de cada nodo se consideran completamente mezcladas antes de entrar en un nodo adyacente.
4. La pérdida de calor en el exterior del estanque y la conducción en las paredes del tanque son suficientemente bajas para que no se formen gradientes de temperatura de dos o tres dimensiones.

Existen dos relaciones importantes que debe tener el estanque: La primera es la relación entre la altura (H) y el diámetro (D), la cual para la mayoría de las instalaciones domésticas la relación (H/D) está en el rango de 1.5 y 3.5 [71]. La segunda corresponde a la relación entre el área colectora y el volumen de acumulación, debido a la alta variación del comportamiento de la temperatura del agua dentro del estanque. Es por ello que la relación entre el volumen y la superficie del colector debe estar en el rango de 40 y 300 l/m² [72].

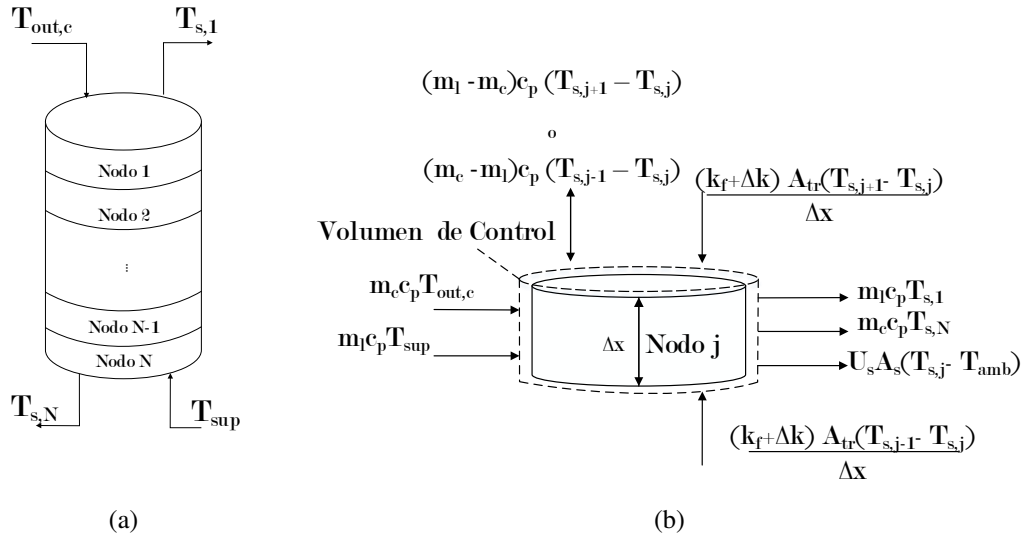


Figura 2.20: (a) Estratificación del estanque (b) Balance de energía en nodo j

El estanque se divide en n segmentos, los cuales se consideran perfectamente mezclados y homogéneos. La ecuación de balance de energía para un nodo cualquiera del estanque viene dada por Eq. 2.14

$$m_{s,j}c_p \frac{dT_{s,j}}{dt} = U_s A_s (T_{s,j} - T_{amb}) + \frac{(k_f + \Delta k) A_{tr} (T_{s,j+1} - T_{s,j})}{\Delta x} + \frac{(k_f + \Delta k) A_{tr} (T_{s,j-1} - T_{s,j})}{\Delta x} + \dot{Q}_{up} + \dot{Q}_{down} + \dot{Q}_{one} + \dot{Q}_{end} \quad (2.14)$$

Donde

$$\dot{Q}_{up} = (\dot{m}_l - \dot{m}_c) c_p (T_{s,j+1} - T_{s,j}), \text{ if } \dot{m}_c < \dot{m}_l \quad (2.15)$$

$$\dot{Q}_{down} = (\dot{m}_c - \dot{m}_l) c_p (T_{s,j-1} - T_{s,j}), \text{ if } \dot{m}_c > \dot{m}_l \quad (2.16)$$

$$\dot{Q}_{one} = \dot{m}_c c_p T_{out,c} - \dot{m}_l c_p T_{s,1}, \text{ if } j = 1 \quad (2.17)$$

$$\dot{Q}_{end} = \dot{m}_l c_p T_{net} - \dot{m}_c c_p T_{s,N}, \text{ if } j = N \quad (2.18)$$

Y además, Δk es un termino adicional de conductividad térmica [73] definido como :

$$\Delta k = k_w \frac{A_{s,w}}{A_{s,fl}} \quad (2.19)$$

Oberndorfer et al. (1999) [74] modeló un número de sistemas diferentes usando de 1 a 100 nodos de tanque y concluyó que para predicciones anuales no más de 10 nodos son necesarios y 3 a 5 nodos son generalmente suficientes. La conclusión general de estos estudios es que un modelo de tanque de 1 nodo (es decir, un tanque completamente mezclado) proporciona una estimación conservadora del rendimiento anual y un modelo de 10 nodos proporciona esencialmente el mismo cálculo de rendimiento del sistema que un modelo de 100 nodos. Kleinbach et al (1993) [75] estudió el error del método numérico 1D en un estanque de acumulación estratificado, y se determinó que para el caso de 8 nodos se tiene un error de un 10 % aproximadamente.

Existen modelos de estratificación en dos y tres dimensiones, los cuales son altamente complejos y encarecen computacionalmente las simulaciones a realizar. Estos modelos incluyen los fenómenos de convección interna natural, la conservación de masa, el momento, en las direcciones axial y radial, y la energía.

En De Césaró et al. (2003) [76] se realiza una comparación entre los modelos de

estratificación 1D y 2D, y se llega a la conclusión que los modelos multinodales (1D) son mucho más rápidos que los modelos bidimensionales, y que no hay razón para utilizar enfoques bidimensionales en las simulaciones para obtener el rendimiento de las PCSTP. Los modelos bidimensionales pueden dar información detallada sobre el comportamiento del fluido dentro del tanque que los modelos unidimensionales no son capaces de modelar, por lo que los modelos 2D cobran relevancia cuando se desean hacer estudios para la comprensión de los fenómenos térmicos en el estanque de almacenamiento de agua caliente.

2.7. Optimización de Plantas de Colectores Solares Planos con Algoritmos Genéticos

J.H. Holland describió por primera vez los Algoritmos Genéticos (AG) en 1965, pero solo publicaría este método una década después en [14]. En un comienzo solo fue utilizado por Holland y sus estudiantes, y no fue hasta una década después que comenzaron a generar interés en la comunidad científica [77]. Actualmente, los AG son una de las técnicas estocásticas más populares [12] debido principalmente a su punto de vista global, su aplicabilidad generalizada y el paralelismo inherente que poseen, son de fácil implementación computacional, ya que son capaces de encontrar soluciones para la programación lineal y no lineal, y además permiten la evaluación de funciones no continuas [77]. En la Tabla 2.2 se agrupan diferentes publicaciones que han utilizado este método para optimizar PCSTP.

Holland se inspira en el principio Darwiniano de la supervivencia del más apto, en el que el individuo más preparado de la población tiene la posibilidad más alta de sobrevivir. De esta manera, crea una serie de pasos que se basan en la mecánica de la selección y genética natural, donde cada generación de individuos son evaluados en la función objetivo hasta que las soluciones del problema converjan. Los AG son mayormente utilizados en problemas de optimización discretos, tal como lo es la optimización de sistemas térmicos solares de agua caliente [5].

Los organismos vivos se adaptan por medio de la evolución, adoptando características que les permitan sobrevivir en ambientes hostiles. Estos organismos son representados por un conjunto de soluciones factibles del problema con una población inicial, que se

seleccionarán de acuerdo con un requisito específico, el que será maximizar o minimizar una función objetivo. La población inicial evoluciona iteración tras iteración a través de los mecanismos de selección, cruce y mutación, manteniendo constante el tamaño de la población. Los individuos (soluciones del problema) son representados como un conjunto de parámetros (genes), que se agrupan una serie de valores (cromosomas). Si bien el alfabeto utilizado para representar los individuos no debe necesariamente estar constituido por el código binario (0,1), buena parte de la teoría en la que se fundamentan los AG utiliza dicho alfabeto.

En cada generación (iteración) los individuos son evaluados por la función objetivo para determinar qué tan bien resuelve el problema o bien, determinar cuan adaptado al medio ambiente es el individuo. Mientras mejor sea la adaptación del individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el individuo sea elegido para participar en el apareamiento (cruza), mezclando su material genético con otro individuo seleccionado de la misma manera. Una vez seleccionados dos padres, sus cromosomas se combinan, utilizando habitualmente los operadores de cruce y mutación.

El operador de cruce, coge dos padres seleccionados y corta sus ristas de cromosomas en una posición escogida al azar, para producir dos subristras iniciales y dos subristras finales. Después se intercambian las subristras finales, produciéndose dos nuevos cromosomas completos (Figura 2.21). Ambos descendientes heredan genes de cada uno de los padres. Habitualmente el operador de cruce no se aplica a todos los pares de individuos que han sido seleccionados para emparejarse, sino que se aplica de manera aleatoria, normalmente con una probabilidad comprendida entre 0.5 y 1.0. En el caso en que el operador de cruce no se aplique, la descendencia se obtiene simplemente duplicando los padres.

Como la generación de N depende de la generación de N-1, el método es muy sensible a la población inicial, la cual es obtenida al azar. Para mitigar este problema, el operador de mutación se introduce con una probabilidad de X % (Generalmente baja $\sim 1\%$) que va a cambiar los genes de un individuo y entrar a otra familia de soluciones. El operador de mutación se aplica a cada "hijo" de manera individual, y consiste en la alteración aleatoria de cada gen componente del cromosoma. La Figura 2.21 muestra la mutación del quinto gen del cromosoma. Este operador asegura que ningún punto del espacio de búsqueda tenga

cero probabilidad de ser examinado. Si el individuo es capaz de sobrevivir, será elegido para formar descendencia.

Después de un número indeterminado de generaciones, los individuos tendrán la genética casi idéntica, en respuesta a su adaptabilidad al medio, obteniendo así una población homogénea. De esta manera, los individuos "fuertes" representan la solución óptima al problema especificado por la función y restricciones del problema objetivo.

Todo algoritmo evolutivo, como lo son los AG, tiene asociado un umbral de error relacionado con el equilibrio óptimo entre la *exploración* y la *explotación* [78]. Exploración significa buscar dentro del espacio de búsqueda tanto como sea posible, mientras que la explotación significa concentrarse en un punto, el cual se espera que sea el óptimo global. Así, bajos niveles de tasa de mutación implica una baja exploración, mientras que una excesiva tasa de mutación (cercana a 1.0) no explotaría la información aprendida en las generaciones anteriores, degenerando la búsqueda de un óptimo global. Es por ello que la selección y configuración de cada uno de los parámetros es de vital importancia para llegar a una solución óptima global.

1. Se genera una población inicial al azar, dentro de los parámetros del problema.
2. Se evalúa toda la población en la función objetivo.
3. Se ordenan los resultados de la función objetivo según cual sea el objetivo (*Max* o *Min*).
4. Se codifican en lenguaje binario los resultados.
5. Se aplica el operador *cruza*, el cual bajo un cierto criterio y probabilidad genera una nueva población.
6. Se aplica el operador *mutar* (Normalmente tiene asociada una baja probabilidad).
7. Se vuelven a evaluar en la función objetivo.
8. Se repite hasta lograr convergencia.

El poder de los AG proviene del hecho de que se trata de una técnica robusta, y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo

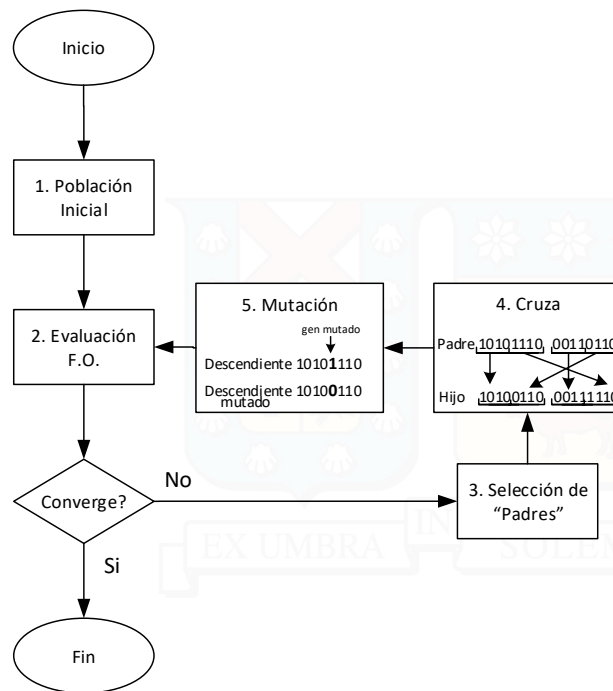


Figura 2.21: Esquema de funcionamiento de los AG.

(Fuente: Elaboración propia)

aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades. Si bien no se garantiza que el AG encuentre la solución óptima global del problema, existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo con el resto de algoritmos de optimización combinatoria [28].

TABLA 2.2: Comparación de distintos estudios para PCSTP que utilizan Algoritmos Genéticos. (Elaboración propia)

Método de Optimización	Uso PCSTP	Foco	Comentarios	Referencia
AG	Industrial	Optimización de PCSTP con el objetivo de disminuir el período de payback.	No se especifica rango de operación del programa; Utiliza perfiles de consumo constante durante el día o bloques horarios; No se discute la temperatura de consumo.	[5]
AG y ANN	Industrial	Optimización de PCSTP con el objetivo de maximizar el LCS.	Se comparan dos técnicas de optimización diferentes; Perfil de consumo constante en un bloque horario.	[72]
AG	Industrial	Diseño óptimo de una PCSTP para un sistema de acuicultura, con el fin de minimizar el LCC.	Perfil y temperatura de consumo no son discutidos. Estanque se considera perfectamente mezclado.	[79]
AG	Industrial	Optimización de una PCSTP por temporada, minimizando el costo total de la planta para que pueda entregar una cantidad de energía requerida.	Enfoque en el comportamiento del estanque, el cual debe ser de gran volumen. No se discute el perfil de consumo.	[80]



CAPÍTULO 3

OBJETIVOS



3.1. Objetivo Principal

Implementar un modelo de optimización para una planta térmica de colectores solares planos, que permita determinar el tamaño que entregue la máxima rentabilidad financiera en distintas zonas del país.

3.2. Objetivos Secundarios

- Identificar variables relevantes para la optimización de la planta de colectores solares planos.
- identificar cómo varía el dimensionamiento de la planta ante cambios en los perfiles de consumo de agua caliente.
- Evaluar distintas zonas geográficas a fin de identificar las de mayor potencial para la instalación de plantas térmicas solares.
- Generar un modelo numérico estable, identificando las condiciones extremas para el cual el modelo diverge.
- Modelar un algoritmo genético capaz de optimizar el Life Cycle Saving, considerando el área colectora y el volumen del estanque de acumulación.
- Identificar cómo cambian los resultados financieros ante modificaciones en la temperatura de consumo y la cantidad de agua requerida.
- Identificar cómo cambian los resultados financieros ante modificaciones en los parámetros de control del algoritmo genético.
- Identificar cómo cambian los resultados financieros ante modificaciones en los parámetros financieros.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA



4.1. Modelo de Energía

4.1.1. Descripción de la PCSTPP

El sistema de calentamiento de agua con energía solar propuesto en esta investigación consiste en un arreglo de colectores solares planos conectados a un tanque de almacenamiento, el cual debe soportar temperaturas elevadas y estar muy bien aislado para disminuir las pérdidas térmicas con el ambiente y lograr un mejor desempeño. Una bomba de circulación mueve el fluido calentado por la energía solar incidente sobre los colectores para llevarla al estanque de acumulación. El agua caliente permanece almacenada en el estanque hasta que se necesite. Si el agua no tiene la temperatura requerida a la hora del consumo, el sistema auxiliar se acciona para alcanzar la temperatura deseada.

El análisis numérico del sistema de calentamiento de agua es modular, donde se tiene: Colector solar, Estanque de acumulación y Sistema auxiliar (Ver Figura 4.1).

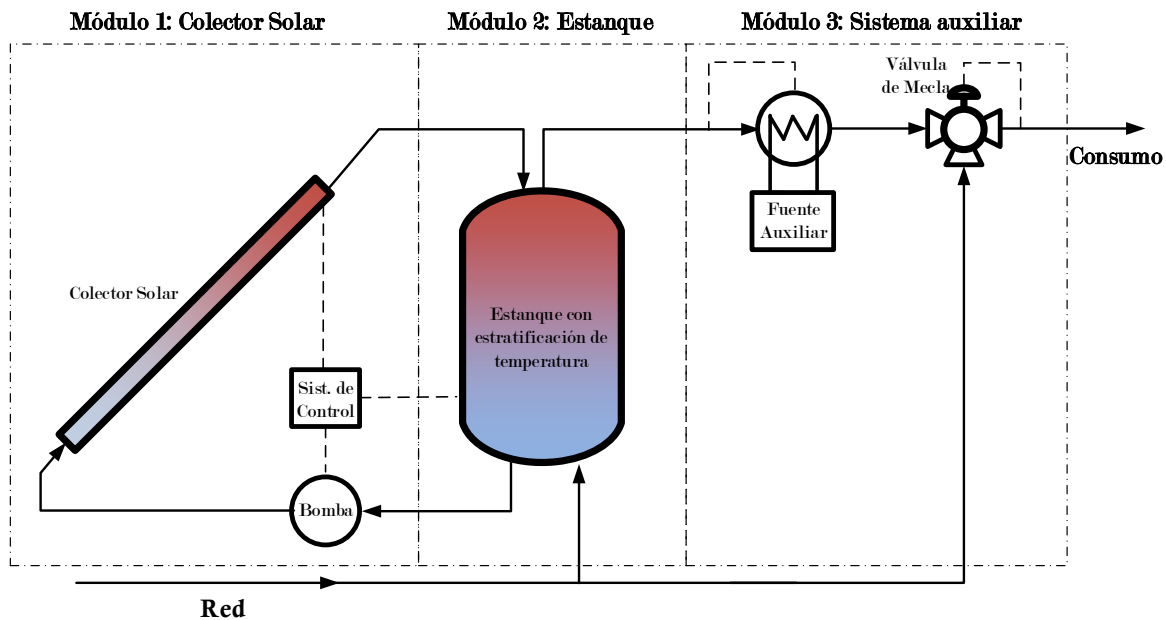


Figura 4.1: Diagrama PCSTP y división para análisis numérico.

(Fuente: [28])

1. **Colector solar:** Corresponde al conjunto de colectores solares, los cuales se encuentran apuntando al Ecuador con una inclinación dependiendo de la latitud del punto de

evaluación, una de las “reglas de oro” para obtener el máximo de energía con una orientación fija [46]. La ecuación que representa la ganancia de energía útil proveniente del sol está dada por la ecuación de Hotel-Willer [7]:

$$\dot{Q}_u = A_c F_r [I_T (\tau \alpha) - U_L (T_{in,c} - T_{amb})]^+ \quad (4.1)$$

En la práctica, el método básico de medir el rendimiento del colector es exponer el colector de funcionamiento a la radiación solar y medir las temperaturas de entrada y salida del fluido y el caudal del fluido. La ganancia útil es la

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_c c_p (T_{out,c} - T_{in,c}) \quad (4.2)$$

Además, se añade un sistema de control para intervenir la circulación entre el colector y el estanque, cerrando el flujo cuando la temperatura de salida del colector es menor a la temperatura de la primera capa del estanque. El flujo de circulación es de $11 \frac{kg}{h \cdot m^2}$, acorde al rango recomendado en [46] y el mismo que en [1], el cual estudia el caso de una lavandería en Brasil con parámetros cercanos al de éste estudio.

Los parámetros del colector solar utilizados se muestran en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1: Características del Colector Solar [1].

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tipo de Colector	Plano-Vidrio
$F_R(\tau\alpha)$	0.73
$F_R U_L$, W/m ² °C	5.92
Flujo por unidad de área, kg/h·m ²	11

2. **Estanque de acumulación:** Su forma es cilíndrica, dispuesto de manera vertical con el fin de aumentar la estratificación para obtener agua caliente desde la parte superior y entregar agua fría al sistema de colectores solares desde la base del estanque. El depósito está diseñado para que sea capaz de almacenar el calor útil proveniente de los colectores solares y de satisfacer la demanda de calor para diferentes momentos del día.

La simulación del estanque de acumulación se hace según el modelo unidimensional

multinodal. Según lo expuesto Capítulo 2, existen dos relaciones importantes que debe tener el estanque: La primera es la relación entre la altura (H) y el diámetro (D), por lo cual se utiliza la relación $H=2.5 D$. La segunda corresponde a la relación entre el área colectora y el volumen de acumulación, la cual debe estar en el rango de $[40:300] l/m^2$. Los parámetros utilizados se resumen en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2: Parámetros del Estanque de Almacenamiento

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Número de Nodos	7
U_s , kJ/h m ² °C	2.5
k_f , W/m° C	0.58
k_w , W/m° C	0.041
ρ , kg/m ³	1000
c_p , J/kg° C	4.18

3. **Sistema Auxiliar:** Corresponde al uso de la caldera alimentada por gas natural que está en funcionamiento para un caso base hipotético, y que para este estudio solo se utilizará en caso de no alcanzar la temperatura requerida.

La energía entregada por la fuente auxiliar para una hora se puede definir como

$$Q_{aux} = 3600 \cdot \dot{m}_l c_p (T_{Load} - T_{s,1})^+ \quad (4.3)$$

O bien, se puede obtener desde el balance de energía que gobierna el sistema completo:

$$Q_{aux} = [Q_{Load} - Q_u + Q_{loss}]^+ \quad (4.4)$$

La energía demandada, Q_{Load} , se satisface mediante la captación de la energía térmica solar útil, Q_u , y enviado al estanque de acumulación que puede almacenar o distribuir la carga térmica, en el cual se producen pérdidas hacia el ambiente, Q_{loss} . En caso de que la demanda de energía no se logre satisfacer por la energía solar, el sistema auxiliar se activa para proporcionar el calor necesario, Q_{aux} , para alcanzar la temperatura requerida [55].

4.2. Datos Meteorológicos Locales y Perfiles de Consumo

Un componente crítico en el estudio de optimización es la disponibilidad de los datos meteorológicos necesarios para evaluar la capacidad de los sistemas solares para producir energía útil en diferentes regiones a lo largo del país. Chile es una larga franja de tierra con unos 4350 km de longitud y 250 km de ancho (en su punto más ancho). Su geografía cubre desde el desierto más seco del mundo, el desierto de Atacama, hasta el Estrecho de Magallanes. Esta geografía en particular es responsable de importantes diferencias en la radiación solar promedio anual diaria por año variando, en centros urbanos, de 6.49 kWh/m²/día en Calama hasta 3.23 kWh/m² en Puerto Montt.

Este estudio busca evaluar la viabilidad económica de los PCSTP en distintas ciudades o pueblos que están distribuidos a lo largo del país, comenzando en Arica en su extremo norte y llegando hasta la Isla de Chiloé en su extremo sur, por lo que la radiación solar, temperatura, humedad y velocidad del viento varían considerablemente debido a la peculiar geografía de Chile, la cual cruza varios ángulos latitudinales. Las simulaciones se realizan con una base de datos de 2004 a 2015, proporcionada por el Explorador Solar [48]. Un mapa con la radiación solar global promedio anual en Chile puede verse en la Fig. 4.2. En esta figura se puede ver la alta diferencia de radiación entre el norte y sur de Chile.

Los datos que se ingresan al programa son la temperatura promedio (°C), la radiación solar global diaria (W/m²) y la temperatura de la red (°C). Para la temperatura de la red se utiliza la ecuación 4.5 [82].

$$T_{sup} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - \frac{T_{max} - T_{min}}{2}(-1)\cos(2\pi\frac{mo - 2}{12}) \quad (4.5)$$

4.2.1. Perfiles de Consumo

Un componente importante en esta inversión es determinar la influencia del patrón de consumo energético (agua caliente). En primer lugar se debe asegurar la estabilidad del modelo numérico, por lo que se ha analizado la relación entre el consumo de energía a corto plazo y la capacidad del tanque de almacenamiento. La restricción del modelo numérico es que la capacidad de almacenamiento debe ser al menos cuatro veces la demanda de una



Figura 4.2: Promedio anual de la Radiación Solar Global en Chile
(Fuente: [81])

hora de proceso.

$$m_s > 4 \cdot 3600 \cdot \dot{m}_l \quad (4.6)$$

Donde m_s es la masa del estanque y $\dot{m}_l$ es el flujo másico (kg/s) requerido para el consumo.

Para realizar un estudio del impacto que tiene el perfil de consumo en el LCS, los perfiles de demanda son generados ingresando la fracción del total de consumo que se tiene a cada hora del día.

$$f_1 + f_2 + \dots + f_{24} = 1 \quad (4.7)$$

Donde f_i representa la fracción de la demanda diaria de agua caliente que se consume en la hora i . Esta ecuación se utiliza para generar seis perfiles de consumo de agua, con los cuales se evalúa el rendimiento de la PCSTP. Los perfiles generados se pueden ver en la Figura 4.3.

- Perfil 1: Demanda Constante a lo largo de todo el día.
- Perfil 2: Perfil adaptado desde consumo tipo C en [83].
- Perfil 3: Demanda Constante durante jornada laboral de 8 horas, esto es, entre las 8:00 y 16:00 horas [72].
- Perfil 4: Perfil ISO 9459–3:1997(E) de consumo de agua doméstica[84].
- Perfil 5: Demanda escalonada: Aprovechamiento del peak solar y radiación solar global: Consumo entre las 8:00 y 16:00 hrs.
- Perfil 6: Demanda concentrada: 30 % del total a las 13:00 , 14:00 y 15:00 y un 10 % a las 16:00 hrs.

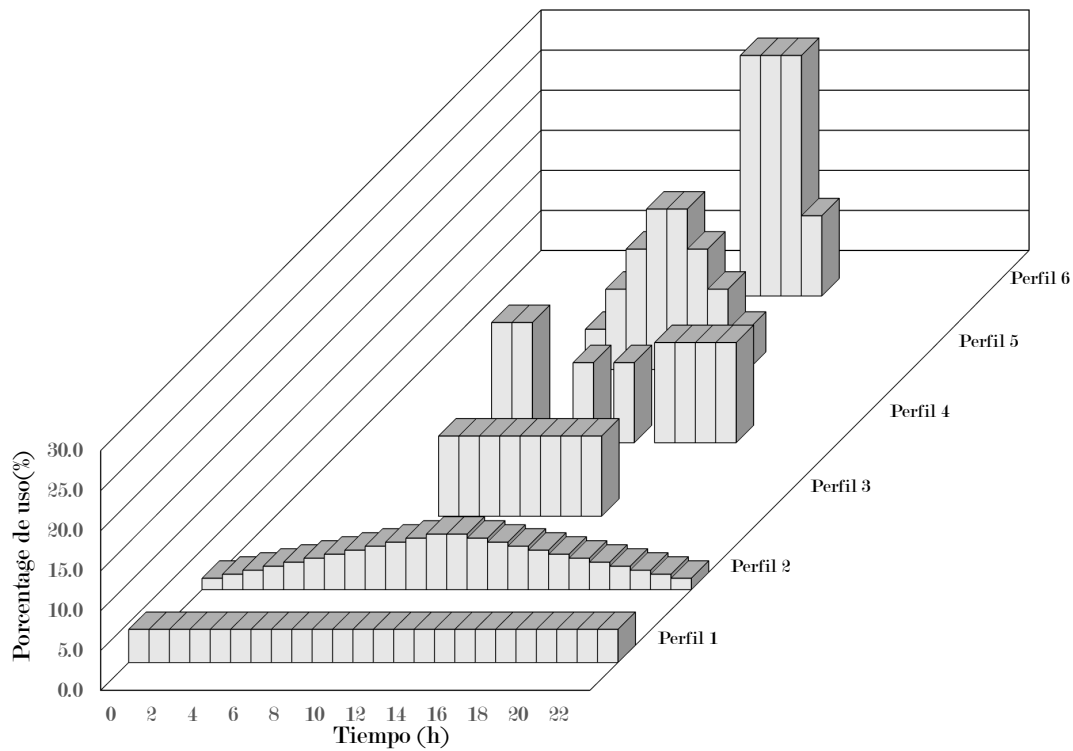


Figura 4.3: Perfiles generados.
(Fuente: Elaboración propia)

4.3. Evaluación Financiera

El Life Cycle Cost (LCC) es la suma de todos los costos asociados a un sistema de energía durante su vida útil en valor presente [15], tomando en cuenta los costos de adquisición, mantenimiento, operación, y en caso de aplicar, los costos de eliminación.

El análisis económico que se hace en esta investigación es el Life-Cycle Saving , el cual se define como la diferencia entre el LCC de un sistema de combustible convencional y el LCC del sistema solar con fuente auxiliar [46], [55], [85]. De esta manera, el LCS queda expresado por la Ecuación 4.8.

$$LCS = LCC_{con} - LCC_{sol} \quad (4.8)$$

El horizonte de evaluación es de 20 años, un estándar para éste tipo de proyectos. La

inversión necesaria será pagada el 50 % al comienzo del proyecto, y el resto será pagado en cuotas iguales durante 10 años a una tasa de interés(r_d) del 10 % anual. Para traer los pagos futuros a valor presente se utiliza el Valor Presente Neto (PWF en inglés) [46].

$$PWF(N, r_i, r) = \sum_{j=1}^N \frac{(1 + r_i)^{j-1}}{(1 + r)^j} = \begin{cases} \frac{1}{r - r_i} \left(1 - \left(\frac{1 + r_i}{1 + r} \right)^N \right) & \text{si } r_i \neq r \\ \frac{N}{r_i + 1} & \text{si } r_i = r \end{cases} \quad (4.9)$$

El LCC para el sistema de energía convencional es

$$LCC_{con} = Q_l C_{fuel} PWF(N, r_i, r) \quad (4.10)$$

Donde $Q_l(J)$ es la energía necesaria para satisfacer la demanda de agua caliente, C_{fuel} ($USD\$/J$) es el costo del combustible convencional, que en este caso corresponde a gas natural¹. Por otro lado, el LCC del sistema de energía solar con fuente auxiliar es:

$$LCC_{sol} = C(1 - f_d) + D \cdot PWF(N', r_i, r) + (C_{O\&M} + C_{aux}) \cdot PWF(N, r_i, r) \quad (4.11)$$

Donde C representa la inversión inicial definida como:

$$C = c_{fixed} + c_c A_c + c_s V_s \quad (4.12)$$

Del mismo modo, D representa los pagos anuales en valor presente de la deuda de la inversión, la cual queda definida por:

$$D = \frac{f_d \cdot C(r_d(1 + r_d)^{N'})}{(1 + r_d)^{N'} - 1} \quad (4.13)$$

Donde f_d representa la razón de endeudamiento, c_{fixed} ($USD\%$) es el costo fijo, c_c ($USD\$/m^2$) representa el costo por unidad de área de los colectores solares, c_s ($USD\$/m^3$) el costo por unidad de volumen del estanque de almacenamiento. El sistema auxiliar a utilizar será la planta a gas que se tiene en un principio, pero ahora solo se utilizará en caso de no alcanzar la temperatura requerida.

¹El valor del combustible corresponde al promedio para el período 2008-2015. Banco Central de Chile

Por otro lado, los Costos de Operación y Mantenimiento ($C_{O\&M}$) se estipulan en un 5 % de la inversión, mientras que los costos del sistema auxiliar quedan expresados en función de la energía auxiliar requerida (Q_{aux}) según:

$$C_{aux} = Q_{aux} C_{fuel} PWF(N, r_i, r) \quad (4.14)$$

Finalmente, se analiza el ahorro obtenido a lo largo del horizonte de evaluación en términos de la inversión. El indicador Savings Over Investing (SOI) determina la cantidad de veces que el ahorro obtenido (LCS) es la inversión realizada para dicho proyecto.

$$SOI = \frac{LCS}{Investment} \quad (4.15)$$

Los parámetros económicos utilizados se muestran en la Tabla 4.3:

TABLA 4.3: Parámetros Económicos

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Precio Combustible, USD/m ³	1.1
Costo Fijo, USD	454.1
Costo Colector, USD/m ²	188.05
Costo Estanque, USD/m ³	811.4
Período de Evaluación, años	20
Tasa de Descuento, %	10
Tasa de Inflación, %	3
Tasa de Interés, %	10

4.4. Optimización mediante Algoritmos Genéticos

En este estudio, un AG se emplea con el fin de maximizar el LCS de una PTCSP. Los AGs han sido teóricamente y empíricamente demostrados para proporcionar una búsqueda robusta en espacios complejos de forma eficaz [86]. Sin embargo, el uso de AG convencionales no garantiza la convergencia al óptimo global debido a limitadas capacidades de explotación y convergencia prematura. También, requiere generalmente un tamaño de población relativamente grande que resulta en un tiempo computacional

más alto en comparación con un método de búsqueda basado en gradiente, que tiene una alta probabilidad de converger a un óptimo local dependiendo de la conjetura inicial dada. Este inconveniente es muy crítico para los solucionadores de problemas directos caros, pero se vuelve menos crítico con los ordenadores más rápidos o funciones objetivas relativamente simples, con variables discretas, que se pueden calcular muy rápido, como el problema mencionado en este estudio. Los parámetros utilizados pueden ser vistos en la Tabla 4.4. Además, en caso de que no se llegue a una convergencia dentro de los parámetros establecidos, el número de generaciones máximas será de 75.

Para llevar a cabo la resolución de este problema se le deberán ingresar datos del perfil de consumo a utilizar, los datos sobre la radiación global incidente sobre un plano inclinado y la temperatura ambiente. El funcionamiento del algoritmos se puede apreciar en la Figura 4.4

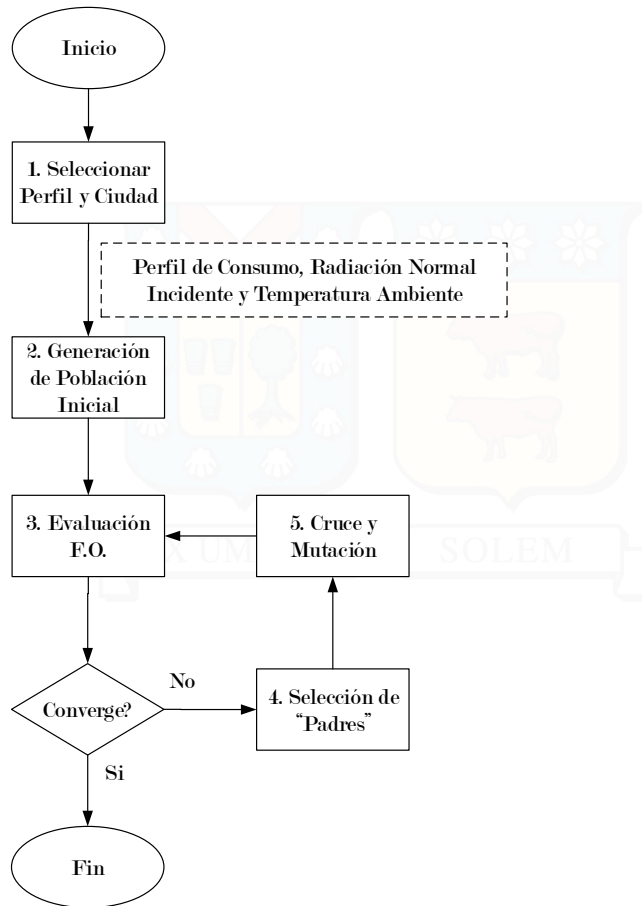


Figura 4.4: Representación esquemática del proceso de optimización.

(Fuente: Elaboración propia)

La formulación matemática del problema de optimización queda planteado como:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Encontrar:} & X = [A_c, V_s] \\
 \text{Para Maximizar:} & LCS(X) \\
 \text{Sujeto a:} & 100 \leq A_c(m^2) \leq 500 \\
 & 10 \leq V_s(m^3) \leq 40
 \end{array}$$

4.5. Análisis de Sensibilidad y Riesgos

Una vez obtenidos resultados para las distintas locaciones evaluadas un análisis de sensibilidad se desarrolla para estudiar la dependencia de los resultados financieros con la

incertidumbre de los parámetros de entrada. Este análisis de sensibilidad es realizado sobre parámetros del modelo energético, de optimización y del modelo financiero.

4.5.1. Análisis sobre la Temperatura y Factor de Carga

Se estudia el comportamiento del LCS y fracción solar ante cambios en la temperatura y la cantidad de agua requerida. Se analiza el comportamiento de la ciudad que tiene mejor desempeño económico y se simula para los casos de 40, 60 y 80°C y una cantidad de agua caliente requerida que varía $\pm 50\%$ de los 25 m³ del caso propuesto.

4.5.2. Análisis sobre parámetros de Control de los AG

De Jong, K. (1975) realiza los primeros estudios sobre los valores de los parámetros con que se debe configurar el AG [87]. A partir de su estudio, en el cual se aplicó AG usando diferentes configuraciones de los parámetros, se determinó que se debía usar una población con tamaño de 50 a 100 individuos, una probabilidad de mutación del 0.1 % y una probabilidad de cruce de 60 %. El ajuste óptimo de los parámetros de los AG ha sido objeto de análisis en diversos estudios en los cuales se da énfasis en la tasa de mutación [78], [88], obtención teórica del tamaño óptimo de la población [86], e incluso análisis de la combinación de los parámetros tamaño de la población, tasa de mutación y tasa de cruce [89], [88] y [90].

De esta manera, una vez obtenidos los resultados para los distintos perfiles de consumo, se hace un estudio sobre los parámetros de control de los GA a partir de De Jong [87], Hesser [90], Grefenstette [88] y Schaffer [89]. Los parámetros a evaluar son: Population size, Mutation rate and Crossover rate. En Tabla 4.4 se observan los valores de los parámetros estudiados.

4.5.3. Análisis Financiero y de Riesgo

Se realiza un análisis de sensibilidad para determinar cómo afectan al LCS del proyecto variaciones en diferentes parámetros del proyecto. El análisis se realiza para las ciudades con mejor y peor resultados, utilizando el método One At a Time (OAT), con un rango de

TABLA 4.4: Parámetros del AG a sensibilizar

Autor	Población	Tasa de Cruce	Tasa de Mutación
Caso Propuesto	40	0.8	0.01
De Jong	50	0.6	0.001
Hesser	30	0.32	0.01
Grefenstette	30	0.95	0.01
Schaffer	30	0.6	0.101

$\pm 15\%$ y $\pm 30\%$ [41]. Los parámetros escogidos son: Costo inicial de la Inversión, Costos de operación y mantenimiento, precio del combustible, la tasa de apalancamiento y la tasa de interés de la deuda.

Porterior al análisis de sensibilidad sobre los parámetros financieros, se realiza un análisis de riesgo para identificar factores que comprometan los resultados financieros obtenidos. Para ambas ciudades se utiliza el método de simulación Montecarlo para el LCS, en el cual se hace variar simultanea e independientemente a las variables anteriormente analizadas, bajo una distribución normal. El rango de las variables es $\pm 10\%$ [91]. El método es iterado 500 veces, generando así una distribución de probabilidad para el LCS.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS



5.1. Comparación con Modelo Kalogirou

El objetivo de esta sección es comparar los resultados desarrollados en esta investigación con resultados previamente publicados para la ciudad de Nicosia, Chipre [72]. La base de datos meteorológica que se utiliza es el Typical Meteorological Year (TMY) de Nicosia [92]. El sistema solar de agua caliente utilizado es denominado Industrial Process Heat (IPH) y consiste en un arreglo de colectores solares, una bomba de circulación, un estanque de almacenamiento y un sistema auxiliar de calentamiento, además de válvulas y sistemas de control, los cuales funcionan de la misma manera que la planta descrita en el capítulo 4. Los parámetros más importantes de este estudio, a saber, el área colectora, el volumen de agua almacenada y el LCS, fueron utilizados para la comparación. El IPH system considerado en este estudio asume un consumo de 2000 kg/h de agua caliente a 80°C. El perfil de consumo propuesto en [72] asume que el fluido es requerido los primeros 45 min de cada hora, en un horario entre 08:00 h y las 16:00 h. El objetivo de la optimización es encontrar la combinación óptima de área colectora y volumen de acumulación que entregue el máximo LCS. Para las simulaciones se hace variar el área colectora entre 100 y 500 m² y el volumen del estanque de almacenamiento entre 10 y 30 m³. Para la evaluación del LCS se considera que el 30 % de la inversión es pagada al comienzo y el resto se paga en cuotas anuales iguales durante 10 años. El resto de los parámetros utilizados se encuentran en la Tabla 5.2. Los resultados de optimización del modelo propuesto (1) fueron comparados contra los resultados publicados por S. Kalogirou [72].

TABLA 5.1: Comparación de modelos

Parámetro	Optimización con AG (1)	Optimización por AG de Kalogirou (2)	Método Tradicio- nal de Kalogirou (3)	Diferencia entre (1) y (2) (%)	Diferencia entre (1) y (3) (%)
Área (m ²)	305	301.6	300	1.05	1.57
Volumen (m ³)	24	14	20	41.74	17.36
Q_{aux} (10 ⁸ kJ)	3.523	5.779	3.606	64.01	2.34
LCS (€)	15,225	13,990	13,336	8.12	12.41

Kalogirou realizó dos optimizaciones. La primera optimización está basada en métodos de inteligencia artificial (2). Este enfoque es similar al propuesto en el presente estudio. La segunda optimización, llamada tradicional (3), consiste en encontrar una solución óptima

corriendo muchas simulaciones en TRNSYS y decidiendo mediante prueba y error las características del sistema que entrega la solución óptima. Los detalles de ambos métodos pueden ser encontrados en [72]. Los resultados de la comparación pueden ser vistos en la Tabla 5.1. Los resultados obtenidos con nuestro modelo (1) corresponden a un promedio de 10 simulaciones. Esto debido a que el GA es un método que depende fuertemente de la población inicial, la cual se escoge aleatoriamente. Se puede observar que los resultados obtenidos en cuanto a la energía auxiliar necesaria es muy diferente con respecto al método (2) y muy similar al valor obtenido con el método tradicional (3). Esto se puede explicar en primer lugar debido a la naturaleza aleatoria de la población inicial, la cual converge en un cierto valor bajo una tolerancia establecida. Kalogirou [72] no clarifica si los resultados corresponden al promedio, a la mejor o peor de las simulaciones realizadas con el método (2), entendiendo que el problema puede quedar en un óptimo local. Por otro lado, el patrón de consumo de agua caliente utilizado por Kalogirou es diferente [72], donde solo se utilizan las primeras tres cuartas partes de cada hora, patrón de consumo que no es tomado en cuenta en el modelo propuesto (1) ni en el modelo tradicional (3). Finalmente, existen diferencias sustanciales en el volumen del estanque de almacenamiento, que se puede explicar por cambios en el modelo energético del estanque, a la diferencia en la cantidad de nodos utilizados, o bien a los valores de los coeficientes térmicos del estanque. Estas diferencias en el patrón de consumo y cantidad de nodos del estanque, sumado a posibles discrepancias en la tasa de inflación y/o la tasa de descuento hacen que la energía auxiliar necesaria sea menor, con lo que el LCS es levemente superior.

TABLA 5.2: Parámetros Financieros Utilizados para la Validación

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i> ¹
Precio combustible, USD/l	30.8
Costo fijo, USD	912.4
Costo colector, USD/m ²	199.3
Costo estanque, USD/m ³	361.8
Período de evaluación, años	20
Tasa de descuento, %	10
Tasa de inflación, %	5
Tasa de interés, %	10

¹En [72] se utiliza el Euro como moneda. En esta investigación se utiliza la tasa de cambio correspondiente

5.2. Generación de Mapa Termosolar para Chile

El modelo propuesto y previamente validado ha sido utilizado para generar un mapa termosolar para 182 localidades de Chile y seis perfiles de consumo para la PCSTP descrita en el capítulo 4. El objetivo es maximizar el LCS en función de la combinación óptima del área colectora y el volumen de almacenamiento los cuales poseen un rango de variación de $[100:500] \text{ m}^2$ y $[10:40] \text{ m}^3$, respectivamente.

Para cada perfil se considera que el consumo total es 25 m^3 al día a una temperatura de consumo de 80°C . Para la elección de los puntos se escogieron tres puntos dentro de una zona delimitada por paralelos y meridianos, en la cual se utiliza un muestreo por conveniencia, donde se privilegian zonas con alta población y distancia geográfica. Además, se realiza una división según longitud, altura y/o acceso directo a la costa, generando seis zonas: Zona Cordillerana (aquellas que están sobre los 2000 msnm); Zona Costera (aquellas ciudades que tienen directamente acceso a la costa), y luego se divide entre ángulos longitudinales de manera que se crean las regiones $[69-70[$, $[70-71[$, $[71-72[$, $[72-\text{o más}[$.

TABLA 5.3: Resultados de la optimización para la PCSTP según zona y perfil (kUSD)

Zona	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Prom. zonas
Z. Cordillerana	716.69	718.76	651.78	679.93	674.01	631.82	678.83
Z. Costera	461.58	448.41	415.27	416.50	419.97	393.99	425.95
Long. $[69-70[$	618.56	616.50	644.08	629.99	656.95	619.21	630.88
Long. $[70-71[$	579.57	576.44	564.70	562.61	568.38	539.05	565.13
Long. $[71-72[$	496.52	487.64	448.00	446.77	447.54	428.13	459.10
Long. $+72^\circ$	408.91	395.94	359.75	368.52	367.14	342.75	373.83
Prom. perfiles	546.97	513.93	517.39	522.33	540.61	492.49	-

al 2 de enero 2017, equivalente a 1 EUR = 1.0488 USD

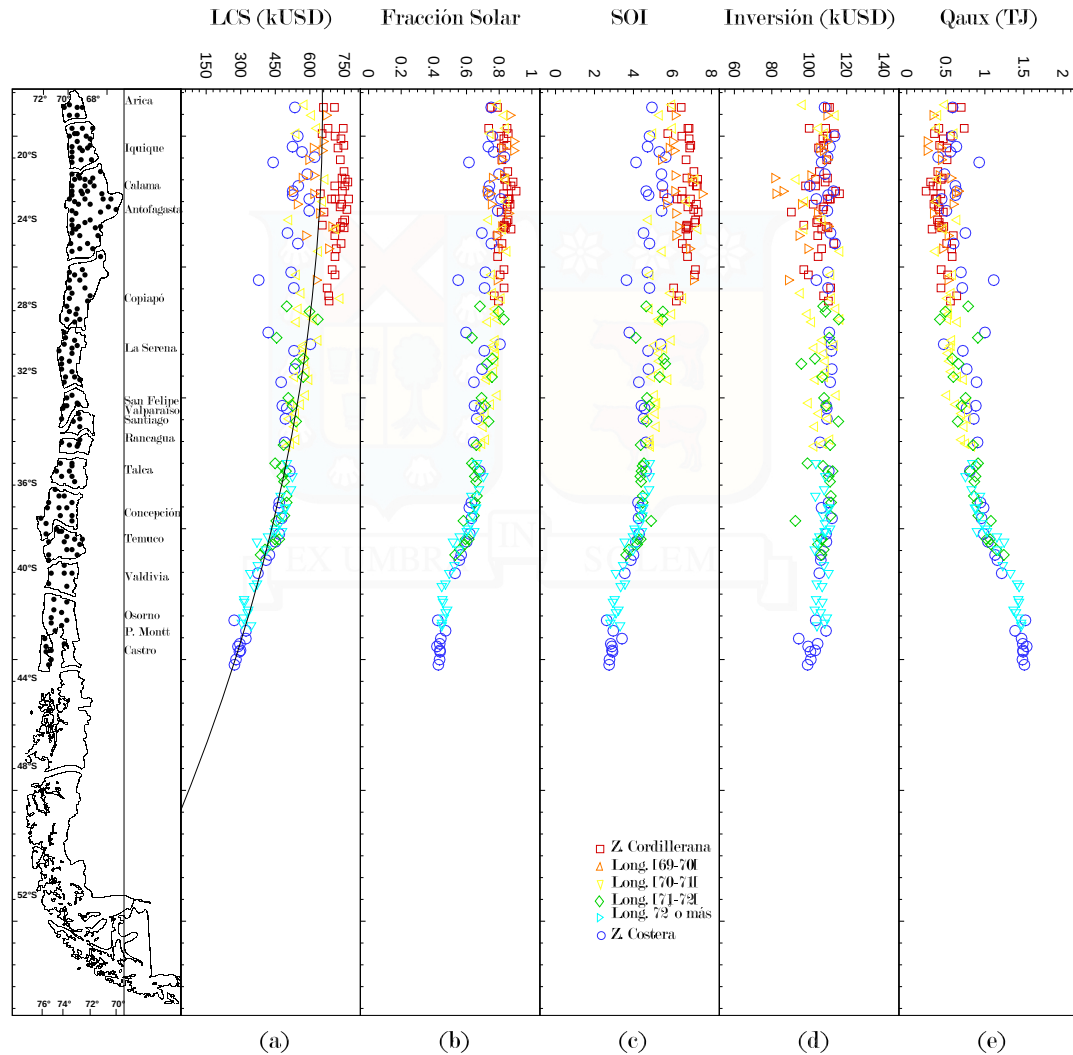


Figura 5.1: Perfil 1. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ).

(Fuente: Elaboración propia)

En las Figuras 5.1, A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 se muestran los seis mapas generados para cada uno de los perfiles estudiados. En la Tabla 5.3 se muestra el resumen según zona y perfil analizado. Para el 60.1 % de las ciudades en que se realizó la simulación el Perfil 1 tiene los mejores resultados de LCS. Por otro lado, si bien el Perfil 5 obtiene el mayor LCS solo para el 6.6 % de los casos, el ratio SOI es el mejor en el 32.2 % de los casos analizados, lo que lo convierte en el perfil con mejor SOI. Esto refleja que el Perfil 5 al ser utilizado según la curva de radiación diaria tiene resultados mejores, con una instalación menor. El

Punto 58 de simulación, ubicado en la Región de Antofagasta y que corresponde a la Mina La Escondida ($24^{\circ}17'S$ $69^{\circ}3'O$), obtuvo el mejor promedio de LCS entre los seis perfiles analizados, promediando 719.3 kUSD², y un ahorro de 6.85 veces sobre la inversión (SOI). Además, Calama es el centro urbano (a tan solo 20 km de Chuquibambilla, la mina a tajo abierto más grande del mundo), con mejor promedio de LCS y SOI, siendo 701.3 kUSD y 6.68 respectivamente.

El análisis sobre los distintos puntos a lo largo de Chile incluyó cinco minas de cobre: Sierra Gorda, Escondida, Gabriela Mistral, El Salvador y El Teniente. Todos ellos tienen un promedio de LCS por sobre los 570 kUSD y sobre 6.5 el ratio SOI. Estos resultados demuestran el gran potencial que se tiene en la minería para invertir en este tipo de tecnologías y disminuir la dependencia en energía externa.

Por el contrario, la ciudad de Puerto Montt ($41^{\circ}46'S$ $72^{\circ}94'O$) registró los resultados más bajos entre los puntos analizados, con un LCS y SOI de 241.9 kUSD y 2.50 veces, respectivamente. Los resultados no varían en gran magnitud según el perfil de consumo para este punto, siendo el Perfil 1 el de mejor desempeño económico con un LCS de 258.9 kUSD.

La Figura 5.2 compara los resultados de las tres grandes ciudades de Chile: Calama, Santiago y Puerto Montt, ubicados en el norte, centro y sur de Chile respectivamente. En promedio, los resultados de LCS para Calama son 52 % y 189 % más altos que Santiago y Puerto Montt respectivamente. Los resultados para la fracción solar y el SOI siguen el mismo patrón, mientras que la inversión necesaria no varía más allá del 8.1 % entre estas ciudades. Se puede observar que el Perfil 1 tiene los mejores resultados LCS, siendo 15 % más alto que el Perfil 6 (peor) en Calama, y cerca del 20 % para Santiago y Puerto Montt. Por otro lado, el Perfil 5 tiene las inversiones mínimas requeridas, donde Calama tiene la mayor diferencia entre perfiles (17 %), mientras que en Santiago es de 8.4 % y solo 2.4 % de diferencia en Puerto Montt.

Los resultados demuestran el gran potencial para aprovechar la energía solar a lo largo de Chile. En el Norte del país, los resultados sobresalen con respecto a las otras zonas del país con cualquiera de los perfiles estudiados. Del mismo modo, en el sur se obtienen

²kUSD= Mil USD

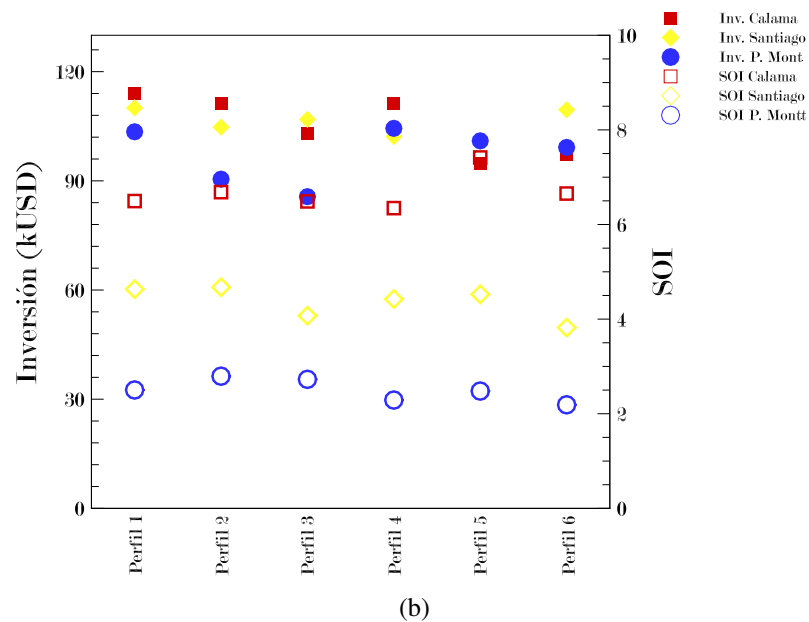
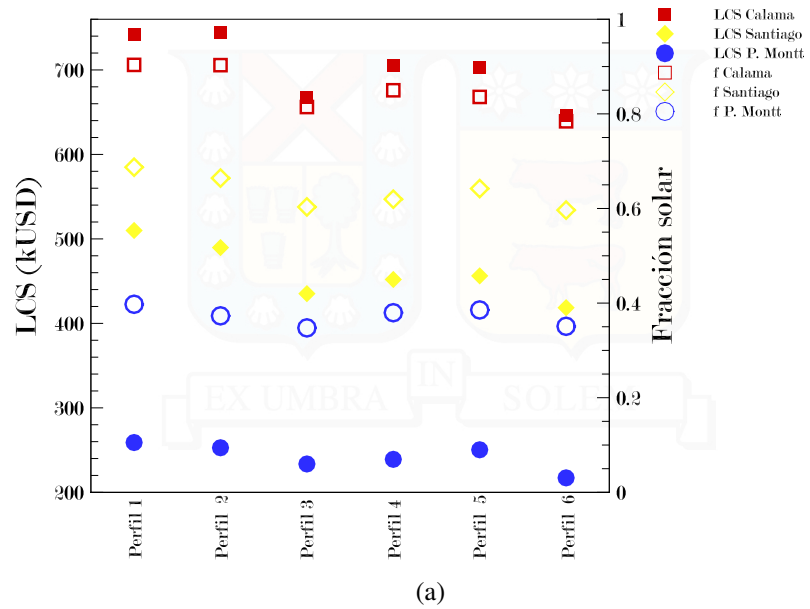


Figura 5.2: Comparación de resultados según perfil para ciudades ubicadas al norte (Calama, 22°88'S 68°55'O)), centro (Santiago, 33°27'S 70°40'O) y sur (P. Montt, 41°46'S 72°94'O) de Chile (a) LCS y fracción solar (b) Inversión y SOI.

resultados positivos en todas las ciudades analizadas, abriendo una puerta para otros estudios de viabilidad para proyectos solares en estas regiones más frías y subvaloradas.

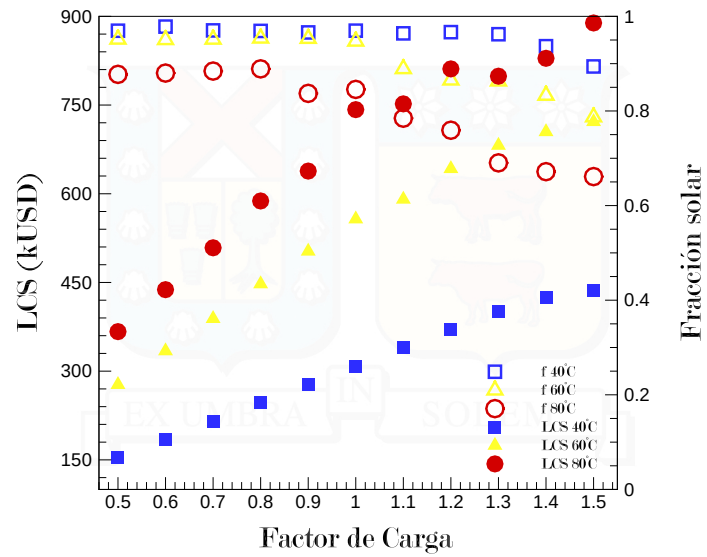
5.3. Análisis de Sensibilidad

5.3.1. Temperatura y Factor de Carga

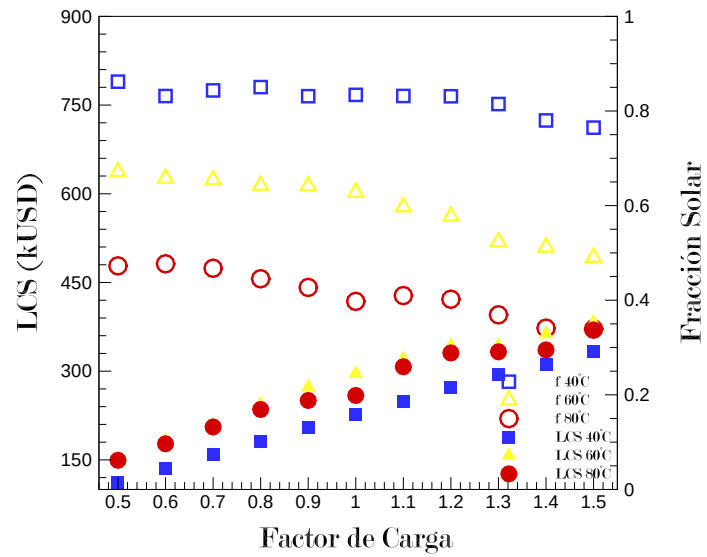
En la Fig. 5.3 se muestran los resultados para las tres temperaturas estudiadas, según la cantidad de agua requerida.

En términos generales se ve que a medida que aumenta la cantidad de agua y temperatura requerida, mayor LCS tiene el proyecto, mientras que la fracción solar tiende a disminuir. Para el Caso de 40°C , es donde la fracción solar varía menos, hasta un 10 %, ante el aumento de la cantidad de agua requerida. En cambio, para el caso de 80°C , la fracción solar llega a disminuir hasta casi el 20 %.

En Puerto Montt, locación en que se tienen los resultados de LCS más bajos, se obtienen resultados positivos para todos los casos estudiados. Los resultados de LCS varían levemente para las distintas temperaturas estudiadas, y se tiene que el consumo a 60°C es levemente superior al de 80°C . Por el contrario, en Mina Escondida los resultados a 80°C son casi más del doble que los resultados a 40°C para el mismo nivel de agua requerida.



(a) Mina Escondida



(b) Puerto Montt

Figura 5.3: Analisis de sensibilidad para el perfil 1 ante cambios en la cantidad de agua y la temperatura en el mejor (a) y peor (b) escenario.

(Fuente: Elaboración propia)

5.3.2. Parámetros de Control Algoritmo Genético

Una vez obtenidos los resultados para los distintos perfiles de consumo, se hace un estudio sobre los parámetros de control de los AG a partir de De Jong [87], Hesser [90], Grefenstette [88] y Schaffer [89]. Los parámetros a evaluar son: Tamaño de la población, tasa de mutación y tasa de cruce. En Tabla 4.4 se observan los valores de los parámetros estudiados.

TABLA 5.4: Resultados Parámetros de Control AG

Autor	LCS (kUSD)	Tiempo (s)	Generación
Caso Propuesto	742.25	833.17	51
De Jong	723.42	798.31	57
Hesser	733.32	588.49	89
Grefenstette	737.59	405.71	54
Schaffer	747.89	1116.39	106

El análisis se hizo utilizando el Perfil 1 para la Mina Escondida, la cual presenta el mejor resultado financiero del estudio. En la Tabla 5.4 se muestran los promedios de las cinco veces que se simuló el problema para cada configuración planteada.

El mejor resultado financiero se obtiene para la configuración de Schaffer, que presenta un LCS de 747 kUSD, pero demora un 34 % más (casi 300 segundos por simulación), donde llega al óptimo luego de 106 generaciones. Por el contrario, la configuración de Grefenstette es quien llega al óptimo en menor tiempo, con 405 segundos, un 51 % menos que la configuración propuesta, pero se obtienen resultados de LCS menores en un 0.63 %.

Los resultados demuestran que existe un trade-off entre el óptimo que se obtiene y el tiempo de resolución que demora la simulación. Una disminución de un 63.7 % en el tiempo de simulación entregó resultados de LCS 1.37 % más bajos.

5.3.3. Resultados Financieros y Análisis de Riesgo

Con la intención de conocer cómo se comporta el proyecto ante cambios en parámetros financieros que puedan repercutir en la rentabilidad de éste se lleva a cabo un análisis de sensibilidad. El análisis se hizo para el Perfil 1 de consumo de agua caliente en Mina Escondida y Puerto Montt, que corresponden al mejor y peor escenario estudiado, respectivamente.

En la Fig. 5.4 se puede apreciar que el precio del combustible tiene el mayor impacto sobre el LCS. Un aumento del 30 % en el precio del combustible genera un aumento del LCS en un 36 % para Mina Escondida y un 47 % en Puerto Montt. El costo inicial tiene un impacto relevante solo en Puerto Montt, donde un incremento del 30 % del costo inicial, genera una disminución del LCS de un 17 %, y solo 6 % para el caso de Mina Escondida. Por otro lado, el apalancamiento, la tasa de interés de la deuda y los costos de operación y mantenimiento tienen un bajo impacto en el LCS del proyecto, en el cual ninguno supera el $\pm 7\%$.

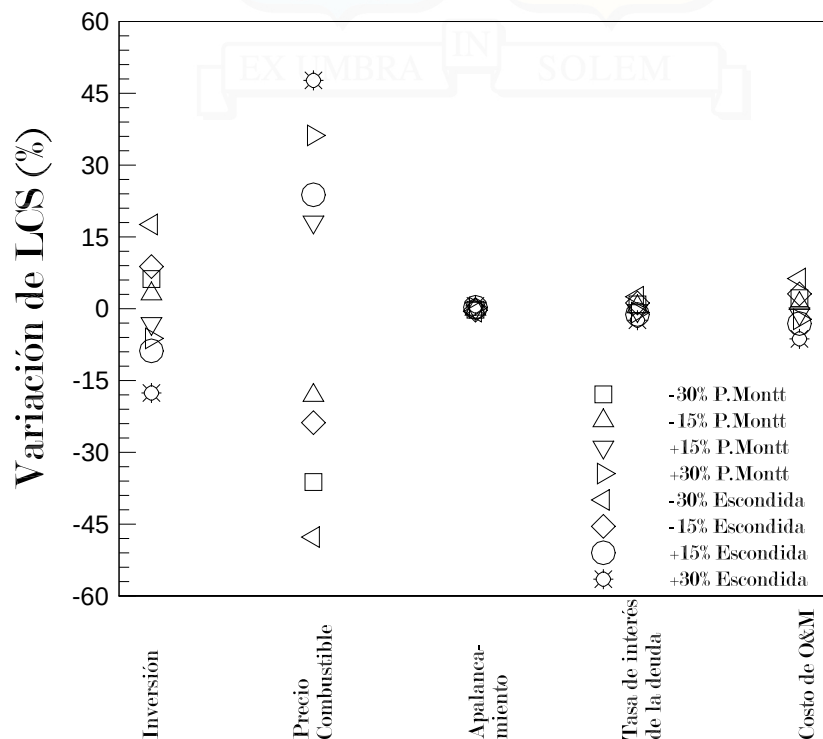


Figura 5.4: Resultados de la sensibilización OAT para el Perfil 1.
(Fuente: Elaboración propia)

Una vez que se determina el nivel de impacto de cada parámetro por separado, el análisis de riesgo utilizado permite realizar un análisis estocástico para un escenario dinámico. En este análisis las variables analizadas en el análisis de sensibilidad fueron evaluadas en un rango de $\pm 10\%$ [91]. Este análisis se realiza solo para el Perfil 1 en la Mina Escondida. En la Fig. 5.5 se observa la frecuencia y probabilidad acumulada para el

LCS en un escenario dinámico. El riesgo que el LCS sea menor a 500 kUSD es 0 %, y será mayor a 780 kUSD para más del 80 % de los casos estudiados.

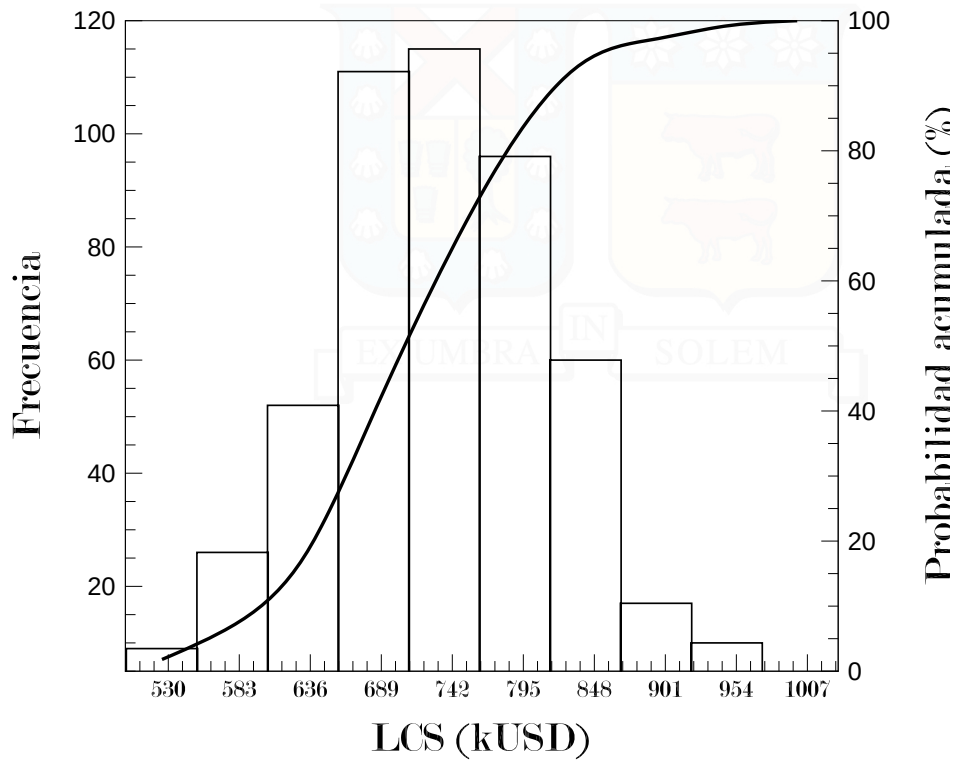


Figura 5.5: Resultados análisis de riesgo Monte Carlo en Mina Escondida.

(Fuente: Elaboración propia)

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES



En el presente estudio, un modelo de simulación modular es propuesto para estudiar el potencial solar que integra la evaluación energética de una PCSTP con un modelo de optimización basado en algoritmos genéticos para encontrar la combinación óptima entre el área colectora y el volumen de almacenamiento que maximiza el LCS de una PCSTP de baja-media temperatura. Este modelo de simulación es utilizado para caracterizar el potencial uso de estos sistemas en 182 localidades de Chile, considerando seis perfiles de consumo.

En primer lugar, se realiza un estudio de estabilidad del modelo numérico propuesto, entendiendo que la aproximación utilizada es de diferencias finitas explícitas, por lo que las variables estudiadas deben cumplir ciertos requisitos. Se determina que la capacidad del estanque de acumulación debe ser al menos cuatro veces el consumo que se tiene en una hora. Además, el consumo que se tiene en una hora no puede superar en 1.5 la cantidad de agua que hay en un estanque. En general, se recomienda que la cantidad de nodos no sea superior a 10 nodos, lo cual es acorde a la literatura analizada.

Se desarrollaron distintos análisis para comprender los efectos que tienen distintos parámetros en el LCS del proyecto. Se realizó un análisis sobre la temperatura y la cantidad de agua requerida para el consumo. Se llevó a cabo un análisis sobre tres parámetros de control de los algoritmos genéticos: Tamaño de la población, tasa de mutación y tasa de cruce. También se realizó un análisis estático y dinámico para comprender el efecto que tienen distintos parámetros económicos en la factibilidad económica del proyecto.

Para todos los perfiles estudiados se tiene un comportamiento similar respecto a los resultados de LCS obtenidos a lo largo y ancho de Chile. En la zona norte de Chile existe un gran potencial para el desarrollo de sistemas solares térmicos, donde se destacan las zonas que están por sobre los 2000 msnm, las cuales tienen resultados sobresalientes con respecto a otra zona que se encuentra a la misma latitud. Esto es muy importante ya que en el norte de Chile hay una alta concentración de actividad minera, la principal actividad económica de Chile. Por el contrario, la zona costera presenta los resultados financieros más bajos al comparar con otra zona que está en la misma latitud.

El estudio determinó que el Perfil 1, aquél que representa un consumo constante durante todo el día, es el que tiene mejor LCS en el 60.1 % de los lugares estudiados. El valor

promedio de éste perfil es un 9.96 % mayor que el Perfil 6, el resultado menos positivo, y un 1.16 % más que el Perfil 5, el segundo perfil con mejor LCS. Por otro lado, Perfil 4, aquél que aprovecha la curva de radiación solar diaria, tiene el mejor promedio de SOI para las zonas evaluadas, el cual es un 9.0 % superior al Perfil 6, aquél con menor SOI, y un 1.0 % superior al Perfil 1, el segundo perfil con SOI más elevado. En Mina Escondida se tiene la mejor locación con un LCS de 719.3 kUSD promedio para los seis perfiles estudiados, y un ahorro de 6.85 veces sobre la inversión requerida (SOI).

Los cambios en la temperatura de consumo se hacen relevantes para el caso en que la radiación solar es mayor, obteniendo mejores resultados a medida que aumenta la cantidad de agua de consumo y la temperatura de ésta, los mejores resultados para el caso de 80°C. Los cambios en los parámetros financieros, tanto para el análisis estático como dinámico, no alteraron la viabilidad económica del proyecto. Los tiempos de convergencia del AG varían considerablemente bajo las distintas configuraciones estudiadas, con diferencias de casi el 300 % entre la configuración más rápida y la más lenta, mientras que el LCS varía solo un 3 % entre el mejor y peor. La configuración de los AG usada demora un 51.3 % más que la configuración de Grefenstette, la cual resultó ser la configuración que converge más rápido, aunque el LCS es un 0.63 % mayor que el de ésta última.

Como resultado de este trabajo se obtienen mapas de Chile que muestran qué tan rentable es una instalación de una PCSTP en comparación con una caldera alimentada por gas natural ante distintos perfiles de consumo energético. Una potencial línea de investigación para trabajos futuros es realizar comparaciones sobre los algoritmos de optimización estocástica para PCSTP, estudiando los criterios de convergencia, rapidez y qué tan efectivo es para llegar al óptimo global del problema. Otra línea interesante es desarrollar investigaciones que determinen el potencial uso de energía térmica en Chile para temperaturas media-alta (100-200°C), utilizando colectores solares de tubos de vacío, con lo cual se podría aplicar para procesos productivos de la industria alimentaria, química o minera entre otras.



Bibliografía

- [1] Thiago P Lima, Jose Carlos C Dutra, Ana Rosa M Primo, Janardan Rohatgi, and Alvaro Antonio V Ochoa. Solar water heating for a hospital laundry: A case study. *Solar Energy*, 122:737–748, 2015.
- [2] Comisión Nacional de Energía. Anuario estadístico de energía 2005-2015, 2015.
- [3] Haichao Wang, Elnaz Abdollahi, Risto Lahdelma, Wenling Jiao, and Zhigang Zhou. Modelling and optimization of the smart hybrid renewable energy for communities (shrec). *Renewable Energy*, 84:114–123, 2015.
- [4] Eduardo Chandia, Fritz Zaversky, Fabienne Sallaberry, and Marcelino Sánchez. Analysis of the energy demand of the chilean mining industry and its coverage with solar thermal technologies. *International Journal of Sustainable Engineering*, pages 1–11, 2016.
- [5] Marcel Loomans and Huib Visser. Application of the genetic algorithm for optimisation of large solar hot water systems. *Solar Energy*, 72(5):427–439, 2002.
- [6] Hans Schweiger, João Farinha Mendes, Nikolaus Benz, Klaus Hennecke, Germán Prieto, Mercè Cusí, and Helder Gonçalves. The potential of solar heat in industrial processes. a state of the art review for spain and portugal. EuroSun, 2000.
- [7] H. C. Hottel and A. Whillier. Evaluation of flat-plate solar collector performance. *Transaction of the Conference on the Use of Solar Energy: The Scientific Basis, II, Part I, Section A*, pages 74–104, 1958.
- [8] Benjamin YH Liu and Richard C Jordan. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: with design data for the us, its outlying possessions and canada. *Solar Energy*, 7(2):53–74, 1963.
- [9] SA Klein. Calculation of flat-plate collector utilizability. *Solar Energy*, 21(5):393–402, 1978.
- [10] University of Wisconsin-Madison. Solar Energy Laboratory and Sanford A Klein. *TRNSYS, a transient system simulation program*. Solar Energy Laboratary, University of Wisconsin–Madison, 1979.
- [11] Sanford Alan Klein, WA Beckman, and John A Duffie. A design procedure for solar heating systems. *Solar Energy*, 18(2):113–127, 1976.

- [12] Naveen Sharma et al. Stochastic techniques used for optimization in solar systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3):1399–1411, 2012.
- [13] James Kennedy. Particle swarm optimization. In *Encyclopedia of machine learning*, pages 760–766. Springer, 2011.
- [14] John H Holland. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press, 1975.
- [15] Rosalie T Ruegg. *Solar heating and cooling in buildings: methods of economic evaluation*. National Bureau of Standards, 1975.
- [16] Layek Abdel-Malek. Optimum design of solar water heating systems. *Computers & operations research*, 12(2):219–225, 1985.
- [17] Alarcón I Palma R, Jiménez G. Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico chileno. *Proyecto Energías Renovables No Convencionales (CNE/GTZ)*, 2009.
- [18] EducarChile. Contexto nacional: Institucionalidad, 2016.
- [19] Ibrahim Dincer and Marc A Rosen. A worldwide perspective on energy, environment and sustainable development. *International Journal of Energy Research*, 22(15):1305–1321, 1998.
- [20] T. Bradford. *Solar revolution: the economic transformation of the global energy industry*. Estados Unidos. MIT Press books, 2006.
- [21] U.S. Energy Information Administration. International energy outlook 2013 - highlights. *DOE/EIA-0383*, (1):1–243, 2013.
- [22] B-N. Huang, M.J. Hwang, and C.W. Yang. Causal relationship between energy consumption and gdp growth revisited: A dynamic panel data approach. *Ecological Economics*, 67(1):41–54, 2008.
- [23] Ministerio de Energía. Energía 2050 - Política Energética Nacional, 2014.
- [24] Jean-Baptiste Joseph Fourier. Les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, 7, 1827.
- [25] Goddard Institute for Space Studies NASA. Nasa, noaa find 2014 warmest year in modern record, 2015.
- [26] Susan Solomon, Dahe Qin, Martin Manning, RB Alley, T Berntsen, NL Bindoff, Z Chen, A Chidthaisong, JM Gregory, GC Hegerl, et al. Technical summary. 2007.
- [27] Naciones Unidas ONU. Onu,convención marco sobre el cambio climático, 2015.

- [28] Fabián A. Bustos. Una metodología para evaluar el potencial de energía solar térmica y fotovoltaica en Chile, 2014.
- [29] Luis Milla. Evolución de la energía convencional y no convencional. *Industrial Data*, 5(2):78–85, 2002.
- [30] Josep Puig and Joaquim Corominas. *La ruta de la energía*. Number 7. Anthropos Editorial, 1990.
- [31] Nicolás Méndez. La era de las termoelectricas. Sitio web: <http://www.centralenergia.cl/2011/01/31/la-era-de-las-termoelectricas/>, 1 2011.
- [32] EducarChile. Aprende con energía: Petróleo, 2016.
- [33] Foro Nuclear de la Industria Española. <http://www.foronuclear.org>, consultado 22 de octubre de 2016, 2016.
- [34] Comité CORFO. Reporte cifes, energías renovables en el mercado eléctrico chileno, 2016.
- [35] EducarChile. Aprende con energía: Energía eólica, 2016.
- [36] EducarChile. Aprende con energía: Energía biomasa, 2016.
- [37] EducarChile. Aprende con energía: Energía hidráulica, 2016.
- [38] EducarChile. Aprende con energía: Energía geotérmica, 2016.
- [39] EducarChile. Aprende con energía: Energía mareomotriz, 2016.
- [40] Rubén Muñoz Bustos. Renovación ley 20.365: Franquicia tributaria y subsidios para sistemas solares térmicos, 2015.
- [41] F Bustos, A Toledo, J Contreras, and A Fuentes. Sensitivity analysis of a photovoltaic solar plant in Chile. *Renewable Energy*, 87:145–153, 2016.
- [42] EducarChile. Energía solar en el mundo, 2016.
- [43] Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance. Tables. *ASTM Standard E490-00a*, 2000.
- [44] Frank Benford and John E Bock. *A time analysis of sunshine*. General electric Company, Research laboratory, 1938.
- [45] PI Cooper. The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, 12(3):333–346, 1969.
- [46] John A Duffie and William A Beckman. *Solar engineering of thermal processes*, volume 3. Wiley New York, 2013.
- [47] EducarChile. Aprende con energía: Energía solar, 2016.

- [48] Departamento de Geofísica. Exploradorsolar 3, 2016.
- [49] M Petrakis, HD Kambezidis, S Lykoudis, AD Adamopoulos, P Kassomenos, IM Michaelides, SA Kalogirou, G Roditis, I Chrysis, and A Hadjigianni. Generation of a “typical meteorological year” for nicosia, cyprus. *Renewable Energy*, 13(3):381–388, 1998.
- [50] Alberto Ortega, Rodrigo Escobar, Sergio Colle, and Samuel Luna De Abreu. The state of solar energy resource assessment in chile. *Renewable Energy*, 35(11):2514–2524, 2010.
- [51] Ming-Dah Chou and Max J Suarez. A solar radiation parameterization for atmospheric studies. *NASA Tech. Memo*, 104606:40, 1999.
- [52] The Weather Research and Forecasting Model. www.wrf-model.org, consultado 22 de octubre de 2016, 2016.
- [53] UTFSM CNE, PNUD. Irradiancia solar en territorios de la república de Chile, 2008.
- [54] VI Belessiotis and E Delyannis. The history of renewable energies for water desalination. *Desalination*, 128(2):147–159, 2000.
- [55] Soteris A Kalogirou. *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press, 2013.
- [56] Hoyt Hottel and B Woertz. Performance of flat-plate solar-heat collectors. *Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Eng.); (United States)*, 64, 1942.
- [57] Manuel Collares-Pereira and Ari Rabl. Derivation of method for predicting long term average energy delivery of solar collectors. *Solar Energy*, 23(3):223–233, 1979.
- [58] Manuel Collares-Pereira and Ari Rabl. Simple procedure for predicting long term average performance of nonconcentrating and of concentrating solar collectors. *Solar Energy*, 23(3):235–253, 1979.
- [59] SA Klein and WA Beckman. A general design method for closed-loop solar energy systems. *Solar Energy*, 22(3):269–282, 1979.
- [60] SA Klein, PI Cooper, TL Freeman, DM Beekman, WA Beckman, and JA Duffie. A method of simulation of solar processes and its application. *Solar Energy*, 17(1):29–37, 1975.
- [61] JF Orgill and KGT Hollands. Watsun: A solar heating simulation and economic evaluation program. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 77:24603, 1976.
- [62] M Connolly, R Giellis, C Jensen, and R McMordie. Solar heating and cooling computer analysis-a simplified sizing design method for non-thermal specialists. In *Sharing the Sun: Solar Technology in the Seventies, Volume 10*, volume 10, pages 220–234, 1976.

- [63] HP Garg. An overview of design methods for solar water heating systems. *Solar & Wind Technology*, 2(2):101–112, 1985.
- [64] D Thevenard. A simple tool for the simulation of active solar systems: Watsun reborn. In *Proceedings of the Third Solar Buildings Conference. Fredericton N.B.*, pages 189–196, 2008.
- [65] Werner H Bloss and F Pfisterer. *Advances in Solar Energy Technology: Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society, Hamburg, Federal Republic of Germany, 13-18 September 1987*. Elsevier, 2013.
- [66] Layek Abdel-Malek and Jon T Chu. Evaluation of solar water heating systems. *Computers & operations research*, 12(1):17–23, 1985.
- [67] William A Beckman, Sanford A Klein, and John A Duffie. Solar heating design, by the f-chart method. *NASA STI/Recon Technical Report A*, 78:31071, 1977.
- [68] Gorla Rama Subba Reddy and Salako Rashid. Feasibility of wind-solar hybrid system for cleveland, ohio, usa. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2011, 2011.
- [69] Young-Deuk Kim, Kyaw Thu, Hitasha Kaur Bhatia, Charanjit Singh Bhatia, and Kim Choon Ng. Thermal analysis and performance optimization of a solar hot water plant with economic evaluation. *Solar Energy*, 86(5):1378–1395, 2012.
- [70] SA Klein, JW Mitchell, JA Duffie, and WA Beckman. Computers in the design of solar energy systems. *Energy*, 4(4):483–501, 1979.
- [71] Ivette Maria Rodríguez Pérez. *Unsteady laminar convection in cylindrical domains: numerical studies and application to solar water storage tanks*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2007.
- [72] Soteris A Kalogirou. Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms. *Applied Energy*, 77(4):383–405, 2004.
- [73] C.A. Cruickshank. *Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating applications*. PhD thesis, Department of Mechanical and Materials Engineering. Queen’s University, June 2009.
- [74] G Oberndorfer, WA Beckman, and SA Klein. Sensitivity of annual solar fraction of solar space and water heating systems to tank and collector heat exchanger model parameters. Technical report, Univ. of Wisconsin, Madison, WI (US), 1999.
- [75] Eberhard Markus Kleinbach, WA Beckman, and SA Klein. Performance study of one-dimensional models for stratified thermal storage tanks. *Solar energy*, 50(2):155–166, 1993.
- [76] Rejane De Cesaro Oliveski, Arno Krenzinger, and Horácio A Vielmo. Comparison between models for the simulation of hot water storage tanks. *Solar Energy*, 75(2):121–134, 2003.

- [77] Kalyanmoy Deb. Genetic algorithm in search and optimization: the technique and applications. In *Proceedings of international workshop on soft computing and intelligent systems*, pages 58–87. Citeseer, 1998.
- [78] Gabriela Ochoa, Inman Harvey, and Hilary Buxton. Error thresholds and their relation to optimal mutation rates. In *European Conference on Artificial Life*, pages 54–63. Springer, 1999.
- [79] Doaa M Atia, Faten H Fahmy, Ninet M Ahmed, and Hassen T Dorrah. Optimal sizing of a solar water heating system based on a genetic algorithm for an aquaculture system. *Mathematical and Computer Modelling*, 55(3):1436–1449, 2012.
- [80] Bruno Durão, António Joyce, and João Farinha Mendes. Optimization of a seasonal storage solar system using genetic algorithms. *Solar Energy*, 101:160–166, 2014.
- [81] SolarGIS. GHI Solar map - Chile. 2010-2015. GeoModel Solar.
- [82] RETScreen International. *Clean Energy Project Analysis*. 2010.
- [83] JK Gruber, S Jahromizadeh, M Prodanović, and V Rakočević. Application-oriented modelling of domestic energy demand. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61:656–664, 2014.
- [84] ISO 9459-3:1997(E). Performance tests for solar plus supplementary systems, organization for international standards, geneva, switzerland, 1997.
- [85] Soteris Kalogirou. Economic analysis of solar energy systems using spreadsheets. *Renewable energy*, 9(1):1303–1307, 1996.
- [86] David E Goldberg. Sizing populations for serial and parallel genetic algorithms. In *Proceedings of the 3rd international conference on genetic algorithms*, pages 70–79. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1989.
- [87] KA DeJong. *Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. PhD thesis, Ph. D. thesis, Dept. Computer and Communication Sciences, Univ. of Michigan, 1975.
- [88] John J Grefenstette. Optimization of control parameters for genetic algorithms. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 16(1):122–128, 1986.
- [89] J David Schaffer, Richard A Caruana, Larry J Eshelman, and Rajarshi Das. A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization. In *Proceedings of the third international conference on Genetic algorithms*, pages 51–60. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1989.
- [90] Jürgen Hesser and Reinhard Männer. Towards an optimal mutation probability for genetic algorithms. In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, pages 23–32. Springer, 1990.

- [91] Dong Jun, Zhang Xu, Jiang Xue, Xu Xiaolin, and Tang Yuxi. Economic analysis and policy suggestions on gas power generation projects considering carbon emission reduction. *Procedia Environmental Sciences*, 11:1029–1038, 2011.
- [92] Soteris A Kalogirou. Generation of typical meteorological year (tmy-2) for nicosia, cyprus. *Renewable Energy*, 28(15):2317–2334, 2003.





ANEXO A

RESULTADOS DIFERENTES PERFILES



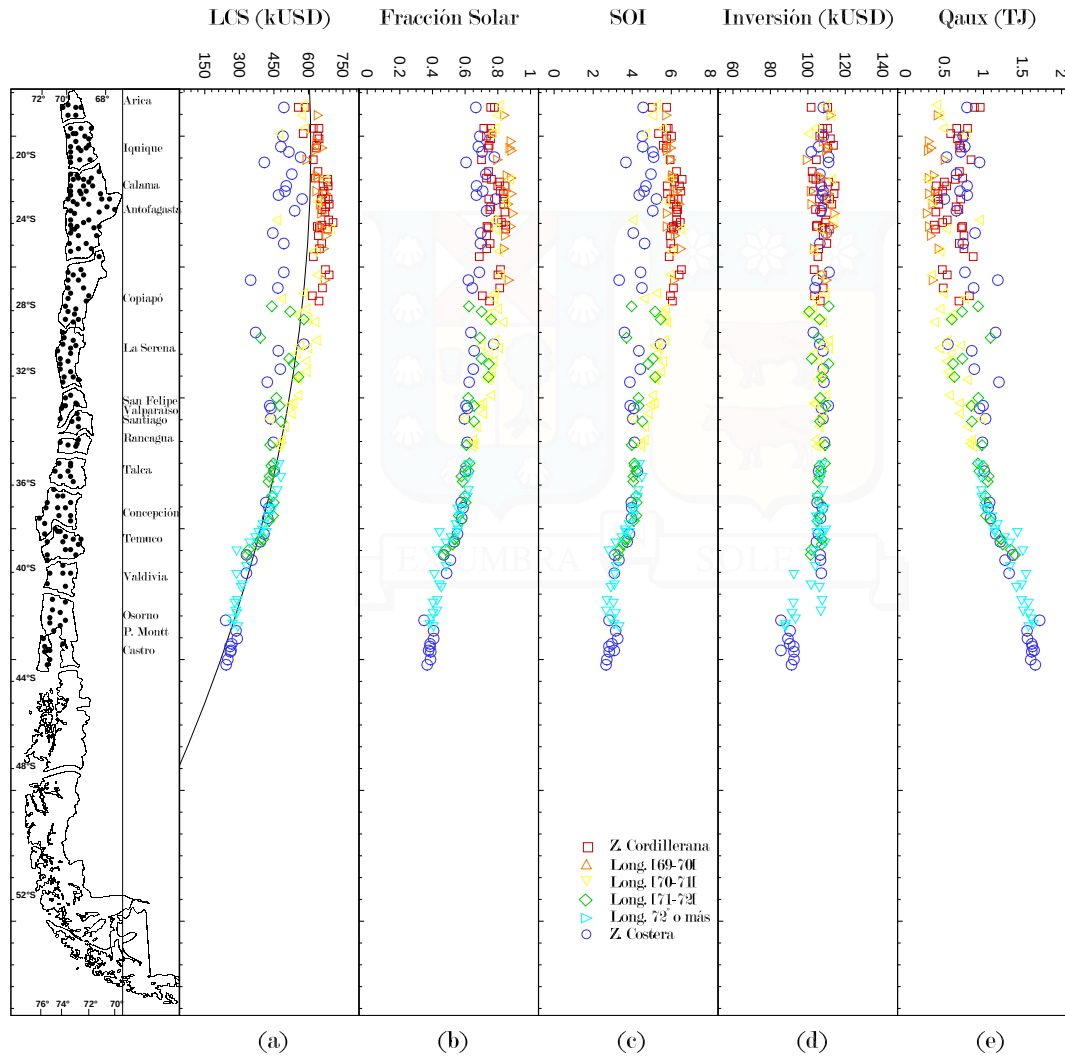


Figura A.1: Perfil 2. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ).

(Fuente: Elaboración propia)

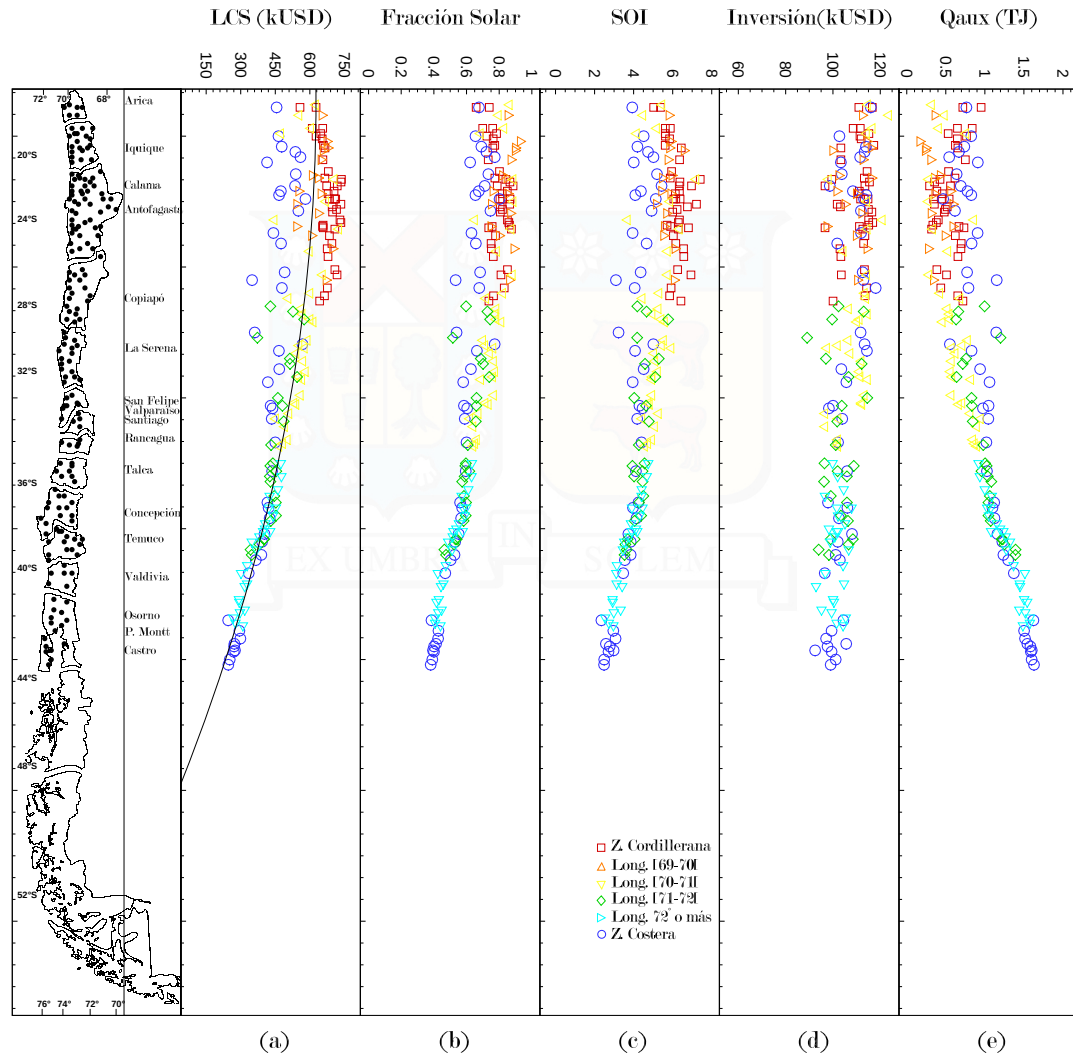


Figura A.2: Perfil 3. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ).

(Fuente: Elaboración propia)

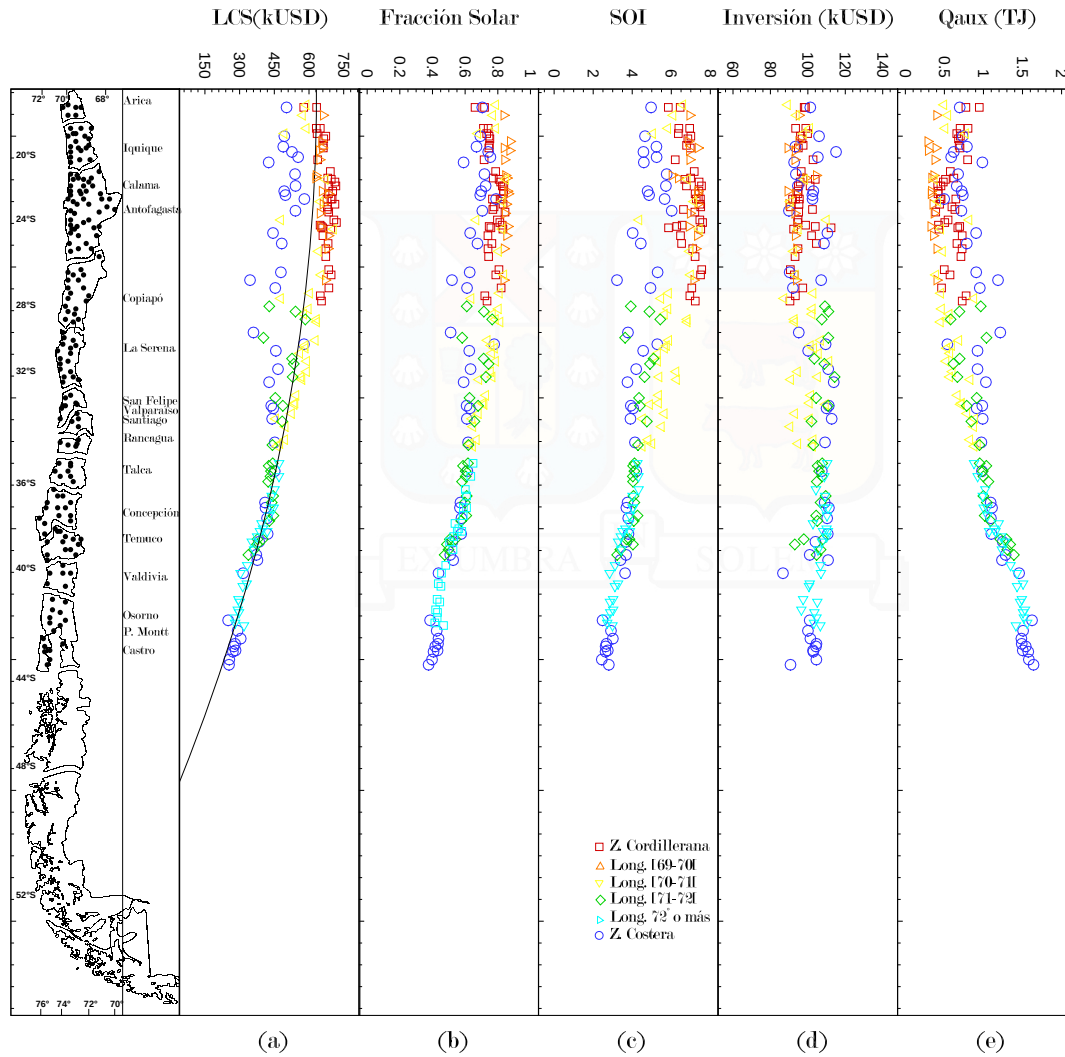


Figura A.3: Perfil 4. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ).

(Fuente: Elaboración propia)

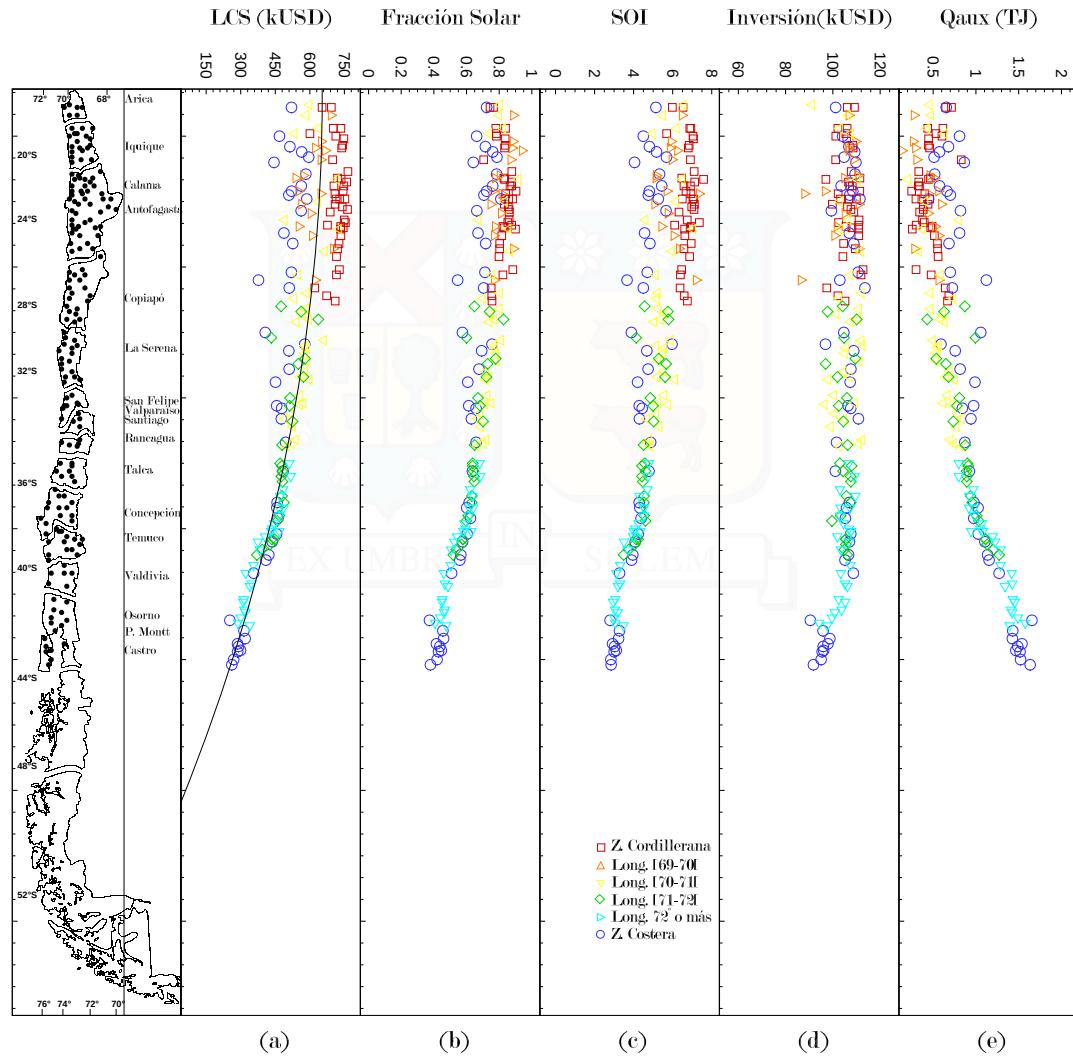


Figura A.4: Perfil 5. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ).

(Fuente: Elaboración propia)

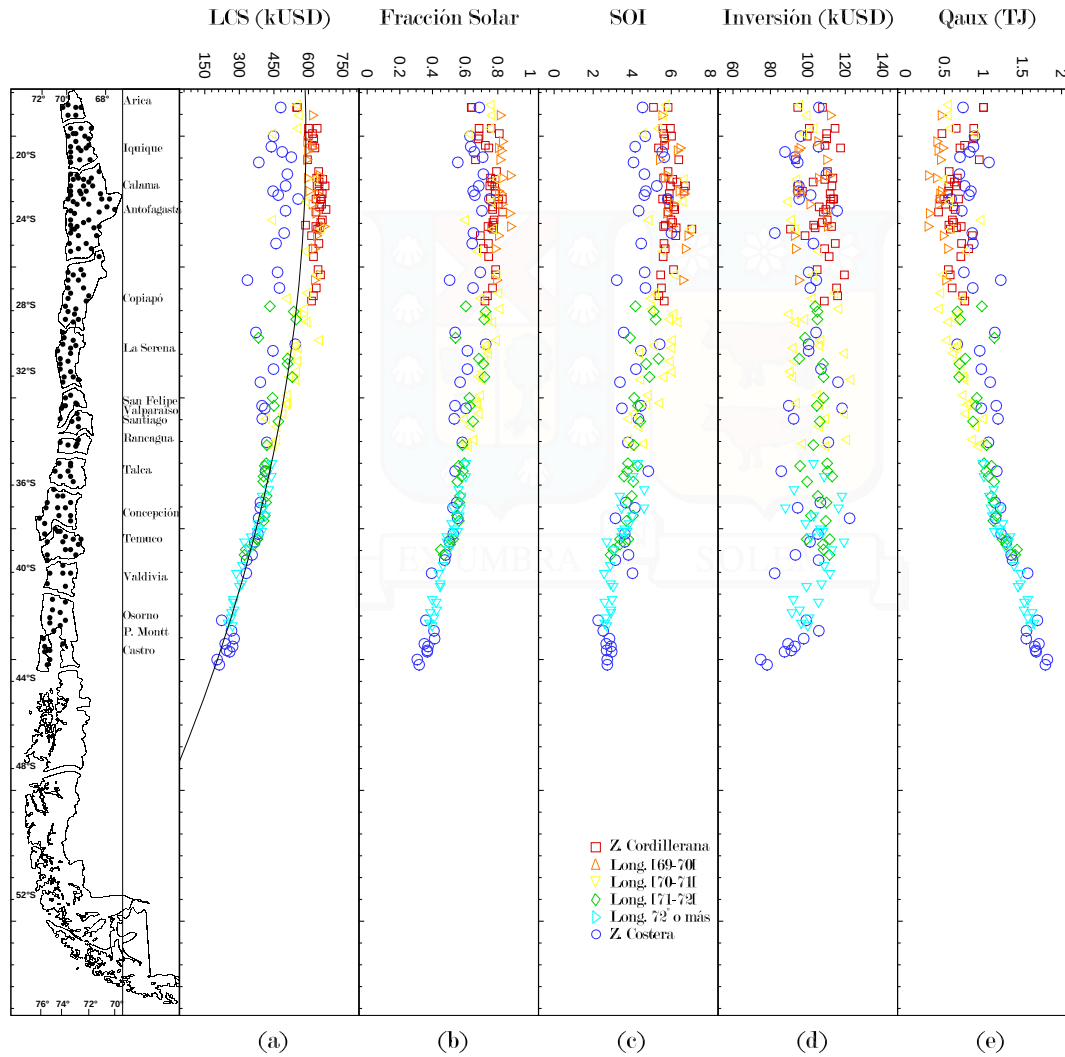


Figura A.5: Perfil 6. (a) LCS óptimo. (b) Fracción de la energía requerida que es suministrada por el Sol. (c) Cantidad de veces que el ahorro supera la inversión (SOI). (d) Inversión óptima. (e) Energía Auxiliar requerida (TJ).

(Fuente: Elaboración propia)