UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO - CHILE

ESTUDIO TÉCNICO, AMBIENTAL Y FINANCIERO DEL USO RESIDENCIAL DE PANELES SOLARES HÍBRIDOS EN CHILE PARA DIFERENTES PERFILES DE DEMANDA

FELIPE ALEJANDRO BALBOA SERRANO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA	:	Dr. JORGE CONTRERAS RODRÍGUEZ
PROFESOR CORREFERENTE	:	Dr. ANDRÉS FUENTES CASTILLO

NOVIEMBRE 2018

A mi familia . . .

Si en algún momento llegas a dudar de algo, que sea de tus límites.

AGRADECIMIENTOS

Para mi familia, quienes sin ellos esto no hubiese sido posible, a mi abuela quien fue mi segunda madre desde que tengo uso de razón, para mi hermana que siempre me estuvo alentando a seguir por más y me terminó de convencer por elegir mi carrera, a mi padre que a pesar de no estar conmigo en casa siempre sabía que contaba con su apoyo, y especialmente a mi madre, quien me crió y en cierta forma lo sigue haciendo, aprendiendo de ella día a día, eres admirable, este título es más tuyo que mío. Doy gracias por el camino que elegí, a quienes conocí y en lo que me formó esta Universidad, a pesar del duro camino que fue, ahora mirando un poco hacia atrás puedo darme cuenta que cada segundo que viví acá valió la pena. Gracias... totales!

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio se enmarca en la investigación y evaluación económica solar térmica y fotovoltaica para 7 ciudades de Chile, elegidas estratégicamente debido a su ubicación geográfica, con el fin de determinar la configuración de un módulo híbrido térmico fotovoltaico con sistema ON GRID optimizando su área para maximizar el ahorro del ciclo de vida (LCS) utilizando algoritmos genéticos (AG) como método de optimización implementado en MATLAB.

Son analizados 6 perfiles de consumo diferentes tanto para ACS como para la demanda de electricidad, totalizando una configuración de 36 escenarios distintos y así evaluar su influencia en el resultado económico. La evaluación financiera se considera un horizonte de evaluación de 20 años con una tasa de descuento del 10 %, además de considerar el efecto del Net Billing para inyectar a la red la energía que no se consume. Los resultados arrojan que los perfiles que acumulan la demanda en las horas peak de radiación son los que entregan mayor rendimiento financiero, observando el gran potencial que se tiene en la zona norte respecto a las demás localidades del país.

En el consumo acumulado entre las 13:00 y 17:00 hrs (el perfil ACS 6) entregó los mejores resultados, seguido de los perfiles 3 y 5, que también acumulan la demanda en las horas de mayor radiación, por otro lado para los perfiles eléctricos se obtienen resultados similares, a pesar del efecto del Net Billing, el cual no logra amortiguar los efectos de consumo fuera de las horas de radiación con la venta de los excesos a la red, ya que ésta se realiza a precio nudo, 45 % del valor de venta.

Posteriormente se hace un análisis de sensibilidad a las locaciones con mayor y menor LCS, aumentando al crecer la demanda pero reduciendo la fracción solar, conjuntamente se hacen variar los parámetros financieros, destacando la gran incidencia en los resultados de las tarifas de la energía auxiliar, completando casi el 80 % de la varianza en el escenario dinámico.

En el mejor de los casos, ubicado en Antofagasta, se logra obtener un LCS de $ 2.701.194, con una inversión de $ 1.916.939 y un ratio SOI (veces que está la inversión en el ahorro) de 1,4, mientras que para todas las ciudades evaluadas el proyecto en estricto rigor es rentable a los 20 años evaluados, siendo el peor de los casos un LCS cercano a los $ 175.000.

ABSTRACT

This study is part of the research and economic evaluation of solar thermal and photovoltaic for 7 cities of Chile, strategically chosen due to its geographical location, in order to determine the configuration of a hybrid photovoltaic thermal module with ON GRID system optimizing its area for Maximize Life-Cycle Savings (LCS) using genetic algorithms (AG) as an optimization method implemented in MATLAB.

6 different consumption profiles are analyzed for both ACS and Electricity demand, totaling a configuration of 36 different scenarios and thus evaluating their influence on the economic result. The financial evaluation is considered a 20-year evaluation horizon with a 10 % discount rate, in addition to considering the effect of Net Billing to inject energy into the network that is not consumed. The results show that the profiles that accumulate the demand in the peak hours of radiation are the ones that deliver the highest financial performance, observing the great potential that exists in the northern zone with respect to the other localities of the country.

In the accumulated consumption between 13:00 and 17:00 hrs (profile ACS 6) gave the best results, followed by profiles 3 and 5, which also accumulate demand in the hours of highest radiation, on the other hand for electrical profiles obtain similar results, despite the effect of Net Billing, which does not manage to dampen the effects of consumption outside the hours of radiation with the sale of the excesses to the network, since this is done at a fixed price, 45 % of the sale value.

Subsequently, a sensitivity analysis is made to the locations with higher and lower LCS, increasing the LCS by increasing the demand but reducing the solar fraction, jointly changing the financial parameters, highlighting the high incidence in the results of the energy tariffs. auxiliary, completing almost 80 % of the variance in the dynamic scenario.

In the best case, located in Antofagasta, it is possible to obtain an LCS of $ 2,701,194, with an investment of $ 1,916,939 and an SOI ratio (times the investment is in savings) of 1.4 , while for all cities evaluated the project in strict rigor is profitable after 20 years evaluated, the worst case being an LCS close to $ 175,000.

Índice de Contenidos

1. Introducción **1**
1.1. Objetivo principal . . . 3
1.2. Objetivos secundarios . . . 3

2. Antecedentes generales **5**
2.1. Contexto energético . . . 5
2.1.1. Matriz energética . . . 6
2.2. Estructura del mercado eléctrico en el país . . . 7
2.3. Ley de net billing . . . 8
2.3.1. Matriz eléctrica . . . 9
2.4. Tipos de fuentes energéticas . . . 11
2.4.1. Energías no renovables . . . 12
2.4.1.1. Riesgos relacionados con las fuentes de energías fósiles . . . 13
2.4.2. Energías renovables . . . 13
2.4.2.1. Riesgos relacionados con las fuentes de energías renovables . . . 14
2.5. Justificación de este trabajo . . . 15

3. Análisis bibliográfico **17**
3.1. Tópicos sobre transferencia de calor . . . 17
3.1.1. Conducción . . . 17
3.1.2. Convección . . . 19
3.1.3. Radiación . . . 19
3.2. Tópicos de energía solar . . . 21
3.2.1. Radiación solar sobre superficies con inclinación . . . 22
3.2.2. Ángulos solares . . . 22
3.2.3. Factores de incidencia en la recepción de energía solar en la Tierra . . . 23
3.3. Datos metereológicos . . . 24
3.4. Generador fotovoltaico . . . 25
3.4.1. Estructura de un panel fotovoltaico . . . 26
3.4.2. Montaje y disposición de paneles solares . . . 28
3.5. Colector solar . . . 29
3.6. Colector híbrido térmico fotovoltaico . . . 31
3.6.1. Ventaja de incorporar ambos sistemas unificados . . . 33
3.6.2. Estructura PVT . . . 34
3.6.3. Modelo térmico de energía . . . 34
3.6.3.1. Celdas solares del módulo PVT . . . 37
3.6.3.2. Superficie posterior al tedlar . . . 37
3.6.3.3. Agua que fluye bajo el tedlar . . . 38
3.6.4. Almacenamiento de energía térmica en sistema de colectores solares híbridos . . . 39
3.6.4.1. Balance energético en el estanque . . . 41
3.6.5. Optimización de sistemas de colectores a través de algoritmos genéticos . . . 42

4. Metodología **45**
4.1. Modelo de energía . . . 45
4.2. Sistema auxiliar . . . 49
4.3. Datos metereológicos locales y perfiles de consumo . . . 50
4.4. Perfiles de consumo . . . 51
4.5. Evaluación financiera . . . 53
4.6. Optimización mediante algoritmos genéticos . . . 56
4.7. Análisis de sensibilidad y riesgos . . . 57
4.7.1. Análisis sobre parámetros del modelo energético . . . 57
4.7.2. Análisis sobre parámetros de control de los algoritmos genéticos . . . 57
4.7.3. Análisis de emisiones . . . 58
4.7.4. Análisis financiero y de riesgo . . . 58

5. Resultados **60**
5.1. Comparación modelo de Tiwari . . . 60
5.2. Radiación solar por ciudad . . . 61
5.3. Resultados por ciudad . . . 63
5.4. Análisis de sensibilidad . . . 76
5.4.1. Variación de demanda . . . 76
5.4.2. Parámetros del algoritmo genético . . . 78
5.4.3. Análisis de emisiones . . . 79
5.4.4. Resultados financieros y análisis de riesgo . . . 80

6. Conclusiones **84**

Bibliografía **86**

A. Nomenclatura **89**

B. Resultados **91**

C. Datos de radiación solar **98**

Índice de Tablas

2.1. Ejemplos de energía primaria (Fuente: Elaboración propia) 11

4.1. Parámetros utilizados para el colector solar híbrido (Fuente: (Tiwari y Sodha, 2006)) 47
4.2. Pérdidas por concepto de factores externos (Fuente: (Molina et al., 2017)) 49
4.3. Parámetros económicos 55
4.4. Parámetros del AG a sensibilizar 58

5.1. Resultados parámetros de control AG (Fuente: Elaboración propia) 79

B.1. Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Antofagasta, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia). 91
B.2. Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Valparaíso, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia). 92
B.3. Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Santiago, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia). 93
B.4. Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Concepción, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia). 94
B.5. Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Osorno, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia). 95
B.6. Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Punta Arenas, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia). 96

B.7. Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Punta Arenas, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia). 97

C.1. Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Antofagasta obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)). 98
C.2. Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Valparaíso obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)). 99
C.3. Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Santiago obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)). 99
C.4. Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Concepción obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)). 100
C.5. Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Osorno obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)). 100
C.6. Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Punta Arenas obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)). 101
C.7. Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Puerto Williams obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)). 101

Índice de Figuras

2.1. Consumo de energía primaria mundial equivalente en galones de petróleo (Fuente: (Statistical, 2018)). 6
2.2. Evaluación de la capacidad de generación eléctrica neta instalada por sistema entre los años 2007 y 2017 en MW (Fuente: (CNE, 2017)). 9
2.3. Total Nacional de la capacidad de generación eléctrica neta instalada por tecnología en MW al año 2007 (Fuente: (CNE, 2017)). 10
2.4. Total Nacional de la capacidad de generación eléctrica neta instalada por tecnología en MW al año 2017 (Fuente: (CNE, 2017)). 10
2.5. Evolución de inyección de ERNC desde vigencia de la Ley 20.257 en GWh (Fuente: (CNE, 2017)). 11

3.1. Celdas, paneles y arreglo de paneles. Tyagi et al. (2012). 25
3.2. Sección Transversal de un colector solar plano (Fuente: (Kalogirou, 2013)). 29
3.3. Clasificación de colectores Tyagi et al. (2012). 33
3.4. Sistema fotovoltaico / térmico integrado (PVT) con canal de tubo redondo (Huang et al., 2001). 35
3.5. Diseño de colector de agua PV/T con colector absorbente debajo del panel solar (Othman et al., 2009). 35
3.6. Vista transversal de un sistema fotovoltaico / térmico integrado (Tiwari y Sodha, 2006). . . . 35
3.7. Diagrama de circuito de resistencia térmica para sistema fotovoltaico / térmico (Tiwari y Sodha, 2006). 36
3.8. Sistema típico que utiliza un tanque de agua como almacenamiento. Al agua que circula a través del colector se adhiere energía y la que circula a través de la demanda se le remueve energía (Fuente: (Klein et al., 1976)). 40
3.9. Almacenamiento sin estratificación de masa m_s operando a la temperatura T_s dentro del ambiente a temperatura T_a.(Fuente: (Nacif Hartley et al., 2011)) 41
3.10. Esquema de funcionamiento de los GA (Araya Ibaceta, 2017). 44

4.1. Diagrama del arreglo solar fotovoltaico para obtención de agua caliente sanitaria y energía eléctrica (Fuente: Elaboración propia). 46
4.2. Perfiles de consumo de agua caliente sanitaria (Fuente: Elaboración propia). 52
4.3. Perfiles de consumo de electricidad (Fuente: Elaboración propia). 53
4.4. Representación esquemática del proceso de optimización (Fuente: (Araya Ibaceta, 2017)). . 56

5.1. (a) Resultados del modelo obtenidos por A. Tiwari. (b) Resultados del modelo obtenidos en el presente estudio para la validación. (Fuente: Elaboración propia). 61
5.2. Radiación promedio del año obtenida hora a hora para las distintas ciudades evaluadas (Fuente: Elaboración propia). 62
5.3. Consolidado de radiación promedio de todas las ciudades evaluadas representadas hora a hora (Fuente: Elaboración propia). 63

5.4. Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Antofagasta mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia). . . . 64
5.5. Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Valparaíso mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia). . . . 65
5.6. Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Santiago mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia). 66
5.7. Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Concepción mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia). . . . 67
5.8. Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Osorno mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia). 68
5.9. Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Punta Arenas mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia). . . . 69
5.10. Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Puerto Williams mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia). . . . 70
5.11. Representación de la combinación de mejores resultados para el LCS evaluado en las distintas ciudades del país (Fuente: Elaboración propia). . . . 71
5.12. Representación de la combinación de peores resultados para el LCS evaluado en las distintas ciudades del país (Fuente: Elaboración propia). . . . 72
5.13. Evaluación del perfil 1 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia). . . . 73
5.14. Evaluación del perfil 2 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia). . . . 73
5.15. Evaluación del perfil 3 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia). . . . 74
5.16. Evaluación del perfil 4 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia). . . . 74
5.17. Evaluación del perfil 5 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia). . . . 75
5.18. Evaluación del perfil 6 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia). . . . 75
5.19. Comparación por ciudad de los promedios obtenidos en los diferentes perfiles para LCS, área colectora y SOI. (Fuente: Elaboración propia). . . . 76
5.20. Comparación por ciudad de los resultados obtenidos en los diferentes perfiles de ACS comparados con los promedios de perfiles de electricidad para LCS, área colectora y SOI. (Fuente: Elaboración propia). . . . 77
5.21. Variación de la demanda en el perfil 6/2 aplicado a la ciudad de Antofagasta (Fuente: Elaboración propia). . . . 78
5.22. Variación de la demanda en el perfil 4/6 aplicado a la ciudad de Puerto Williams (Fuente: Elaboración propia). . . . 78
5.23. Emisiones de CO_2 en kg/día que se dejan de emitir con el uso de colectores solares híbridos para las ciudades evaluadas con el perfil 6 ACS y 2 eléctrico para el área colectora óptima (Fuente: Elaboración propia). . . . 80
5.24. Emisiones de CO_2 en kg/día que se dejan de emitir con el uso de colectores solares híbridos para las ciudades evaluadas en los distintos perfiles eléctricos comparada con el promedio de resultados de ACS para el área colectora óptima (Fuente: Elaboración propia). . . . 81
5.25. Variación de parámetros financieros bajo el método OAT en el perfil 6/2 en Antofagasta (Fuente: Elaboración propia). . . . 82
5.26. Variación de parámetros financieros bajo el método OAT en el perfil 4/6 en Puerto Williams (Fuente: Elaboración propia). . . . 82

1 | Introducción

Hoy en día no es un misterio para nadie el consumo desmesurado de energías a nivel mundial, en los últimos 40 años tanto el consumo como la producción energética se han duplicado debido a distintos factores como el crecimiento económico mundial, el mayor tamaño del sector de transporte, aumento de la capacidad productiva de los países y como no, el aumento de la población mundial. Chile no escapa de esta estadística, según el balance del Ministerio de Energía, entre 1990 y 2017 el consumo de electricidad creció en un 339,3 % (CNE, 2017).

La matriz energética en el año 2017 es altamente dependiente de energías convencionales, puesto que para la generación eléctrica bruta el 26 % y 23 % se produce con carbón e hidroeléctricas, seguido del petróleo con un 22 % y con tan sólo 1 % la energía solar y biomasa (CNE, 2017). Sin embargo, existe un presente y futuro más consiente con el planeta, donde existen reales procesos de cambio, estableciendo políticas dirigidas al cambio de la matriz energética con el fin de que las ERNC tengan una participación fundamental.

Así, se ha establecido al año 2025, una meta a corto plazo, consistente en que el 20 % de la matriz de generación eléctrica en el país sea en base a ERNC. Aunque para algunos esto puede ser ambicioso, diversos estudios han reflejado los impactos positivos que tendría sobre el medio ambiente y la sociedad, junto con reducir la dependencia de fuentes fósiles que son altamente contaminantes y generan constantes problemas sobre la comunidad.

Actualmente, es común observar sobre los techos de las casas o edificios aparatos destinados a la obtención de energía a partir del sol, siendo los más comunes los colectores solares (para calentar agua) y los paneles fotovoltaicos (para obtener energía eléctrica). Estos aparatos suponen una alta inversión inicial para poder implementarlos en un hogar, sin mencionar el estudio previo para analizar si es rentable la instalación, dependiendo de factores como la temperatura, radiación, velocidad del viento, entre otros, empero

que de llevarse a cabo podría traer grandes beneficios no tan sólo para el hogar, sino que también para el planeta.

Ahora bien, la implementación en los tejados de las casas supone requerir una gran capacidad de área si lo que se requiere es abastercerse de energía solar, y más aún, si es para Agua caliente sanitaria (ACS) y electricidad.En solución a esta problematica, ha irrumpido con fuerza una nueva tecnología, los colectores solares híbridos, en la cual por la misma cantidad de área colectora se puede obtener simultaneamente electricidad y agua caliente sanitaria, gracias a que su configuración permite que bajo las celdas fotovoltaicas circule el agua que es calentada, al mismo tiempo que la transferencia de calor permite que las celdas no aumenten en exceso su temperatura disminuyendo su eficiencia. Un panorama muy alentador pero de poco conocimiento en el país, con baja comercialización, y que además, supone altos precios muy por encima de los paneles o colectores convencionales, pero que puede traducirse en ahorros significativos tanto en dinero como en espacio.

Chile cuenta con un entorno privilegiado en la zona norte por sus altos niveles de radiación en este lugar, siendo una plaza propicia para la implementación de ERNC basadas en la obtención de energía solar. De manera, que para los investigadores con el objeto de estudiar la factibilidad de su instalación, actualmente se han inclinado por técnicas estocásticas o métodos de búsqueda aleatoria para la estimación, predicción y optimización de los diversos sistemas de energía solar, puesto que generan en el menor tiempo mejores resultados que los modelos deterministas (Sharma et al., 2012).

El método estudiado en el presente trabajo es de optimización mediante algoritmos genéticos (AG) (Holland, 1992), basados en el principio Darwiniano de la supervivencia del más apto, donde el individuo más preparado de la población tiene la posibilidad más alta de sobrevivir, de esta forma se procede a crear un serie de pasos en base a la mecánica de selección y genética natural, donde cada generación de individuos son evaluados en la función objetivo hasta que las soluciones del problema converjan.

Una manera de determinar económicamente la competitividad de las tecnologías enfocadas en ERNC es obtener los costos en que incurren los sistemas de calentamiento de agua y generación fotovoltaica con energía convencional y con energía solar, obteniendo el Life-Cycle Saving (LCS), el cual es un parámetro financiero que señala el ahorro obtenido a lo largo de todo el ciclo de vida de los sistemas al implementar un cambio de tecnología.

En el presente trabajo se discute un modelo de simulación modular basado en los principios de la evolución genética y natural, con el fin de encontrar el área colectora óptima que maximiza el LCS para la

obtención de energía eléctrica y térmica en 7 ciudades de Chile, recorriendo de Norte a Sur con el fin de identificar variaciones respecto a la zona evaluada y sus posibles razones.

En el Capítulo 2 se muestra a grandes rasgos el panorama general sobre la energía en Chile y el Mundo, además de la composición del mercado eléctrico en Chile y los organismos gubernamentales involucrados, junto con los diferentes tipos de fuentes energéticas que cuenta el planeta.

En el capítulo 3 se hace una revisión bibliográfica sobre los tópicos más relevantes para realizar la investigación, tipos de transferencia de calor, factores de incidencia en la obtención de energía fotovoltaica, estudio de los aparatos por separado, tanto paneles como colectores para luego enfocarse en los colectores solares híbridos y su teoría, en conjunto con esto se expone la aplicación y modelación de los AG.

En el Capítulo 4 se detalla la metodología utilizada para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos planteados, por último, en los capítulos 5 y 6 se muestran los resultados y conclusiones respectivamente.

1.1. Objetivo principal

Estudiar el efecto que tiene el perfil de demanda de energía y la zona geográfica en el tamaño óptimo de un sistema solar híbrido que abastezca de energía eléctrica y térmica al sector residencial chileno.

1.2. Objetivos secundarios

- Estudiar el funcionamiento de los paneles solares híbridos para suministrar energía térmica y eléctrica.
- Lograr identificar variables con incidencia para la optimización del sistema de paneles híbridos.
- Implementar un modelo de optimización basado en un algoritmo genético para el ahorro del ciclo de vida de un sistema de paneles solares híbridos .
- Analizar la variación en el dimensionamiento del sistema ante cambios en los diferentes perfiles de demanda energética.
- Evaluar distintas ciudades del país para identificar aquellas que entreguen mayor rentabilidad.

- Analizar los resultados energéticos, ambientales y financieros ante modificaciones en la demanda de energía.

2 | Antecedentes generales

2.1. Contexto energético

Una sociedad que renuncia al futuro energético se expone a múltiples trastornos y consecuencias, lo que devenga en una pérdida de conciencia de lo que podrían sufrir las generaciones venideras y asume de manera tácita que algunas fuerzas con interés propio de cualquier índole moverán el tablero y los hilos para su conveniencia y por consecuencia se supone que existirá energía de manera ilimitada en la vida de todos, rayando en lo utópico.

El contexto internacional energético de los últimos años se encuentra marcado por diferentes fenómenos. En primer lugar, se viene asistiendo a una revolución tecnológica en el ámbito de las energías renovables y, también, en cuanto a combustibles fósiles no tradicionales como el "shale gas", todo lo cual está modificando la histórica composición de la matriz energética de los países a nivel mundial. Al impacto de estos cambios tecnológicos, se suma el crecimiento en el intercambio de energía en los mercados internacionales y a través de las integraciones energéticas regionales. Por otra parte, la incorporación de electricidad a nuevas actividades plantea desafíos en cuanto al incremento de la demanda eléctrica y del potencial de eficiencia energética.

Otro fenómeno que está ocurriendo es la preocupación de la comunidad internacional que busca descarbonizar la matriz energética mundial con el objeto de reducir lo máximo posible las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los consumidores de energía, que antes se constituían como pasivos receptores de la energía producida en fuentes distantes de sus residencias, industrias o comercios, hoy comienzan a evolucionar y transformarse en entes activos, productores, gestores y consumidores interesados del tipo de energía que utilizan, modificando

el flujo de la energía desde “abajo hacia arriba”. Lo anterior, facilitado por redes inteligentes que generan más y mejor información para los diversos agentes del sistema, lo que hace más resilientes, gestionables y eficientes los sistemas eléctricos.

La participación ciudadana también plantea desafíos en cuanto a la instalación de infraestructura energética, el uso de determinadas fuentes de energía y las políticas que las determinan. Se debe considerar el involucramiento ciudadano en el proceso de toma de decisiones ya que hoy en día constituyen un ente más que activo en el contexto energético.

Todo lo anterior, junto con las modificaciones que se están dando en los patrones de consumo y producción no energética, han cambiado no sólo la configuración de las matrices energéticas sino también los objetivos y prioridades de la política energética en general, dando cuenta de una gran transición en cuanto al tema que se está produciendo en el mundo y en Chile.

2.1.1. Matriz energética

En los últimos 40 años, alrededor del mundo el consumo y la producción energética se han duplicado. Los factores determinantes de este fenómeno son, entre muchos otros, el crecimiento económico mundial, el incremento de la capacidad productiva de los países, el mayor tamaño del sector de transporte y el aumento creciente y constante de la población mundial.

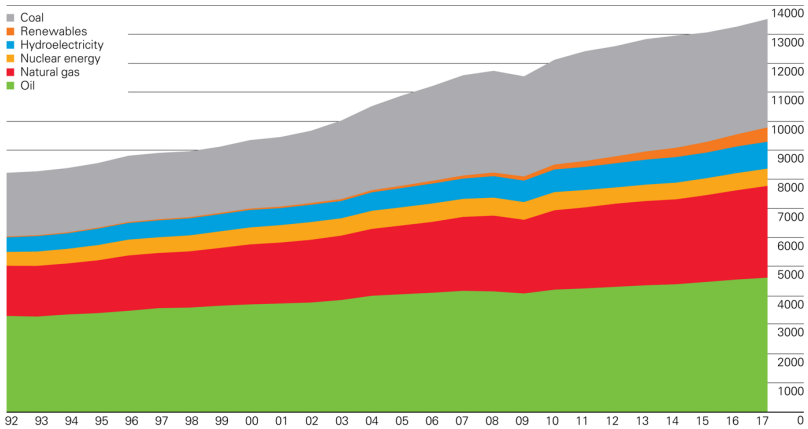

Figura 2.1: Consumo de energía primaria mundial equivalente en galones de petróleo (Fuente: (Statistical, 2018)).

Como se ve en la figura 2.1 desde hace casi 30 años que el petróleo sigue liderando como energía primaria de mayor uso a nivel mundial, seguida del carbón y el gas natural, y mucho más atrás la hidroelectricidad y la energía nuclear. Es un hecho que el consumo se ha mantenido con estos combustibles como eje

primario, pero cabe destacar la irrupción, en mucho menor cuantía, de las energías renovables, las cuales hace 3 décadas practicamente no eran consideradas, ni siquiera para aparecer en las estadísticas, y hoy que con el paso de los años se han hecho un espacio en el mapa de consumo mundial, mostrando un constante crecimiento que ilusiona con un futuro energético más amigable con el medio ambiente.

2.2. Estructura del mercado eléctrico en el país

El mercado eléctrico chileno esta compuesto por 3 partes fundamentales, de acuerdo a como se constituyó hace ya casi 40 años en 1982 por decreto de la Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE), constituyéndose así la columna que sostiene el actual mercado, la generación, transmisión y distribución, junto con otras modificaciones que incorporó y que propiciaron la competencia y la introducción de la privatización del sector eléctrico chileno. Entre los grandes avances que se llevaron a cabo con la promulgación de la ley fue establecer un modelo de operación al mínimo costo global y fomentar que las empresas de generación puedan suscribir contratos de abastecimiento de manera independiente con clientes libres y empresas distribuidoras (Palma et al., 2009).

En el país se identifican actividades de generación, transmisión y distribución, las cuales son desarrolladas por empresas privadas, mientras que la autoridad cumple el rol de regulador y fiscalizador, estableciendo criterios en pos de la expansión económica y eficiente del sistema eléctrico.

Hasta el 21 de Noviembre de 2017 Chile se regía por dos grandes sistemas interconectados: el Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), además de los Sistemas Medianos (SSMM) de Aysén y Magallanes. Desde esta fecha, los dos primeros se interconectaron tras la energización y sincronización de las líneas eléctricas comprendidas por Kapatur-Los Changos, en la zona de Mejillones; Los ChangosCumbres, Cumbres-Nueva Cardones y Nueva Cardones y Cardones, en la zona de Copiapó. La finalidad de este paso es aprovechar la energía limpia que se genera en diversas zonas de Chile, seguridad en la entrega de suministro eléctrico, ingreso de nuevos actores al sector, y con vistas al futuro, aumentar la interconexión internacional con países vecinos.

Las empresas generadoras coordinan la operación de sus centrales a través del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN). La función de este organismo es básicamente encargarse de velar por la seguridad del sistema y programar el despacho de las centrales con el fin de satisfacer la demanda en todo momento y ocasión al menor costo posible, sujeto a las restricciones de seguridad.

Aquel organismo público en el cual recae toda la responsabilidad del sector es el Ministerio de Energía, que debe llevar adelante los planes, políticas y normas para el desarrollo del sector eléctrico, junto con esto entrega concesiones para centrales hidroeléctricas. líneas de transmisión, subestaciones y zonas de distribución eléctrica. Del Ministerio depende la Comisión Nacional de Energía (CNE), organismo encargado de analizar precios, tarifas y normas técnicas a las que deben ceñirse las empresas del sector, y la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), entidad que fija los estándares técnicos y fiscaliza su cumplimiento.

2.3. Ley de net billing

La Ley 20.571 o también conocida como Net Billing detalla los fundamentos para la generación residencial y entrega a los consumidores la oportunidad de convertirse en un generador de energía eléctrica, con medios domiciliares de Energías Renovables No Convencionales o de instalaciones de cogeneración eficiente. Los clientes que cuentan con estas unidades de generación y que a su vez hayan cumplido con todo el protocolo de puesta en servicio estipulado en la ley, el reglamento y la norma técnica, se les hace el balance final de cada mes entre la valorización de la energía eléctrica que ha inyectado y la valorización de la energía que ha retirado de las redes (Debido a que la proporción no es igual entre la compra y la venta de energía eléctrica), esto se logra mediante la instalación de medidores electricos bidireccionales, lo que debe ser considerado, entre otros, como parte de los costos necesarios de implementar Net Billing. En resumidas cuentas el proceso sigue 4 simples pasos:

- El campo solar fotovoltaico convierte la energía solar en electricidad.
- El inversor transforma la electricidad producida por el campo solar de corriente continua a corriente alterna.
- La energía puede ser utilizada durante las horas de sol.
- El medidor bidireccional cuenta tanto la energía que se consume desde la red como aquella que se inyecta en forma de excedente generando dos cifras.

2.3.1. Matriz eléctrica

La capacidad instalada de generación eléctrica neta al año 2017 asciende a 22.580 MW. De esta cifra el 75,8 % corresponden al SIC y 22,4 % al SING, el restante 0,8 % se configura con los Sistemas Eléctricos Medianos respectivamente.

Por otro lado, el total de la capacidad instalada al año 2017 se ve claramente dependiente del recurso termoélectrico con un 55 %, seguido de un 27 % de hidroelectricidad convencional y un creciente porcentaje de 18 % de ERNC. Junto con esto, se registran 27 centrales de generación en prueba que en total alcanzan 490 MW, de los cuales el 86 % son ERNC como se ve en la figura 2.2.

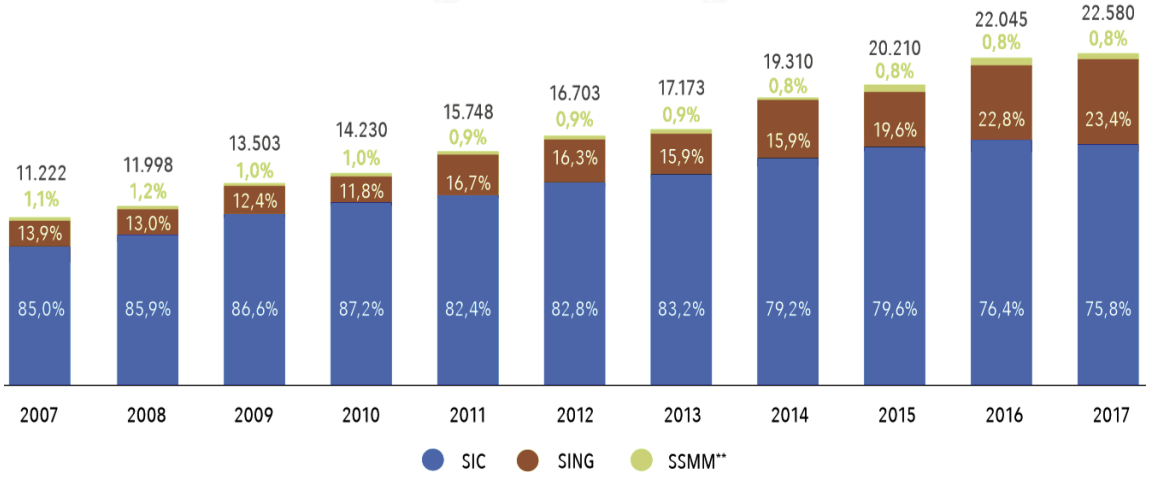

Figura 2.2: Evaluación de la capacidad de generación eléctrica neta instalada por sistema entre los años 2007 y 2017 en MW (Fuente: (CNE, 2017)).

Viendo la evolución los últimos 10 años en la matriz energética chilena se ve como han entrado nuevos actores a considerar para la generación eléctrica, a simple vista observando las figuras 2.3 y 2.4 se ve como entran a nuevos actores en la mesa, las ERNC van tomando fuerza, si hace 10 años practicamente no se consideraban en el mapa, hoy en día ya se ha entrado en razón sobre el potencial que Chile posee para explotar las ERNC, la generación solar fotovoltaica alcanza al 8 %, la biomoasa duplicó su participación estos últimos 10 años, la geotermia está recién entrando en el mercado, por contrapartida se ha reducido la dependencia al gas natural en un 7 %, pero aumentando el consumo de carbón y petróleo diesel, por lo que se puede inferir que aún hay mucho camino por delante para que las ERNC sean una opción real y considerable para las empresas privadas.

A partir del 1 de Enero de 2010 entraron en vigencia la Ley 20.257 o "Ley ERNC". Esta ley introdue la definición lelgal de Energías Renovables No COnvencionales y establece las tecnologías que son englobadas

Figura 2.3: Total Nacional de la capacidad de generación eléctrica neta instalada por tecnología en MW al año 2007 (Fuente: (CNE, 2017)).

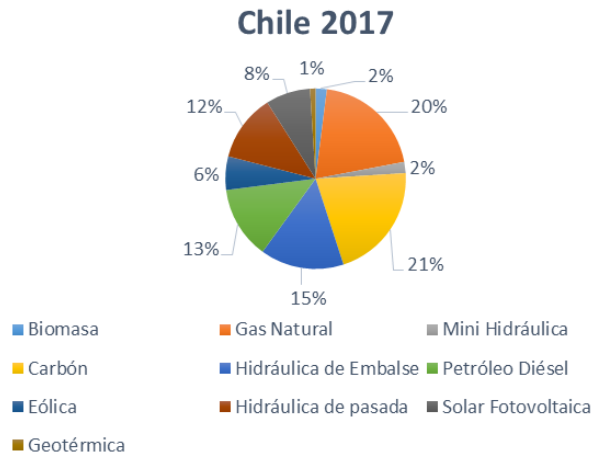

Figura 2.4: Total Nacional de la capacidad de generación eléctrica neta instalada por tecnología en MW al año 2017 (Fuente: (CNE, 2017)).

por esta categoría, y también define una exigencia a las empresas de generación para acreditar un porcentaje de inyección ERNC. En la figura 2.5 se puede ver la evolución que tuvo este cambio en la a lo largo de los años, donde lo exigido pasó a segundo plano ya que lo inyectado está muy por encima del marco legal, lo que a todas luces muestra la conveniencia del uso de las ERNC.

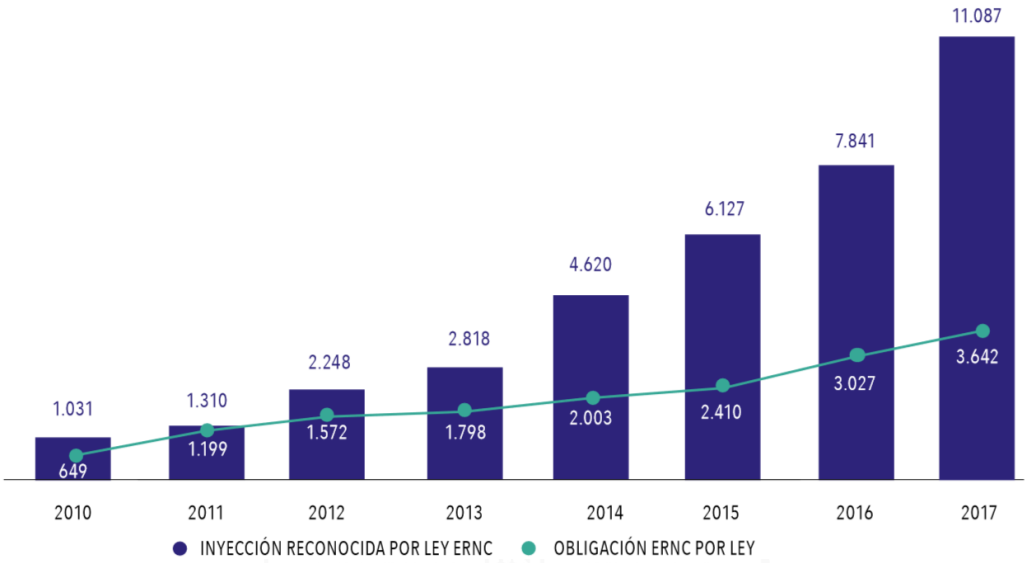

Figura 2.5: Evolución de inyección de ERNC desde vigencia de la Ley 20.257 en GWh (Fuente: (CNE, 2017)).

2.4. Tipos de fuentes energéticas

¿Qué es la Energía? vale la pena hacerse esta pregunta antes de abarcar un tema tan importante hoy en día y que tiene al mundo debatiendo por nuevas leyes que permitan salvaguardar los recursos energéticos para las nuevas generaciones en un planeta habitable. Definase Energía como *'Capacidad de realizar un trabajo'* según la Real Academia Española, y bajo una perspectiva económica se puede englobar como un recurso natural, primario o derivado, que permite realizar trabajo o servir de subsidiario a actividades economicas independientes de la producción de energía. Entonces es necesario hacer distinción entre energía primaria y secundaria.

No Renovables	**Renovables**
Petróleo	Energía Solar
Carbón	Energía Eólica
Gas Natural	Energía Marítima
Energía Nuclear	Energía Hidráulica
	Bioenergía
	Energía Geotérmica

Tabla 2.1: Ejemplos de energía primaria (Fuente: Elaboración propia)

No es difícil notar que a partir de las primarias se derivan las secundarias, como la electricidad, energía térmica y energía mecánica. De acuerdo al carácter de "limitado"que pueda tener una fuente energética en la Tierra es que se puede englobar en dos clases de fuentes energéticas: Las Energías No Renovables o Convencionales debido al alto conocimiento y uso que se tiene sobre ésta tecnología; y las Energías

Renovables o No Convencionales.

2.4.1. Energías no renovables

La energía no renovable se obtiene de un recurso natural limitado, por lo que una vez que éste se agote, no podrá sustituirse, de este modo, cuando se agoten las reservas de los recursos que permiten generar una energía no renovable, ésta deja de existir.

Las energías no renovables tienen su origen a partir de combustibles fósiles o combustibles nucleares. En el primer grupo podemos encontrar al petróleo, el carbón y el gas natural. Estos combustibles son fáciles de extraer, pero sus reservas pueden agotarse en el corto o medio plazo. Por otro lado los combustibles fósiles tienen otras ventajas igualmente importantes como, por ejemplo, que son baratos o que poseen una larga disponibilidad en el tiempo. No obstante, expulsan gases contaminantes perjudiciales para el planeta en su totalidad.

Dentro de la clasificación de los combustibles fósiles se encuentran:

- **Petróleo**: Es la principal fuente energética del mundo desarrollado. En estado puro (crudo) tiene poca utilidad, por lo que requiere de procesos de refinación para ser aprovechable, obteniéndose así numerosos productos energéticos secundarios como petróleo combustible (fuel oil), petróleo diésel, gasolinas de motor y de aviación, kerosene, gas licuado de petróleo (o GLP), gas de refinería, entre otros. Estos productos son destinados principalmente al consumo del transporte y gran parte de los usos industriales y requerimientos residenciales.

- **Carbón**: El carbón es una roca sedimentaria formada por carbono, mezclado con otras sustancias. Su alto valor energético, su bajo costo de extracción y su facilidad para ser transportado 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.

- **Gas natural**: El gas natural 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. El principal uso del

gas natural es la generación de electricidad, donde se emplea en centrales termoeléctricas de ciclo combinado, uso no correspondiente a un consumo final.

Otra de las fuentes de energía primaria convencional es la **Energía Nuclear** o energía atómica, es aquella energía que se obtiene a partir de reacciones nucleares, es decir a partir de reacciones de partículas y núcleos atómicos. Estas reacciones pueden darse de forma espontánea o bien pueden ser provocadas por el ser humano. A saber, un átomo es la partícula más pequeña en el que se divide la materia. Dentro de cada átomo existe un núcleo y dentro de éste núcleo existen dos tipos de partículas, neutrones y protones. Estas dos partículas se mantienen unidas dentro del núcleo, la energía que mantiene esas dos partículas unidas es la energía nuclear, ésta puede ser utilizada para generar electricidad, pero para que esto se pueda llevar a cabo, primero hay que liberar esa energía a través de Fisión Nuclear o Fusión Nuclear.

2.4.1.1. Riesgos relacionados con las fuentes de energías fósiles

La utilización del carbón para la generación de electricidad tiene asociado los siguientes riesgos en las diferentes etapas de su ciclo de vida:

- En la minería produce un elevado riesgo de enfermedades respiratorias, además de enfermedades de tipo nervioso, por inhalación de polvo procedente del proceso de extracción.
- En la construcción de centrales no son superiores a los normales de otras actividades industriales. En ningún caso son catastróficos.

Mientras que lo que respecta a la operación se logra identificar:

- Trabajadores: riesgo a la salud relacionado con enfermedades respiratorias por la existencia de polvo de carbón y posible pérdida de la capacidad auditiva por el ruido.
- Población: están relacionados a las emisiones que se han señalado anteriormente provenientes de su combustión que ocasionan enfermedades respiratorias, toxicidad y cáncer

2.4.2. Energías renovables

Las energías renovables se caracterizan porque en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil no se consumen ni se agotan en una escala humana. Además, dependiendo de su forma de

explotación, también pueden ser catalogadas como renovables la energía proveniente de la biomasa, la energía geotérmica y los biocombustibles. Suelen clasificarse 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. Dentro de las convencionales, la más importante es la hidráulica a gran escala.

En Chile se define como fuentes de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) a la eólica, la pequeña hidroeléctrica (centrales hasta 20 MW), la biomasa, el biogás, la geotermia, la solar y la energía de los mares.

Últimamente se han dado discusiones sobre el futuro de la generación eléctrica en el país, por lo que se ha puesto en la palestra la temática de independencia energética y cambio climático. Respondiendo a estas demandas, el año 2008 se promulgó la Ley 20.257 o "Ley ERNC", la cual entre otras medidas clasifica a las energías renovables en convencionales y no convencionales como se mencionó anteriormente. 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 %.

2.4.2.1. Riesgos relacionados con las fuentes de energías renovables

Una central hidroeléctrica trae consigo una serie de transformaciones que modifican el curso de las aguas de los ríos. Estas transformaciones bien empleadas pueden utilizarse para el control de inundaciones, riegos, suministro de agua potable y para instalaciones industriales. Sin embargo, el riesgo más importante de esta forma de generar energía se concentran en los accidentes catastróficos derivados del hundimiento de presas o embalses. En su fase constructiva los accidentes que puedan ocurrir afectan principalmente a los trabajadores. En la operación de la central los riesgos son de tipo catastrófico, por rotura del muro de contención de la central o por perdida del asentamiento del mismo, tras un posible desplazamiento del mismo. En este caso de pone en libertad un gran volumen de agua, el cual puede producir daños catastróficos a la población cercana.

En el caso de las solares térmicas, se utilizan heliostatos o espejos, los riesgos los producen la luz reflejada en los espejos (pueden producir ceguera) y los fluidos con los que se trabaja, como sales de sodio, que en general son productos tóxicos. En el caso de las fotovoltaicas, el riesgo se produce en las fábricas donde se producen las fotoceldas ya que en este proceso hay riesgo de exposición a sustancias tóxicas y gases tóxicos y la toxicidad de ellos en caso de escape por accidente tiene también un riesgo a la salud

pública.

Un parque eólico está formado por un gran número de unidades eólicas, de elevada altura, con paletas de los aerogeneradores de grandes dimensiones sometidas a fuerzas del viento muy intensas. Por ello, el riesgo principal radica en el desprendimiento de las paletas cuando las condiciones del viento superan los límites de diseño. Si estos parques están cercanos al punto de consumo aparece entonces un riesgo para la población.

2.5. Justificación de este trabajo

Para nadie es un misterio que el crecimiento del consumo energético ha ido aumentando en los años de manera exponencial, por lo que pensar en un futuro donde se puedan mantener las costumbres y características de consumo que tiene la sociedad es prácticamente una utopía si es que no se toman cartas en el asunto de como solventar la creciente demanda energética al mismo tiempo que se logra combatir los graves problemas que generan el calentamiento global, la disminución de la capa de ozono, la lluvia ácida, además de una amplia gama de efectos nocivos de contaminación atmosférica que se producen por la generación de energía y el consumo irresponsable. Es por estas razones que las autoridades han estado aplicando gran cantidad de recursos para políticas públicas en pro de estos puntos, constituyéndose en instrumentos para que el Estado alcance los objetivos propuestos para mejorar el bienestar de las personas. La energía se debe entender como un motor del desarrollo económico y social, por lo que es de gran importancia asegurar el suministro futuro para las próximas generaciones. La manera en cómo se obtiene y utiliza la energía tiene también incidencia directa en el crecimiento económico, pero a su vez, genera efectos en el cuidado del medio ambiente y en las oportunidades de desarrollo de las personas. Para todo lo anterior no sólo se debe depender de la iniciativa de las personas y su autogestión, sino que también de un rol activo del Estado y que conduzca a traves de sus acciones a un sector energétio seguro, inclusivo, competitivo y sostenible, cuyos beneficios se extrapolen a todos los ámbitos de la vida de los chilenos.

Sumado a lo anterior y la obligación del Estado ante esta potente temática, es necesario recalcar las característias provilegiadas que posee Chile para el desarrollo de tecnologías que permitan aprovechar la energía solar. Solo por mencionar uno, el Desierto de Atacama posee una de las tasas de irradiación solar más grandes del mundo y cielos que permanecen despejados prácticamente todo el año, convirtiendolo en uno de los lugares idóneos casi utópicos para el desarrollo y aplicación de tecnologías solares, mejor aún, esta zona concentra gran parte de la actividad minera, sector preponderante que constituye una de las bases si de

recursos económicos se habla a nivel país, la cual no está demás mencionar, es altamente intensiva en el uso de energía.

En los últimos años el mercado solar ha tomado un fuerte impulso, con un camino políticas estatales para fomentar el uso de las ERNC, subsidiando sistemas solares térmicos, o la ley de NetBilling que se transforma en una gran oportunidad para que los consumidores se transformen en "micro productores"de energía al vender sus excedentes a la red central, no obstante aún no se logra explotar el verdadero potencial de estas tecnologías, siendo una barrera importante la inversión inicial que llega a desincentivar a los más entusiastas.

En concreto se busca generar un sondeo que logre distinguir las zonas del país con mayor potencial para el uso de tecnologías híbridas, algo desconocidas en el mercado chileno, donde se puede obtener energía eléctrica y térmica a partir del mismo dispositivo, ahorrando en espacio y eficiencia, además de discutir sobre la influencia del patrón de consumo energético sobre el rendimiento económico de este tipo de proyectos, de tal forma de poder sensibilizar los beneficios de las ERNC con estudios que ayuden a la comprensión y acerquen a la ciudadanía a estas nuevas tecnologías que pueden ser un alivio para la problemática energética que ya se está viviendo y puede llegar a niveles críticos para las futuras generaciones.

3 | Análisis bibliográfico

3.1. Tópicos sobre transferencia de calor

La energía se puede transferir mediante las interacciones de un sistema con su alrededor, estas interacciones se denominan trabajo y calor. ¿Qué es la transferencia de calor? se define como *"La energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas"* (Bergman et al., 2011b), por lo tanto siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor.

Existen diferentes tipos de transferencia de calor, a los cuales se les llama *modos*. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario (que puede ser sólido o un fluido) se utiliza el término *conducción* para referirse a la transferencia de calor que se produce a través del medio. Por otro lado, el término *convección* se refiere a la transferencia de calor que ocurre entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. El tercer modo se denomina *radiación*. Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Por tanto, en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas.

3.1.1. Conducción

Cuando se habla de conducción se debe evocar de inmediato conceptos de actividad atómica y molecular, pues hay procesos en estos niveles que sustentan este modo de transferencia de calor. La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas. En presencia de un gradiente de temperatura, la transferencia de energía por conducción debe ocurrir en la dirección de la temperatura decreciente.

Ejemplos de transferencia por conducción abundan en la vida cotidiana, el extremo expuesto de una

cuchara metálica introducida súbitamente en un taza de café caliente se calentará debido a la conducción de energía a través de la cuchara. En un día invernal hay una pérdida significativa de energía de una habitación caliente hacia el exterior; esta pérdida se debe principalmente a la transferencia de calor por conducción a través de la pared que separa el aire de la habitación del aire exterior.

Se pueden cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de ecuaciones o modelos apropiados, los cuales sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Para la conducción de calor se utiliza la *Ley de Fourier*, el caso más explicativo es donde se utiliza una pared plana unidimensional con una distribución de temperatura $T(x)$, con el modelo:

$$q_s'' = -k\frac{dT}{dx} \tag{3.1}$$

El flujo de calor o transferencia por unidad de área q_s'' es la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección de x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx en esta dirección. k representa la çonductividad térmicaz es una propiedad de transporte que caracteriza al material. El signo menos es consecuencia de que el calor se trasnfiere en la dirección de la temperatura decreciente. De esta forma el gradiente se expresa como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \tag{3.2}$$

Mientras que el flujo de calor como:

$$q_s'' = -k\frac{T_2 - T_1}{L} \tag{3.3}$$

Esta ecuación proporciona un flujo de calor, es decir, la velocidad del calor transferido por unidad de área. Por lo tanto el calor transferido por conducción por unidad de tiempo, q_x W a través de una pared plana de área A corresponde al producto del flujo por el área. $q_x = q_x''A$ (Bergman et al., 2011a).

3.1.2. Convección

En simples palabras la convección en sí es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido, o la transferencia de energía que ocurre dentro de un fluido debido a los efectos combinados de conducción y movimiento global del mismo. Existen dos clasificaciones de acuerdo a la naturaleza del flujo, *convección forzada* cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba, o vientos atmosféricos; o convección libre (o natural) cuando el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo es como sigue:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \tag{3.4}$$

Donde q'' corresponde al flujo de calor por convección el cual es proporcional a la diferencia de temperaturas de la superficie y del fluido, T_s y T_∞, respectivamente. Esta expresión es conocida como la *ley de enfriamiento de Newton*, y la constante de proporcionalidad h se denomina *coeficiente de transferencia de calor por convección* el que depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido de transporte (Bergman et al., 2011a).

3.1.3. Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita, puede provenir de sólidos, líquidos y gases. Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o fotones). Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa.

La radiación que una superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área W/m^2. Existe un límite superior

para la potencia emisiva, establecido por la *ley de Stefan-Boltzmann*:

$$E_b = \sigma T_s^4 \tag{3.5}$$

Donde E en la potencia emitida superficial, T_s es la temperatura absoluta K de la superficie y σ es la constante de Stefan-Boltzmann (σ = 5,67x10^{-8} W/m^2 k^4). A dicha superficie se le denomina radiador ideal o cuerpo negro (Bergman et al., 2011a).

El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dado por:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \tag{3.6}$$

Donde ϵ es una propiedad radiativa de la superficie llamada *emisividad*, que va entre el rango $0 \leq \epsilon \leq 1$ proporcionando una medida de eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro, lo cual depende del material de dicha superficie y del acabado.

La radiación puede incidir sobre una superficie desde sus alrededores, designando a la velocidad con que esa radiación incide sobre un área unitaria de la superficie como *irradiación G*.

Una parte o toda de la irradiación puede llegar a ser absorbida por la superficie, incrementando la energía térmica del material, denominándose así la absortividad, la cual afecta la velocidad a la que la energía radiante es absorbida por área superficial unitaria:

$$G_{abs} = \alpha G \tag{3.7}$$

Donde $0 \leq \alpha \leq 1$. Si $\alpha \leq 1$ y la superficie es *opaca*, partes de la irradiación se reflejan, por otro lado si la superficie es semitransparente, parte de la irradiación también se transmite.

3.2. Tópicos de energía solar

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra, está conformado por materia gaseosa y es el elemento de mayor tamaño del Sistema Solar. Posee una temperatura superficial de 5777 K aproximadamente. Su composición química está dada principalmente por átomos de hidrógeno, los que constituyen el 92,1 % de su composición, estos reaccionan 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/m^2 en la superficie solar, que es emitida al espacio en todas direcciones de manera difusa. 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) (Bustos et al., 2016).

Toda materia; ya sea sólido, líquido o gaseoso; que se encuentre a una temperatura por sobre el cero absoluto (0 K ó -273,15 °C), emite 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. De esta forma 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:

- **radiación directa**: Aquella que proviene del disco solar sin ser dispersada por la atmósfera (y que produce sombra), incide sobre una superficie en dirección de los rayos solares.

- **radiación difusa**: Radiación solar que ha cambiado su dirección debido a la interacción atmosférica, principalmente debido a las nubes. Incide sobre una superficie desde toda la bóveda celeste, incluyendo la radiación reflejada, que corresponde a la radiación que se refleja en los distintos objetos y superficies.

La energía contenida en la radiación directa es mucho mayor que la que entrega la radiación difusa, esta última se produce principalmente por la presencia de nubes, donde los rayos solares chocan y cambian su dirección en muchos sentidos, mientras la radiación directa se hace evidente en días soleados, cuando la temperatura ambiente sube considerablemente. De esta manera, la radiación global es la suma de ambas (Erbs et al., 1982).

La radiación que proviene del Sol posee como características distintas longitudes de ondas, qué basicamente es la distancia real que recorre una perturbación en un determinado intervalo de tiempo, de esta forma se puede definir un Espectro de Irradancia Solar donde se verifica que la radiación del Sol no es repartida de manera homogénea, clasificándose en ultravioleta (menor a 400 nm), espectro visible (400 a

700 nm) e infrarroja (superior a 700 nm). La longitud de onda relevante para aplicaciones de interés solar se encuentra entre el rango de los 200 nm a 2000 nm.

3.2.1. Radiación solar sobre superficies con inclinación

Se le denomina radiación normal incidente, a la radiación recibida en una superficie perpendicular a los rayos provenientes del sol. Para recibir la radiación normal durante todo el día, es necesario que la superficie receptora se mueva de Este a Oeste siguiendo la posición del sol. Si la superficie que recibe la radiación está horizontal, es decir, perpendicular al radio de la tierra, se le denomina radiación horizontal. Usualmente, es más sencillo recolectar la energía solar en una superficie que no se mueva a lo largo del día, pero se intenta encontrar un ángulo de inclinación (δ) para la superficie receptora tal que se optimice la cantidad de radiación recibida durante el día y/o el año, a esto se le denomina radiación incidente en un plano inclinado (Molina et al., 2017).

Para medir la radiación solar existen hoy en día prácticamente dos tipos de instrumentos, estos trabajan en base a la longitud de onda del espectro solar que se está midiendo y la dirección de los fotones que llegan a una superficie (ya sea directa, difusa o global).

- Piranómetro: Utilizado para medir radiación total, a saber, directa y difusa, ésta es absorbida casi en su totalidad por una superficie horizontal ennegrecida, para una gama de longitudes de onda muy amplia.
- Pirheliómetro: Este aparato requiere de un sistema móvil acoplado que siga la trayectoria del Sol, ya que es utilizado para medir la radiación normal incidente y para ello requiere que su ubicación sea perpendicular a la posición del Sol.

3.2.2. Ángulos solares

Llámese a la relación geométrica entre una plano con cualquier orientación respecto al planeta Tierra y la radiación solar del haz entrante (la posición del Sol) (Benford y Bock, 1938).

- Latitud: Distancia angular que hay desde un punto de la superficie de la Tierra hasta el paralelo del ecuador; se mide en grados, minutos y segundos sobre los meridianos.
- Declinación: Posición angular del sol al mediodía solar, es decir, cuando el Sol está en el meridiano

local. La ecuación de Cooper 3.8 la define como:

$$\delta = 23,45 sin(360(\frac{284+n}{365})) \tag{3.8}$$

Con n correspondiente al día del año.

Tambíen es importante conocer la posición del sol en el cielo (Duffie y Beckman, 2013):

- Zenit Solar: Ángulo entre la vertical y la línea del Sol, o en otras palabras, el ángulo de incidencia de radiación del haz sobre una superficie horizontal.
- Altitud Solar: Ángulo entre la horizontal y la línea al Sol.
- Azimut Solar: Ángulo entre la proyección de los rayos solares en el plano horizontal medido desde el sur hacia el hemisferio norte.

3.2.3. Factores de incidencia en la recepción de energía solar en la Tierra

En promedio la radiación que logra ingresar a la atmósfera es de 1353 W/m^2 (Duffie y Beckman, 2013) (también llamado constante solar).

Como ya se ha mencionado, esta energía se absorbe, refleja y dispersa en el ambiente, principalmente debido al efecto de las nubes, partículas y moléculas de las que está compuesta la atmósfera. Factores como la composición y el grosor de la atmósfera afectan dramáticamente la fracción de energía que finalmente llega a la superficie del planeta. También es importante mencionar que el punnto máximo de radiación se alcanza cuando el Sol está directamente sobre un sitio (por lo general cerca del medio día) y disminuye mientras mas se acerque al horizonte. Lo mismo ocurre durante el año, alcanzando mayores radiaciones en verano y declinando en invierno.

- **Factores astronómicos**: La Tierra posee movimientos de rotación, traslación y precesión. El primero corresponde al giro que hace sobre su propio eje durante un período de 24 horas, generando el día y la noche. La traslación es el movimiento elíptico que se describe alrededor del Sol con un ciclo de 365,25 días, la característica elíptica propicia un periodo en que la Tierra está mas cerca del Sol (perihelio) produciendo diferencias de hasta 3,5 % en la energía que llega al planeta. Por último el movimiento de precesión corresponde al desplazamiento en la orientación del eje de rotación de la Tierra, causado por la gravedad del Sol, la Luna y otros planetas. Es el movimiento de traslación de la Tierra, que sumado

a la inclinación del eje terrestre con respecto al plano orbital, los que causan que en el hemisferio norte y sur se reciban diferentes cantidades de energía durante el año.

- **Factores geográficos**: Latitud, grosor de la atmósfera y la altura por sobre el nivel del mar inciden notablemente sobre la cantidad de radiación solar que recibe el planeta en determinadas zonas. Las zonas cercanas al ecuador reciben directamente los rayos solares, y a medida que aumenta la latitud, mayor es el ángulo cenital, por lo tanto crece el área iluminada por un haz de luz, lo que lleva a que la energía sea distribuida en un área mayor, distinguiendo tres zonas geográficas debido a diferencias de la latitud; intertropical, temppladas y polares (ésta ultima de las mas frías debido a que los rayos solares caen muy oblicuos). La atmósfera terrestre refleja y absorbe los rayos solares actuando como una especie de filtro, por lo que no es difícil inducir que mientras más densa sea la atmósfera, menor energía recibirá la superficie terrestre. Para hacerse una idea, en el ecuador el espesor alcanza unos 14 km, la que comienza a adelgazar conforme se avanza a los polos, donde se llega a los 8 km, mientras que en las zonas altas la energía recibida es mayor puesto que a mayor altitud el grosor de la atmósfera es menor.

3.3. Datos metereológicos

El Ministerio de Energía ha puesto a disposición del público, de forma gratuita, diferentes herramientas en línea y de tipo geográficas denominadas “Exploradores”, los cuales han sido diseñados como herramientas en línea destinadas al análisis de los recursos renovables que permiten, de manera gráfica, realizar una evaluación preliminar del potencial energético sobre cualquier sitio definido por el usuario, aunque no sustituye mediciones en terreno.

En particular, el Explorador Solar presenta la información pública más detallada que existe actualmente sobre el recurso solar en Chile. Los datos que encontrará en este sitio han sido generados a partir de modelos atmosféricos y datos satelitales, para el período comprendido entre los años 2004 y 2016, con una resolución espacial de 90 metros.

Además de poder conocer el recurso solar en el país, el usuario puede encontrar herramientas para el cálculo de generación fotovoltaica y sistemas solares térmicos. Además se cuenta con una red de estaciones de medición de recursos meteorológicos, con fines energéticos, específicamente recurso eólico y solar.

Además del Explorador Solar, existe el Registro Solarimétrico para la República de Chile (CNE,

2008), a partir del cual se pueden obtener la irradiación total horaria en superficie horizontal o inclinada para cada hora por extensos períodos de tiempo.

3.4. Generador fotovoltaico

El generador fotovoltaico corresponde a un dispositivo que convierte la energía solar en energía eléctrica de corriente continua (DC). El fenómeno físico que permite la conversión de la energía es el efecto fotoeléctrico, el cual implica procesos como la absorción de radiación, transporte de electrones y mecanismos de recombinación que son determinados por las propiedades electroópticas del semiconductor. El generador fotovoltaico es formado por un arreglo de células o celdas solares conectadas internamente para formar un panel. A su vez, dichos paneles son cableados entre sí y configurar el arreglo de paneles (figura 3.1).

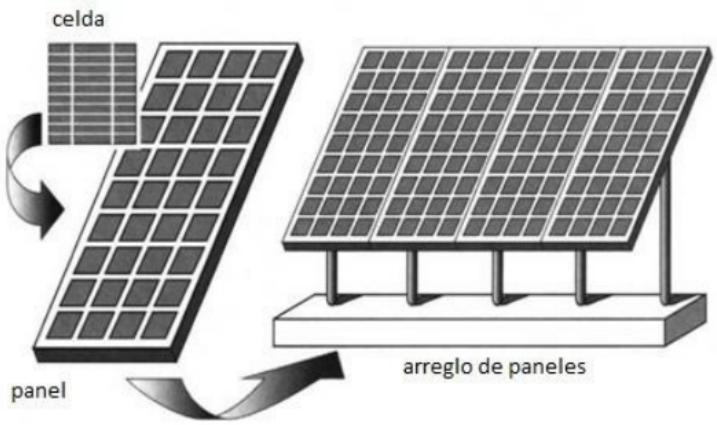

Figura 3.1: Celdas, paneles y arreglo de paneles. Tyagi et al. (2012).

Las celdas más comunes de la actualidad son hechas de silicio en diferentes configuraciones (amorfo, policristalino y monocristalino), las que a nivel microscópico tiene la siguiente estructura básica:

- Electrodo transparente.
- Capa de semiconductor tipo p.
- Capa de semiconductor intrínseco.
- Semiconductor tipo n.
- Electrodo metálico.

- Plástico opaco.

El grosor total de las primeras 5 capas es de 1 nanómetro, mientras que la ultima capa de plástico opaco es de 20 nanómetros . La función de los electrodos, tanto el transparente como el metálico, es facilitar el transporte de electrones. En la actualidad la mayor parte de las celdas comercializadas posee en la parte superior una capa antireflectante para mejorar la absorción de la radiación Miller (2005).

A nivel macroscópico, los paneles fotovoltaicos poseen una capa lisa de vidrio templado para protegerlo de esfuerzos mecánicos sin disminuir la absorción de luz, mientras que por el lado trasero posee una superficie opaca de protección. Entre ambas capas de protección del panel las celdas van selladas con un pegamento transparente de silicona (EVA). En los bordes del mismo se coloca un marco metálico para proteger también las celdas de golpes y vibraciones.

3.4.1. Estructura de un panel fotovoltaico

La parte más importante de un panel fotovoltaico es el conjunto de células fotovoltaicas que son las encargadas de la transformación de la radiación solar en energía eléctrica. El resto de elementos que forman parte de un panel solar tienen la función de proteger y dar firmeza y funcionalidad al conjunto.

A grandes rasgos las células o celdas fotovoltaicas están encapsuladas con vidrio reforzado y varias capas de material plástico. Posteriormente, todo este conjunto se refuerza formando un marco exterior con perfiles metálicos de aluminio.

Actualmente los paneles solares fotovoltaicos normalmente presentan la siguiente estructura:

- Cubierta Frontal.
- Capas encapsuladas.
- Marco de apoyo.
- Protección posterior.
- Caja de conexiones eléctricas.
- Células fotovoltaicas.

Cubierta frontal: Tiene una función principalmente protectora ya que sufre la acción de los agentes

atmosféricos. Se utiliza el vidrio templado con bajo contenido en hierro, ya que presenta una buena protección contra los impactos y es muy buen transmisor de la radiación solar. Dependiendo de la calidad del cristal protector puede incluso en algunos casos bajar el rendimiento del panel solar.

Capas encapsuladas: Encargadas de proteger las células solares y sus contactos. Los materiales empleados (etil-vinil-acetileno o EVA) proporcionan una excelente transmisión a la radiación solar, así como una nula degradación frente las radiaciones ultravioletas. El EVA es un copolímero termoplástico de etileno y acetato de vinilo, que actúa como aislante térmico y transparente para dejar pasar los rayos solares hasta las células fotovoltaicas. Aporta cohesión al conjunto del panel al rellenar el volumen existente entre las cubiertas frontal y trasera, amortiguando así las vibraciones e impactos que se pueden producir.Es importante mencionar los problemas más importantes que presentan con los copolímeros como la EVA, resaltando su excesiva plasticidad (cuando se estiran, no recuperan su posición original), gran adherencia al polvo, lo que provoca una disminución en la transmisividad a la radiación solar, y su baja vida útil, que suele condicionar la vida útil de todo el módulo.

Marco de apoyo: Aquella parte que da robustez mecánica al conjunto. El marco de apoyo de un panel solar permite su inserción en estructuras que agruparán a módulos. Normalmente es de aluminio aunque también puede ser de otros materiales. De todos modos, es importante que se construya con un material resistente a las diferentes situaciónes climáticas.

Protección posterior: Su finalidad es proteger contra los agentes atmosféricos, ejerciendo una barrera infranqueable contra la humedad. Normalmente, se utilizan materiales acrílicos, Tedlar o EVA. A menudo son de color blanco, ya que esto favorece el rendimiento del panel debido al reflejo que produce en las células. El Tedlar o PVF es un polímero termoplástico, estructuralmente similar al PVC (polyvinyl chloride). Tiene una baja inflamabilidad, baja permeabilidad a los vapores y una excelente resistencia al desgaste por las condiciones atmosféricas.

Caja de conexiones eléctricas: Lugar donde se da una continuidad al circuito eléctrico, básicamente de la caja salen dos cables, el positivo y negativo, incluso en algunas se tiene una toma de tierra que se utiliza para instalaciones de potencia elevada.

Células fotovoltaicas: Ya mencionadas en el comienzo, se trata de dispositivos semiconductores capaces de generar electricidad a partir de la radiación solar.

3.4.2. Montaje y disposición de paneles solares

Dado que la radiación captada por los paneles depende del ángulo con que ésta incide (siendo máxima cuando es perpendicular al panel), existen dos tipos de estructuras (las más utilizadas) sobre las que se pueden montar los paneles:

- Estructura fija: tal como dice su nombre, los paneles se ubican en el mismo plano, en grupos, sobre estructuras metálicas fijas que poseen una cierta inclinación con respecto a la horizontal, de tal manera de optimizar la radiación captada durante el día, considerando la trayectoria del sol sobre el cielo. Cabe destacar que el ángulo de inclinación de los paneles, con respecto a la horizontal, con que deben ser instalados depende exclusivamente de la latitud geográfica donde se ubica la central (que determina la trayectoria del sol sobre el cielo a lo largo del año). Como norma general para determinar la inclinación de los paneles se tiene (Hidalgo, 2006):

  1. Una inclinación igual a la latitud del lugar maximiza la radiación captada promedio anual.

  2. Una inclinación igual a la latitud + 15° maximiza la radiación captada promedio durante los meses de invierno.

  3. Una inclinación igual a la latitud - 15° maximiza la radiación captada promedio durante los meses de verano.

- Seguidores: estructura metálica sobre la que se montan varios paneles en un mismo plano. Éstas pueden variar su inclinación ya sea en uno o dos ejes mediante el uso de motores eléctricos, con el objetivo de realizar un seguimiento de la trayectoria del sol durante el día, de tal forma que la radiación incida perpendicular a los paneles durante la máxima cantidad de tiempo, optimizando así la cantidad de potencia generada. Adicionalmente los seguidores deben estar conectados a un computador que anide el software de control de movimiento de la estructura, de tal manera que ésta siga en todo momento la posición de máxima potencia generada. En la actualidad los seguidores más grandes disponibles a nivel comercial son del orden de los 100 m^2 de superficie. Cabe destacar que esta alternativa, junto a otras (como por ejemplo el uso de paneles curvos concentradores de radiación) no es muy utilizada en los proyectos actuales debido a su alto costo. A modo de ejemplo, se puede decir que un seguidor es más costoso que todos los paneles que es capaz de soportar, por lo tanto, desde el punto de vista del inversionista, resulta más rentable instalar una mayor cantidad de paneles fijos que hacer uso de estas estructuras (Miller, 2005).

3.5. Colector solar

Un colector solar es un dispositivo que recolecta la energía recibida por el sol y eleva la temperatura de cierto fluido con la finalidad de aprovecharlo para diferentes usos. Se pueden clasificar en dos grandes grupos, aquellos captadores de baja temperatura, focalizados en un uso doméstico de calefacción. agua caliente sanitaria y climatización de piscinas, y por otro lado los captadores de alta temperatura, que se conforman mediante espejos, requeridos para producir vapor que mueve una turbina que generará energía eléctrica.

Estos colectores están basados en el concepto del .efecto invernadero"que se logra generar en el interior del aparato, éste se ve beneficiado por la cubierta de vidrio propiciando el efecto ya dicho. La radiación solar es absorbida por la placa aumentando su temperatura,de esta forma la placa comienza a emitir radiación de onda larga en el espectro infrarrojo, la que no sale al exterior debido a la barrera es que se tranforma el vidrio que ahora es un actor reflejador. El calor obtenido por la placa se transfiere al circuito de fluido de trabajo (agua comúnmente). Es importante hacer el alcance que el sistema en su totalidad debe estar bien aislado, sobre todo el contenedor donde se almacena el agua, que es por donde se generan las mayores pérdidas, en la figura 3.2 se logra apreciar el funcionamiento de estos.

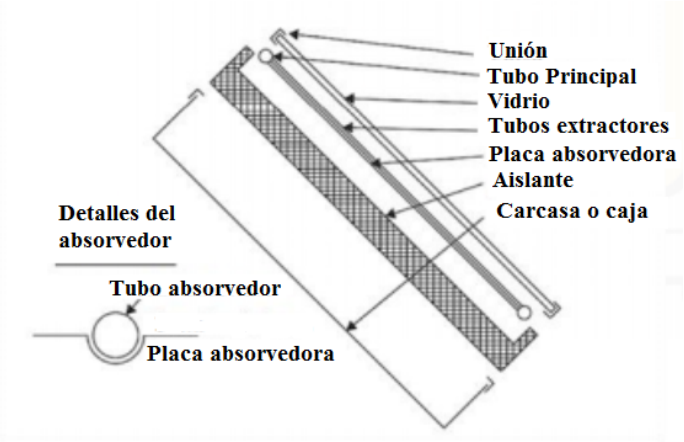

Figura 3.2: Sección Transversal de un colector solar plano (Fuente: (Kalogirou, 2013)).

Los elementos básicos para poder llevar a cabo la instalación de este tipo de sistemas son:

- Captadores: Captan la radiación solar y calientan el fluido caloportador que circula por el dispositivo.
- Circuito hidráulico: Lugar por el cual transita y se transporta el fluido calentado por los captadores.
- Intercambiador de calor: En la instalación solar térmica se debe ceder el calor trasnportado mediante

un intercambiador de calor. El circuito cerrado que une los captadores se denomina circuito primario, mientras que el circuito secundario corresponde al que parte del intercambiador hacia el depósito de acumulación solar. Los intercambiadores pueden ser externos al depósito, como los intercambiadores de placas; o bien pueden ser interiores, como los del modo serpentín, en cuyo caso se trataria de interacumuladores.

- Acumulación: Como es de esperar, la energía solar térmica no se consume en su totalidad de manera inmediata, ya que su utilización depende de la demanda de agua caliente en cada momento, de esta forma se debe almacenar para que se pueda suministrar a medida que se va demandando. ¿Cómo se consigue ésto? con la utilización de acumuladores o interacumuladores, en palabras simples, depósitos con capacidad y aislamiento suficiente para evitar en lo posible las pérdidas de energía.

- Bombas de circulación: Con el fin de mover los caudales de fluidos necesarios y vencer las pérdidas de carga de los circuitos.

- Energía Auxiliar Convencional: En un marco idealista se esperaría una radiación contante a toda hora y una demanda sin grandes oscilaciones, en la práctica esto no ocurre y existen periodos de baja radiación térmica o con altas demandas de consumo, por lo que se requiere de un sistema de apoyo que logre calentar el agua necesaria, independiente del sistema solar, denominado generador auxiliar. Por lo general estos sistemas son a base de calderas que comienzan a calentar el agua a la temperatura prefijada.

En las pequeñas instalaciones para agua caliente sanitaria es común encontrar todos estos elementos anteriormente mencionados en uno solo, formando lo que comunmente se conoce como equipo compacto o kit´s.

El modelo de energía tuvo un primer acercamiento con H. Hottel y B. Woertz (Hottel y Woertz, 1942), para que años despues el mismo Hottel junto con su alumno Whillier presentarán la base para el desarrollo de estos aparatos.

$$\dot{q}_u = A_c F_r [I_t(\tau\alpha) - U_L(T_{in,c} - T_{amb})]^+ \tag{3.9}$$

Donde:

- A_c representa el área del colector solar

- F_r es el factor de remoción de calor del colector
- I_T es la irrandancia global sobre el plano inclinado
- $(\tau\alpha)$ el producto transmitancia-absortancia
- U_L el coeficiente de pérdida global de calor
- T_{in} y T_{amb} la temperatura de entrada al colector solar y la temperatura ambiente respectivamente

¿Qué indica el signo '+'? Si la diferencia de ganancia por radiación y las pérdidas del colector es mayor a cero se puede utilizar a conveniencia esta diferencia, de lo contrario la ganancia del colector es cero. También se puede obtener el rendimiento del colector de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{\dot{q}_u}{A_c I_T} = F_r[(\tau\alpha) - \frac{U_L(T_{in,c} - T_{amb})}{I_T}] \tag{3.10}$$

3.6. Colector híbrido térmico fotovoltaico

La mayor ventaja de la energía solar en comparación con otras formas de energía se debe a que es respetuosa con el medio ambiente y abundantemente disponible. Durante el siglo pasado, los combustibles fósiles recibieron la mayor parte de nuestras necesidades energéticas porque son mucho más baratos y más convenientes que la energía de fuentes alternativas. Los sistemas híbridos para la utilización de energía solar han atraído considerablemente la atención de científicos e ingenieros durante la última década debido a su mayor eficiencia y estabilidad de rendimiento en comparación con los dispositivos solares individuales. Tradicionalmente, los dispositivos destinados a utilizar energía solar se dividen en dos clases principales según el método de conversión: calor o electricidad, como los colectores térmicos y los módulos fotovoltaicos, respectivamente.

Los colectores de energía solar térmica son intercambiadores de calor especiales que convierten la radiación solar en energía térmica a través de un medio de transporte y/o fluido en movimiento. El componente principal de cualquier sistema solar es el colector solar. Este es un dispositivo que absorbe la radiación solar entrante, la convierte en energía térmica y la transfiere a través de un fluido (generalmente aire, agua o aceite).En la figura 3.3 se pueden ver la clasificación de éstos. En general, se utilizan como secador/calentador de aire para secar los productos agrícolas y/o aplicaciones de calefacción/refrigeración en combinación con

los calentadores auxiliares para el aire acondicionado de los edificios.

Los sistemas fotovoltaicos (PV) constituyen la forma más útil de aprovechar la energía solar convirtiéndola directamente en electricidad. Los dispositivos de conversión de energía, que se utilizan para convertir la luz solar en electricidad mediante el uso del efecto fotoeléctrico, se denominan células solares. Un sistema fotovoltaico se compone de células solares y componentes auxiliares. Convierte la radiación solar directamente en electricidad. En 1954, los investigadores de Bell Telephone Laboratories demostraron la primera conversión práctica de la radiación solar en energía eléctrica mediante el uso de una célula solar con un 6 % de eficiencia (Erbs et al., 1982). Con la llegada del programa espacial, las células fotovoltaicas hechas de silicio de calidad semiconductora se convirtieron rápidamente en la fuente de energía de elección para usar en satélites. Las eficiencias comunes de conversión de energía solar están entre 15 y 20 % (Chopra et al., 2004).

Sin embargo, hoy ha surgido una nueva área que incorpora ambos métodos de conversión de energía, que se puede llamar foto-termo-conversión (Tyagi et al., 2012). La conversión de energía solar en electricidad y calor con un solo dispositivo llamado colector térmico híbrido fotovoltaico (PVT). De esta forma, el calor y la potencia se producen simultáneamente y parece una idea lógica desarrollar un dispositivo que pueda cumplir con ambas demandas.

1. **Colector de líquido PV/T**: Al igual que el sistema de calentamiento de agua del colector de placa plana, los colectores térmicos fotovoltaicos líquidos (PVT) se utilizan para calentar el agua y, simultáneamente, la producción de electricidad para diversas aplicaciones domésticas e industriales (Erdil et al., 2008). El calentador de agua doméstico generalmente utiliza colectores de placa plana en conexión paralela y se ejecuta automáticamente con la acción del termosifón mientras que el sistema de calentamiento de agua industrial utiliza una serie de colectores de placa plana en serie y, por lo tanto, utiliza una bomba de agua fotovoltaica para mantener una flujo de agua dentro del colector.

2. **Colector de aire PV/T**: Tanto el aire como el agua se han utilizado como fluidos de transferencia de calor en colectores PVT prácticos, produciendo sistemas de PVT/aire y PVT/agua, respectivamente. Los sistemas PVT/agua son más eficientes que los sistemas PVT/aire debido a las altas propiedades termofísicas del agua en comparación con el aire. Sin embargo, los sistemas PVT / aire se utilizan en muchas aplicaciones prácticas debido a la baja construcción (uso mínimo de material) y costo de operación entre otros.

3. **Sistema concentrador de PV/T**: Los sistemas de concentración fotovoltaica (CPV) pueden operar a

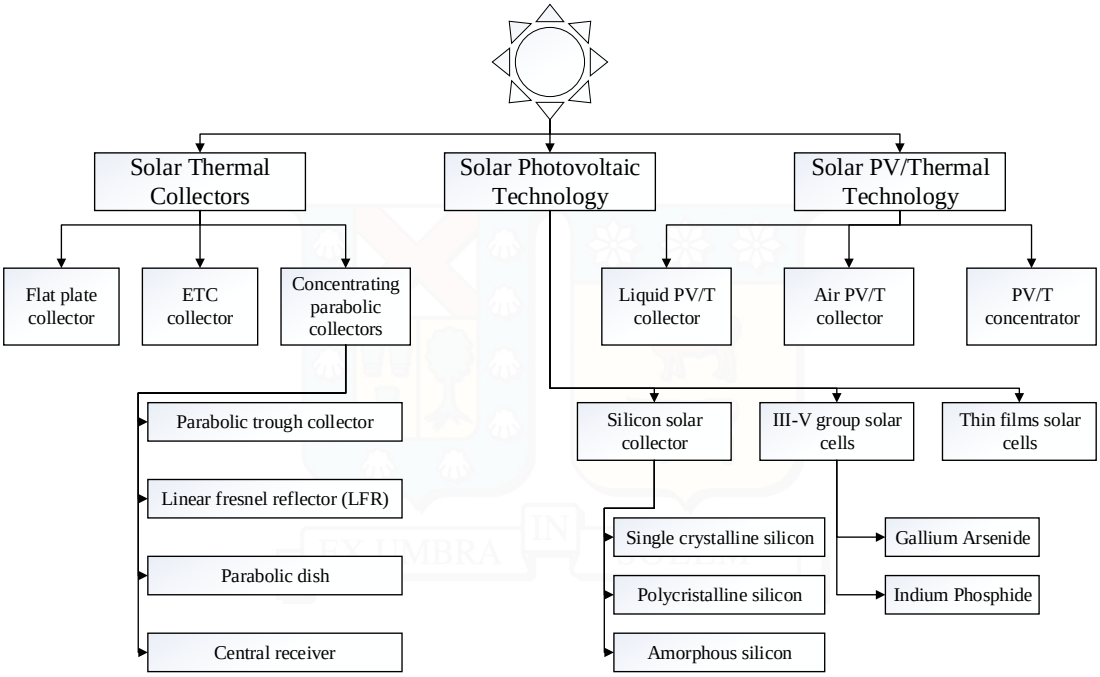

Figura 3.3: Clasificación de colectores Tyagi et al. (2012).

temperaturas más altas que las de los colectores de placa plana. La recolección del calor rechazado de un sistema de CPV conduce a un sistema de CPV térmico (CPVT), que proporciona electricidad y calor a temperaturas medias. Este enfoque es prometedor debido al costo significativamente menor de los reflectores en relación con las células solares. El uso de CPVT en combinación con reflectores de concentración tiene un potencial significativo para aumentar la producción de potencia de un área de celda solar dada. Renno ha optimizado el tamaño así como su rendimiento eléctrico y térmico del CPVT para las aplicaciones domésticas (Renno, 2014).

3.6.1. Ventaja de incorporar ambos sistemas unificados

Una celda solar tiene su energía umbral de fotones correspondiente a la brecha de banda de energía particular por debajo de la cual la conversión de electricidad no tiene lugar. Los fotones de mayor longitud de onda no generan pares de electrón-agujero, solo disipan su energía en forma de calor en la celda. Un módulo FV común convierte el 4-17 % de la radiación solar entrante en electricidad, dependiendo del tipo de células solares en uso y las condiciones de trabajo. En otras palabras, más del 50 % de la energía solar incidente se

convierte en calor (después de descontar la porción reflejada). Esto puede llevar a una temperatura extrema de trabajo de la celda de hasta 50 °C por encima del ambiente, lo que puede acarrear dos consecuencias indeseables:

- Una caída en la eficiencia de la celda (típicamente 0,4 % por aumento de temperatura para las celdas fotovoltaicas)
- Un daño estructural permanente del módulo si la tensión térmica permanece durante un período prolongado.

Numerosas correlaciones expresan la temperatura y la eficiencia de la célula como funciones de las variables meteorológicas pertinentes y las condiciones de trabajo celular (Skoplaki y Palyvos, 2009). Al enfriar las células solares con una corriente de fluido como el aire o el agua, se puede mejorar el rendimiento de la electricidad. Pero conceptualmente, el mejor diseño es reutilizar la energía térmica extraída por el refrigerante. Entonces se puede mejorar el rendimiento energético por unidad de área del panel (o fachada en el caso de la instalación integrada en el edificio). Estos son los incentivos que conducen a la evolución de la tecnología solar híbrida PVT.

3.6.2. Estructura PVT

En el presente estudio se trabaja la evaluación de un sistema híbrido fotovoltaico para obtener electricidad y agua caliente sanitaria a partir de un sólo dispositivo, por lo que se estudia en profundidad el tipo de sistema colector de líquido PV/T que es el requerido para este caso.

La estructura del PVT consta de ciertos elementos fundamentales para el correcto funcionamiento de dispositivo, a saber, y en orden de ingreso de la radiación directa: Placa de vidrio, celdas fotovoltaicas, un material con alta transmisividad (por lo general Tedlar), arreglo de tubos donde circula el fluido y aislante. Con ayuda de las figuras 3.4 y 3.5 se puede ver gráficamente como se constituye este tipo de aparatos.

3.6.3. Modelo térmico de energía

Anteriormente se hizo una aproximación a grandes rasgos de la estructura del módulo PVT, a continuación se detalla el modelo térmico de energía para la comprensión del funcionamiento teórico del dispositivo.

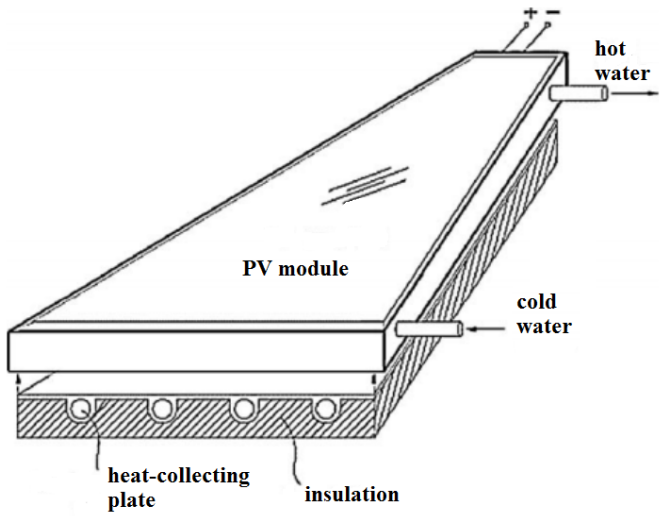

Figura 3.4: Sistema fotovoltaico / térmico integrado (PVT) con canal de tubo redondo (Huang et al., 2001).

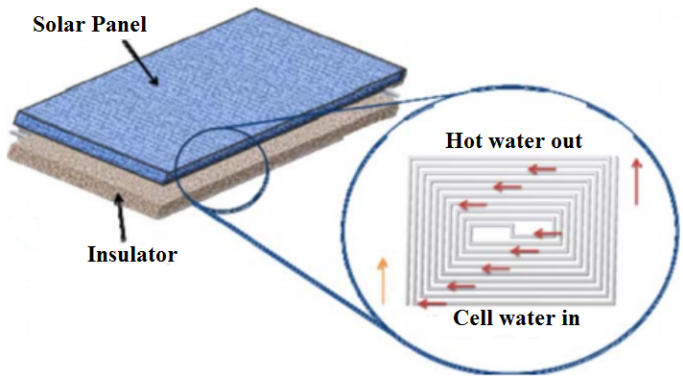

Figura 3.5: Diseño de colector de agua PV/T con colector absorbente debajo del panel solar (Othman et al., 2009).

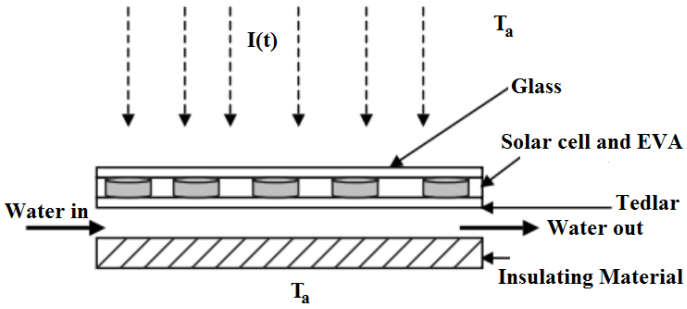

Figura 3.6: Vista transversal de un sistema fotovoltaico / térmico integrado (Tiwari y Sodha, 2006).

El diagrama de circuito de resistencia térmica correspondiente se muestra en la Figura 3.7, mientras que Una expresión de la eficiencia eléctrica dependiente de la temperatura de un módulo fotovoltaico (Schott,

1985) viene dada por:

$$\eta = \eta_r[1 - \beta(T_c - T_r)] \tag{3.11}$$

Donde $\beta = 0.0045\ C^{-1}$ es el coeficiente de temperatura Zondag et al. (2002), T_c es la temperatura de las celdas, T_r es la temperatura de referencia (tomada como 25 °C) y η_r es la eficiencia del módulo a la temperatura de referencia. La ecuación 4.10 se puede usar para evaluar η_r en el presente caso para una eficiencia dada del módulo PV $\eta = 0.09$ y la temperatura de la celda (T_c) con flujo de agua.

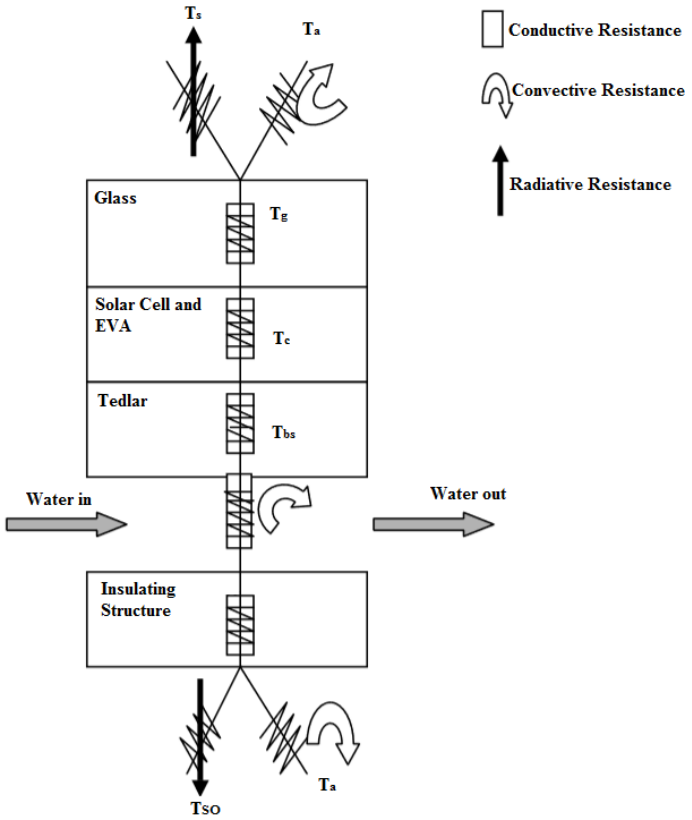

Figura 3.7: Diagrama de circuito de resistencia térmica para sistema fotovoltaico / térmico (Tiwari y Sodha, 2006).

Siguiendo la Fig. 3.7, los balances de energía para diferentes componentes del sistema integrado fotovoltaico-térmico son los siguientes:

3.6.3.1. Celdas solares del módulo PVT

$$\tau_G[\alpha_c\beta_c I(t) + (1-\beta_c)\alpha_T I(t)]Wdx = [U_t(T_c - T_a) + U_T(T_c - T_{bs})]Wdx + \eta_c I(t)\beta_c Wdx \tag{3.12}$$

A partir de la ecuación anterior, se puede obtener la tasa de energía térmica transferida desde la célula solar a la superficie posterior del tedlar, dada por:

$$U_t(T_c - T_{bs}) = h_{p1}(\alpha\tau) - U_{tT}(T_{bs} - T_a) \tag{3.13}$$

donde $h_{p1} = \frac{U_T}{U_t+U_T}$, es el factor de penalización (no presente en la ecuación correspondiente para un colector de placa plana convencional) debido a la presencia de material de célula solar, tedlar y EVA.

3.6.3.2. Superficie posterior al tedlar

$$U_T(T_c - T_{bs})Wdx = h_T(T_{bs} - T_f)Wdx \tag{3.14}$$

Con la ayuda de las ecuaciones 3.13 y 3.14, se obtiene la tasa de energía térmica transferida desde la superficie posterior de tedlar al fluido activo en estado de equilibrio, dada por:

$$h_t(T_{bs} - T_f) = \frac{h_T}{U_{tT} + h_T}h_{p1}(\alpha\eta)I(t) - \frac{h_T U_{tT}}{h_t + U_{tT}}(T_f - T_a) = h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)I(t) - U_{tw}(T_f - T_a) \tag{3.15}$$

Donde $h_{p2} = \frac{h_T}{U_{tT}+h_t}$, es el factor de penalización debido a la presencia de la interfaz entre tedlar y el fluido de trabajo a través del canal.

3.6.3.3. Agua que fluye bajo el tedlar

La energía térmica neta disponible en el fluido entre el tedlar y el aislamiento inferior es arrastrada por el fluido que fluye en modo de operación forzada, es decir:

$$F'[h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)I(t) - U_{tw}(T_f - T_a) - U_b(T_f - T_a)]Wdx = \frac{\dot{m}}{n}c_f\frac{dT_f}{dx}Wdx \tag{3.16}$$

ó

$$F'[h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)I(t) - U_L(T_f - T_a)]Wdx = \frac{\dot{m}}{n}C_f\frac{dT_f}{dx}Wdx \tag{3.17}$$

La ecuación anterior es similar a la expresión para el colector de placa plana convencional excepto por los términos h_{p1} y h_{p2} como se explicó anteriormente. La presencia de estos parámetros reduce la eficacia de un sistema PVT en comparación con un colector plano convencional.

De la ecuación 3.17 se obtiene:

$$\dot{Q}_u = F_r[h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff}I(t) - U_L(T_{fi} - T_a)] \tag{3.18}$$

Donde:

$$(\alpha\tau)_{eff} = \tau_G[\alpha_c\beta_c + \alpha_T(1 - \beta_c) - \eta_c\beta_c] \tag{3.19}$$

La ecuación 3.18 es muy similar a la ecuación para la tasa de energía útil para un colector de placa plana. Además, se puede utilizar para obtener una expresión de una eficiencia térmica instantánea del sistema PV/T como:

$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_u}{A_cI(t)} = F_R[h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff} - U_L\frac{T_{fi} - T_a}{I(t)}] \tag{3.20}$$

Que es casi igual a la conocida ecuación característica de Hottel-Whiller-Bliss para el colector de placa plana (Tiwari, 2002) siendo la diferencia el factor de penalización, $h_{p1}h_{p2}$, que no están presentes en la

clásica ecuación.

3.6.4. Almacenamiento de energía térmica en sistema de colectores solares híbridos

El almacenamiento de energía en forma de calor es una de las posibilidades que entrega una configuración de colectores solares para guardar y 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 (Duffie y Beckman, 2013).

Para la generalidad de 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. Para el caso del agua caliente sanitaria requerida por un hogar se utiliza un tanque de agua como medio de almacenamiento, y corresponde a 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.

Para muchos sistemas solares, ,el agua constituye el material ideal para almacenar calor, ya que posee características muy atractivas:

- Es un fluido de bajo costo
- No es tóxica
- De fácil acceso y disponibilidad
- Posee alto calor específico, por lo que tiene alta capacidad de almacenamiento para su masa y volumen.
- Debido a las características del sistema, la energía se adhiere y sustrae de este tipo de unidad de almacenamiento transportando el mismo medio, lo que elminia la diferencia de temperatura entre el medio de transporte del calor y el medio de almacenamiento.

- Sólo se necesitan bombas y cañerías convencionales para trabajar con este tipo de líquido.

Los típicos sistemas que se utilizan en tanques de agua son representados por 3.8. Generalmente el flujo másico que circula por el colector es accionado por una bomba, aunque algunos sistemas logran prescindir de esta si es que opera por medio de la termocirculación, donde la diferencia de densidades entre el agua caliente y fría permite el movimiento del fluido en la dirección deseada. Para que el sistema logre operar gracias a la termocirculación se deben considerar las pérdidas de carga y los rangos de temperatura en que el sistema trabaja.

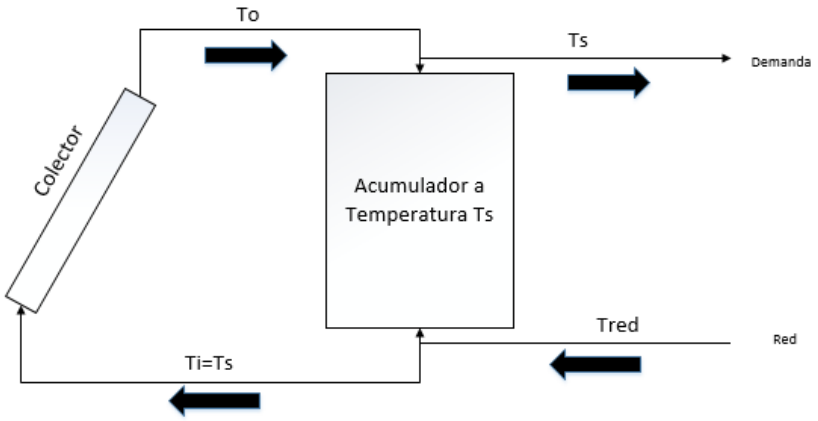

Figura 3.8: Sistema típico que utiliza un tanque de agua como almacenamiento. Al agua que circula a través del colector se adhiere energía y la que circula a través de la demanda se le remueve energía (Fuente: (Klein et al., 1976)).

La energía almacenada en un estanque de agua, u otro líquido, a una temperatura uniforme (completamente mezclada o no estratificada) operando en una diferencia de temperatura finita está dada por 3.21.

$$Q_s = m_s c_p \Delta T_s \tag{3.21}$$

Donde Q_s es la capacidad térmica total operante en el rango de temperatura δT_s, m_s es la masa de agua en la unidad de almacenamiento o tanque, y C_p corresponde al calor específico del agua.

Por lo general el margen de temperaturas en que cada unidad opera está limitado entre un *"lower bound"* definido por las exigencias del proceso y un *üpper bound"* por variados factores, entre los que destaca la presión de vapor del líquido, el proceso o las pérdidas de calor del colector.

3.6.4.1. Balance energético en el estanque

En régimen transitorio, el balance energético sobre un depósito de almacenamiento sirve para predecir su temperatura como una función dependiente del tiempo. Para tanques sin estratificación, como en la Figura 3.9 el balance de energía viene dado por:

$$m_{s,j}c_p\frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_u - \dot{L}_s - U_sA_s(T_s - T_{amb}) \tag{3.22}$$

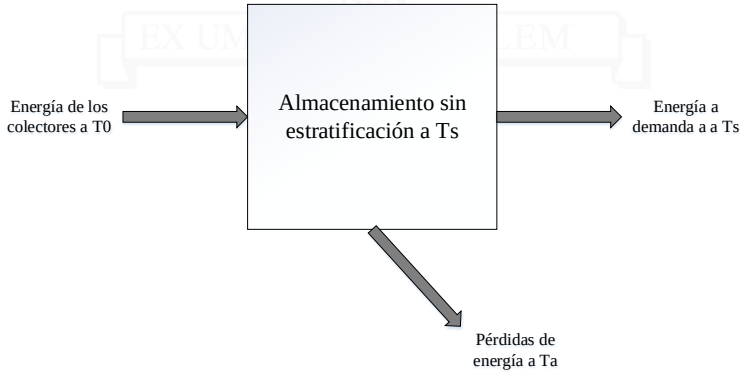

Figura 3.9: Almacenamiento sin estratificación de masa m_s operando a la temperatura T_s dentro del ambiente a temperatura T_a.(Fuente: (Nacif Hartley et al., 2011))

Donde $\dot{Q}_u$ es la ganancia de energía proveniente del colector PVT, $\dot{L}_s$ 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 del ambiente.

La ecuación 3.22 debe integrarse en el tiempo para determinar el rendimiento a largo plazo del estanque de almacenamiento y el proceso solar en general. Para ésto, 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. De esta forma la ecuación

resultante queda:

$$T_s^{+} = T_s + \frac{\Delta t}{m_s c_p}(\dot{Q}_u - \dot{L}_s - U_s A_s (T_s - T_{amb})) \tag{3.23}$$

Para una demanda determinada se pueden presentar relaciones en donde los resultados conforman un sistema de ecuaciones, de forma que viene determinado por la ecuación del rendimiento del colector y por las exigencias de la demanda. Estas ecuaciones se resuelven para obtener tanto la temperatura T_s como las variaciones de energía en función del tiempo; también se puede incluir la energía auxiliar añadiéndola al depósito o al caudal que sale del mismo hacia la demanda. Los sistemas de acumulación de energía térmica en agua, por lo general, trabajan con grados significativos de estratificación, por lo que el modelo presentado para tanques sin estratificación, si bien presenta la ventaja de ser bastante simple, su aplicación solo brindará resultados aproximados con un número similar de orden de magnitud a la realidad.

3.6.5. Optimización de sistemas de colectores a través de algoritmos genéticos

Los organismos vivos se adaptan gracias a la evolución, integrando características que les ayudan a sobrevivir en ambientes desfavorables. Estos organismos se representan mediante 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 se evalúan por la función objetivo para determinar qué tan bien resuelve el problema o bien, según la teoría de la evolución, analizar cual es la aptitud al medio ambiente del individuo. Mientras mejor sea la adaptación del individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el individuo sea elegido para participar en la cruza, mezclando su material genético con otro individuo seleccionado de la misma manera. Una vez seleccionados dos padres, sus cromosomas se combinan, utilizando habitualmente el cruce y mutación.

En la operación de cruce, se toma a los dos padres seleccionados y se procede a cortar sus ristras

de cromosomas en una posición escogida al azar, para producir dos subristras iniciales y dos subristras finales. Posteriormente se intercambian las subristras finales, produciéndose nuevamente dos cromosomas 3.10. Ambos descendientes heredan genes de cada uno de los padres. Por lo general 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. 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 ~ 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. Después de un número indeterminado de generaciones, los individuos tendrán la genética casi idéntica, debido a su adaptabilidad al medio, resultando así en una población homogénea. De esta forma, los individuos ”fuertes” representan la solución óptima al problema especificado por la función y restricciones del problema objetivo.

Así, bajos niveles de tasa de mutación implica una baja exploración (buscar dentro del espacio de búsqueda tanto como sea posible), mientras que una excesiva tasa de mutación (cercana a 1.0) no explotaria (concentrarse en un punto) 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 (Ochoa et al., 1999).

Los pasos resumidos de aplicación de algoritmos genéticos son como siguen:

1. Generación de la población inicial.
2. Evaluación de los individuos de la población en la función objetivo.
3. Organización de los resultados según sea el objetivo (Max o Min).
4. Codificación de resultados a lenguaje binario.
5. Cruce, donde bajo cierto criterio y probabilidad se genera una nueva población.
6. Mutación.
7. Evaluación de individuos en la función objetivo.

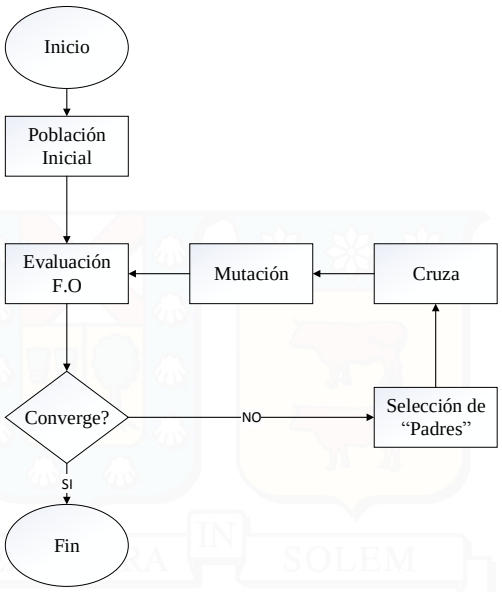

Figura 3.10: Esquema de funcionamiento de los GA (Araya Ibaceta, 2017).

8. Repetir hasta lograr convergencia.

Los algoritmos genéticos constituyen una herramienta robusta que ayuda a la resolución de problemas de variadas áreas de la ingeniería. Este método no garantiza la solución óptima global, pero si soluciones a nivel aceptable dentro de un tiempo razonable y competitivo comparado con otros métodos (Bustos Olavarría, 2013).

4 | Metodología

4.1. Modelo de energía

El sistema de calentamiento de agua y generación de electricidad con energía solar propuesto en esta investigación consiste en un sistema PV/T y un calentador de agua de almacenamiento cilíndrico aislado. El sistema PVT comprende un módulo fotovoltaico separado por la película de tedlar de un canal a través del cual fluye el agua de refrigeración y consumo. La parte inferior del canal está hecha de material aislante. El tanque de almacenamiento está conectado al sistema PV/T a través de tuberías aisladas. Se ha utilizado una bomba de 3 W con controlador para hacer circular el agua. De no alcanzar el requerimiento energético demandado por el hogar se activa la fuente auxiliar, en este caso el gas natural, para solventar esa diferencia existente entre lo generado por el colector y lo que exige la demanda. Caso similar se aplica para la generación de electricidad, donde de no lograrse alcanzar los niveles de requerimiento energéticos se suple con la energía de la red a través del medidor bidireccional, que además cuantifica cuando se está produciendo más de lo que se consume e inyectarlo a la red (NetBilling).

El análisis numérico del sistema de colectores híbridos se define por el diagrama de la figura 4.1.

Colector solar híbrido: Corresponde a la configuración de colectores solares que se encuentran apuntando al Ecuador con una inclinación dependiendo de la latitud del punto de evaluación para obtener el máximo de energía con una orientación fija (Duffie y Beckman, 2013). La ecuación que representa la ganancia de energía útil proveniente del sol está dada por la ecuación de Hotel-Willer modificada (Tiwari y

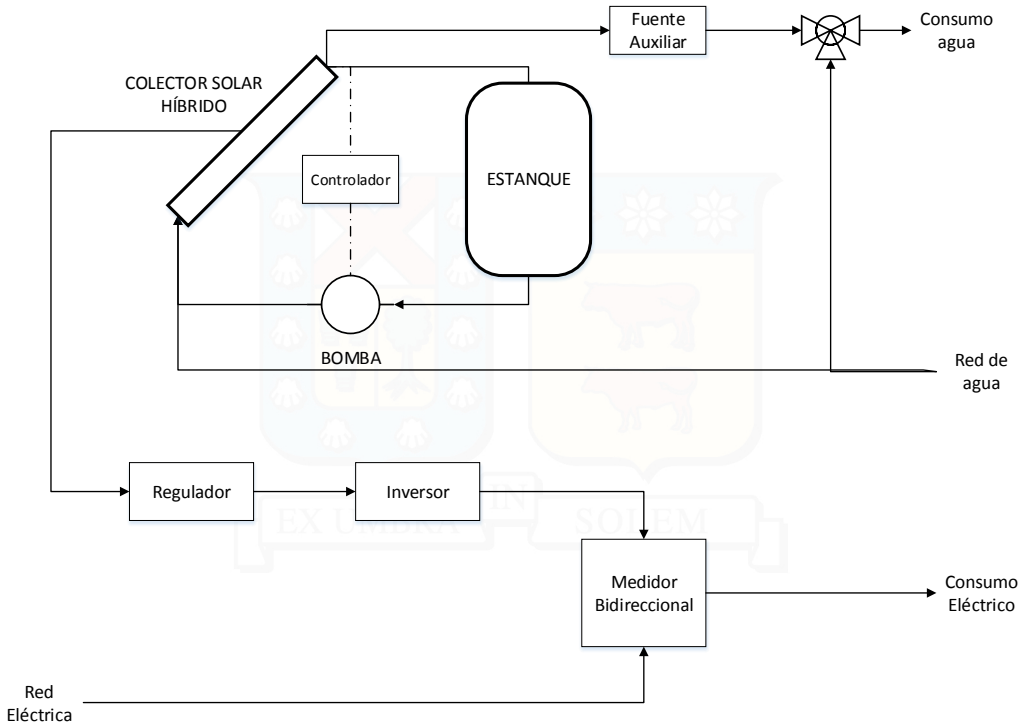

Figura 4.1: Diagrama del arreglo solar fotovoltaico para obtención de agua caliente sanitaria y energía eléctrica (Fuente: Elaboración propia).

Sodha, 2006):

$$\dot{Q}_u = F_R A_c [h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_L (T_{w0} - T_a)] \tag{4.1}$$

En donde la diferencia con el modelo tradicional radica con los factores h_{p1} y h_{p2} que representan la pérdida de calor producto de la presencia de las celdas fotovoltaicas.

En la práctica, él método básico para medir el rendimiento del colector en su fase térmica es exponerlo a la radiación solar y medir las temperaturas de entrada y salida del fluido, junto con su caudal de paso. De esta forma la ganancia útil es:

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

Además, se añade un sistema de control para intervenir la circulación entre el colector y el estanque,

Parámetro	Valor
Calor específico del agua	4.190 J/kg K
Flujo másico del agua	0,016 kg/s
Coef. de condutividad térmica de la celda	0,039 W/m K
Coef. de conductividad térmica del vidrio	1 W/m K
Coef. de conductividad térmica del aislante	0,035 W/m K
Coef. de conductividad térmica del tedlar	0,033 W/m K
Espesor celda fotovoltaica	0,0003 m
Espesor vidrio	0,003 m
Espesor cubierta aislante	0,05 m
Espesor tedlar	0,0005 m

Tabla 4.1: Parámetros utilizados para el colector solar híbrido (Fuente: (Tiwari y Sodha, 2006))

cerrando el flujo cuando la energía de salida recolectada es menor a la demandada dentro de la hora específica. El flujo de circulación es de 0,016 kg/s acorde a lo estipulado en (Tiwari y Sodha, 2006) donde se estudia el funcionamiento del colector solar híbrido con los parámetros mostrados en la tabla 4.1 y que serán los mismos a utilizar en este estudio.

Para modelar el efecto del tanque de almacenamiento en el sistema de colectores híbridos se hace uso de lo recomendado por A. Tiwari (Tiwari y Sodha, 2006) para sistemas de éste tipo, donde la energía térmica desde el sistema IPVT es transferida según como sigue:

$$\dot{Q}_u = M_w C_w \frac{dT_w}{d_t} + (UA)_T (T_w - T_a) \tag{4.3}$$

Luego recombinando las ecuaciones 4.1 y 4.3 y expresándola como una ecuación diferencial de primer orden:

$$\frac{dT_w}{dt} + aT_w = f(t) \tag{4.4}$$

Donde:

$$a = \frac{(UA)_T + A_c F_R U_L}{M_w C_w} \tag{4.5}$$

$$f(t) = \frac{1}{M_w C_w}(A_c F_R h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t) + ((UA)_T + A_c F_R U_L) T_a) \tag{4.6}$$

Posteriormente una solución analítica a la ecuación 4.4 se puede obtener con las siguientes suposiciones:

- a es considerado constante en un intervalo de tiempo definido entre [0,t].
- f(t) es considerado como $\overline{f(t)}$ durante el intervalo de tiempo [0,t].

La solución requiere de una condicion inicial dada por $T_w(t = 0) = T_{w0}$, la cual en primera instancia se considera como la Temperatura de la red.

$$T_w = \frac{\overline{f(t)}}{a}(1 - e^{-at}) + (T_{w0}e^{-at}) \tag{4.7}$$

Luego de obtener T_w desde la ecuación 4.7 se procede al cálculo de las temperaturas del módulo PV y la base del módulo PV (T_c y T_{bs} respectivamente):

$$T_{bs} = \frac{h_{p1}(\alpha\tau)_{eff}I(t) + U_{tT}T_a + h_T T_w}{U_{tT} + h_T} \tag{4.8}$$

$$T_c = \frac{\tau_G(\alpha_c\beta_c + \alpha_T(1 - \beta_c))I(t) - \eta_c I(t)\beta_c + U_t T_a + U_T T_{bs}}{U_t + U_T} \tag{4.9}$$

Mientras que para el módulo fotovoltaico se trabaja a partir de la obtención de la eficiencia evaluada hora a hora dada por 4.10.

$$\eta = \eta_r[1 - \beta(T_c - T_r)] \tag{4.10}$$

Donde $\beta = 0.0045$ C^{-1} es el coeficiente de temperatura Zondag et al. (2002), T_c es la temperatura de las celdas, T_r es la temperatura de referencia (tomada como 25 °C) y η_r es la eficiencia del módulo a la temperatura de referencia. La ecuación 4.10 se puede usar para evaluar η_r en el presente caso para una eficiencia dada del módulo PV $\eta = 0.09$ y la temperatura de la celda (T_c) con flujo de agua.

Suciedad	2 %
Sombras del entorno (árboles, construcciones adyacentes,etc.)	3 %
Imperfecciones de fabricación	2 %
Cableado	2 %
Conectores	0,5 %
Degradación de las celdas por luz incidente	1,5 %
Tiempo apagado	3 %
Diferencias entre valores de laboratorio y realidad de especificaciones técnicas	1 %
Pérdida Total	14,08 %

Tabla 4.2: Pérdidas por concepto de factores externos (Fuente: (Molina et al., 2017))

4.2. Sistema auxiliar

Corresponde al sistema que se acciona cuando el arreglo térmico fotovoltaico no logra dar abasto con la demanda que necesita el hogar, este entra a operar cuando dentro de una hora dada, si la energía captada por el colector no alcanza a suplir la demanda, entonces se activa el sistema abastecido por gas natural, por otro lado cuando la electricidad abastecida por el sistema fotovoltaico no alcanza a suplir la demanda requerida es que entra en acción la red local eléctrica, esto se hace de manera inmediata sin requerir la intervención de un operador manual.

En la figura 4.1 se ve dónde se activa o entran a operar estos sistemas, ya que cómo se comprenderá en todo el país los niveles de radiación varían considerablemte de un punto a otro, por lo que se debe contemplar un "*plan B"* en caso de que la demanda exigida por la casa no sea totalmente abastecida. De esta forma para el caso del agua caliente ésta es calentada vía gas natural ante la eventualidad de que el colector no logre disponer de la energía requerida por la casa, por lo que entra a operar la fuente auxiliar para suplir esa diferencia. De esta forma la dependencia a la acción solar se reduce en gran medida, con la contraparte de que se debe pagar por el uso del gas natural. En el caso de la electricidad ocurre algo similar, pero aplicado esta vez al consumo de energía eléctrica, se considerará un sistema *' ON GRID '* o también conocido como *'conectado a la red'*, para que funcione todo éste arreglo se necesita del string de paneles fotovoltaicos, el inversor central, y un medidor bidireccional, la diferencia de éste con los convencionales es que mide tanto la energía consumida como la generada de forma automática. Claro está que inciden una serie de factores , por lo que por defecto se asigna un 14 % de pérdidas en el sistema fotovoltaico 4.2.

4.3. Datos metereológicos locales y perfiles de consumo

Un componente crítico para el estudio y para toda la simulación es la obtención de los datos metereológicos que constituyen el dato de entrada para que la evaluación funcione. Para esto se cuenta con la base de datos proporcionada por el Ministerio de Energía de Chile en su página web para el uso de su Herramienta 'Explorador Solar' (Molina et al., 2017). El método consiste en evaluar la capacidad de los sistemas solares para producir energía útil en diferentes lugares de Chile, tomando en cuenta las distintas características geográficas del sector que como se verá son de variada magnitud conforme se estudie un punto u otro del país. Chile es una larga franja de tierra con aproximadamente unos 4.350 km de longitud y 250 km de ancho (en su punto de mayor embergadura), en otras palabras, una larga y angosta faja de tierra. Posee curiosidades geográficas dignas de estudios mundiales, como el desierto más árido del mundo, el desierto de Atacama, y se extiende hasta otro hito peculiar, el Estrecho de Magallanes. Estas características especiales que presenta la geografía chilena da como resultados diferencias en la radiación solar promedio anual diaria por año que se logra medir en distintas zonas, para muestra un botón, en Arica se calcula un 5,88 kWh/m^2/día mientras que al otro extremo de Chile, en Punta Arenas se obtiene un 3,60 kWh/m^2/día, diferencias sustanciales que como se verá traerá consecuencias en la evaluación del estudio conforme se vaya avanzando de Norte a Sur.

Este estudio busca como finalidad evaluar la viabilidad económica de instalar un arreglo de Paneles Fotovoltaicos Híbridos en distintas localidades del país, comenzando por el territorio de la zona Norte con la ciudad de Antofagasta y terminando en su extremo austral con la ciudad de Puerto Williams, por lo que no es difícil imaginar que entran en juego una serie de variables que cambian a medida que se avanza en el territorio como lo son la radiación solar, temperatura, humedad y velocidad del viento debido a la peculiar geografía del país. Las simulaciones se llevan a cabo con una base de datos que provee el Explorador Solar y que contempla desde el 1 de Enero de 2004 a 31 de Diciembre de 2015.

Los datos de 'inputs' que se ingresan el programa son:

- Temperatura Promedio (°C)
- Radiación solar global diaria (W/m^2)
- Temperatura de la red (°C)

Para el cálculo de la temperatura de la red se utilizará un promedio simple dado por 4.11

$$T_{sup} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \tag{4.11}$$

4.4. Perfiles de consumo

El objetivo de este estudio es evaluar la factibilidad de aplicar una configuración de paneles solares híbridos tomando en cuenta las distintas características geográficas de cada lugar, pero el consumo tanto de agua caliente como de electricidad no se comporta de manera homogénea durante todos los días, meses y años, por lo que se debe aplicar un perfil de consumo que simule la demanda esperada y de esta forma determinar su influencia en el patrón de consumo energético.

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

$$fe_1 + fe_2 + ... + fe_{24} = 1 \tag{4.12}$$

$$fa_1 + fa_2 + ... + fa_{24} = 1 \tag{4.13}$$

Donde fe_i representa la fracción de demanda eléctrica que se consume en la hora i. Mientras que el mismo concepto lo representa fa_i pero aplicado para el consumo de agua caliente.

Estas ecuaciones son de utilidad para generar seis perfiles de demanda que representan el consumo de agua y electricidad, con los cuales se evalúa el rendimiento del sistema de colectores solares híbridos.

Perfiles de demanda para agua caliente sanitaria:

- Perfil 1: Demanda constante a lo largo de todo el día.
- Perfil 2: Perfil adaptado desde consumo tipo C en (Gruber et al., 2014).

- Perfil 3: Demanda constante durante jornada laboral de 8 horas, esto es, entre las 8:00 y 16:00 horas (Kalogirou, 2004).
- Perfil 4: Perfil ISO 9459-3:1997(E) de consumo de agua doméstica (Kulkarni et al., 2007).
- 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.

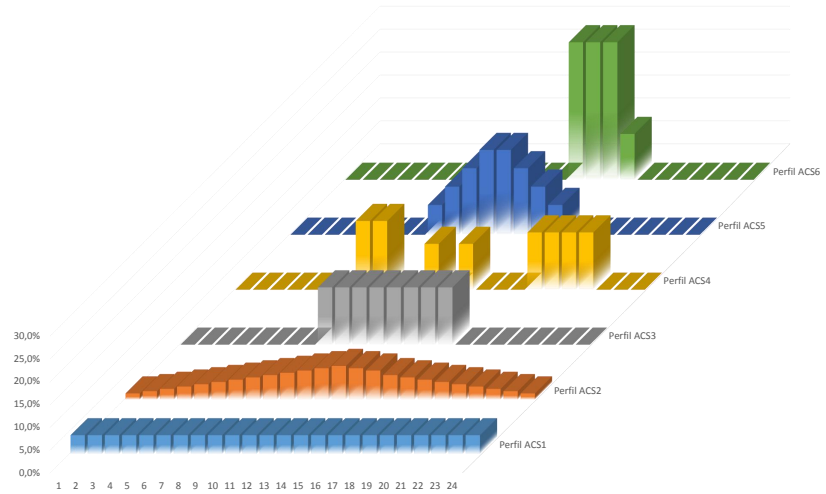

Figura 4.2: Perfiles de consumo de agua caliente sanitaria (Fuente: Elaboración propia).

Perfiles de demanda para consumo eléctrico:

- Perfil 1: Demanda constante a lo largo de todo el día.
- Perfil 2: Perfil adaptado desde consumo tipo C en (Gruber et al., 2014).
- Perfil 3: Demanda constante durante jornada laboral de 8 horas, esto es, entre las 8:00 y 16:00 horas (Kalogirou, 2004).
- Perfil 4: Demanda siguiendo el patrón de consumo mediante electrodomésticos (Richardson et al., 2010).
- Perfil 5: Demanda escalonada, aprovechamiento del peak solar y radiación solar global, consumo entre las 8:00 y 16:00 hrs.

- Perfil 6: Demanda según uso de luminarias dentro del hogar (Gruber et al., 2014).

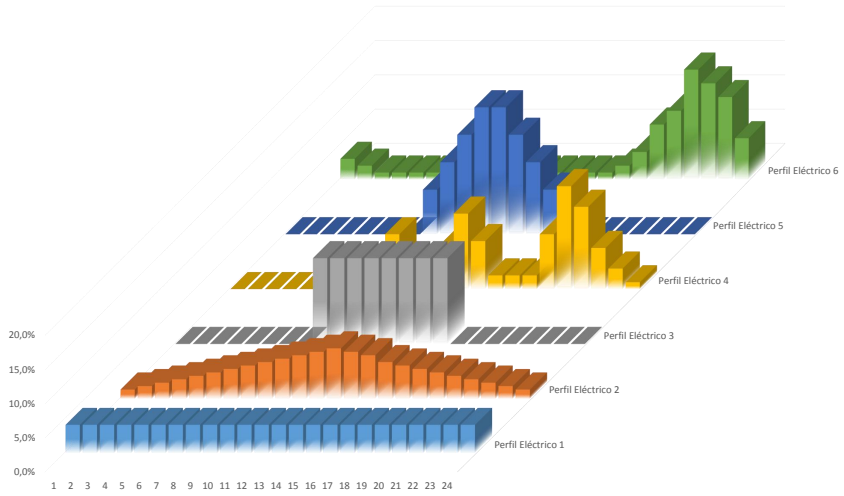

Figura 4.3: Perfiles de consumo de electricidad (Fuente: Elaboración propia).

Las demandas aplicadas en el estudio tratan de ser lo más representativas posibles en torno al consumo promedio residencial en Chile, para esto se consulta en el formulario de cálculo proporcionado por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética y el Ministerio de Energía, accediendo al consumo promedio de energía eléctrica y de ACS residencial en el país, totalizando 7.31 kWh y 5.92 kWh de consumo diario, valores que será utilizados para los cálculos del presente estudio.

4.5. 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 Ruegg (1975), en los que lógicamente se toman en cuenta los costos de adquisición, mantenimiento, operación y en caso de aplicar, los costos de eliminación.

El análisis económico que se lleva a cabo en esta investigación es el Life-Cycle Saving, el que está definido como la diferencia entre el LCC de un sistema de combustible convencional y el LCC del sistema solar con fuente auxiliar (Duffie y Beckman, 2013), (Kalogirou, 2013), (Kalogirou, 1996). Así, de esta forma,

el LCS quedará expresado por 4.14.

$$LCS = LCC_{con} - LCC_{sol} \tag{4.14}$$

Como características de la simulación se utilizará un horizonte de evaluación de 20 años, un estándar para éste tipo de proyectos. La inversión necesaria se paga un 50 % al comienzo del proyecto, mientras que el resto será pagado en cuotas iguales durante 10 años a una tasa de interés r_d del 10 % anual. Resta traer los pagos futuros a valor presente, para lo cual se utiliza el Valor Presente Neto (Duffie y Beckman, 2013) (PWF).

$$PWF(N, r_i, r) = \sum j = 1^N \frac{(1+r_i)^{j-1}}{(1+r)^j} = \begin{cases} \frac{1}{r-r_i}(1-(\frac{1+r_i}{1+r})^N) & si \quad r_i \neq r \\ \frac{N}{r_i+1} & si \quad r_i = r \end{cases} \tag{4.15}$$

Mientras que el LCC para el sistema convencional es:

$$LCC_{con} = (Q_a C_{gas} + Q_e C_{elect}) PWF(N, r_i, r] \tag{4.16}$$

Donde Q_a es la energía necesaria para satisfacer la demanda de agua caliente, C_{gas} es el costo del combustible convencional, en este caso el gas natural, Q_e es la energía necesaria para cubrir la demanda de energía eléctrica y C_{elect} es el costo de la tarifa eléctrica. Por otro lado el LCC para el sistema de energía solar con fuente auxiliar viene dado por:

$$LCC_{sol} = C(1 - f_d) + DPWF(N', r_i, r) + (C_{O-M} + C_{aux}) PWF(N, r_i, r) \tag{4.17}$$

Donde C representa la inversión inicial:

$$C = c_{fixed} + c_c A_c + c_s V_s \tag{4.18}$$

Parámetro	**Valor**
Precio Gas Natural, $/m^3	1130
Precio Electricidad, $/kWh	101,204
Costo Colector híbrido, $/m^2	328.194
Costo tanque de almacenamiento $/L	533
Período de Evaluación, años	20
Tasa de Descuento, %	10
Tasa de Inflación, %	3
Tasa de Interés, %	10

Tabla 4.3: Parámetros económicos

Mientras que D representa los pagos anuales en valor presente de la deuda de la inversión:

$$D = \frac{f_d C(r_d(1+r_d)^{N'})}{(1+r_d)^{N'} - 1} \tag{4.19}$$

Donde f_d es la razón de endeudamiento, c_{fixed} el costo fijo, c_c el costo por unidad de área de los colectores solares, c_s el costo por unidad de volumen del estanque de almacenamiento.

Por último los costos de operación y mantenimiento C_{O-M} se estipulan en 5 % de la inversión y los costos del sistema auxiliar quedan expresados en función de la energía auxiliar requerida Q_{aux}:

$$C_{aux} = (Q_{Auxagua} C_{gas} + Q_{Auxelect} C_{elect}) PWF(N, r_i, r) \tag{4.20}$$

Finalmente para tener una visión comparativa entre lo que se ahorró en el periodo contra lo que se invirtió durante el horizonte de evaluación es que se obtiene el ratio *Savings Over Investing* (SOI) que en simples palabras evalúa la cantidad de veces que el ahorro obtenido es la inversión realizada.

$$SOI = \frac{LCS}{Investment} \tag{4.21}$$

Los parámetros económicos se muestran en la tabla 4.3.

4.6. Optimización mediante algoritmos genéticos

En este estudio la aplicación de AG constituye un eje fundamental, ya que es a través de estos que se llega al número que maximiza el LCS del sistema híbrido fotovoltaico. Existen pruebas teóricas y empíricas que han logrado demostrar la eficacia de éste método para la búsqueda robusta en espacios complejos. Sin embargo, es importante mencionar que el uso de este método no garantiza la convergencia a un óptimo global debido a limitadas capacidades de explotación y convergencia prematura. Por otra parte se requiere un tamaño de la población relativamente grande lo que desencadena en un tiempo de resolución computacional mucho más alto que si fuese, por ejemplo, un método basado en gradientes, el cual tiene alta probabilidad de converger a un óptimo local, claro está, dependiendo de las condiciones iniciales. En el problema descrito en este estudio se utiliza una función objetiva relativamente simple, con variables discretas que se pueden calcular muy rápido, por lo que el tiempo de iteración no se convierte en un obstáculo, mientras que si en caso de que se extendiese más de lo necesario se establece un número máximo de 70 iteraciones.

Para resolver el problema planteado en el estudio en cuestión se deben ingresar los datos del perfil de consumo, radiación global incidente sobre un plano inclinado y la temperatura ambiente para que comiencen a operar los algoritmos genéticos en busca de la solución, en la figura 4.4 se puede apreciar el funcionamiento de éstos.

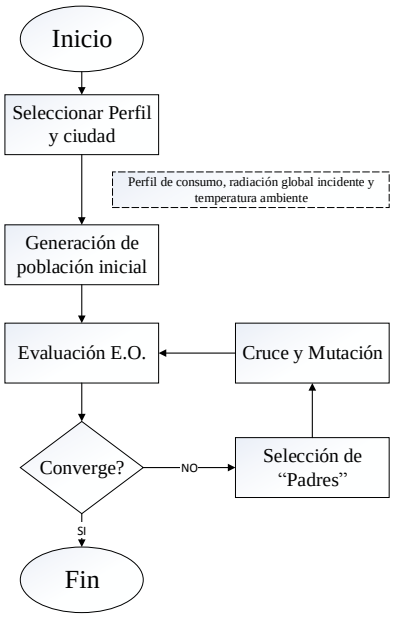

Figura 4.4: Representación esquemática del proceso de optimización (Fuente: (Araya Ibaceta, 2017)).

La formulación matemática del problema de optimización queda planteado como sigue, donde se requiere encontrar el área óptima en conjunto al volumen de almacenamiento, el primero para una casa residencial se encuentra entre 0 y 10 m^2 mientras que el ratio volumen/área debe cumplir con la restricción de estabilidad dada por (Molina et al., 2017):

$$Encontrar: \quad X = (A_c, V_s)$$

$$Para \;\; Maximizar: \quad LCS(X)$$

$$S.a: \quad 0 \leq A_c(m^2) \leq 10$$

$$40 \leq V_s/A_c \leq 180$$

4.7. Análisis de sensibilidad y riesgos

Una vez obtenidos los resultados para las distintas ciudades que entraron en la evaluación se procede a realizar un análisis de estudio de dependencia de los resultados financieros con la incertidumbre de los parámetros de entrada, el cual se lleva a cabo sobre parámetros del modelo energético, de optimización y financiero.

4.7.1. Análisis sobre parámetros del modelo energético

Se estudia el comportamiento del LCS y del ratio SOI ante cambios en la demanda exigida por el hogar tanto eléctrica como de agua caliente sanitaria, para esto se hace variar la demanda en rangos de 10 % hasta 30 % para analizar su incidencia en los resultados finales y a su vez observar como afecta en la fracción solar obtenida por los colectores solares híbridos.

4.7.2. Análisis sobre parámetros de control de los algoritmos genéticos

En 1975 De Jong, K. lleva a cabo los primeros estudios sobre los valores de los parámetros con que se debe configurar el AG (De Jong, 1975). En este estudio se determinó que se debía usar una población con un rango entre 50-100 individuos, una probabilidad de mutación de 0,1 % y una probabilidad de cruce de 60 %. El ajuste óptimo de los parámetros de los AG ha sido objeto de análisis en muchos estudios en los

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
Grefensette	30	0.95	0.01
Schaffer	30	0.6	0.101

Tabla 4.4: Parámetros del AG a sensibilizar

cuales se abordan distintas temáticas como la tasa de mutación (Grefenstette, 1986), obtención teórica del tamaño óptimo de la población, y también el análisis de la combinación de parámetros tales como tamaño de población, tasa de mutación y tasa de cruce (Schaffer, 1989), (Hesser y Männer, 1990).

De esta manera se hace un estudio sobre los parámetros de control de los GA a partir de De Jong (De Jong, 1975), Hesser (Hesser y Männer, 1990), Grefenstette (Grefenstette, 1986) y Schaffer (Schaffer, 1989). Acá los parámetros que se evalúan son: Population size, Mutation rate and Crossover rate.

En la tabla 4.4 se pueden ver los valores de los parámetros estudiados.

4.7.3. Análisis de emisiones

Se lleva a cabo el análisis de emisiones para cuantificar el aporte al medio ambiente que implica la aplicación de estas tecnologías sustentables reemplazando al gas natural y la energía eléctrica. Para esto es que se consulta el factor de emisión por cada combustible utilizado en caso auxiliar en la página proporcionada por el Ministerio de Energía (Ministerio de Energía, 2018) y con este dato más el ahorro de energía obtenido por la utilización del colector solar híbrido se puede cuantificar la cantidad de kilogramos de CO_2 que se dejan de producir diariamente tanto por los m^3 de gas como por los kWh de electricidad, lo que se puede extrapolar también al horizonte de evaluación contemplando los 20 años que éste dura para totalizar la contribución total al medio ambiente.

4.7.4. Análisis financiero y de riesgo

Se realiza el respectivo análisis de sensibilidad para determinar cómo afectan al LCS del proyecto variaciones en diferentes parámetros que se utilizaron para la evaluación financiera, aplicándose el método One At a Time (Bustos et al., 2016), con un rango de 15 % y 30 % de variación. Los parámetros a modificar son: Costo inicial de la Inversión, Costos de operación y mantenimiento, precio del combustible auxiliar, la tasa de apalancamiento y la tasa de interés de la deuda.

Posterior al análisis de sensibilidad de los parámetros financieros recién mencionados es que se realiza un análisis de riesgo para identificar aquellos factores que comprometan los resultados financieros obtenidos. Para ambas ciudades se utiliza el método de simulación de Montecarlo para el LCS, en el cual se hace variar simultánea e independientemente a las variables anteriormente analizadas, bajo una distribución normal. El rango de variables es +10 % y -10 % (Jun et al., 2011). El método es iterado 10.000 veces, generando así una distribución de probabilidad para el LCS.

5 | Resultados

5.1. Comparación modelo de Tiwari

Para la realización de este estudio se requirió de un modelo el cual trabajara el dispositivo central para la obtención de la energía proveniente del sol, el colector híbrido fotovoltaico, para este fin es que se usa como base la teoría planteada por A. Tiwari (Tiwari y Sodha, 2006) en donde ya se ha comprobado por variados autores de manera experimental como teórica su eficacia. De todos modos se procede a validar el modelo presentado por el autor tomando en cuenta los datos que utilizó en su estudio, tales como los datos radiativos entre las 8 y las 15 horas en Chipre el 21/05/1999, considerando un área colectora de 0,516 m^2, un flujo másico de 0,016 kg/s, un estanque con capacidad de 45 kg de agua y un panel con 9 % de eficiencia teórica. Con estos datos se procede a elaborar el modelo en MATLAB para verificar la obtención de resultados similares y de esta forma aplicarlo en el estudio, es así como se elabora la figura 5.1 donde se corrobora la efectividad del modelo para colectores híbridos y se utiliza para los presentes resultados aplicados a distintos perfiles de demanda.

Una vez aplicado el modelo se procede a evaluar las ciudades en cuestión para analizar los resultados bajo distintos perfiles, entregando resultados bastante acordes a la literatura, alcanzando en ciudades como Antofagasta temperaturas de consumo directo de agua promedio de cercana a los 50°C, o en Pto. Williams en el mejor de los casos de hasta 42°C, mientras que el módulo fotovoltaico sobrepasa esas temperaturas como es de esperar, llegando casi a los 60°C en Antofagasta y a 46°C en Pto Williams, efecto que no es deseable para este tipo de artefactos ya que la eficiencia del módulo se reduce conforme se aleja de su temperatura de eficiencia máxima de 25°C, lo cual traerá consecuencias en los resultados del LCS.

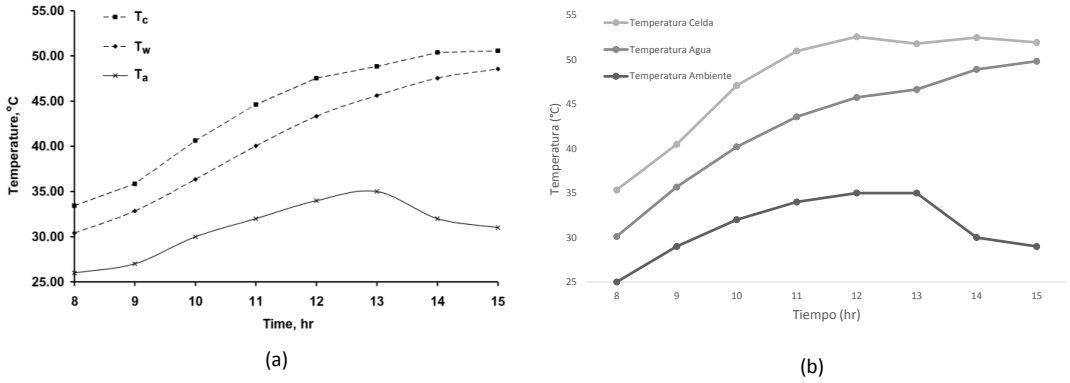

Figura 5.1: (a) Resultados del modelo obtenidos por A. Tiwari. (b) Resultados del modelo obtenidos en el presente estudio para la validación. (Fuente: Elaboración propia).

5.2. Radiación solar por ciudad

Para este estudio se utilizan los datos proporcionados por el *Explorador Solar*, página del Ministerio de Energía abierta a todo público, desde acá se extraen para las 7 ciudades los niveles de radiación hora a hora durante todo el año, obteniendo el promedio horario para la obtención de energía del modelo. En la figura 5.2 se pueden apreciar los niveles de radiación en cada una de las ciudades evaluadas para este estudio, no es difícil notar la diferencia de magnitudes entre Antofagasta y las demás ciudades, en cuanto más se acerca al norte de Chile más alta es la radiación, superando los 800 W/m^2 entre las 13:00 y las 15:00 hrs, límite que no se cruza en las demás ciudades conforme se va avanzando a la zona sur, donde el máximo llega tan sólo a la mitad del registrado en Antofagasta, lo que condicionará los resultados financieros como se verá mas adelante. Cabe destacar la distribución de la radiación conforme avanza el día, describiendo una especie de campana de Gauss, con su peak entre las 13:00 y 14:00 hrs, momento propicio para aprovechar al máximo la energía solar.

Un consolidado de las radiaciones globales para cada ciudad se puede ver en la figura 5.3 donde se aprecian las diferencias sustanciales entre los niveles radiativos obtenidos en cada ciudad, esto da pie a suponer sobre los beneficios que traen los sistemas solares en la zona norte por sobre la zona sur, debido a que la radiación es el sustento principal para la obtención de energía solar y su posterior conversión en

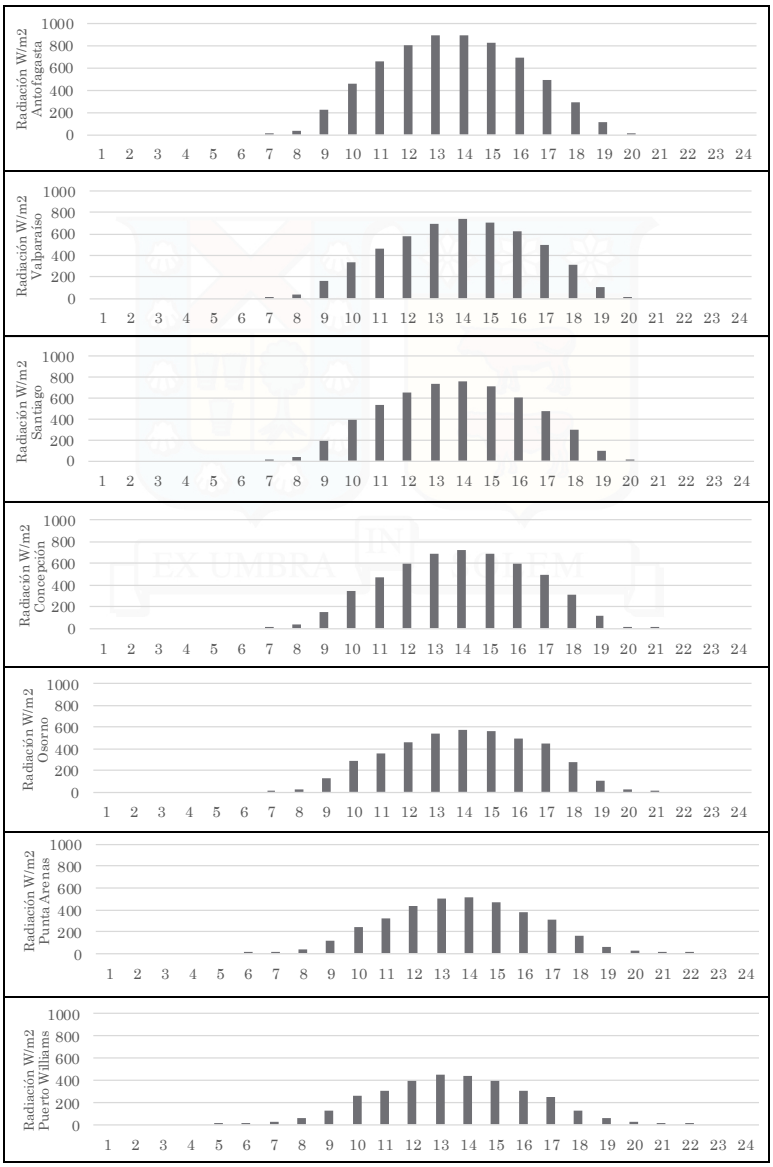

Figura 5.2: Radiación promedio del año obtenida hora a hora para las distintas ciudades evaluadas (Fuente: Elaboración propia).

energía térmica o eléctrica como es el caso de este estudio.

Para hacerse una idea, en Antofagasta el peak máximo representa el doble de radiación en las mejores condiciones de Puerto Williams, mientras que en Osorno se alcanza tan sólo el 64 % de los niveles de la ciudad nortina, por otro lado las ciudades de Santiago, Valparaíso y Concepción muestran datos radiativos relativamente similares, tomando una leve ventaja la capital del país. Por la zona sur las ciudades extremas no presentan grandes diferencias, donde Punta Arenas registra un 8 % mayor de nivel radiativo que su vecina Puerto Williams. Si se quiere tener mayor detalle de la radiación de cada ciudad véase el Anexo C donde se

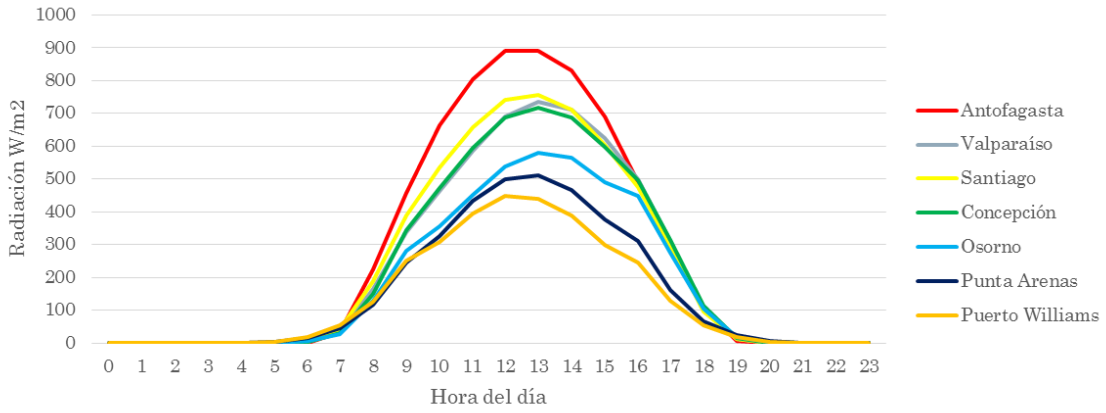

Figura 5.3: Consolidado de radiación promedio de todas las ciudades evaluadas representadas hora a hora (Fuente: Elaboración propia).

muestran los datos hora a hora y mes a mes utilizados en este estudio.

5.3. Resultados por ciudad

Configurado el algoritmo se evalúan las 7 ciudades con un mismo nivel de demanda eléctrico y de ACS, probando distintas configuraciones de perfiles totalizando 36 combinaciones distintas para cada ciudad. De esta forma se elabora para cada perfil el resultado económico obtenido hora a hora durante el día representado en el ahorro obtenido por la energía solar o pago de energía auxiliar en pesos, así se puede ver de mejor manera el efecto que causa la implementación de los artefactos solares, en las figuras 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 se logra apreciar tanto el pago como el ahorro de manera simultánea. Es importante notar que todos los gráficos de perfiles de demanda eléctrica (7.31 kWh), así como también los de ACS (5.92 kWh), poseen la misma área bajo la curva, la diferencia radica cuando se aplica el perfil que hace que se distribuyan de distinta forma según la hora del día.

Se puede ver como en Antofagasta se obtienen los mejores resultados, a simple vista el área celeste (que representa el ahorro) abarca gran parte de los perfiles mostrados, donde incluso en el perfil 5 y 6 se cubre la totalidad de la demanda con el colector solar para el ACS. Es evidente que los mejores resultados se obtienen en las horas con mayor radiación, esto es entre las 11:00 y 16:00 hrs, patrón que se repite para el

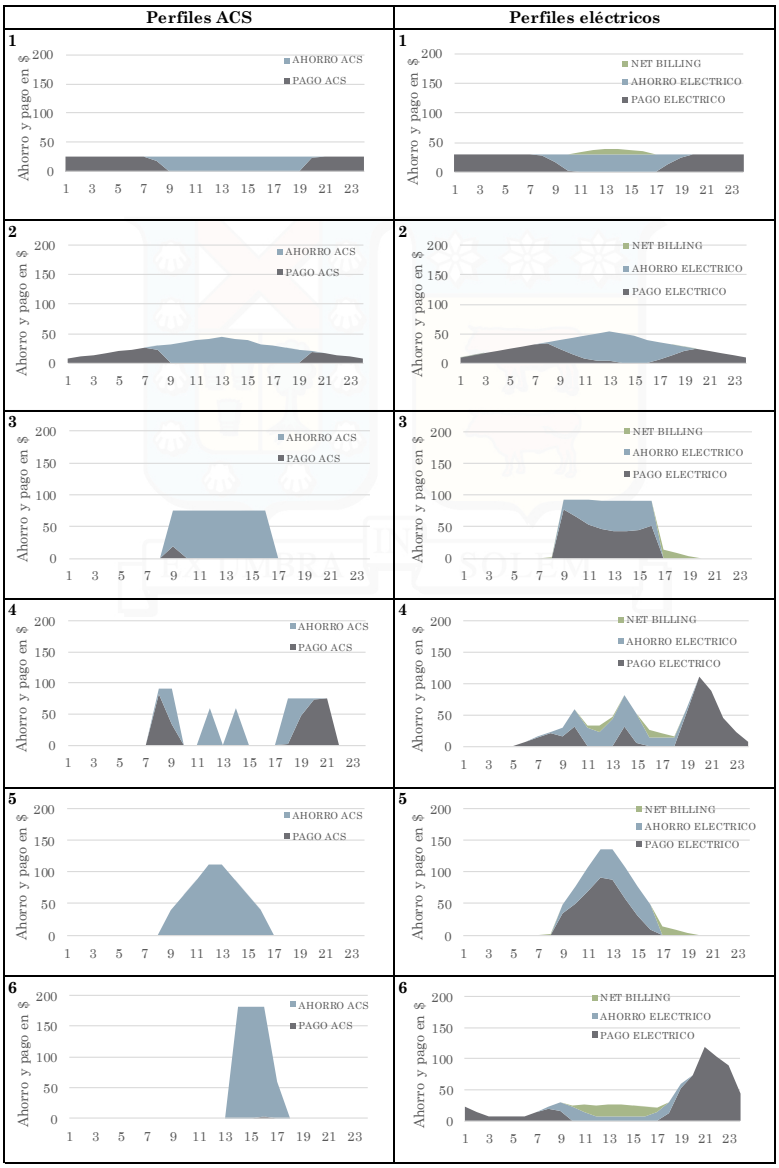

Figura 5.4: Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Antofagasta mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia).

resto de las ciudades. Caso aparte es el efecto del net billing, el cual se presenta de color verde en los gráficos, este se muestra sólo en caso de que la demanda sea totalmente cubierta y el excedente sea inyectado a la red, o en caso de que no se demande energía pero la radiación incidente permita la generación de energía eléctrica para ser inyectada. Es así como sólo en el caso de Antofagasta el perfil uno logra producir energía eléctrica para inyectarse a la red, debido a los altos niveles de radiación en la zona, fenómeno que no se produce para ninguno de los perfiles 1 en el resto de ciudades, por otro lado es la única que tiene totalmente cubierta la demanda del perfil 5 ACS y casi en su totalidad la del perfil 6 ACS.

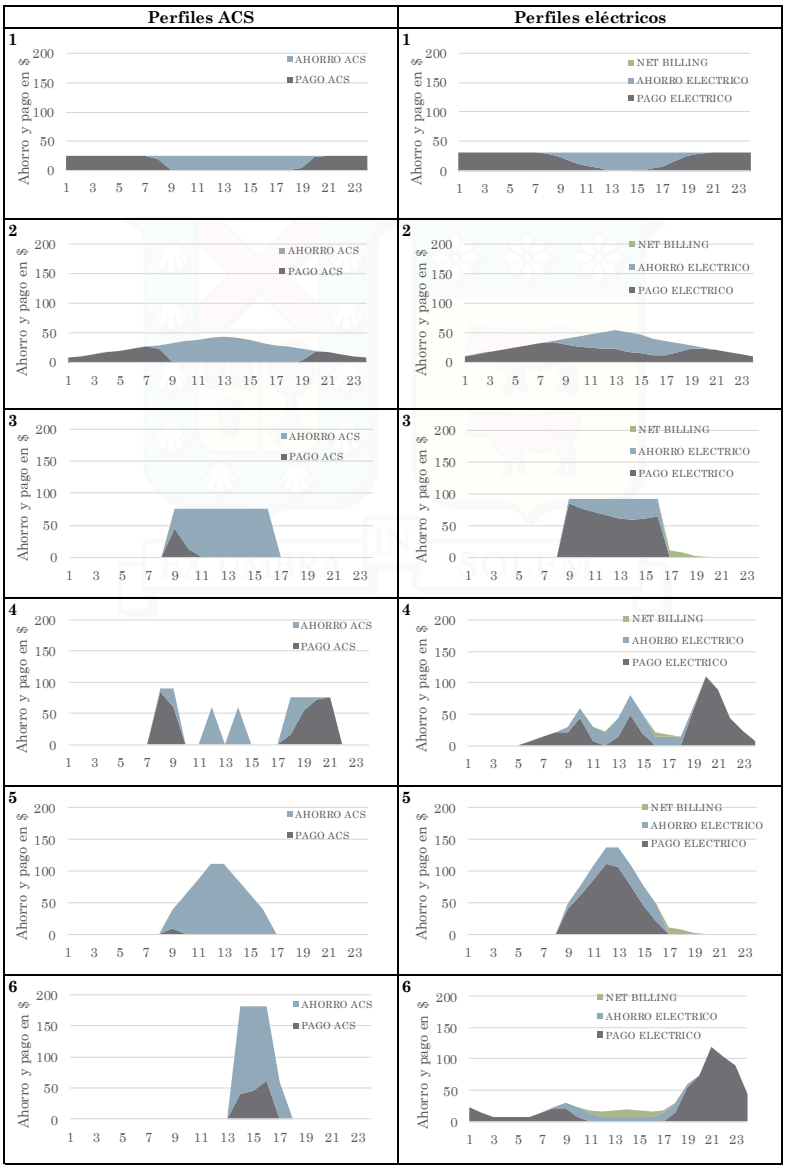

Figura 5.5: Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Valparaíso mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia).

Para el resto de ciudades se ve como el efecto del net billing es prácticamente despreciable en la totalidad de perfiles, salvo en el perfil 6 donde el consumo no se concentra en las horas peak de radiación, haciendo propicio el inyectar energía en la red durante esas horas, pero financieramente no tan conveniente ya que se contabiliza como un ahorro del 0,45 en comparación a la tarifa eléctrica.

En cuanto a los perfiles de ACS se ve como el área celeste (la que representa el ahorro) se torna predominante en los perfiles 3, 5 y 6, por lo que los mejores resultados para el LCS salen entre la combinación de estos con algun perfil eléctrico con resultados sobresalientes, entre los que destaca el perfil 2.

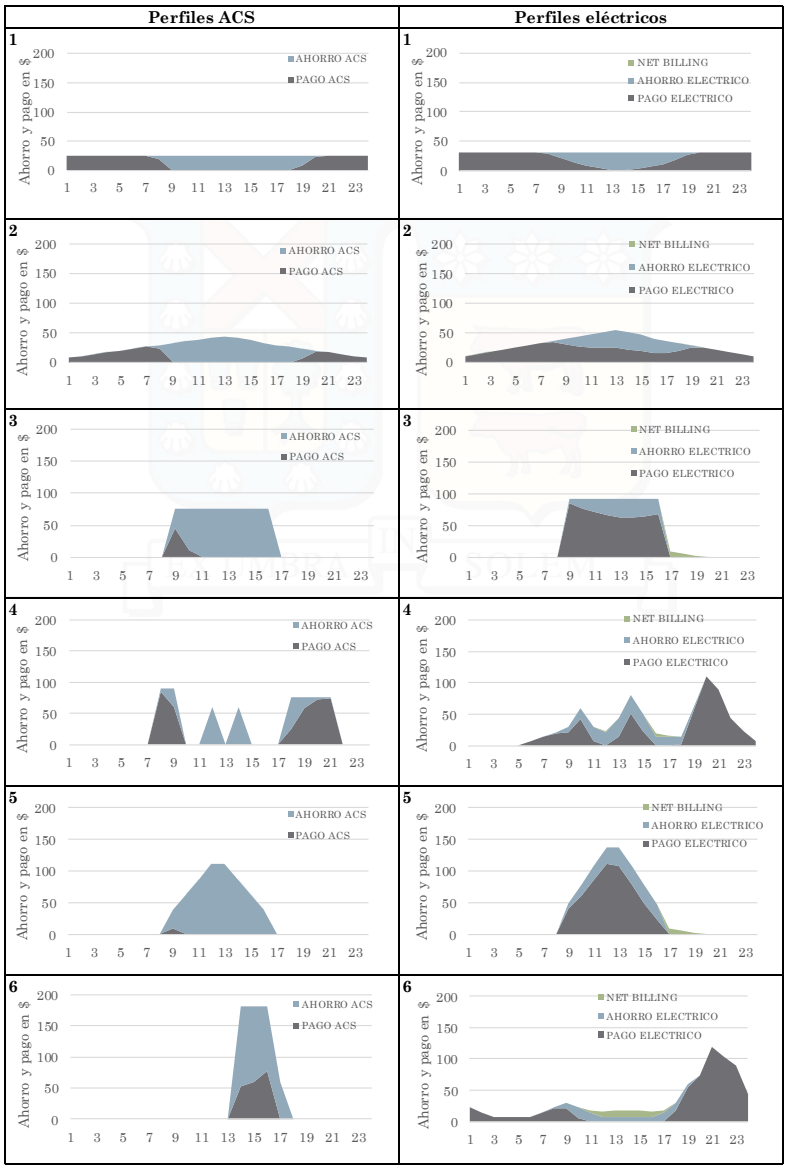

Figura 5.6: Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Santiago mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia).

Se puede ir viendo como el área azul va creciendo conforme se avanza hacia las ciudades del sur, es decir, el pago por energía auxiliar va tomando mayor preponderancia respecto al ahorro generado por el uso de energía solar, resultado que va muy de la mano respecto a los niveles de radiación obtenidos anteriormente.

Como era de esperarse los mejores resultados en el LCS se obtienen en la zona norte, en la ciudad de Antofagasta, donde la combinación del perfil 6 de ACS junto con el perfil 2 de electricidad entregaron el mejor resultado dentro de las ciudades evaluadas con $2.701.194 de ahorro total en los 20 años de evaluación,

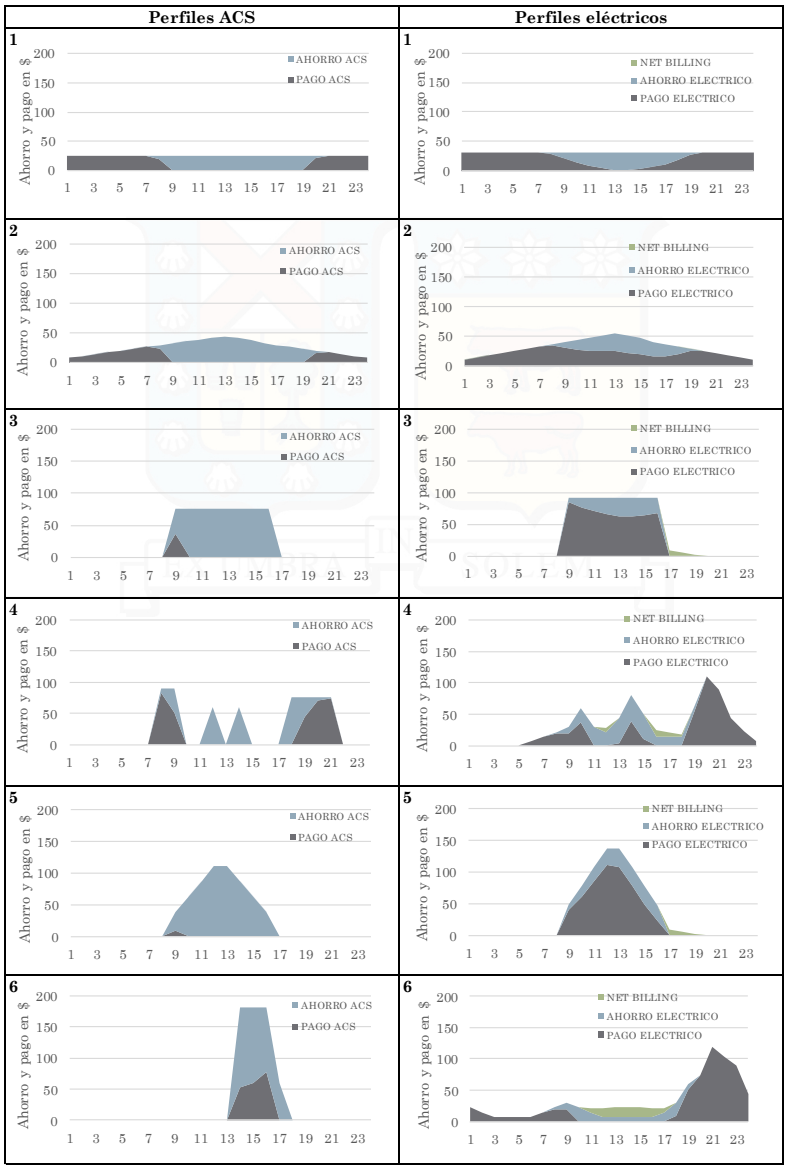

Figura 5.7: Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Concepción mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia).

esto en gran medida beneficiado ya que la demanda de ACS se concentra en la horas de mayor radiación, por lo que la fracción solar es prácticamente 1 con la utilización de ese perfil en esa zona, mientras que para el consumo eléctrico difícilmente se logra suplir totalmente con el panel, por lo que una demanda concentrada en las horas de radiación contribuye a un mayor ahorro, como lo es el perfil 2 donde se concentra en las horas peak de radiación el consumo, y descendiendo paulatinamente hacia la mañana o la tarde, por otro lado es preciso mencionar que para efectos de calculo es mejor consumir toda la energía generada ya que ésta se ahorra al mismo valor que si se estuviese obteniendo de la red, mientras que si se inyectara a la red este ahorro sólo se traduce al 45 % de que si se hubiese consumido, ya que la Ley del net billing estipula

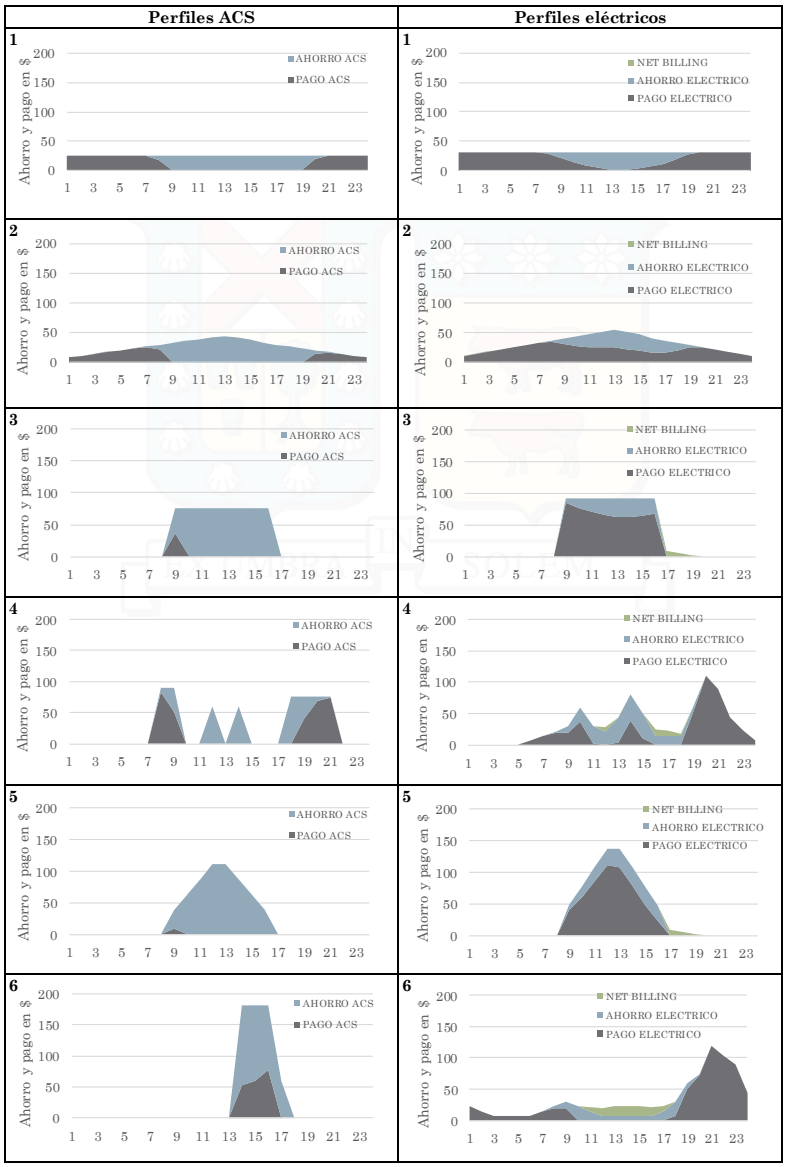

Figura 5.8: Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Osorno mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia).

el precio de venta de la generación al precio nudo de ésta. Junto con el LCS óptimo encontrado también se puede calcular el SOI, en este caso entrega uno de 1.4, lo que quiere decir que el ahorro representa 1.4 veces la inversión para este sistema residencial, inversión que fue cercana a los $1.916.939 considerando costos fijos y los 2.92 m^2 de colector solar híbrido que entrega el algoritmo.

Conjunto al perfil 6 de ACS también se obtuvieron excelentes resultados en los perfiles 3 y 5, todos con demandas acumuladas en las horas de mayor radiación que desembocan en LCS no menores a los $2.000.000, mientras que para los perfiles eléctricos con mayor éxito son los perfiles 2, 3 y 5, nuevamente

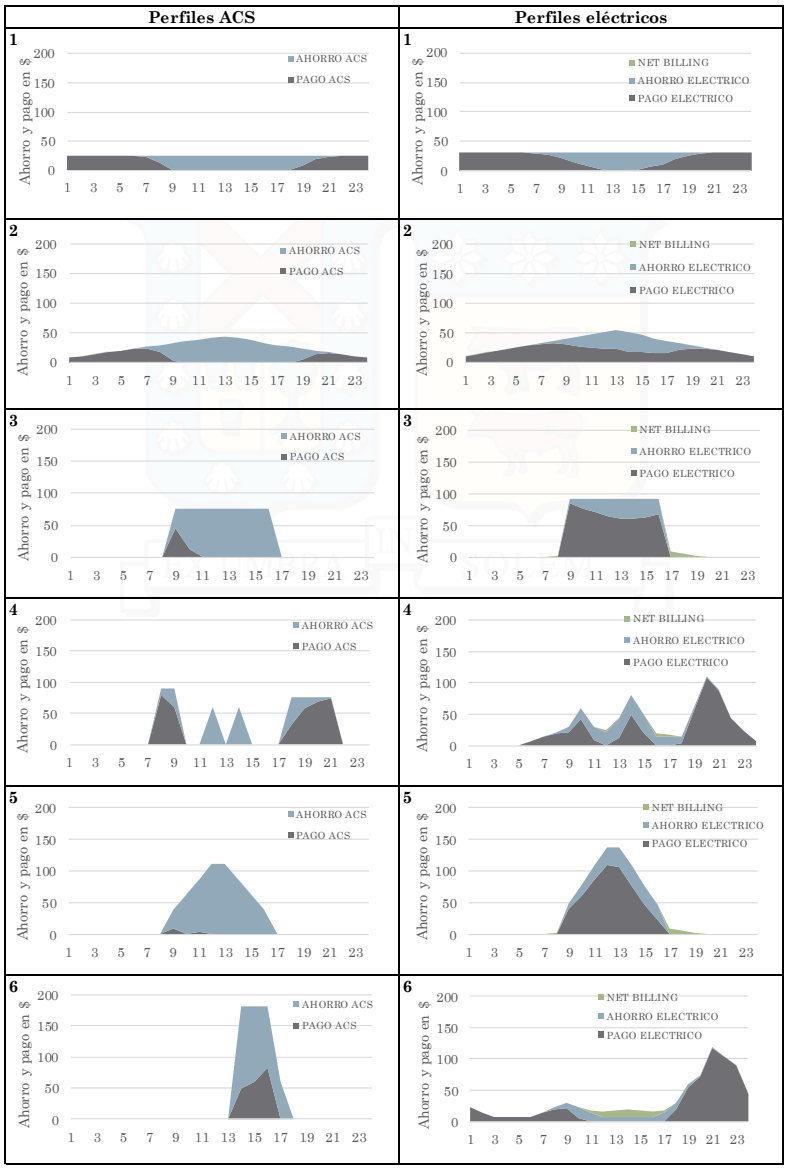

Figura 5.9: Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Punta Arenas mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia).

aquellos que concentran el consumo en el centro de las horas del día.

Por contrapartida, los peores resultados se encontraron en la zona Sur del país, como era de esperar, debido a los bajos niveles de radiación en comparación con la zona Norte. Es así como en la ciudad de Puerto Williams es posible encontrarse con LCS tan bajos alrededor de los $175.162 de ahorro en los 20 años de evaluación, con un SOI de 0,05, y esto sólo es alcanzado si se cuenta con aproximadamente 6 m^2 de área colectora, claro sí, evaluando con perfiles que no concentran su consumo en las horas peak de radiación, ya que de ser el caso, el LCS puede subir en esta zona a casi los $2.000.000 con tan sólo aumentar en un

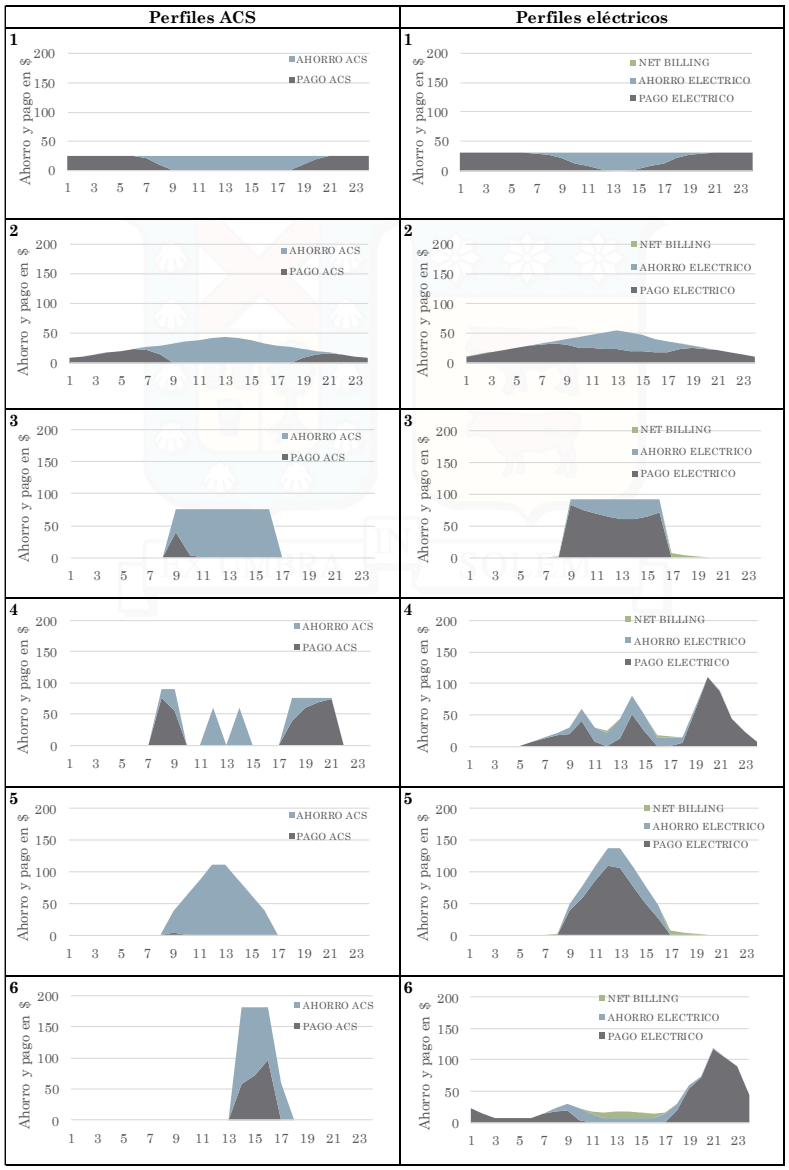

Figura 5.10: Resultado diario de los distintos perfiles evaluados en la ciudad de Puerto Williams mostrados hora a hora para el ahorro, pago y cuota de net billing obtenido en pesos (Fuente: Elaboración propia).

10 % el área colectora respecto a la zona norte. En las figuras 5.11 y 5.12 se pueden ver representadas las combinaciones de perfiles que dan los mejores y peores resultados para las ciudades consideradas en el estudio.

En las figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18 se ve la relación entre el SOI y el área colectora necesaria para alcanzar ese nivel de rendimiento entre ahorro e inversión, es claro el patrón que se sigue donde los mejores resultados se obtienen en el norte a pesar de los perfiles evaluados, considerando áreas colectoras menores pero sacando mucho mayor rendimiento a la inversión que aquellas zonas donde deben

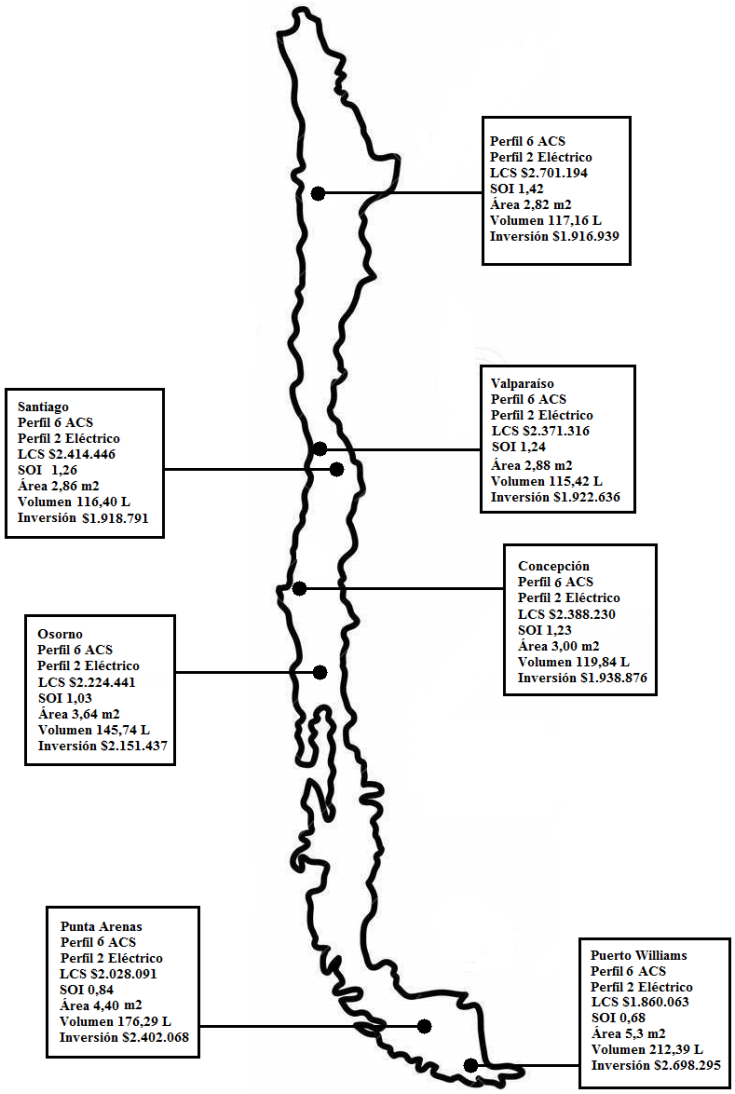

Figura 5.11: Representación de la combinación de mejores resultados para el LCS evaluado en las distintas ciudades del país (Fuente: Elaboración propia).

esforzarse por aumentar el área de recolección pero sin acercarse a los resultados de la zona norte.

Según los gráficos obtenidos la mejor combinación entre perfiles se da a partir del perfil 5 para ACS en combinación con los distintos perfiles eléctricos, ya que prácticamente en su totalidad de ciudades evaluadas el ratio SOI representa más de una vez la inversión, esto hace sentido ya que se aprovechan las horas de mayor radiación para abastacer la demanda de ACS. Por otro lado se ve como la mayor área colectora se presenta en Pto. Williams, pero a su vez presentando el peor SOI, llegando a necesitar 2,1 veces el área que se necesita en Antofagasta y obteniendo un SOI 50 % menor para un mismo perfil evaluado, por lo que se ve como el algoritmo optimiza en función del área para sacar provecho a la inversión, mejorando así el LCS.

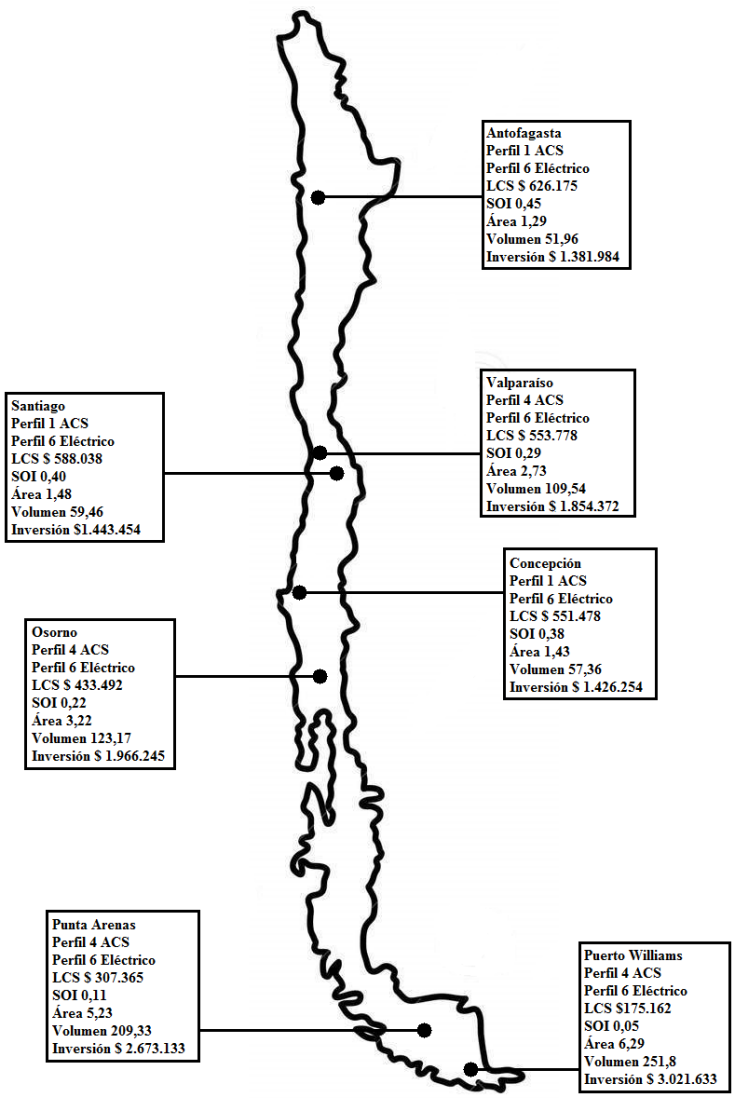

Figura 5.12: Representación de la combinación de peores resultados para el LCS evaluado en las distintas ciudades del país (Fuente: Elaboración propia).

Observando los resultados de lo perfiles eléctricos se ve como aquellos que acumulan el consumo en las horas peak de radiación son mas rentables, algo lógico de suponer viendo los resultados en los perfiles de ACS, ahora bien, en este estudio también se propone la incidencia de la nueva ley net billing en un sistema ON GRID, donde lo que no se consume se inyecta a la red de manera directa pero pagándose a un valor del 45 % del precio de venta de la misma energía eléctrica proporcionada por las distribuidoras, para de esta manera amortiguar en alguna medida aquellos perfiles donde se demanda en horas que no se cuenta con mayor radiación por parte del sol como lo son el perfil 4 y 6, y son justamente estos los que cuentan con los peores resultados, siendo el perfil 6 aquel con los LCS más bajos en cualquiera de las combinaciones con los perfiles de ACS, llegando en Puerto Williams a un LCS en 20 años de tan sólo $175.162 con un SOI de

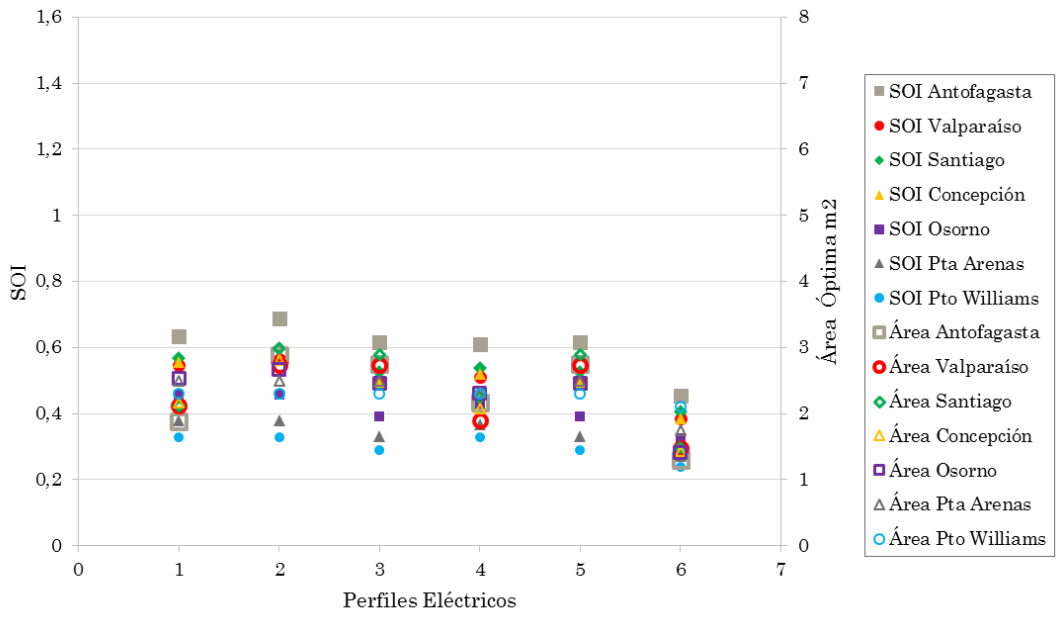

Figura 5.13: Evaluación del perfil 1 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia).

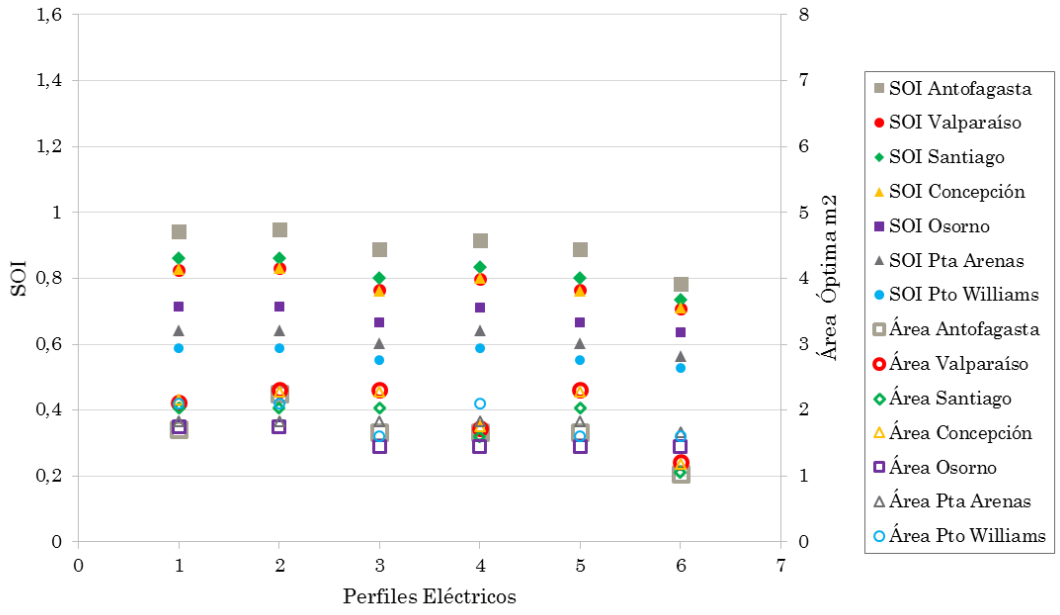

Figura 5.14: Evaluación del perfil 2 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia).

0.05, esto se puede explicar ya que el algoritmo recomienda, según los datos obtenidos, consumir la energía eléctrica de manera inmediata, ya que esto significa dejar de consumir aquella que proporciona la red y por ende se cuantifica el ahorro al mismo valor de venta de las distribuidoras, mientras que si se inyecta a la red en horas donde no se consume energía ésta se cuantifica al 0,45 %, menos de la mitad que si éste ahorro

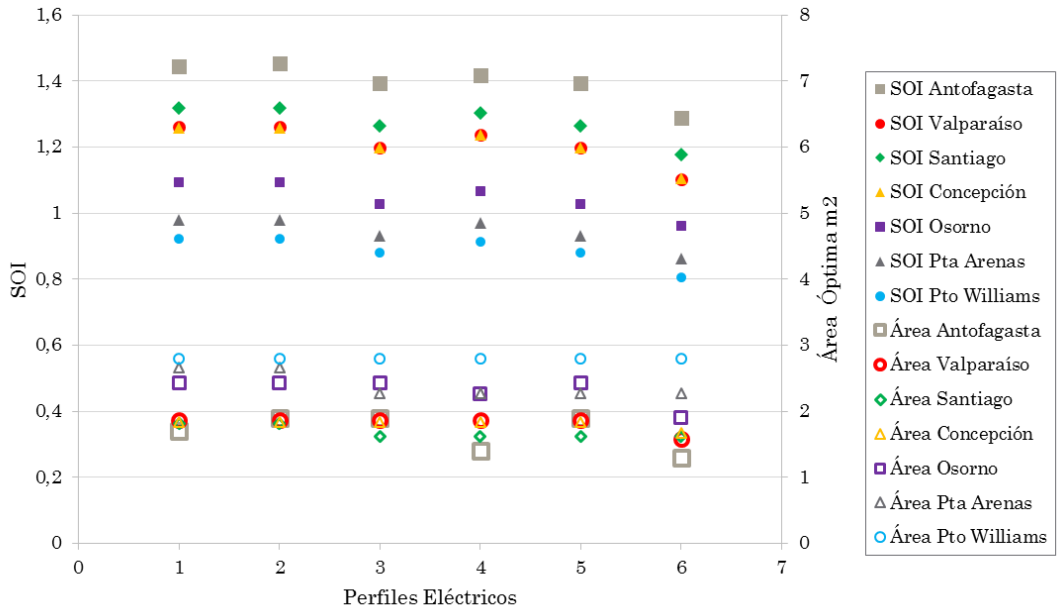

Figura 5.15: Evaluación del perfil 3 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia).

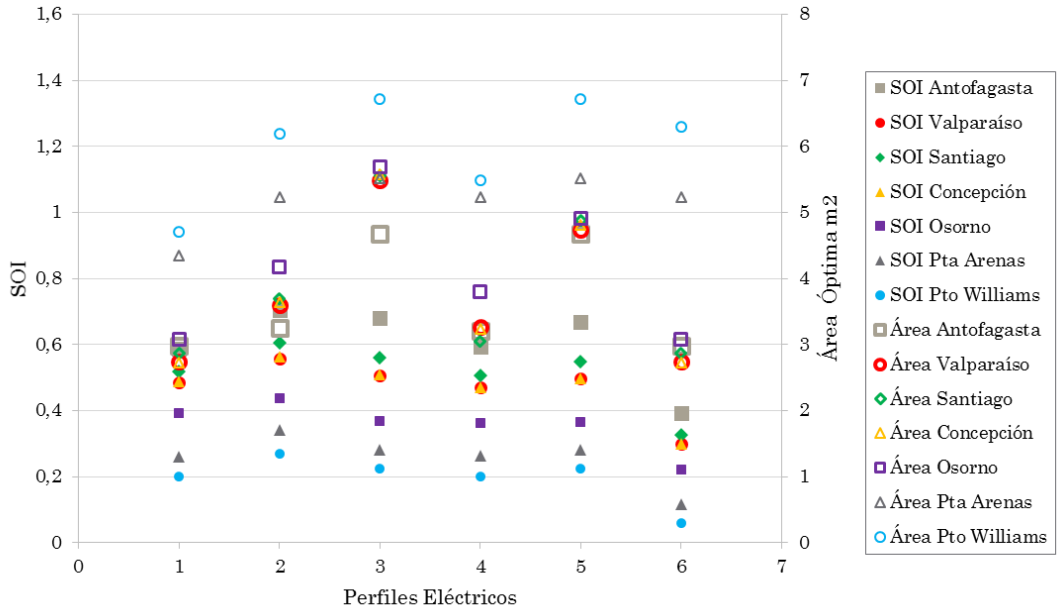

Figura 5.16: Evaluación del perfil 4 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia).

hubiese sido consumido, por lo que no es recomendable esperar retornos en rentabilidad exagerados a partir del efecto del net billing, sino más bien suplir la energía que se consume con los paneles y el exceso (que pocas veces se genera debido al alto consumo de energía) se inyecte a la red.

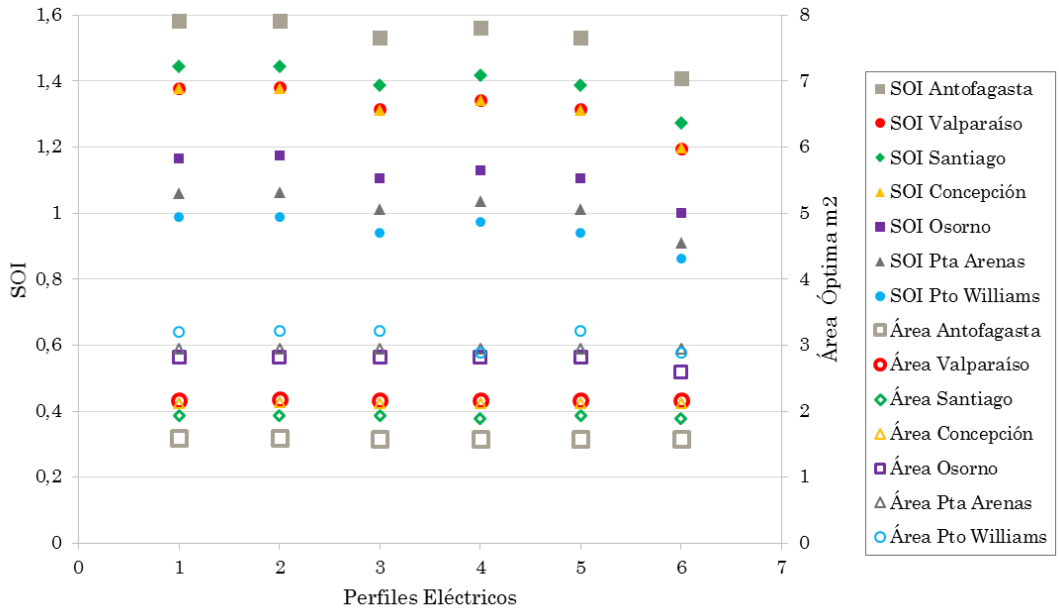

Figura 5.17: Evaluación del perfil 5 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia).

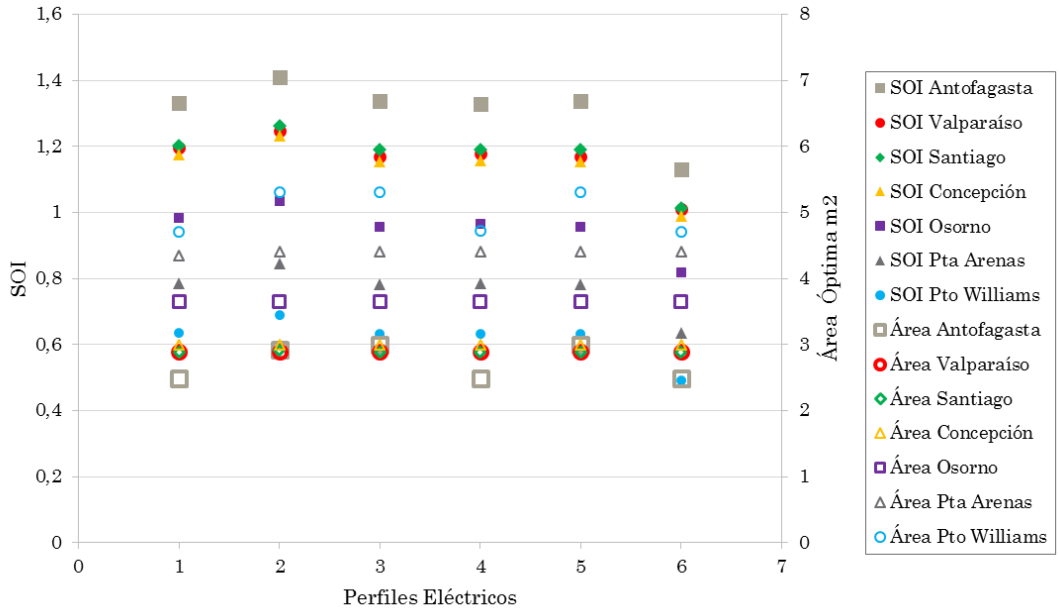

Figura 5.18: Evaluación del perfil 6 de ACS frente a los 6 perfiles de electricidad para obtener el SOI y el área óptima (Fuente: Elaboración propia).

Por otro lado se ve en la figura 5.19 como a medida que se va avanzando hacia el sur el LCS comienza a descender, no así el área colectora que aumenta para obtener mayores beneficios pero aumentando a su vez la inversión, lo que desencadena en un SOI menor, en simples palabras en el norte se saca mayor rentabilidad con poca área colectora, mientras que al otro extremo sur se debe aumentar en 54 % el área para obtener un

33 % menos de LCS que en la zona norte. También se puede observar que en los perfiles de ACS 3, 5 y 6 combinados con el promedio de los perfiles eléctricos (figura 5.20) se obtienen los LCS más altos debido a la distribución que estos poseen la cual favorece a la recolección de radiación en las horas peak.

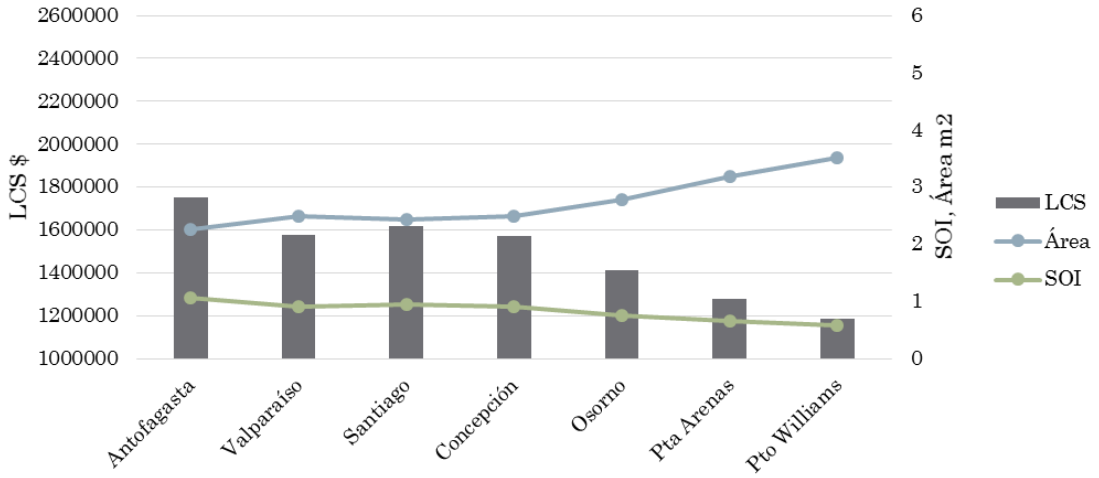

Figura 5.19: Comparación por ciudad de los promedios obtenidos en los diferentes perfiles para LCS, área colectora y SOI. (Fuente: Elaboración propia).

Para un mayor detalle se puede consultar el Anexo B donde se encuentran todos los resultados obtenidos a lo largo de los 20 años de evaluación que se aplicaron en este estudio.

5.4. Análisis de sensibilidad

5.4.1. Variación de demanda

Para el análisis de la variación en la demanda modifica desde un -30 % hasta 30 % al mejor y peor resultado en cuanto a LCS obtenido, estos son en Antofagasta con el Perfil 6 ACS/2 eléctrico y Puerto Williams con el Perfil 4 ACS/6 eléctrico, los resultados obtenidos ante estos cambios se representan en las figuras 5.21 y 5.22 respectivamente, en éstas se puede ver como aumenta el LCS a medida que aumenta la demanda, esto se aplica como un generalidad para las demás ciudades, mientras que la fracción solar se reduce a medida que aumenta la demanda ya que la tecnología captadora se ve cada vez mas sobrepasada ante las exigencias de consumo.

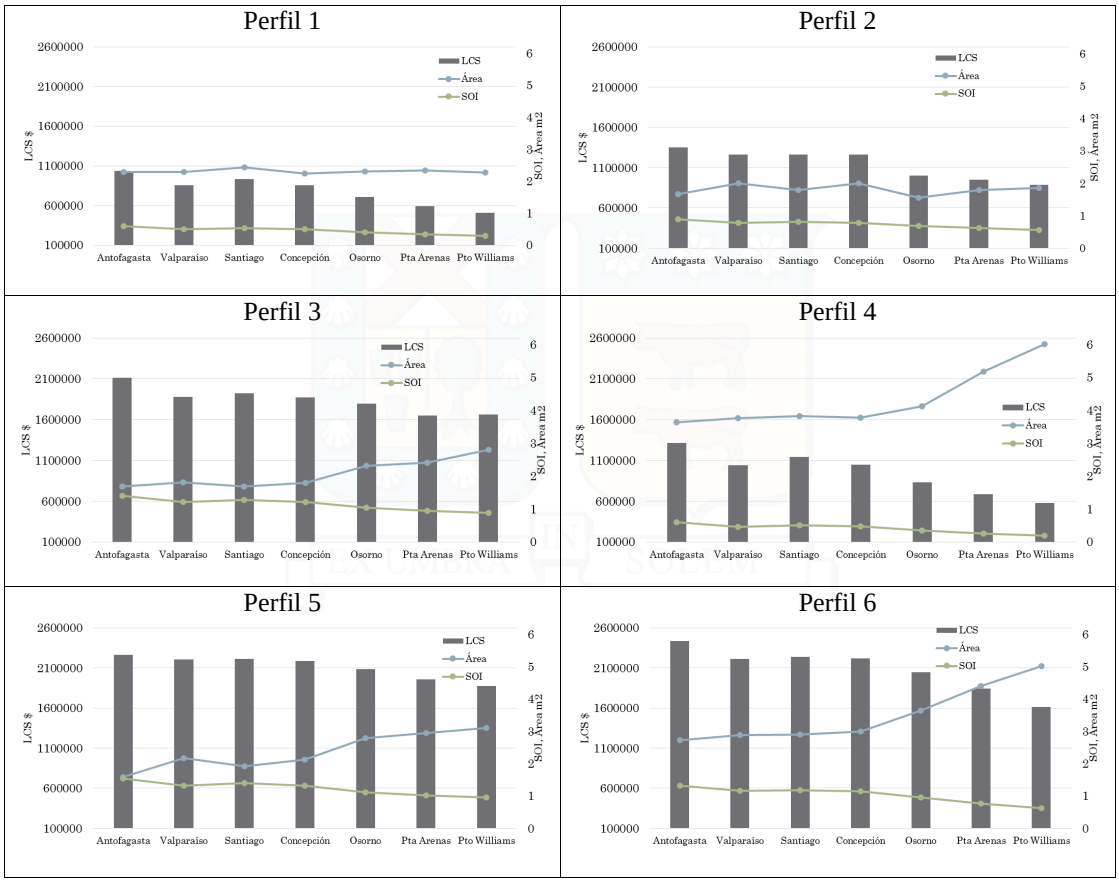

Figura 5.20: Comparación por ciudad de los resultados obtenidos en los diferentes perfiles de ACS comparados con los promedios de perfiles de electricidad para LCS, área colectora y SOI. (Fuente: Elaboración propia).

También se puede observar las diferencias entre la cantidad de energía solar obtenida a través de la tecnología solar utilizada en las dos ciudades analizadas, ubicadas en extremos distintos del país, el mejor de los casos la fracción solar obtenida es prácticamente 1 en Antofagasta, lo que estima que la totalidad de la demanda de ACS es cubierta bajo ese perfil, caso contrario en Puerto Williams donde incluso reduciendo la demanda al 30 % la fracción solar no alcanza ni siquiera el 70 %. Caso similar ocurre para la fracción obtenida en la parte fotovoltaica, donde en Antofagasta se puede llegar prácticamente al 60 % con un área de 2.92 m^2 disminuyendo en 30 % la demanda, mientras que en el peor de los casos la fracción solar alcanza el 20 % con el doble de área colectora en Puerto Williams.

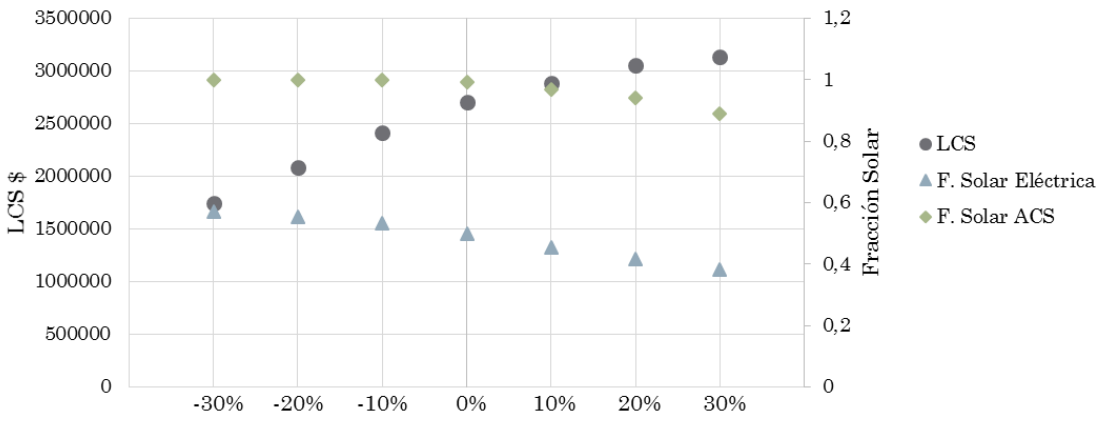

Figura 5.21: Variación de la demanda en el perfil 6/2 aplicado a la ciudad de Antofagasta (Fuente: Elaboración propia).

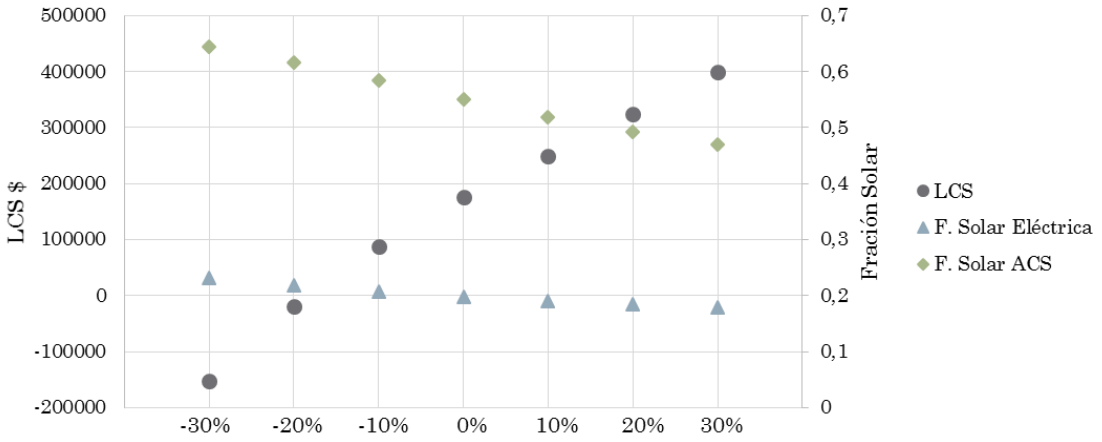

Figura 5.22: Variación de la demanda en el perfil 4/6 aplicado a la ciudad de Puerto Williams (Fuente: Elaboración propia).

5.4.2. Parámetros del algoritmo genético

Una vez obtenidos los resultados con el modelo propuesto aplicado a los distintos perfiles de consumo se procede a hacer un estudio de los parámetros de control de los AG a partir de De Jong, Hesser, Grefenstette

Autor	LCS $	Generación
Caso Propuesto	2.701.194,308	67
De Jong	2.632.026,26	72
Hesser	2.668.430,496	89
Grefenstette	2.682.992,19	54
Schaffer	2.719.396,426	94

Tabla 5.1: Resultados parámetros de control AG (Fuente: Elaboración propia)

y Schaffer. Los parámetros a evaluar son: Tamaño de la población, tasa de mutación y tasa de cruce. En la tabla 5.1 se observan los valores de los parámetros estudiados.

En el análisis se utilizó la localidad de Antofagasta con la combinación de perfil de ACS 6 y perfil eléctrico 2, el cuál representa el mejor resultado para el LCS en este estudio. El mejor resultado se presenta con la configuración de Schaffer, con 94 generaciones que suponen un tiempo de mayor iteración pero que para éste caso no trae mayores problemas debido al corto tiempo de procesamiento, por otro lado aquella simulación que procesó más rápido fue la configuración de Grefenstette, con tan sólo 54 generaciones. Para casos donde la resolución para la simulación es de tiempos excesivamente largo cualquier tipo de ayuda en reducir estos tiempos es bienvenida, en tal caso utilizar una configuración que suponga un tiempo menor a merced de no reducir la precisión en la función objetivo queda sujeto a la decisión del programador, sólo queda mencionar que un aumento en las generaciones de un 40 % entregó resultados de LCS 0,6 % más altos.

5.4.3. Análisis de emisiones

Es un hecho que el utilizar las energías renovables para suplir el uso de las convencionales trae consigo constantes beneficios, y no tan sólo económico, sino también al medio ambiente, por lo que se puede cuantificar este impacto positivo al comparar las cantidades de CO_2 que se dejan de emitir al hacer uso de otras fuentes de energía, como lo es la solar en el presente estudio. Para el caso del ACS se deja de utilizar en parte el gas natural, el cual dependiendo de la configuración de perfiles de demanda se utiliza en menor o mayor cuantía. En la figura 5.23 se puede ver la cantidad de CO_2 que se deja de emanar al medio ambiente, evaluando con los factores de emisiones de (Ministerio de Energía, 2018) con 1,97 kg CO_2/m^3 para el gas natural, y 0,582 kg CO_2/kWh de electricidad, con los perfiles de consumo 6 de agua caliente sanitaria y perfil 2 de electricidad (aquella combinación que entregó los mejores resultados financieros). Como era de esperar en la zona norte es donde se obtienen los mejores resultados y donde más ahorro energético se produce y, a su vez, más emisiones se dejan de lado. Se ve como la electricidad presenta mayor magnitud en el total

final ya que deja una mayor huella de carbono que el gas natural, representando prácticamente el 85 % del total de emisiones, por otro lado, si se evalúa en el horizonte de 20 años del presente estudio, en Antofagasta se pueden dejar de producir 22.144 kg de CO_2, mientras que en Puerto Williams se logra llegar a 20.732 kg, pero con el 53 % más de área que en la ciudad del norte, esto bajo el contexto de una casa residencial no deja de ser menor para contribuir a un planeta más sustentable. También se compara las emisiones que se dejan de lado evaluando los perfiles eléctricos (ya que tienen mayor preponderancia en el resultado final ambiental) en conjunto al promedio de emisiones que deja el gas natural, entregando los resultados que se muestran en la figura 5.24 donde se deja ver como el perfil eléctrico 2 genera el mayor ahorro de CO_2 para el medio ambiente, aunque en general todos los perfiles eléctricos entregan aporte similar o del mismo orden de magnitud, salvo el 6 que no aprovecha para nada las horas peak de radiación concentrando su consumo en las noches o mañanas.

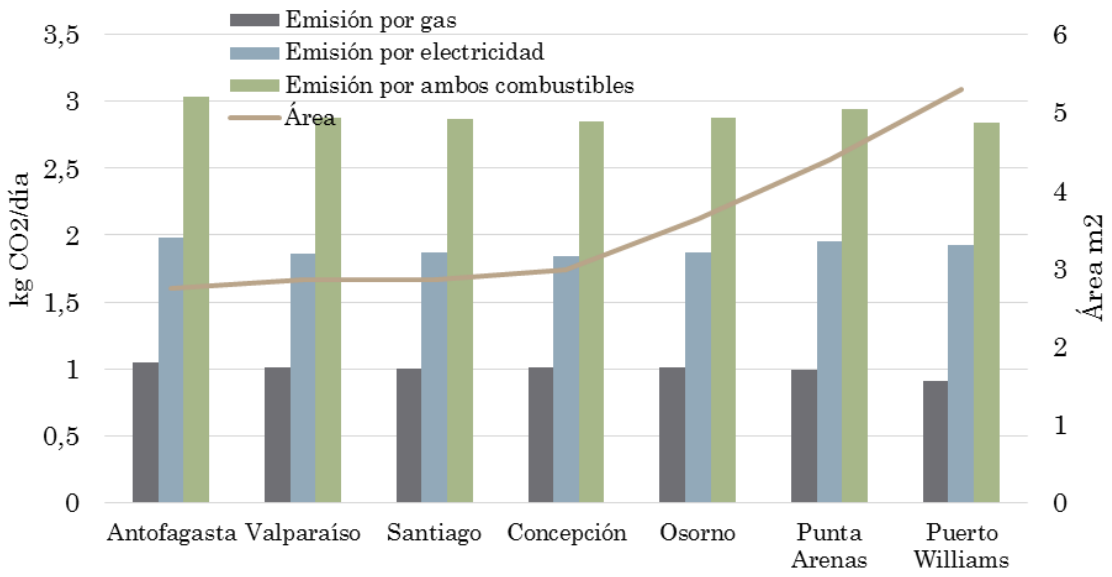

Figura 5.23: Emisiones de CO_2 en kg/día que se dejan de emitir con el uso de colectores solares híbridos para las ciudades evaluadas con el perfil 6 ACS y 2 eléctrico para el área colectora óptima (Fuente: Elaboración propia).

5.4.4. Resultados financieros y análisis de riesgo

Con la intención de conocer como repercute en los resultados finales los cambios en los parámetros financieros es que se lleva a cabo un análisis de sensibilidad. Este se aplica sobre el perfil 6/2 en Antofagasta y el perfil 4/6 en Puerto Williams, el mejor y peor resultado de este estudio. En las figuras 5.25 y 5.26 se ven los resultados de las variaciones aplicadas, para el caso de Antofagasta se ve como las mayores variaciones

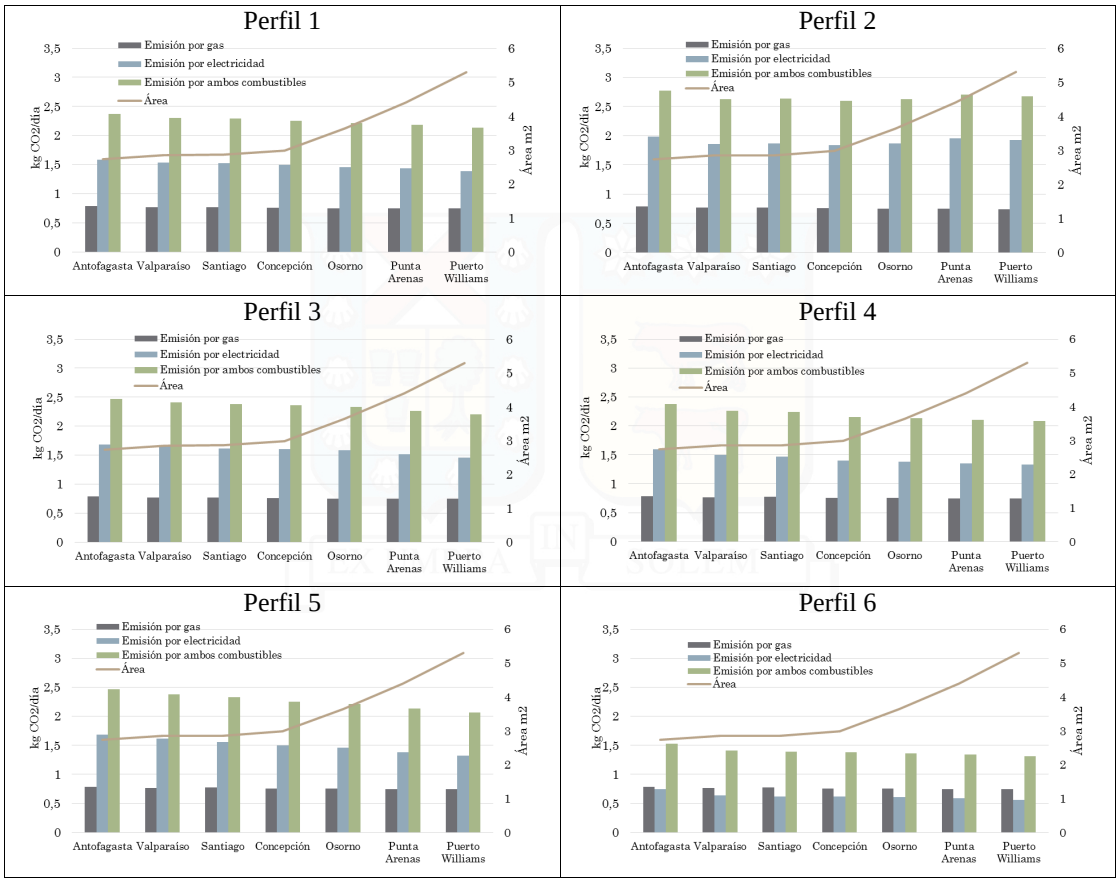

Figura 5.24: Emisiones de CO_2 en kg/día que se dejan de emitir con el uso de colectores solares híbridos para las ciudades evaluadas en los distintos perfiles eléctricos comparada con el promedio de resultados de ACS para el área colectora óptima (Fuente: Elaboración propia).

en el LCS se producen con los cambios de el precio de la electricidad y el gas, donde una variación del conjunto de estos en un 30 % puede modificar hasta prácticamente un 50 % el LCS, mientras que cambios en el apalancamiento, la tasa de interés de la deuda el el costo de operación y mantenimiento ni tienen mayor incidencia. Por otra parte, para el caso de Puerto Williams, cambios en la inversión inicial y en la tarifa de electricidad y gas producen cambios realmente sinificativos para el LCS, esto debido a que es tan bajo que las modificaciones impactan de gran manera su valor, cuadruplicándolo incluso al aumentar en 30 % el valor tarifario de la energía comprada, mientras que la tasa de interés y los costos de operación y mantenimiento, como en Antofagasta, no acarrean mayor incidencia.

Una vez que se determina el nivel de incidencia e impacto de cada parámetro por separado se procede a realizar un análisis de estocástico para un escenario dinámico mediante simulaciones de Montecarlo, evaluando las variables en un rango de +10 % y -10 % Jun et al. (2011). Este análisis se realiza sólo para el

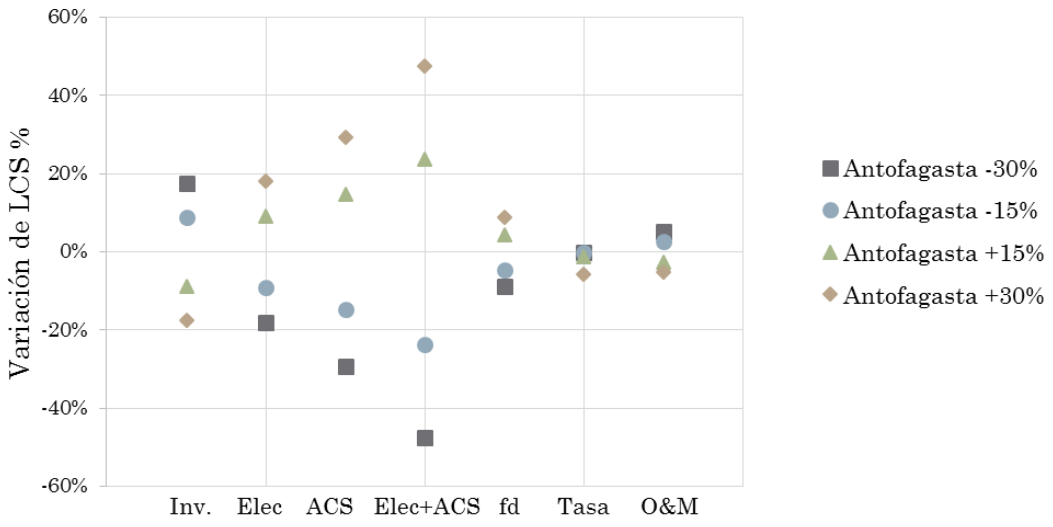

Figura 5.25: Variación de parámetros financieros bajo el método OAT en el perfil 6/2 en Antofagasta (Fuente: Elaboración propia).

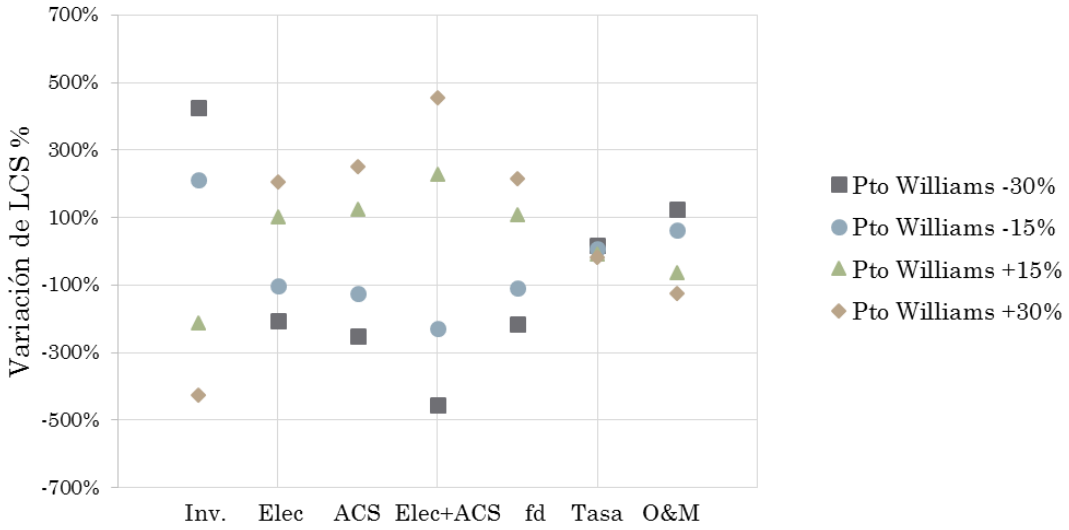

Figura 5.26: Variación de parámetros financieros bajo el método OAT en el perfil 4/6 en Puerto Williams (Fuente: Elaboración propia).

mejor resultado de este estudio, es decir, el perfil 6/2 de Antofagasta. Se observa la frecuencia y probabilidad acumulada del LCS en un escenario dinámico, el riesgo de que sea menor a $2.314.672 es de 0 %, y será mayor a $2.600.000 el 76 % de los casos. Por otro lado se corrobora la teoría anterior, donde la tarifa de la energía era el mayor factor de incidencia a la hora de cambios, ya que la tarifa de gas aporta un 60.8 % de

contribución a la varianza, seguida de la tarifa eléctrica con un 22.4 %.

6 | Conclusiones

En el presente estudio un modelo de simulación mediante algoritmos genéticos es aplicado para estudiar el potencial solar de la implementación de un arreglo de colectores solares híbridos para de esta forma encontrar el área colectora óptima que maximiza el LCS de la instalación. Este modelo se aplica en 7 ciudades del país de norte a sur para ver las incidencias de la localidad geográfica en donde se hace la evaluación.

En primer lugar se realiza la validación del modelo tomando los datos planteados por A. Tiwari en su evaluación de un sistema de colectores solares híbridos situado en Chipre, resultando en valores de gran similitud (9 % de error). Posterior a esto, se aplica el modelo con el colector solar híbrido en cuestión para 7 ciudades a lo largo de Chile con distintos perfiles de demanda tanto para el ACS como para la electricidad, configurádonse en 36 combinaciones diferentes para evaluar las 7 ciudades, es decir, 252 iteraciones de resultados distintos.

Una vez obtenidos los resultados para los distintos perfiles estudiados se muestra que para todo el territorio la implementación es rentable, ya que el LCS no da negativo bajo los parámetros estudiados, ahora bien, tampoco es muy alentador por ejemplo en Puerto Williams donde el LCS es de tan sólo $ 175.162 con un SOI de 0,05. Del total configuraciones posibles, el 35 % de las veces el SOI supera el valor 1, es decir, el ahorro supera más de una vez la inversión, mientras que sólo el 25 % de los casos supera los $ 2.000.000 de LCS.

En términos generales el área óptima promedio de las ciudades evaluadas resultó en 2,73 m^2 con una inversión de $ 1.485.417, si se evalúan los mejores resultados la combinación de perfiles más sobresaliente resulta ser la del perfil 6 de ACS y 2 de electricidad, cuantificando en Antofagasta un LCS de $ 2.701.194 y un SOI de 1,4, mientras que en Puerto Williams la misma combinación entrega un LCS de $1.860.063 y un SOI de 0,6, debido a que se debió incurrir en un área colectora 1,8 veces mayor para maximizar la rentabilidad. Si

se evalúa el peor caso éste radica, como era de esperar, en la zona con menor radiación, ubicada al sur la ciudad de Puerto Williams logró alcanzar la cifra de $ 175.162 con la combinación de perfiles 4 de ACS y 6 de electricidad, una tónita a lo largo de la ciudades evaluadas donde ésta configuración presenta los peores resultados del muestreo, comenzando con $ 759.654 en Antofagasta, pasando por $ 621.355 en Valparaíso, $ 555.227 en Concepción y $307.365 en Punta Arenas. Con esto se verifica que los mejores resultados se obtienen con perfiles que aprovechen el peak solar para consumo inmediato, tanto el perfil 6 como el 5 y el 3 en ACS cumplen esta característica, potenciando los resultados de los perfiles eléctricos, los cuales a su vez, si bien cuentan con el efecto del Net Billing para amortiguar la dependencia del consumo a las horas de mayor radiación, si ésta energía no se consume de inmediato se inyecta a la red con el valor de nudo, es decir, 0,45 veces el valor de venta de la distribuidora, en cambio si se consume de inmediato este ahorra se representa con el valor de venta de la red (proporción 1:1), por lo que el efecto Net Billing poco incide en la elección de perfiles óptimos, siendo aquellos con mejor resultado el 2, 3 y 5, nuevamente, aquellos que aprovechan el consumo en las horas peak.

El aumento en la demanda genera beneficiosos resultados en el estudio en lugares donde la radiación solar es mayor, aumentando el LCS a medida que crece la demanda energética, pero a su vez reduciendo la fracción solar ya que el arreglo térmico fotovoltaico comienza a quedarse corto ante el consumo exigido. La variación de parámetros financieros demuestra la alta variabilidad ante cambios en los precios de las energías auxiliares, contribuyendo a la varianza un 60,8 % el costo del gas natural y un 22,4 % la tarifa eléctrica en el escenario dinámico.

Como resultado de este trabajo se obtiene la rentabilidad del proyecto en distintas zonas evaluadas, como promedio a nivel nacional se obtiene un LCS de $1.485.417 con un SOI de 0,8 y una inversión de $1.852.972, los resultados cambian radicalmente dependiendo de donde se posicione el proyecto, en el mejor de los casos se logra recuperar 1,5 veces la inversión traducida en ahorro durante los 20 años evaluados con un área colectora de 2,9 m^2, ahorro que seguirá creciendo a medida que se aumenta el periódo de evaluación, sin mencionar los beneficios al planeta llegando a dejar de lado 22.000 kg de CO_2 durante los 20 años de evaluación en Antofagasta, queda en manos del lector decidir si es atractivo invertir en este tipo de sistemas híbridos, lo que es innegable es el aporte que se genera al medio ambiente al dejar de depender de energías fósiles para contribuir a prolongar la vida del planeta en que se habita.

Bibliografía

Araya Ibaceta, Rodrigo Enrique (2017). Optimización de una planta de colectores solares térmicos planos con algorítmos genéticos para diferentes perfiles de demanda energética. *Valparaiso, Chile*. (document), 3.10, 4.4

Benford, Frank y Bock, John E (1938). *A time analysis of sunshine*. General electric Company, Research laboratory. 3.2.2

Bergman, Theodore L; Incropera, Frank P; DeWitt, David P; y Lavine, Adrienne S (2011a). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons. 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3

Bergman, Theodore L; Incropera, Frank P; Lavine, Adrienne S; y DeWitt, David P (2011b). *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons. 3.1

Bustos, F; Toledo, A; Contreras, J; y Fuentes, A (2016). Sensitivity analysis of a photovoltaic solar plant in chile. *Renewable Energy*, 87, 145–153. 3.2, 4.7.4

Bustos Olavarría, Fabián Andrés (2013). Una metodología para evaluar el potencial de energía solar térmica y fotovoltaica en chile. *Valparaiso, Chile*. 3.6.5

Chopra, KL; Paulson, PD; y Dutta, V (2004). Thin-film solar cells: an overview. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(2-3), 69–92. 3.6

CNE (2017). Anuario estadistico de energia 2007-2017. (document), 1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5

CNE, UTFSM (2008). Pnud: Irradiancia solar en territorios de la república de chile. *Santiago de Chile*. 3.3

De Jong, Kenneth Alan (1975). Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems. 4.7.2

Duffie, John A y Beckman, William A (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons. 3.2.2, 3.2.3, 3.6.4, 4.1, 4.5, 4.5

Erbs, DG; Klein, SA; y Duffie, JA (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar energy*, 28(4), 293–302. 3.2, 3.6

Erdil, Erzat; Ilkan, Mustafa; y Egelioglu, Fuat (2008). An experimental study on energy generation with a photovoltaic (pv)–solar thermal hybrid system. *Energy*, 33(8), 1241–1245. 1

Grefenstette, John J (1986). Optimization of control parameters for genetic algorithms. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 16(1), 122–128. 4.7.2

Gruber, JK; Jahromizadeh, S; Prodanović, M; y Rakočević, V (2014). Application-oriented modelling of domestic energy demand. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 656–664. 4.4, 4.4

Hesser, Jürgen y Männer, Reinhard (1990). Towards an optimal mutation probability for genetic algorithms. In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature* (pp. 23–32).: Springer. 4.7.2

Hidalgo, Pablo Daniel (2006). Proyecto electrificación rural, localidad de camar, ii región, antofagasta. *Santiago, Chile*. 3.4.2

Holland, John Henry (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press. 1

Hottel, Hoyt y Woertz, B (1942). Performance of flat-plate solar-heat collectors. *Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Eng.);(United States)*, 64. 3.5

Huang, BJ; Lin, TH; Hung, WC; y Sun, FS (2001). Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar energy*, 70(5), 443–448. (document), 3.4

Jun, Dong; Xu, Zhang; Xue, Jiang; Xiaolin, Xu; y Yuxi, Tang (2011). Economic analysis and policy suggestions on gas power generation projects considering carbon emission reduction. *Procedia Environmental Sciences*, 11, 1029–1038. 4.7.4, 5.4.4

Kalogirou, Soteris (1996). Economic analysis of solar energy systems using spreadsheets. *Renewable energy*, 9(1-4), 1303–1307. 4.5

Kalogirou, Soteris A (2004). Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms. *Applied Energy*, 77(4), 383–405. 4.4, 4.4

Kalogirou, Soteris A (2013). *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press. (document), 3.2, 4.5

Klein, Sanford Alan; Beckman, WA; y Duffie, John A (1976). A design procedure for solar heating systems. *Solar Energy*, 18(2), 113–127. (document), 3.8

Kulkarni, Govind N; Kedare, Shireesh B; y Bandyopadhyay, Santanu (2007). Determination of design space and optimization of solar water heating systems. *Solar Energy*, 81(8), 958–968. 4.4

Miller, Andrew (2005). Renewable energy: its physics, engineering, use, environmental impacts, economics and planning, bent sorensen elsevier academic press (2004),£ 39.99, euros59. 95, us 84.95, isbn: 0-12-656153-2. 3.4, 3.4.2

Ministerio de Energía (2018). http://huelladecarbono.minenergia.cl/. http://huelladecarbono.minenergia.cl/combustible-chile/. [Acceso Septiembre 2018]. 4.7.3, 5.4.3

Molina, Alejandra; Falvey, Mark; y Rondanelli, Roberto (2017). A solar radiation database for chile. *Scientific reports*, 7(1), 14823. (document), 3.2.1, 4.2, 4.3, 4.6, C.1, C.2, C.3, C.4, C.5, C.6, C.7

Nacif Hartley, Javier Andres; Latorre, Roman; et al. (2011). *Acumulación térmica para un sistema solar de calefacción activo*. Technical report, e-libro, Corp. (document), 3.9

Ochoa, Gabriela; Harvey, Inman; y Buxton, Hilary (1999). Error thresholds and their relation to optimal mutation rates. In *European Conference on Artificial Life* (pp. 54–63).: Springer. 3.6.5

Othman, Mohd Yusof; Ruslan, Mohd Hafidz; Mat, Sohif; y Sopian, Kamaruzzaman (2009). Collectors suitable for building integrated applications. *American journal of environmental sciences*, 5(5), 618–624. (document), 3.5

Palma, R; Jiménez, G; y Alarcón, I (2009). Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico chileno (renewable energies in the chilean power market). *Comisión Nacional de Energía (CNE) Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Santiago*. 2.2

Renno, Carlo (2014). Optimization of a concentrating photovoltaic thermal (cpv/t) system used for a domestic application. *Applied Thermal Engineering*, 67(1-2), 396–408. 3

Richardson, Ian; Thomson, Murray; Infield, David; y Clifford, Conor (2010). Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model. *Energy and buildings*, 42(10), 1878–1887. 4.4

Ruegg, Rosalie T (1975). *Solar heating and cooling in buildings: methods of economic evaluation*. Citeseer. 4.5

Schaffer, J (1989). A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization. *San Meteo, California*. 4.7.2

Schott, T (1985). Operation temperatures of pv modules: a theoretical and experimental approach. In *EC Photovoltaic solar energy conference. 6* (pp. 392–396). 3.6.3

Sharma, Naveen et al. (2012). Stochastic techniques used for optimization in solar systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1399–1411. 1

Skoplaki, EPJA y Palyvos, JA (2009). Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable energy*, 34(1), 23–29. 3.6.1

Statistical, BP (2018). Statistical review of world energy 2018. (document), 2.1

Tiwari, Arvind y Sodha, MS (2006). Performance evaluation of solar pv/t system: an experimental validation. *Solar Energy*, 80(7), 751–759. (document), 3.6, 3.7, 4.1, 4.1, 4.1, 5.1

Tiwari, Gopal Nath (2002). *Solar energy: fundamentals, design, modelling and applications*. Alpha Science Int'l Ltd. 3.6.3.3

Tyagi, VV; Kaushik, SC; y Tyagi, SK (2012). Advancement in solar photovoltaic/thermal (pv/t) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1383–1398. (document), 3.1, 3.6, 3.3

Zondag, Herman A; de Vries, DW de; Van Helden, WGJ; Van Zolingen, RJC; y Van Steenhoven, AA (2002). The thermal and electrical yield of a pv-thermal collector. *Solar energy*, 72(2), 113–128. 3.6.3, 4.1

A | Nomenclatura

- A_c: Área colectora
- C_w: Calor específico del agua
- C_c: Costo del colector por unidad de área
- C_{fixed}: Costo fijo
- C_{gas}: Costo del gas natural
- C_{elect}: Costo de la electricidad
- $C_{o\&M}$: Costo anual de operación y mantenimiento
- C: Inversión Inicial
- D: Pago anual de la deuda
- f: Fracción Solar
- f_d: Apalancamiento
- F_R: Factor de remoción
- h_{p1}: Factor de penalización debido al tedlar a través del vidrio, célula solar y EVA.
- h_{p2}: factor de penalización debido a la interfaz entre tedlar y el fluido de trabajo.
- I_t: Irradiancia global sobre una superficie inclinada
- $\dot{m}_w$: Flujo másico de agua

- N: Período de evaluación
- N': Período de la deuda
- Q: Energía
- $\dot{Q}_{aux}$: Tasa de energía otorgada por el sistema auxiliar
- $\dot{Q}_u$: Tasa de transferencia de energía útil
- r: Tasa de descuento anual
- r_d: Tasa de interés anual de la deuda
- r_i: Tasa de inflación anual
- T_a: Temperatura ambiente
- U_L: Coeficiente global de pérdidas del colector
- U_t: Coeficiente de transferencia de calor global desde la célula solar al ambiente a través de la cubierta de vidrio
- U_T: Coeficiente de transferencia de calor conductivo de la célula solar al agua a través de tedlar
- U_{tT}: Coeficiente de transferencia de calor global de vidrio a tedlar a través de célula solar
- U_{tw}: Coeficiente global de transferencia de calor del vidrio al agua a través de la célula solar y el tedlar
- $\tau\alpha$: Producto transmitancia-absortancia del colector
- AG: Algoritmo genético
- ERNC: Energías Renovables No Convencionales
- LCC: Life-Cycle Cost (Costo del ciclo de vida)
- LCS: Life-Cycle Savings (Ahorro del ciclo de vida)
- PWF: Present Worth Factor (Valor Presente Neto)
- SOI: Savings over investment (Ahorro por sobre la inversión)

B | Resultados

ACS/Eléctrico	Caux $	LCS $	SOI	Inversión Óptima $	Área Óptima	Volumen Óptimo
Perfil 1/1	3646396,99	996686,075	0,63319053	1574069,774	1,884503599	75,38014396
Perfil 1/2	3052313,78	1307742,85	0,68774992	1901480,21	2,882116097	115,2846439
Perfil 1/3	3360490,31	1143456,85	0,61569329	1857185,834	2,747152092	109,8860837
Perfil 1/4	3611141,08	1014834,93	0,60922946	1665767,976	2,163906031	86,55624125
Perfil 1/5	3360490,31	1143456,85	0,61569329	1857185,834	2,747152092	109,8860837
Perfil 1/6	4315818,09	626175,614	0,45309896	1381984,233	1,29922312	51,96892481
Perfil 2/1	3248483,14	1429394,47	0,94320365	1515467,491	1,705943712	68,23774848
Perfil 2/2	2929976,69	1602703,83	0,94732633	1691818,103	2,243280204	89,73120815
Perfil 2/3	3418562,61	1335773,86	0,88843828	1503507,764	1,669502685	66,78010741
Perfil 2/4	3346963,94	1375153,11	0,91463015	1503507,308	1,669501296	66,78005183
Perfil 2/5	3418562,01	1335774,19	0,88843828	1503508,144	1,669503843	66,78015373
Perfil 2/6	3948373,04	1014757,21	0,78263912	1296583,802	1,03900986	41,56039439
Perfil 3/1	2486866,96	2190851,45	1,44545044	1515687,697	1,706614677	68,26458706
Perfil 3/2	2334827,83	2291881,91	1,45275206	1577613,947	1,895302616	75,81210463
Perfil 3/3	2502171,43	2199842,93	1,39441144	1577613,947	1,895302616	75,81210463
Perfil 3/4	2766416,07	2007385,71	1,41840654	1415240,026	1,4005528	56,02211198
Perfil 3/5	2502171,52	2199842,87	1,39441144	1577613,906	1,895302491	75,81209965
Perfil 3/6	3163040,96	1778974,95	1,28734289	1381896,748	1,298956557	51,95826226
Perfil 4/1	3377504,88	1135718,81	0,58707891	1934524,979	2,982802791	119,3121116
Perfil 4/2	2860472,12	1423536,1	0,70322773	2024288,929	3,2563116	130,252464
Perfil 4/3	2355320,12	1695908,44	0,68091912	2490616,562	4,677201782	187,0880713
Perfil 4/4	3277871,7	1193492,12	0,59397852	2009318,649	3,21069748	128,4278992
Perfil 4/5	2407339,57	1667297,78	0,66943189	2490615,993	4,677200049	187,088002
Perfil 4/6	4061257,51	759654,892	0,39268278	1934525,606	2,9828047	119,312188
Perfil 5/1	2367155,54	2341497,32	1,58413813	1478089,105	1,592052581	63,68210326
Perfil 5/2	2367155,54	2341497,32	1,58413813	1478089,105	1,592052581	63,68210326
Perfil 5/3	2511800,76	2261508,08	1,53155413	1476609,955	1,587545644	63,50182575
Perfil 5/4	2433142,52	2304770,1	1,56085234	1476609,955	1,587545644	63,50182575
Perfil 5/5	2511800,76	2261508,08	1,53155413	1476609,955	1,587545644	63,50182575
Perfil 5/6	2840102,92	2080941,74	1,40927019	1476609,49	1,587544227	63,50176907
Perfil 6/1	2208582,04	2358141,11	1,33138627	1771192,303	2,485131668	99,40526672
Perfil 6/2	1647276,01	2701194,31	1,42898838	1916939,682	2,828385783	117,1688308
Perfil 6/3	1855891,06	2590983,22	1,33730579	1937465,047	2,991761115	119,6704446
Perfil 6/4	2220420,38	2351630,02	1,32771016	1771192,308	2,485131684	99,40526734
Perfil 6/5	1855891,3	2590983,06	1,33730578	1937464,932	2,991760764	119,6704306
Perfil 6/6	2851820,28	2004360,1	1,13164446	1771192,426	2,485132043	99,40528171

Tabla B.1: Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Antofagasta, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia).

ACS/Eléctrico	Caux $	LCS $	SOI	Inversión Óptima $	Área Óptima	Volumen Óptimo
Perfil 1/1	3668417,43	900597,519	0,54584016	1649929,022	2,115645083	84,62580331
Perfil 1/2	3350671,9	1048781,2	0,56579831	1853630,831	2,736320077	109,4528031
Perfil 1/3	3599008,4	912297,043	0,49230284	1853121,641	2,734768585	109,3907434
Perfil 1/4	3849685,12	809001,728	0,51246912	1578635,079	1,898413985	75,9365594
Perfil 1/5	3599008,4	912297,044	0,49230284	1853121,642	2,734768589	109,3907436
Perfil 1/6	4321698,04	554453,833	0,38549019	1438308,557	1,470842115	58,8336846
Perfil 2/1	3205217,77	1363798,18	0,82658063	1649927,575	2,115640673	84,6256269
Perfil 2/2	3089074,19	1425277,59	0,83151197	1714079,463	2,311110086	92,44440343
Perfil 2/3	3300062,96	1309233,77	0,76381159	1714079,463	2,311110086	92,44440343
Perfil 2/4	3478538,8	1216765,84	0,79949255	1521922,683	1,725612544	69,02450176
Perfil 2/5	3300064,08	1309233,18	0,76381159	1714078,701	2,311107763	92,44431054
Perfil 2/6	3951613,89	957874,152	0,7079059	1353109,432	1,21124223	48,44968919
Perfil 3/1	2661646,87	1974206,18	1,26025855	1566508,859	1,861465654	74,45862614
Perfil 3/2	2661646,87	1974206,18	1,26025855	1566508,859	1,861465654	74,45862614
Perfil 3/3	2833058,51	1879929,78	1,20007606	1566508,859	1,861465654	74,45862614
Perfil 3/4	2729036,44	1937141,9	1,23659824	1566508,693	1,861465147	74,4586059
Perfil 3/5	2833058,79	1879929,6	1,20007608	1566508,693	1,861465147	74,4586059
Perfil 3/6	3240261,09	1625528,17	1,10357224	1472969,433	1,576453051	63,05812205
Perfil 4/1	3558981,94	900368,224	0,48553794	1854372,551	2,738580081	109,5432032
Perfil 4/2	2992548,7	1190861,36	0,55805321	2133956,635	3,59046672	143,6186688
Perfil 4/3	2472010,73	1396475,75	0,50679958	2755479,279	5,484232739	219,3693095
Perfil 4/4	3441310,22	953139,21	0,47000749	2027923,468	3,267385961	130,6954384
Perfil 4/5	2815482,18	1245099,2	0,49617878	2509376,147	4,734361832	189,3744733
Perfil 4/6	4189144,19	553778,963	0,29863408	1854372,938	2,738581261	109,5432505
Perfil 5/1	2258603,43	2298108,96	1,37728322	1668581,253	2,172478024	86,89912097
Perfil 5/2	2244050,03	2306430,4	1,38093146	1670199,036	2,177407376	87,09629504
Perfil 5/3	2446576,24	2194723,98	1,31532315	1668581,577	2,172479011	86,89916044
Perfil 5/4	2361320,96	2241614,3	1,34342542	1668581,12	2,172477619	86,89910476
Perfil 5/5	2446577,15	2194723,39	1,31532316	1668581,12	2,172477619	86,89910476
Perfil 5/6	2809904,6	1994893,16	1,19556289	1668580,688	2,172476304	86,89905216
Perfil 6/1	2161324,91	2275871,3	1,19616706	1922636,665	2,885639789	115,4255916
Perfil 6/2	1987787,73	2371316,74	1,24633189	1922636,665	2,885639789	115,4255916
Perfil 6/3	2248312,98	2228027,86	1,17102119	1922636,665	2,885639789	115,4255916
Perfil 6/4	2223729,95	2241548,52	1,17812747	1922636,665	2,885639789	115,4255916
Perfil 6/5	2248312,98	2228027,86	1,17102119	1922636,665	2,885639789	115,4255916
Perfil 6/6	2803603,3	1922618,18	1,01050201	1922636,665	2,885639789	115,4255916

Tabla B.2: Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Valparaíso, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia).

ACS/Eléctrico	Caux $	LCS $	SOI	Inversión Óptima $	Área Óptima	Volumen Óptimo
Perfil 1/1	3632290,99	939656,549	0,56902254	1651352,072	2,119981085	84,79924341
Perfil 1/2	3174703,42	1157865,63	0,59842175	1934865,539	2,983840471	119,3536188
Perfil 1/3	3470006,29	1000964,19	0,52558167	1904488,417	2,891282037	115,6512815
Perfil 1/4	3678356,59	910030,795	0,53666572	1695712,537	2,25514646	90,20585839
Perfil 1/5	3470006,3	1000964,19	0,52558167	1904488,414	2,891282029	115,6512812
Perfil 1/6	4296420,06	588038,572	0,40738287	1443454,356	1,486521252	59,46085008
Perfil 2/1	3193224,45	1397633,69	0,86144103	1622436,863	2,031877069	81,27508276
Perfil 2/2	3190405,4	1399185,71	0,86225951	1622696,763	2,032668978	81,30675912
Perfil 2/3	3370349,84	1300216,28	0,801269	1622696,351	2,032667724	81,30670897
Perfil 2/4	3485441,56	1234761,05	0,83337908	1481631,928	1,602847487	64,11389948
Perfil 2/5	3370349,72	1300216,36	0,80126901	1622696,431	2,032667969	81,30671875
Perfil 2/6	3979097,15	956678,438	0,73523753	1301182,81	1,053022937	42,12091747
Perfil 3/1	2610432,7	2040031,1	1,31720013	1548763,215	1,807395063	72,2958025
Perfil 3/2	2610432,7	2040031,1	1,31720013	1548763,215	1,807395063	72,2958025
Perfil 3/3	2887793,48	1878576,87	1,26341525	1486903,748	1,618910609	64,75642434
Perfil 3/4	2778037,04	1938942,85	1,30401404	1486903,356	1,618909412	64,75637649
Perfil 3/5	2887794,22	1878576,4	1,26341527	1486903,356	1,618909412	64,75637649
Perfil 3/6	3122969,58	1749229,82	1,17642499	1486902,979	1,618908265	64,75633058
Perfil 4/1	3471622,56	981730,745	0,51735143	1897609,041	2,870320727	114,8128291
Perfil 4/2	2848539,54	1311371,99	0,60436752	2169825,393	3,69975805	147,990322
Perfil 4/3	2291894,57	1553212,03	0,5589927	2778590,924	5,554653418	222,1861367
Perfil 4/4	3450988,14	991071,73	0,50650104	1956702,259	3,05037648	122,0150592
Perfil 4/5	2613094,24	1405266,79	0,54900992	2559638,248	4,887509362	195,5003745
Perfil 4/6	4126849,69	621355,818	0,32744138	1897609,355	2,870321685	114,8128674
Perfil 5/1	2313240	2301784,21	1,4460199	1591806,736	1,938547736	77,54190942
Perfil 5/2	2313240	2301784,21	1,4460199	1591806,736	1,938547736	77,54190942
Perfil 5/3	2485143,96	2207237,03	1,38662375	1591806,736	1,938547736	77,54190942
Perfil 5/4	2429330,98	2233344,14	1,41759513	1575445,692	1,88869599	75,54783961
Perfil 5/5	2485143,98	2207237,02	1,38662375	1591806,728	1,938547713	77,54190853
Perfil 5/6	2837865,25	2008650,2	1,27497289	1575445,414	1,888695145	75,54780581
Perfil 6/1	2159085,74	2292021,73	1,20419263	1903368,014	2,887868192	115,5147277
Perfil 6/2	1938039,42	2414446,91	1,26366188	1918791,053	2,860131809	116,4052724
Perfil 6/3	2204992,01	2266773,41	1,19092689	1903369,072	2,887871418	115,5148567
Perfil 6/4	2202049,76	2268391,53	1,19177765	1903368,076	2,887868383	115,5147353
Perfil 6/5	2204993,84	2266772,29	1,19092692	1903368,076	2,887868383	115,5147353
Perfil 6/6	2815629,06	1930922,92	1,01447689	1903368,076	2,887868383	115,5147353

Tabla B.3: Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Santiago, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia).

ACS/Eléctrico	Caux $	LCS $	SOI	Inversión Óptima $	Área Óptima	Volumen Óptimo
Perfil 1/1	3631051,92	924802,619	0,55488327	1666661,553	2,166628742	86,6651497
Perfil 1/2	3313491,76	1066794,93	0,56837844	1876909,579	2,807249915	112,2899966
Perfil 1/3	3698105,75	876214,894	0,49589232	1766945,891	2,472192944	98,88771776
Perfil 1/4	3772171,81	850466,411	0,519658	1636588,701	2,074997414	82,99989657
Perfil 1/5	3698105,71	876214,911	0,49589232	1766945,928	2,472193055	98,8877222
Perfil 1/6	4327393,12	551478,138	0,38666185	1426254,322	1,434113122	57,36452486
Perfil 2/1	3177839,65	1378716,31	0,82775854	1665602,029	2,163400396	86,53601583
Perfil 2/2	3101904,13	1419022,48	0,83173761	1706093,934	2,28677835	91,47113398
Perfil 2/3	3315389,08	1301605,76	0,76291566	1706093,916	2,286778295	91,4711318
Perfil 2/4	3463751,71	1224944,39	0,80076134	1529724,679	1,749385057	69,97540229
Perfil 2/5	3315389,81	1301605,38	0,76291565	1706093,417	2,286776777	91,47107107
Perfil 2/6	3957124,04	954818,113	0,71054982	1343773,632	1,182796249	47,31184998
Perfil 3/1	2684870,68	1959226,01	1,25874107	1556496,45	1,83095806	73,2383224
Perfil 3/2	2684870,68	1959226,01	1,25874107	1556496,45	1,83095806	73,2383224
Perfil 3/3	2857265,12	1864409,07	1,19782417	1556496,45	1,83095806	73,2383224
Perfil 3/4	2747298,83	1924890,47	1,23668184	1556496,105	1,83095701	73,2382804
Perfil 3/5	2857265,09	1864409,09	1,19782417	1556496,469	1,830958118	73,23832472
Perfil 3/6	3189607,54	1665197,95	1,10555027	1506216,396	1,677755828	67,11023311
Perfil 4/1	3556466,22	902826,223	0,48816931	1849412,101	2,723465696	108,9386278
Perfil 4/2	2962028,58	1207898,03	0,56203707	2149142,987	3,636739205	145,4695682
Perfil 4/3	2435808,11	1415753,39	0,50814294	2786132,172	5,577631436	223,1052575
Perfil 4/4	3451393,13	949452,099	0,46997867	2020202,546	3,243860478	129,7544191
Perfil 4/5	2783103,84	1262601,84	0,49808543	2534910,192	4,812163512	192,4865405
Perfil 4/6	4188464,45	555227,211	0,30021828	1849411,738	2,72346459	108,9385836
Perfil 5/1	2288885,2	2277275,42	1,37795951	1652643,205	2,123915137	84,9566055
Perfil 5/2	2272075,35	2287746,5	1,3791132	1658853,319	2,14283722	85,71348879
Perfil 5/3	2485050,72	2169384,15	1,31267639	1652642,011	2,123911501	84,95646003
Perfil 5/4	2392253,91	2220422,39	1,34355921	1652642,011	2,123911501	84,95646003
Perfil 5/5	2485050,72	2169384,15	1,31267639	1652642,011	2,123911501	84,95646003
Perfil 5/6	2828418,32	1980531,82	1,19840377	1652641,52	2,123910003	84,95640013
Perfil 6/1	2138845,46	2279435,48	1,17564761	1938876,455	2,996061643	119,8424657
Perfil 6/2	1941035,97	2388230,7	1,23176011	1938876,478	2,996061714	119,8424686
Perfil 6/3	2217014,54	2236442,48	1,15347342	1938876,478	2,996061714	119,8424686
Perfil 6/4	2197574,14	2247134,7	1,15898807	1938876,478	2,996061714	119,8424686
Perfil 6/5	2217014,54	2236442,48	1,15347342	1938876,478	2,996061714	119,8424686
Perfil 6/6	2793337,48	1919464,86	0,98998823	1938876,455	2,996061643	119,8424657

Tabla B.4: Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Concepción, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia).

ACS/Eléctrico	Caux $	LCS $	SOI	Inversión Óptima $	Área Óptima	Volumen Óptimo
Perfil 1/1	3635997,96	816658,634	0,45648584	1789011,982	2,539427844	101,5771138
Perfil 1/2	3581356,2	837793,23	0,45788346	1829708,445	2,663429085	106,5371634
Perfil 1/3	3880629,99	687625,825	0,38991029	1763548,818	2,461842135	98,4736854
Perfil 1/4	3816019,18	734163,156	0,42882278	1712043,271	2,304905852	92,19623407
Perfil 1/5	3880630,11	687625,785	0,38991029	1763548,716	2,461841825	98,47367298
Perfil 1/6	4384644,63	461085,718	0,32549975	1416547,065	1,404535321	56,18141285
Perfil 2/1	3574490,3	1091983,29	0,71403268	1529318,36	1,748147011	69,92588042
Perfil 2/2	3574490,3	1091983,29	0,71403268	1529318,36	1,748147011	69,92588042
Perfil 2/3	3851761,39	951988,532	0,66506718	1431417,091	1,449843968	57,99375871
Perfil 2/4	3729149,19	1019425,24	0,71217904	1431417,091	1,449843968	57,99375871
Perfil 2/5	3851761,39	951988,532	0,66506718	1431417,091	1,449843968	57,99375871
Perfil 2/6	3928861,64	909583,413	0,63544293	1431416,365	1,449841755	57,99367022
Perfil 3/1	2564887,64	1916777,55	1,09294114	1753779,299	2,432074625	97,28298498
Perfil 3/2	2564887,64	1916777,55	1,09294114	1753779,299	2,432074625	97,28298498
Perfil 3/3	2772745,95	1802455,47	1,02775502	1753779,299	2,432074625	97,28298498
Perfil 3/4	2748251,49	1810180,39	1,06519408	1699390,209	2,266352244	90,65408978
Perfil 3/5	2772746,1	1802455,38	1,02775501	1753779,215	2,432074368	97,28297472
Perfil 3/6	3253500,82	1518959,56	0,96091849	1580737,149	1,904818946	76,19275782
Perfil 4/1	3566059,95	771685,688	0,39246671	1966244,971	3,079452918	123,1781167
Perfil 4/2	3006257,28	1015272,64	0,43689262	2323849,373	4,169065776	166,762631
Perfil 4/3	2768295,41	1039784,77	0,3682763	2823382,232	5,691131563	227,6452625
Perfil 4/4	3445753,12	796166,857	0,36120484	2204197,667	3,804489621	152,1795848
Perfil 4/5	3054351,14	939709,728	0,36624632	2565786,143	4,906241867	196,2496747
Perfil 4/6	4180956,32	433492,656	0,22046725	1966245,129	3,079453399	123,178136
Perfil 5/1	2197069,86	2192826,34	1,16589522	1880809,096	2,81913166	112,7652664
Perfil 5/2	2168580,64	2208495,41	1,17422625	1880809,096	2,81913166	112,7652664
Perfil 5/3	2407971,4	2076830,49	1,10422185	1880809,096	2,81913166	112,7652664
Perfil 5/4	2318129,71	2126243,42	1,13049401	1880809,096	2,81913166	112,7652664
Perfil 5/5	2407971,4	2076830,49	1,10422185	1880809,096	2,81913166	112,7652664
Perfil 5/6	2872133,67	1808009,81	0,99943444	1809032,93	2,600431239	104,0172496
Perfil 6/1	2129950,44	2114366,71	0,98276942	2151437,22	3,643729685	145,7491874
Perfil 6/2	1929814,64	2224441,42	1,03393267	2151437,4	3,643730232	145,7492093
Perfil 6/3	2234969,92	2056606,01	0,95592185	2151437,4	3,643730232	145,7492093
Perfil 6/4	2198490,51	2076669,69	0,96524759	2151437,323	3,643729998	145,7491999
Perfil 6/5	2234970,03	2056605,96	0,95592186	2151437,323	3,643729998	145,7491999
Perfil 6/6	2776539,03	1758743,01	0,8174735	2151437,323	3,643729998	145,7491999

Tabla B.5: Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Osorno, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia).

ACS/Eléctrico	Caux $	LCS $	SOI	Inversión Óptima $	Área Óptima	Volumen Óptimo
Perfil 1/1	3793101,17	672369,711	0,37913128	1773448,257	2,492005511	99,68022045
Perfil 1/2	3793101,17	672369,711	0,37913128	1773448,257	2,492005511	99,68022045
Perfil 1/3	3951034,56	585506,582	0,33015165	1773447,411	2,492002934	99,68011737
Perfil 1/4	3895289,68	628517,677	0,36600121	1717255,739	2,320788128	92,83152514
Perfil 1/5	3951034,5	585506,599	0,33015164	1773447,471	2,492003116	99,68012464
Perfil 1/6	4354488,26	416242,825	0,27239193	1528102,607	1,744442637	69,77770548
Perfil 2/1	3646154,64	1000108	0,64362573	1553865,779	1,822942464	72,91769855
Perfil 2/2	3646154,64	1000108	0,64362573	1553865,779	1,822942464	72,91769855
Perfil 2/3	3762460,05	936140,021	0,60245874	1553865,779	1,822942464	72,91769855
Perfil 2/4	3649008,29	998538,494	0,64261567	1553865,779	1,822942464	72,91769855
Perfil 2/5	3762460,05	936140,021	0,60245874	1553865,779	1,822942464	72,91769855
Perfil 2/6	3940297,27	844705,854	0,56276601	1500989,467	1,661829489	66,47317956
Perfil 3/1	2627974,53	1792668,69	0,98072894	1827894,154	2,65790098	106,3160392
Perfil 3/2	2627974,53	1792668,69	0,98072894	1827894,154	2,65790098	106,3160392
Perfil 3/3	3000993,53	1587537,72	0,93217812	1703041,179	2,277476672	91,0990669
Perfil 3/4	2880345,84	1653893,95	0,97114149	1703041,179	2,277476672	91,0990669
Perfil 3/5	3000993,53	1587537,72	0,93217812	1703041,179	2,277476672	91,0990669
Perfil 3/6	3212693,93	1471102,45	0,86380938	1703040,617	2,277474959	91,09899835
Perfil 4/1	3446962,18	623696,669	0,26152639	2384832,603	4,354880355	174,1952142
Perfil 4/2	2831501,95	909682,074	0,34030555	2673133,259	5,233326199	209,333048
Perfil 4/3	3021741,45	779057,682	0,28165202	2766029,084	5,516377763	220,6551105
Perfil 4/4	3198779,74	707679,465	0,26473791	2673132,364	5,233323474	209,332939
Perfil 4/5	3021741,74	779057,602	0,28165202	2766028,8	5,516376899	220,655076
Perfil 4/6	3926623,52	307365,147	0,11498308	2673133,611	5,233327274	209,333091
Perfil 5/1	2304273,16	2011871,46	1,0610365	1924412,084	2,951989019	118,0795608
Perfil 5/2	2293231,4	2017944,43	1,06419225	1924412,084	2,951989019	118,0795608
Perfil 5/3	2479453,38	1945522,34	1,01096972	1924412,084	2,951989019	118,0795608
Perfil 5/4	2385682,02	1997096,58	1,03776972	1924412,084	2,951989019	118,0795608
Perfil 5/5	2479453,38	1945522,34	1,01096972	1924412,084	2,951989019	118,0795608
Perfil 5/6	2829943,95	1752752,52	0,91079899	1924412,02	2,951988824	118,0795529
Perfil 6/1	2194606,1	1876052,84	0,78666024	2384832,41	4,354879768	174,1951907
Perfil 6/2	1919808,95	2028091,77	0,84431059	2402068,379	4,407397389	176,2958956
Perfil 6/3	2193775,33	1877410,26	0,78158069	2402068,379	4,407397389	176,2958956
Perfil 6/4	2176266,56	1887040,09	0,78558967	2402068,344	4,407397284	176,2958914
Perfil 6/5	2193775,39	1877410,23	0,78158069	2402068,344	4,407397284	176,2958914
Perfil 6/6	2834431,35	1525049,45	0,63489012	2402068,344	4,407397284	176,2958914

Tabla B.6: Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Punta Arenas, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia).

ACS/Eléctrico	Caux $	LCS $	SOI	Inversión Óptima $	Área Óptima	Volumen Óptimo
Perfil 1/1	3955861,99	561452,327	0,32824231	1710481,282	2,300146506	92,00586025
Perfil 1/2	3955861,99	561452,327	0,32824231	1710481,282	2,300146506	92,00586025
Perfil 1/3	4079904,24	493229,1	0,28835692	1710481,246	2,300146396	92,00585584
Perfil 1/4	3959477,07	559464,041	0,3270799	1710481,246	2,300146396	92,00585584
Perfil 1/5	4079904,24	493229,1	0,28835692	1710481,246	2,300146396	92,00585584
Perfil 1/6	4288388,25	391771,433	0,23765993	1648453,901	2,11115042	84,44601679
Perfil 2/1	3608297,89	964165,111	0,58665359	1643499,883	2,096055636	83,84222545
Perfil 2/2	3608297,89	964165,111	0,58665359	1643499,883	2,096055636	83,84222545
Perfil 2/3	3923083,46	820813,81	0,55352483	1482885,26	1,606666362	64,26665448
Perfil 2/4	3608380,19	964129,478	0,58665011	1643448,894	2,095900272	83,83601088
Perfil 2/5	3923082,93	820814,023	0,55352482	1482885,677	1,606667633	64,26670531
Perfil 2/6	3989116,01	784495,933	0,52903361	1482884,872	1,606665181	64,26660724
Perfil 3/1	2649892,65	1731793,4	0,92351972	1875209,976	2,802071262	112,0828505
Perfil 3/2	2649895,06	1731792,15	0,92351975	1875208,572	2,802066986	112,0826794
Perfil 3/3	2800434,81	1648995,29	0,87936633	1875208,572	2,802066986	112,0826794
Perfil 3/4	2682174,14	1714038,66	0,91405232	1875208,485	2,80206672	112,0826688
Perfil 3/5	2800434,94	1648995,22	0,87936634	1875208,485	2,80206672	112,0826688
Perfil 3/6	3049722,27	1511887,19	0,80625019	1875208,485	2,80206672	112,0826688
Perfil 4/1	3455442,77	498929,159	0,19954285	2500360,961	4,706892754	188,2757102
Perfil 4/2	2676553,39	808209,707	0,27067085	2985950,317	6,186472991	247,4589196
Perfil 4/3	2771247,01	711419,703	0,22524591	3158413,468	6,711964473	268,4785789
Perfil 4/4	3250590,19	549332,087	0,19908488	2759285,871	5,495831341	219,8332536
Perfil 4/5	2771246,87	711419,732	0,2252459	3158413,622	6,711964942	268,4785977
Perfil 4/6	3810917,69	175162,363	0,05796943	3021633,534	6,29519898	251,8079592
Perfil 5/1	2292371,94	1851509,85	0,98733827	2006920,941	3,203391715	128,1356686
Perfil 5/2	2280531,11	1848140,93	0,98790972	2012472,29	3,220306557	128,8122623
Perfil 5/3	2452995,08	1843285,75	0,94077606	2012472,29	3,220306557	128,8122623
Perfil 5/4	2529037,91	1848837,78	0,9723836	1901346,104	2,881707479	115,2682991
Perfil 5/5	2452994,83	1853285,89	0,94077606	2012472,433	3,220306993	128,8122797
Perfil 5/6	2908175,15	1640312,29	0,86271108	1901346,028	2,881707247	115,2682899
Perfil 6/1	2366604,89	1587819,72	0,63505875	2500272,182	4,706622248	188,2648899
Perfil 6/2	1843939,9	1860063,96	0,68934768	2698295,801	5,30999592	212,3998368
Perfil 6/3	2123831,33	1706123,68	0,63229675	2698295,801	5,30999592	212,3998368
Perfil 6/4	2368242,7	1586383,32	0,63262318	2507627,54	4,729033865	189,1613546
Perfil 6/5	2123832,54	1706123,07	0,63229672	2698294,989	5,309993447	212,3997379
Perfil 6/6	3021138,65	1227826,17	0,49107705	2500271,962	4,706621579	188,2648632

Tabla B.7: Resultados del modelo para las 36 combinaciones de perfiles evaluados en el periodo de 20 años en la ciudad de Punta Arenas, donde C_{aux} es el costo de la energía auxiliar en pesos ($), LCS el ciclo de vida en pesos ($), SOI el ahorro sobre el gasto, la inversión óptima para el proyecto en pesos ($), el área óptima del colector en m^2 y el volumen óptimo del estanque en litros. (Fuente: Elaboración propia).

C | Datos de radiación solar

Hora/Mes	Ene a Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00 a 23:00	265,65688	303,358	313,292	304,039	269,505	237,87	208,918	211,065	230,772	246,94	269,883	286,841	305,39884
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	1,1822717	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0071	7,81118	6,36898
7:00	31,775189	45,2356	25,7429	14,2174	2,25112	0	0	0	0,25683	17,9552	82,6583	99,7311	93,25387
8:00	223,40265	241,305	237,069	252,369	255,038	217,329	97,2511	85,0288	216,1	242,175	253,744	293,365	290,05898
9:00	456,36514	495,219	489,075	483,332	447,613	392,209	328,358	327,512	386,823	472,877	537,684	562,926	552,75475
10:00	664,44753	711,098	718,484	723,768	666,335	620,475	534,412	531,137	593,666	677,297	720,637	725,585	750,47598
11:00	803,55095	863,485	890,378	882,721	822,38	765,1	682,691	682,169	742,752	774,307	810,736	840,774	885,11906
12:00	891,56441	966,513	997,62	988,219	885,897	843,504	781,21	785,09	820,85	825,317	902,746	929,682	972,12498
13:00	891,534	989,075	1024,17	1010,22	907,565	826,88	756,747	770,888	801,55	811,554	893,16	928,989	977,60508
14:00	831,51536	941,591	980,285	952,162	870,016	757,822	686,689	702,202	736,92	745,175	830,756	858,242	916,32534
15:00	690,0487	801,656	852,426	816,879	719,951	610,794	548,207	570,193	588,555	620,518	659,494	713,883	778,02753
16:00	490,51927	619,481	664,23	621,369	517,772	414,788	362,001	358,012	374,519	421,121	436,709	512,379	583,84955
17:00	287,21897	403,519	427,077	383,47	287,968	215,467	189,483	198,036	203,971	228,4	254,324	294,52	360,39262
18:00	106,80589	175,662	193,808	167,076	85,3399	44,5211	46,9912	55,2879	72,5701	89,8684	94,5324	112,904	143,1093
19:00	5,834775	26,7606	18,6427	1,12419	0	0	0	0	0	0	0	3,38375	20,10602
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla C.1: Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Antofagasta obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)).

Hora/Mes	Ene a Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00 a 23:00	219,7647	263,079	254,348	241,585	207,753	157,609	154,171	160,793	185,725	226,193	253,813	264,366	267,74257
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	3,8347567	4,3179	0	0	0	0	0	0	0	0	1,25622	18,9418	21,50114
7:00	33,552854	56,8464	31,925	10,4568	0	0	0	0	0	20,9663	93,4023	102,517	86,52023
8:00	164,0062	179,229	171,544	218,572	182,86	103,868	18,4865	15,1872	129,52	232,003	236,081	250,77	229,95405
9:00	336,20654	340,464	319,303	312,277	292,911	229,532	310,359	297,295	287,032	379,263	425,511	435,968	404,56346
10:00	464,16873	485,501	467,509	474,593	444,067	332,277	340,632	356,627	417,53	520,265	582,058	589,306	559,66202
11:00	584,98884	618,895	587,406	598,621	576,47	451,25	436,598	459,037	529,411	650,648	717,316	717,262	676,95227
12:00	690,55625	760,657	731,363	729,059	680,201	534,168	521,785	553,646	629,357	722,623	811,667	826,146	786,00354
13:00	736,0928	854,349	822,381	797,893	715,232	563,65	553,665	574,575	651,892	753,038	841,898	858,47	846,07124
14:00	712,37375	861,456	843,825	783,275	702,452	525,504	518,361	535,82	618,872	716,807	790,809	808,249	843,05662
15:00	624,29608	791,106	777,582	733,375	606,459	440,972	428,84	450,7	518,192	614,699	672,076	701,777	755,77579
16:00	498,97802	643,995	652,156	586,792	459,939	382,616	374,881	373,056	405,862	459,859	505,144	543,179	600,25745
17:00	310,93236	448,905	447,677	378,204	267,803	218,624	196,495	242,681	235,005	267,865	297,65	334,043	396,23666
18:00	102,30918	224,174	219,149	170,099	57,6696	0,15322	0	0,41843	34,7214	90,5885	114,93	136,221	179,58491
19:00	12,056439	43,9948	32,5294	4,83067	0	0	0	0	0	0	1,70428	21,9359	39,68225
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla C.2: Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Valparaíso obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)).

Hora/Mes	Ene a Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00 a 23:00	228,99733	299,069	295,108	272,281	218,906	162,502	147,248	148,139	168,501	213,349	245,419	280,275	297,16942
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	4,9221875	7,42403	0	0	0	0	0	0	0	0	2,73945	23,0982	25,80459
7:00	41,690053	73,3192	41,743	14,1587	0,05955	0	0	0	0	27,9535	103,071	126,891	113,08465
8:00	187,49837	262,887	226,359	229,145	195,557	87,8587	10,7474	12,2161	130,984	240,351	244,591	305,855	303,43012
9:00	387,14923	478,066	452,967	414,841	342,879	253,71	309,963	283,872	272,699	374,564	437,328	503,9	521,00155
10:00	533,54873	675,061	653,138	622,63	517,087	380,021	327,514	334,851	385,952	509,74	602,981	688,281	705,32971
11:00	656,23377	828,162	804,916	772,334	650,759	485,576	419,137	426,663	483,198	618,576	727,475	816,783	841,22698
12:00	740,08254	920,187	913,014	875,03	741,764	564,726	493,417	502,858	572,255	699,877	794,903	884,217	918,74379
13:00	755,38806	940,967	952,977	902,763	743,764	575,915	531,641	524,025	576,991	694,767	801,608	890,738	928,5004
14:00	709,86249	890,756	909,826	858,481	706,228	540,677	495,607	492,306	546,199	665	741,368	809,945	861,95547
15:00	602,82346	791,279	804,661	734,201	596,22	442,439	405,436	411,224	454,29	552,706	607,962	685,551	747,91408
16:00	475,44796	624,207	647,656	578,954	443,626	366,126	363,753	346,231	369,197	413,925	453,756	521,244	576,69978
17:00	294,70144	428,693	433,758	372,248	263,736	203,011	176,743	221,102	222,517	244,157	269,382	323,202	377,86742
18:00	95,125503	212,326	211,471	156,729	52,061	0	0	0	29,7528	78,7536	102,205	127,085	171,12282
19:00	11,462042	44,3225	30,1086	3,23238	0	0	0	0	0	0	0,69074	19,8056	39,3847
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla C.3: Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Santiago obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)).

Hora/Mes	Ene a Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00 a 23:00	217,6008	283,396	276,093	259,592	204,012	150,316	135,802	132,828	158,194	218,518	241,862	271,939	278,65743
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	4,2130092	6,1916	0	0	0	0	0	0	0	0	1,07963	19,5253	23,75963
7:00	29,830079	48,7567	29,6959	6,25003	0	0	0	0	0	14,072	80,1796	97,146	81,86069
8:00	149,51742	203,925	189,225	192,723	142,507	38,1727	0	0,46454	77,1222	217,119	219,524	267,314	246,11216
9:00	343,89866	404,954	375,289	360,479	287,43	279,346	245,348	251,496	268,973	363,676	404,823	452,75	432,21847
10:00	471,8353	591,923	561,146	544,265	456,468	321,072	280,704	277,558	336,842	490,861	559,824	629,877	611,48308
11:00	594,81791	737,743	702,243	699,645	594,457	431,63	375,607	367,902	443,928	627,701	673,821	752,527	730,61123
12:00	687,16323	849,35	831,43	811,78	670,526	506,303	452,308	444,161	513,611	717,572	761,731	844,918	842,26854
13:00	716,69376	892,765	892,795	861,534	687,129	536,609	478,111	451,303	534,337	714,815	788,096	874,215	888,61677
14:00	687,06251	878,112	875,246	825,141	674,49	502,198	452,357	437,377	507,085	683,603	745,943	821,623	841,57397
15:00	598,52437	791,255	798,344	733,73	585,644	405,854	375,213	376,305	452,795	580,038	634,082	698,923	750,10908
16:00	494,47074	647,447	642,834	595,61	452,151	367,624	421,315	348,803	380,649	456,935	485,849	541,447	592,98242
17:00	313,34663	451,144	449,795	397,453	273,824	218,674	178,288	232,386	235,679	271,65	305,655	347,518	398,09246
18:00	113,70362	236,994	229,788	191,811	71,6663	0,09253	0	0,11283	45,6244	106,394	136,78	147,227	197,95272
19:00	16,44176	53,9338	48,3993	9,79445	0	0	0	0	0	0	7,30556	31,5331	46,33492
20:00	0,9001742	6,99985	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,80224
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla C.4: Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Concepción obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)).

Hora/Mes	Ene a Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00 a 23:00	177,92606	261,647	244,849	209,838	144,289	114,01	95,1641	106,564	130,235	180,092	191,211	215,863	241,35047
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	5,71987	12,1565	0	0	0	0	0	0	0	0	2,48857	24,4549	29,53844
7:00	28,276295	51,3921	31,0989	6,69228	0	0	0	0	0	13,1405	74,79	82,9386	79,26308
8:00	128,68632	187,239	156,942	187,245	120,02	15,5798	0	0	55,2545	209,9	171,805	215,336	224,91481
9:00	281,56884	360,206	312,885	249,138	175,509	284,283	194,234	212,195	253,057	309,434	315,082	347,229	365,57422
10:00	356,03141	530,48	475,818	402,468	272,65	196,792	185,701	196,912	242,185	386,37	410,656	458,802	513,54145
11:00	452,53703	667,686	598,323	516,875	381,744	276,555	207,467	278,932	320,702	485,482	501,053	563,317	632,3089
12:00	538,46759	784,421	726,273	639,497	439,709	342,357	286,611	338,782	394,833	554,954	584,108	657,572	712,494
13:00	578,2185	834,297	796,758	705,983	477,643	376,491	326,194	332,117	444,499	581,228	627,547	691,126	744,73845
14:00	563,55853	810,047	790,972	684,494	481,286	370,969	316,394	333,302	440,404	563,632	586,749	653,801	730,65149
15:00	489,81441	728,153	710,465	601,149	446,103	301,482	242,769	283,36	357,417	475,964	513,52	568,589	648,80147
16:00	446,92226	595,669	590,72	506,47	372,382	385,502	400,593	387,754	354,209	401,249	401,575	447,641	519,30402
17:00	275,88824	418,703	418,834	344,466	241,866	186,227	123,975	194,179	233,187	242,022	257,092	301,816	348,29433
18:00	104,71122	228,978	216,457	181,203	54,0293	0	0	0	29,8818	98,8433	132,296	132,878	181,96796
19:00	17,472828	54,9919	49,9885	10,4335	0	0	0	0	0	0	10,3001	35,1594	48,80065
20:00	2,352185	15,1077	0,84879	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05176	12,218
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla C.5: Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Osorno obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)).

Hora/Mes	Ene a Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00 a 23:00	150,0184	206,215	186,002	148,543	119,295	104,91	87,4376	92,8824	109,596	135,835	187,847	198,195	223,462
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	1,9551717	3,31408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,86343	14,28455
6:00	13,748887	40,4312	3,89357	0	0	0	0	0	0	0	9,48777	49,3147	61,8594
7:00	44,021478	90,9836	45,6812	23,0327	0	0	0	0	0	33,8064	84,5577	123,366	126,83055
8:00	117,14946	208,559	162,095	113,174	58,4103	0	0	0	26,6388	116,591	211,645	252,127	256,55375
9:00	244,27741	351,322	306,369	259,564	224,444	122,144	0,30009	23,6563	208,781	259,676	367,592	401,872	405,6095
10:00	324,90946	430,052	373,399	306,3	272,081	244,072	197,661	203,589	245,338	294,839	431,24	431,343	468,99963
11:00	432,12257	536,933	480,827	407,788	372,609	362,241	342,847	329,656	344,805	390,434	530,31	516,791	570,22877
12:00	499,27453	605,861	557,091	480,985	437,018	430,559	428,341	408,347	412,594	445,74	584,672	566,626	633,46121
13:00	511,16703	594,606	582,202	487,458	427,946	466,552	445,656	427,971	405,135	450,273	599,159	595,943	651,10323
14:00	467,35858	563,209	550,92	450,345	387,019	413,735	394,061	387,172	365,399	405,399	542,384	541,756	606,90308
15:00	376,42061	486,96	472,815	372,595	303,88	307,558	276,466	289,402	285,748	317,509	440,177	446,469	517,46878
16:00	309,56535	449,908	442,503	364,002	266,512	170,012	13,1683	159,132	259,891	336,078	389,545	399,071	464,96306
17:00	162,95055	307,252	289,558	212,749	110,568	0,97239	0	0,25136	75,9718	174,677	223,623	249,818	309,96763
18:00	67,173552	172,447	147,661	80,3767	2,60394	0	0	0	0	35,0222	80,5114	120,969	166,49136
19:00	22,919084	81,0065	44,6607	6,66858	0	0	0	0	0	0	13,4316	49,6226	79,63911
20:00	5,3672475	26,0297	4,36666	0	0	0	0	0	0	0	0	5,73848	28,27217
21:00	0,06062	0,27512	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,45232
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla C.6: Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Punta Arenas obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)).

Hora/Mes	Ene a Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00 a 23:00	132,5377	181,429	169,55	137,542	103,367	84,3637	76,2724	73,7808	98,549	125,59	167,609	173,869	198,52964
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0,0472425	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,56691
5:00	4,1466683	9,34846	0,00874	0	0	0	0	0	0	0	0,59073	13,7397	26,07241
6:00	18,630415	54,1216	9,67496	0,00233	0	0	0	0	0	0	16,2245	65,3444	78,19722
7:00	53,087068	110,574	65,8137	33,7255	0	0	0	0	0	35,363	105,99	137,092	148,48697
8:00	126,28873	223,18	174,66	132,055	75,516	0,03323	0	0	36,3551	130,449	218,708	248,734	275,77233
9:00	252,26777	355,859	306,844	273,188	235,527	150,411	0,49968	42,0022	241,121	265,272	360,909	379,707	415,87219
10:00	307,91537	390,286	378,07	314,216	242,26	221,809	187,774	187,94	237,551	293,808	413,233	398,662	429,37595
11:00	395,89178	476,64	472,733	406,288	324,819	314,842	292,5	283,286	322,399	377,046	499,263	468,954	511,93149
12:00	446,98198	529,881	531,765	465,972	373,223	364,108	352,677	341,205	380,643	417,261	542,253	505,795	558,99999
13:00	438,28479	491,055	518,891	434,42	360,437	371,821	422,505	354,205	349,181	402,047	511,472	497,18	546,20386
14:00	387,98034	455,107	478,723	389,369	313,055	316,305	353,76	305,867	304,311	350,616	449,883	439,987	498,78028
15:00	299,0093	383,702	399,548	309,111	234,097	218,122	220,06	213,363	226,432	263,479	353,362	351,612	415,22411
16:00	245,07434	385,105	361,234	314,29	223,085	67,276	0,76168	42,8706	220,161	298,623	319,575	326,116	381,79524
17:00	127,20958	255,192	225,037	168,833	73,0885	0	0	0	47,0206	139,519	170,878	198,333	248,61466
18:00	54,515173	140,923	108,094	56,5296	25,7083	0	0	0	0	40,6696	52,7127	96,0538	133,49126
19:00	19,346747	72,7919	35,7232	3,01097	0	0	0	0	0	0	7,57517	41,5475	71,51234
20:00	4,2037117	20,4656	2,38635	0	0	0	0	0	0	0	0	4,00121	23,59136
21:00	0,02372	0,06184	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2228
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla C.7: Radiación global en W/m^2 para la ciudad de Puerto Williams obtenida cada hora del día en todos los meses del año. (Fuente: (Molina et al., 2017)).