



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

MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMAR LA EXERGÍA DE LA RADIACIÓN SOLAR

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN MECÁNICA

EDUARDO ANDRÉS RODRÍGUEZ CÁRCAMO

PROFESOR GUÍA:  
JOSÉ MIGUEL CARDEMIL IGLESIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
LORENA DEL PILAR CORNEJO PONCE  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE  
JULIO 2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN MECÁNICA  
POR: EDUARDO ANDRÉS RODRÍGUEZ CÁRCAMO  
FECHA: JULIO 2020  
PROF. GUÍA: JOSÉ MIGUEL CARDEMIL IGLESIAS

## MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMAR LA EXERGÍA DE LA RADIACIÓN SOLAR

Las tecnologías solares están en un constante desarrollo, que empuja más allá los límites de conversión de energía. Esta carrera por tener equipos cada vez más eficientes, tiene una frontera que se refiere al límite máximo de conversión de energía, la cual es denominada como exergía. La exergía es una propiedad termofísica y se define como la cuantificación del máximo trabajo útil que puede ser extraído de un sistema. La exergía de la radiación solar es un tema de estudio que se encuentra aún en desarrollo, donde análisis de la exergía radiativa realizados para Chile no se han hecho hasta la fecha. De esta forma, en este trabajo se propone un modelo empírico que logre estimar la exergía de la radiación solar con datos meteorológicos cada un minuto de la ciudad de Santiago de Chile del año 2018.

Los datos meteorológicos pasaron por un proceso de calificación previo al desarrollo de un análisis de regresión, donde se analizaron 8 modelos que relacionaban el factor de exergía mediante el trabajo de Pons y el índice de claridad. Se realizó un análisis estadístico con tal de encontrar el modelo con el mejor ajuste, dando como resultado al modelo cúbico. Para realizar una validación al modelo, se realizó un montaje experimental de un panel fotovoltaico al que se le realizó una modelación térmica y eléctrica. Esta modelación térmica y eléctrica fue contrastada con mediciones de la potencia eléctrica y las temperaturas del tedlar y la celda durante los días 10, 11, 12, 18 y 19 de Junio del 2019. Se utilizó el indicador estadístico *NRMSE* para evaluar esta contrastación que resultó en que el error de las temperaturas del tedlar y la celda son del 0,08 y 0,09 respectivamente. La potencia eléctrica obtuvo un *NRMSE* de 0,16 debido a que el instrumento de medición de la potencia tenía una resolución máxima de un decimal, lo cual afectó el resultado del *NRMSE*.

Las modelaciones térmica y eléctrica se utilizaron para efectuar un balance de exergía al panel fotovoltaico. Este balance se utilizó como una validación del modelo cúbico y se realizó para un día despejado y nublado, correspondientes a los días 18 y 19 de Junio del 2019. La expresión del balance de exergía está en función del contenido exergético de la radiación solar, valor que fue utilizado como comparación entre la exergía calculada por el modelo cúbico con los modelos de Petela, Pons y Jeter. Para el día despejado, se determinó que el modelo propuesto se encuentra muy cercano al modelo de Pons con un *NRMSE* de 0,014. Además, los errores entre el modelo cúbico y los modelos de Petela y Jeter son de 0,033 y 0,051 respectivamente. Durante el día nublado los errores son mayores, calculandose un *NRMSE* entre el modelo cúbico y el modelo de Pons de 0,094. Al comparar con los modelos de Petela y Jeter, se aumenta el error a 0,133 y 0,151 respectivamente. Según estos resultados, se puede concluir que el modelo cúbico se encuentra muy cercano a otros modelos de la literatura durante días con baja nubosidad. El error aumenta para días con una alta nubosidad. Sin embargo, el error calculado aún es aceptable dentro del área de las estimaciones meteorológicas. De esta forma, los resultados confirman que el modelo cúbico puede usarse para estimar la exergía solar radiativa en la ciudad de Santiago de Chile y, por ende, ser usado en los balances termodinámicos para mejorar los diseños de las plantas solares.



ABSTRACT FOR  
THESIS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENGINEERING, MECHANICAL  
MENTION  
AUTHOR: EDUARDO ANDRÉS RODRÍGUEZ CÁRCAMO  
DATE: JULY 2020  
GUIDE PROF.: JOSÉ MIGUEL CARDEMIL IGLESIAS

## EMPIRICAL MODEL FOR ESTIMATING THE EXERGY OF SOLAR RADIATION

Solar technologies are in constant development, pushing the limits of energy conversion efficiencies. In the race to develop efficient equipments exists a frontier which is associated to the reversible work available, called exergy. Exergy is a thermophysical property and is defined as the quantification of the maximum useful work that can be extracted from a system. The exergy of solar radiation is a subject of study that is still under development, where the analysis of radiative exergy available in Chile has not been Carried out to date. Thus, the present work proposes an empirical model that allows estimating the exergy of solar radiation considering on minute-based meteorological data from 2018 at Santiago .

The meteorological data went through a qualification process prior to the development of a regression analysis, where 8 models relating to the exergy factor were analyzed , considering the model developed by Pons as reference, and the clearness index as the main variable for the model. The statistical analysis was performed in order to find the model showing the best fit, resulting in the cubic model. In order to validate the empirical model, an experimental testbench was developed consisting of a photovoltaic panel coupled to a thermal and electrical model. This thermal and electrical modeling was compared with measurements of electrical power and temperatures of the tedlar and solar cell during the days 10th, 11th, 12th, 18th, and 19th of June 2019. The statistical error metric *NRMSE* was used to evaluate this comparison which resulted in an error of the tedlar and cell temperatures of 0.08 and 0.09, respectively. The electrical power showed a *NRMSE* of 0.16 because the power measurement instrument had a maximum resolution of one decimal, affecting the results.

Thermal and electrical modelling were used to make an exergy balance to the photovoltaic panel. This balance was used as a validation of the cubic model and was performed for a clear and cloudy day. The expression of the exergy balance is a function of the exergetic content of the solar radiation, thus the validation considers a comparison between the exergy calculated by the cubic model with the models of Petela, Pons and Jeter. For the clear day, it was determined that the proposed model is significantly close to the Pons model with a *NRMSE* of 0.014. In addition, the errors between the cubic model and the Petela's and Jeter's models are 0.033 and 0.051, respectively. During the cloudy day, the errors are higher, where the *NRMSE* between the cubic model and the Pons model is about 0.094. When compared with the Petela and Jeter models, the error increased to 0.133 and 0.151, respectively. Based on these results, it can be concluded that the cubic model is very close to other models in the literature during low cloudiness days. The error increases for days with high cloudiness. However, the calculated error is still acceptable within the area of weather estimation. Thus, the results confirm that the cubic model can be used to estimate the radiative solar exergy of Santiago de Chile and therefore be used in thermodynamic balances to improve solar plant designs.



# Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo el pilar fundamental que ha sido mi familia durante todo el periodo de estudio de este Magíster. A mi madre Carol por siempre estar preocupada por mí y dar el ánimo necesario en momentos de bajones. A mi Padre Eduardo por el apoyo y confianza en que sacaría adelante todos mis estudios de postgrado. A mi abuela Flor por todo el apoyo que me brindó durante mi estadía en Santiago.

A mi profesor guía José Miguel Cardemil, quien me ayudó a crecer para convertirme en un buen futuro académico durante todos estos años de postgrado. Sus consejos y guías fueron un pilar importante, con el que fui madurando poco a poco desde el primer día en la UChile.

A los profesores miembros de mi comisión, Williams Calderón y Lorena Cornejo. Gracias al profesor Williams por tener siempre la disposición de ayudar y siempre terminar las conversaciones que tuvimos con muchas risas. A la profesora Lorena Cornejo, a quién le estoy eternamente agradecido por su guía durante mi tesis de pregrado en la Universidad de Tarapacá y por haberme recibido en su Laboratorio para mi primera experiencia laboral.

Al Departamento de Mecánica de la Universidad de Tarapacá, que es mi segunda casa y donde realicé mis estudios de pregrado. Gracias a todos los profesores del departamento, los que me dieron todas las herramientas necesarias para continuar estudios de postgrado en el área de mi interés.

A mis amigos de la infancia, en especial a Víctor, Sebastián y Pablo por todas las juntas y risas que se realizaron. Las escapadas a Rancagua, las juntas en mi departamento para jugar videojuegos o las salidas a tomar algo fueron una gran distracción para olvidar y despejarse de los ajetreos típicos de los estudios.

A mis amigos que forjé durante el pregrado en la Universidad de Tarapacá, Daniel y Ramiro, gente apañadora que estuvieron en todas aquí en Santiago, compañeros de conciertos y eventos varios.

A los amigos que hice durante los estudios de magíster, Sebastián, Daniel, Mario, Harold, Edwin, Rodrigo y Diego. Grandes personas que me ayudaron mucho al inicio de los estudios de postgrado. Imborrables son ya las tardes de los Viernes donde era tradición salir juntos a tomar una cerveza para descansar después de una larga semana.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	4
1.1.1. Objetivo General . . . . .	4
1.1.2. Objetivos Específicos . . . . .	4
<b>2. Antecedentes Generales</b>	<b>5</b>
2.1. Radiación Extraterrestre . . . . .	6
2.2. Radiación Terrestre . . . . .	7
2.2.1. Índice de Claridad . . . . .	8
2.2.2. Fracción Difusa . . . . .	8
2.3. Leyes de la Termodinámica . . . . .	8
2.3.1. Primera Ley de la Termodinámica . . . . .	9
2.3.2. Segunda Ley de la Termodinámica . . . . .	10
2.3.3. Entropía . . . . .	11
2.4. Exergía . . . . .	12
2.4.1. Eficiencia Exergética . . . . .	12
<b>3. Revisión Bibliográfica</b>	<b>14</b>
3.1. Exergía de la Radiación No Diluida . . . . .	14
3.2. Exergía de la Radiación Diluida . . . . .	22
3.3. Modelos Empíricos de la Exergía de la Radiación Solar . . . . .	34
3.4. Discusión . . . . .	37
<b>4. Metodología</b>	<b>40</b>
4.1. Filtrado de Datos . . . . .	41
4.2. Factor de Exergía de la Radiación Solar . . . . .	47
4.3. Montaje Experimental . . . . .	50
4.3.1. Balance de Energía . . . . .	52
4.4. Validación Experimental . . . . .	56
4.4.1. Balance de Exergía . . . . .	56
<b>5. Resultados</b>	<b>58</b>
5.1. Factor de Exergía de la Radiación Solar . . . . .	58
5.2. Montaje Experimental . . . . .	65
5.3. Validación Experimental . . . . .	68
5.3.1. Día Despejado . . . . .	69
5.3.2. Día Nublado . . . . .	73



5.4. Discusión . . . . .	76
<b>6. Conclusiones</b>	<b>79</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>81</b>
<b>A. El Sol</b>	<b>86</b>
A.1. Hora Solar . . . . .	86
A.2. Espectro Solar . . . . .	87
A.3. Geometría Solar . . . . .	88
<b>B. Propiedades del Panel Fotovoltaico</b>	<b>91</b>

# Índice de Tablas

4.1. Datos meteorológicos medidos en base minutal para todo el año 2018. . . . .	41
4.2. Modelos propuestos para el factor de exergía global en donde $a$ , $b$ , $c$ y $d$ son constantes a determinar. . . . .	48
4.3. Variables medidas en el montaje experimental. . . . .	50
4.4. Propiedades de las capas del panel fotovoltaico. . . . .	51
5.1. Modelos propuestos para el factor de exergía de la radiación global. . . . .	62
5.2. Resultados de los errores estadísticos para cada modelo desarrollado. . . . .	62
5.3. Errores estadísticos normalizados, $GPI$ y ranking ( $RANK$ ) para cada modelo desarrollado. . . . .	63
B.1. Características del panel fotovoltaico marca König-Sonne modelo KS-10WPS en las condiciones estándar de operación (STC). . . . .	91

# Índice de Ilustraciones

1.1. Matriz eléctrica chilena al año 2018. . . . .	2
2.1. Órbita de la tierra alrededor del Sol. . . . .	6
2.2. Los componentes de la radiación solar a través de la atmósfera. . . . .	7
2.3. Ejemplo de Fracción difusa versus Índice de claridad horario en la ciudad de Santiago de Chile para el año 2018. . . . .	9
2.4. Parte del calor de la fuente de alta temperatura se transforma en trabajo, mientras que el resto es rechazado a un sumidero de baja temperatura. . . . .	11
3.1. Radiación encapsulada en un cilindro-pistón sin fricción. . . . .	15
3.2. Máquina de Jeter para recuperar la energía del flujo constante de radiación. . . . .	18
3.3. Comparación de la exergía de la radiación para Petela, Spanner, Jeter y Parrott considerando una $T_2 = 300$ K y $\delta = 0,005$ rad. . . . .	19
3.4. Máquina de Badescu que extrae trabajo útil, desde un reservorio de radiación a un reservorio de calor. . . . .	21
3.5. Radiación monocromática incidiendo perpendicularmente sobre una superficie de cuerpo negro $Y$ . . . . .	25
3.6. Máquina de Zamfirescu & Dincer para determinar la exergía de la radiación solar. . . . .	29
4.1. Esquema de los criterios desarrollados en este trabajo. . . . .	40
4.2. Estación meteorológica ubicada en Santiago de Chile. . . . .	41
4.3. Comparativa de los datos minutales brutos y filtrados para la ciudad de Santiago de Chile (2018). . . . .	43
4.4. Datos meteorológicos (a) con los límites superior e inferior generados por la función logarítmica y (b) datos aceptados después del proceso de filtrado final. . . . .	44
4.5. Radiación solar global horizontal para cada día del año 2018. . . . .	45
4.6. Radiación solar directa normal para cada día del año 2018. . . . .	46
4.7. Radiación solar difusa horizontal para cada día del año 2018. . . . .	46
4.8. Temperatura ambiente para cada día del año 2018. . . . .	47
4.9. Factor de exergía de la radiación global horizontal en función del índice de claridad. . . . .	48
4.10. (a) Esquema general del montaje experimental con las variables de entrada, salida y mediciones y (b) Fotografía del experimento ubicado en la azotea poniente de Beauchef 851. . . . .	51
4.11. Microscopía del espesor del panel fotovoltaico. De izquierda a derecha: Vidrio, EVA, Celda y Tedlar. . . . .	52

4.12.	Esquema idealizado del flujo de calor transiente en el panel fotovoltaico. . . . .	53
4.13.	Volúmenes de control para las condiciones de borde. (a) Nodos de la parte frontal del panel. (b) Nodos de la parte posterior. (c) Nodos de interfase entre los materiales. . . . .	54
5.1.	Factor de exergía de la radiación solar directa en función de la radiación directa normal y la hora solar mediante el método de Pons para el año 2018. . . . .	59
5.2.	Factor de exergía de la radiación difusa en función de la radiación difusa horizontal y la hora solar mediante el método de Pons para el año 2018. . . . .	60
5.3.	Factor de exergía de la radiación global en función de la radiación global horizontal y la hora solar mediante el método de Pons para el año 2018. . . . .	61
5.4.	Comportamiento del modelo polinómico cúbico con respecto al factor de exergía de la radiación solar global. . . . .	64
5.5.	Dispersión entre la temperatura medida y calculada de la celda en el panel fotovoltaico. . . . .	65
5.6.	Dispersión entre la temperatura medida y calculada del tedlar en el panel fotovoltaico. . . . .	66
5.7.	Dispersión entre la potencia medida y calculada de la potencia eléctrica generada por el panel fotovoltaico. . . . .	67
5.8.	Comportamiento de la radiación solar global horizontal, directa normal y difusa horizontal del día 18 de junio del año 2019. . . . .	69
5.9.	Temperatura ambiente y velocidad del viento del día 18 de junio del año 2019. . . . .	70
5.10.	Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Petela. . . . .	71
5.11.	Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Pons. . . . .	72
5.12.	Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Jeter. . . . .	72
5.13.	Comportamiento de la radiación solar global horizontal, directa normal y difusa horizontal del día 19 de junio del año 2019. . . . .	73
5.14.	Temperatura ambiente y velocidad del viento del día 19 de junio del año 2019. . . . .	74
5.15.	Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Petela. . . . .	75
5.16.	Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Pons. . . . .	75
5.17.	Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Jeter. . . . .	76
A.1.	Irradiancia espectral estándar de la WRC a una distancia Sol-Tierra promedio. . . . .	87
A.2.	Posición del Sol con respecto a un lugar de la Tierra. . . . .	89



# Capítulo 1

## Introducción

Durante los últimos años, la ciudadanía ha comenzado a tomar mayor conciencia del impacto medioambiental que tienen sus hábitos y costumbres en desmedro del planeta. Gracias al mayor acceso a la información, la sociedad en general ha demandado cambios con el fin de disminuir la contaminación que se genera día tras día. Chile no se ha quedado ajeno a este cambio. Nuestro país históricamente ha dependido de la importación de combustibles para su matriz eléctrica, donde los que tienen mayor importación han sido los combustibles fósiles [1]. El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) al año 2018 posee una capacidad instalada de 24586 MW, de las cuales el 46,3% equivalen a energías renovables (biomasa, geotérmica, hidro pasada, hidro embalse, eólica y solar). La energía solar corresponde solo al 9,8% del total de la capacidad instalada del SEN, lo que hace un total de 2412 MW, correspondiente a un aumento del 6,4% con respecto al año 2017 (figura 1.1). La demanda de consumo de electricidad y otros combustibles (petróleo, gas, leña, derivados del carbón entre otros) se divide en los sectores energéticos, transporte, industrial y comercial, público y residencial [2]. El consumo total de todos los sectores al año 2018 alcanzó los 301168 Tcal, representando un aumento del 4,2% con respecto al año anterior. La hoja de ruta por la cual los últimos gobiernos han apoyado el desarrollo de las energías renovables se desarrolló en el año 2015 con la Política Energética al 2050, la que define las políticas públicas a largo plazo en materias tan diversas como eficiencia energética, seguridad y calidad del suministro, etc. Esta propuesta tiene la finalidad de que las energías renovables representen un 60% de la matriz energética nacional para el año 2035 y al menos un 70% de la generación eléctrica para el año 2050.

La energía solar es una de las fuentes de energía renovable que mayor potencial tiene en Chile. Escobar et al. [3] confirmaron en su estudio esta afirmación, mediante una estimación del potencial de energía solar en Chile con datos meteorológicos de 3 años obtenidos de estaciones meteorológicas y satelitales. De esta forma, identificaron al Desierto de Atacama, ubicado en el norte del país, con valores del orden de  $1200 \frac{W}{m^2}$  para la radiación solar global horizontal en condiciones de cielo claro. A su vez, se observaron en la mayor parte del país valores diarios totales de  $5 \frac{kWh}{m^2 \text{ día}}$  para la radiación solar global horizontal y  $6 \frac{kWh}{m^2 \text{ día}}$  para la radiación directa normal. Estos resultados se deben principalmente a la altitud geográfica de la zona, sumado a la baja nubosidad, lo que hace que estos lugares sean ideales para el desarrollo de diferentes tipos de tecnologías solares. A su vez, Hernández et al. [4] desarrollaron

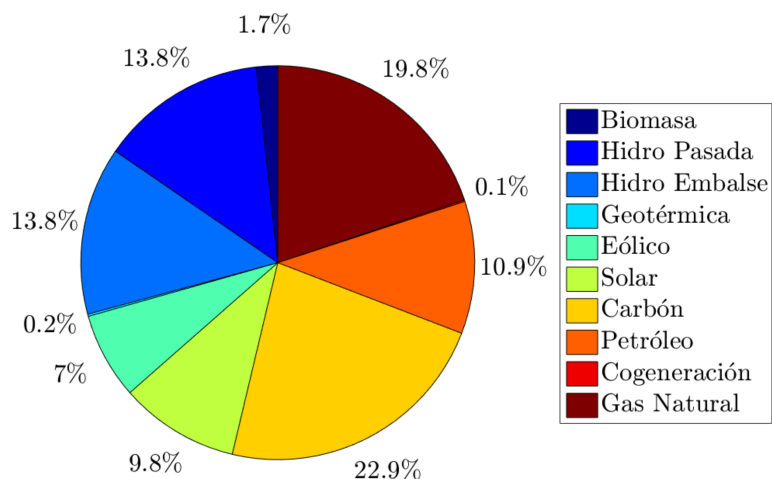


Figura 1.1: Matriz eléctrica chilena al año 2018.

un análisis de los mejores lugares en Chile donde es posible instalar plantas de concentración solar, basados en el costo nivelado de energía ( $LCOE$ ). Mediante una simulación anual de una planta de 130  $MW_e$ , encontraron que las zonas con mayor potencial para esta tecnología son las comprendidas entre las regiones de Arica y Parinacota y la región de Coquimbo, donde se estimó un promedio del  $LCOE$  de  $89 \text{ USD}/MWh$  y un mínimo de  $76 \text{ USD}/MWh$  en los alrededores de Copiapó.

El hecho de que la energía solar tenga un gran potencial para su desarrollo en nuestro país, hace que tome importancia no solo conocer la cantidad del recurso solar medible, sino que también cuanto es el potencial útil de toda esta energía que realmente puede ser aprovechada para su conversión en otro tipo de energía (eléctrica, térmica, mecánica, etc.). En otras palabras, es de gran utilidad conocer cuanto es el máximo trabajo útil que puede extraerse de la radiación solar. Esta disyuntiva está enmarcada bajo el término de la palabra exergía, la cual se define como una propiedad que representa la magnitud del trabajo útil que puede extraerse de una fuente de energía. Debido al avance de la tecnología que se realiza día tras día, se van mejorando los procesos de conversión de energía, haciendo a estos cada vez más eficientes. Sin embargo, la conversión del 100 % de energía es imposible en la realidad, debido principalmente a todas las irreversibilidades que ocurren en el proceso (fricción, pérdidas de calor, etc.). Este límite de conversión es necesario cuantificarlo, ya que, al conocerlo, se puede estimar cuanto es la energía que es realmente aprovechada y la energía que se va perdiendo en el proceso. En el ámbito de la energía solar, las irreversibilidades que se tienen antes de que la radiación llegue al equipo de conversión, se deben principalmente a la atenuación atmosférica. La radiación solar viaja por el vacío del espacio exterior sin ninguna clase de pérdida de energía. Sin embargo, al entrar en contacto con la atmósfera terrestre, comienza a sufrir diferentes fenómenos conocidos como absorción, reflexión y transmisión, debido a las moléculas que se encuentran en suspensión en las diferentes capas de la atmósfera terrestre (vapor de agua, oxígeno, dióxido de carbono, etc.).

El estudio de la exergía de la radiación solar posee dos componentes con la que se evalúa esta propiedad, al considerar a la radiación como no diluida y diluida. Se considera a la radiación como no diluida cuando no se produce ninguna clase de atenuación en su viaje

desde el Sol a la Tierra. Esta forma de cuantificar a la exergía solar comenzó a desarrollarse en los años 60, cuando Petela [5] desarrolló el primer modelo que cuantifica el contenido exergético de la radiación solar. Su análisis se basó en un modelo termodinámico clásico de cilindro-pistón, en donde la radiación solar está encerrada en un cilindro que tiene paredes perfectamente reflectantes y con una temperatura conocida. Alrededor del pistón, se consideró que estaba el ambiente en la Tierra y que tiene una temperatura menor a la que contiene la radiación solar. Mediante un análisis termodinámico llegó a la conclusión que la expresión que define a la exergía de la radiación solar no diluida corresponde a una expresión que solo está en función de la temperatura del Sol y del ambiente terrestre. Este primer análisis abrió la puerta para que otros investigadores analizaran la cuantificación de la exergía solar, donde autores como Spanner [6], Press [7] y Parrott [8] desarrollaron nuevas expresiones basadas en idealizaciones similares al cilindro-pistón de Petela, llegando a diferentes tipos de expresiones que cuantificaban el trabajo útil de la radiación solar no diluida. Sin embargo, al considerar a la radiación como no diluida, se ponía en duda su utilización en los procesos reales de conversión de energía, ya que una máquina térmica de cualquier índole ubicada en la superficie terrestre está sujeta a que la radiación sufra de los efectos de reflexión, absorción y transmisión que se generan en su paso por la atmósfera terrestre.

El estudio de la radiación solar diluida se remonta al año 1982, cuando Karlsson [9] fue el primero en establecer un modelo de exergía que tomaba en consideración a la radiación dependiendo de su longitud de onda e incluyendo un término para la entropía dentro de su modelo, lo cual hizo que su formulación sea considerada hasta el día de hoy como el modelo que determina la exergía de la radiación espectral monocromática y diluida. La modelación de Karlsson fue posteriormente validada por Candau [10], quien en el año 2003 llegó a las mismas expresiones que Karlsson, pero mediante un análisis termodinámico de un motor-absorbedor de Carnot. Para poder utilizar el modelo de Karlsson se necesita conocer la radiación espectral en las frecuencias que se requieran, lo que hace que se complejice su uso en comparación a los modelos de exergía de la radiación solar no diluida. A su vez, la radiación solar medible en la superficie terrestre se divide en tres componentes: radiación global, radiación directa y radiación difusa. El desarrollo de expresiones que consideren esta diferenciación se introdujo mediante el trabajo de Chu & Liu [11], quienes propusieron expresiones para la exergía de la radiación solar global, directa y difusa basados en las ecuaciones fundamentales de Karlsson. Por ende, estas expresiones de exergía también están en función de la frecuencia de la radiación. En el año 2012, Pons [12] desarrolló una nueva formulación para la exergía de la radiación solar diluida, pero esta vez considerando a la radiación como constante en su espectro de frecuencias, con tal de que la dependencia de su modelo solo esté en función de las mediciones instantáneas de la radiación solar directa y difusa. La propuesta de Pons llegó a una expresión que se basa en los conceptos fundamentales de energía y entropía, donde desarrolló una nueva solución para la entropía espectral, válida en una amplia gama de frecuencias.

En años recientes, se ha explorado el desarrollo de expresiones empíricas para la exergía de la radiación solar que no estén basadas en las componentes de la radiación solar, haciendo que estos nuevos modelos estén en función de otras variables meteorológicas como las horas de Sol diarias ( $\bar{n}$ ) o la duración del día promedio del mes ( $\bar{N}$ ). Arslanoglu [13] en el año 2016, desarrolló varios modelos empíricos para Turquía mediante un análisis de regresión entre la expresión del factor de exergía de la radiación solar de Petela y las variables meteorológi-



cas anteriormente señaladas. Arslanoglu evaluó el comportamiento de los diferentes modelos empíricos a partir de un análisis estadístico y así validar sus expresiones. No obstante, Arslanoglu no indicó cual fue el modelo que mejor se ajustaba a sus datos y basó su desarrollo de exergía en el modelo de Petela, el cual considera a la radiación como no diluida. Jamil & Bellos [14] en el año 2019, también desarrollaron expresiones empíricas para India basadas en las mismas variables de Arslanoglu y añadió al análisis el índice de claridad mensual ( $K_T$ ), que es la razón entre la radiación global horizontal y la radiación extraterrestre. El cálculo de la exergía de la radiación solar se basó también en la formulación de Petela, realizando por ende un análisis similar al desarrollado por Arslanoglu.

Un estudio que evalúe el máximo trabajo útil de la radiación solar en Chile no se ha realizado hasta la fecha. Como se describió en los párrafos anteriores, las condiciones naturales que posee nuestro país hace que sea atractiva la exploración de diferentes tecnologías solares, pero este desarrollo debe ir de la mano con la cuantificación real de lo que realmente puede ser aprovechado para su conversión en otra forma de energía. Es por esta razón que se desarrolló en este trabajo una expresión para la exergía de la radiación solar, utilizando los datos meteorológicos del año 2018 en la ciudad de Santiago de Chile. Este modelo fue desarrollado para que dependiera íntegramente del índice de claridad ( $k_t$ ), ya que es una variable fácilmente medible, de bajo costo y que permite tomar en consideración las condiciones del cielo en el modelo. La validación del modelo propuesto se realizó por medio de un montaje experimental de un panel fotovoltaico ubicado en la azotea de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile. Esta validación consistió en realizar un balance de energía y exergía al panel, con tal de comparar el modelo de exergía de la radiación solar con otros modelos propuestos en la literatura.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo General

- Determinar el potencial exergético de la radiación solar en la ciudad de Santiago de Chile.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar una expresión del factor de exergía de la radiación solar basado en el índice de claridad  $k_t$ .
- Validar la expresión mediante un análisis empírico basado en un balance energético/exergético de un panel fotovoltaico.
- Comparar la expresión desarrollada con otros modelos de la literatura.

# Capítulo 2

## Antecedentes Generales

El Sol es una estrella que se encuentra a una distancia promedio de  $1,5 \times 10^{11} [m]$  de la Tierra. La energía total que emite el Sol en todas direcciones es de  $3,8 \times 10^{20} [MW]$ , de la cual solo una fracción de ella es la que llega a nuestro planeta. Esta energía radiativa se denomina como constante solar ( $G_{sc}$ ) y se define como: La cantidad de energía que nos llega del Sol en unidad de tiempo, por unidad de superficie normal a la dirección de la radiación incidente, en la superficie exterior de la atmósfera, cuando la distancia Sol-Tierra es la distancia promedio. EL World Radiation Center (WRC) adoptó el valor de  $1367 [W/m^2]$  con una incertidumbre del 1%. La radiación extraterrestre que incide en un plano normal en el día  $n$  de un año ( $G_{on}$ ) se define como,

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.1)$$

Nuestro planeta se mueve alrededor del Sol con tres tipos de movimientos elementales: traslación, rotación y nutación (figura 2.1). La traslación es el movimiento alrededor del Sol siguiendo una trayectoria elíptica de pequeña excentricidad. La rotación es el movimiento de la Tierra sobre si misma alrededor de un eje imaginario que pasa por los polos y que forma un ángulo de  $23,45^\circ$  llamado declinación solar ( $\delta$ ) con la normal al plano de la eclíptica. Este ángulo se considera positivo en el verano del hemisferio Norte y negativo en el verano del hemisferio Sur y va desde  $-23,45^\circ$  a  $23,45^\circ$ .

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.2)$$

La nutación es una oscilación que tiene el eje de giro de la Tierra alrededor de su posición media. Debido al movimiento elíptico de la Tierra con respecto al Sol, se tiene una variación de la constante solar la cual puede ser calculada mediante la expresión 2.2.

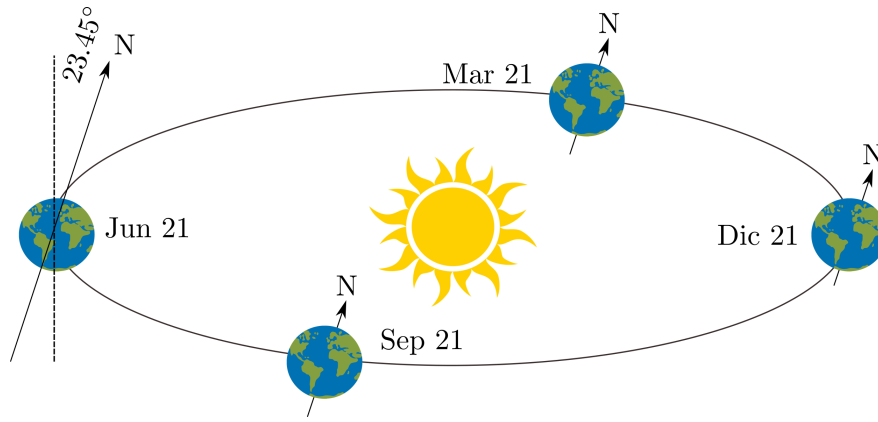


Figura 2.1: Órbita de la tierra alrededor del Sol.

## 2.1. Radiación Extraterrestre

La radiación extraterrestre incidente sobre una superficie plana normal a la radiación solar a cualquier hora se describe como,

$$G_o = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cos \theta_z \quad (2.3)$$

donde la expresión 2.3 para una superficie horizontal a cualquier hora entre el amanecer y el atardecer queda de la siguiente forma:

$$G_o = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (2.4)$$

Es también importante conocer la radiación solar extra-atmosférica diaria en una superficie horizontal ( $H_o$ ),

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600 G_{sc}}{\pi} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left( \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (2.5)$$

Finalmente, la radiación extra-atmosférica en una superficie horizontal para cada hora se obtiene para un intervalo horario desde  $\omega_1$  a  $\omega_2$ ,

$$I_o = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left[ \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi (\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (2.6)$$

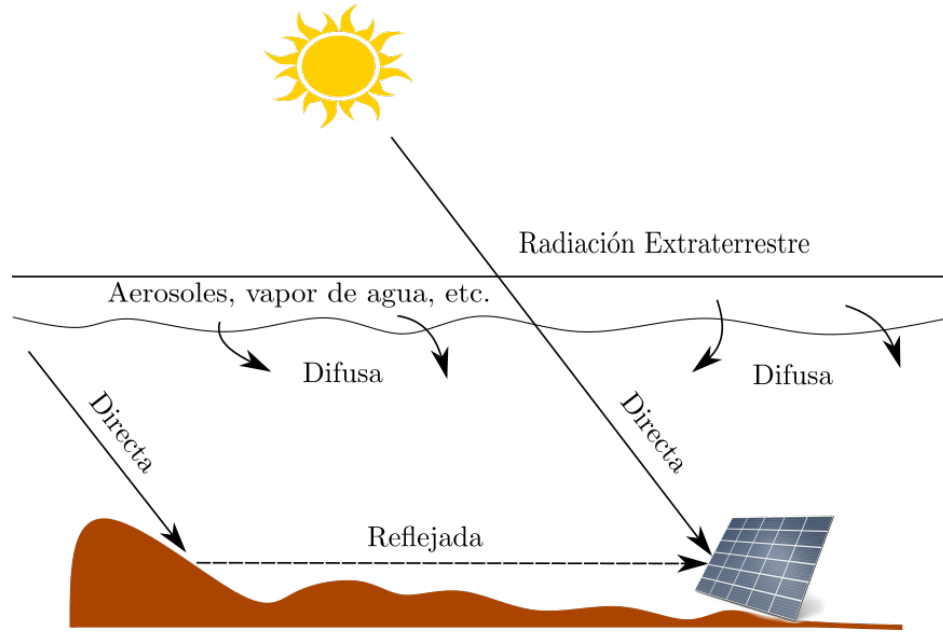


Figura 2.2: Los componentes de la radiación solar a través de la atmósfera.

## 2.2. Radiación Terrestre

La radiación que llega a la Tierra debe atravesar la atmósfera, la cual presenta una gran cantidad de aerosoles y gases que hacen que la radiación se disperse a través de ella. El espesor de la atmósfera que la radiación debe atravesar para llegar a la superficie se denomina Masa de Aire. Debido a esta dispersión que ocurre en la atmósfera terrestre, se divide la radiación solar en 4 conceptos fundamentales, los que se pueden observar en la figura 2.2:

- *Radiación Directa* ( $I_b$ ): Es toda la radiación recibida desde el Sol que llega en un ángulo recto hasta el receptor y que no fue dispersada por la atmósfera.
- *Radiación Difusa* ( $I_d$ ): Se define como la radiación que llega a la superficie después de que su dirección haya cambiado por efecto de la dispersión en la atmósfera.
- *Radiación Reflejada* ( $I_{re}$ ): Es la radiación que llega a la superficie terrestre y es reflejada hacia el receptor.
- *Radiación Global* ( $I_g$ ): Es la suma de las tres componentes anteriores que inciden en una superficie.

En términos generales, todas estas componentes se relacionan de la siguiente forma:

$$I_g(\beta, \gamma_s) = I_b(\beta, \gamma_s) + I_d(\beta, \gamma_s) + I_{re}(\beta, \gamma_s) \quad (2.7)$$

donde  $\beta$  es el ángulo de una superficie inclinada.

### 2.2.1. Índice de Claridad

Una medida de la transparencia de la atmósfera esta ligada al Índice de Claridad, el cual relaciona la radiación solar global con la radiación extra-atmosférica. El índice de claridad mensual es

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}_g}{\overline{H}_o} \quad (2.8)$$

donde el índice de claridad horario se define como,

$$k_T = \frac{I_g}{I_o} \quad (2.9)$$

### 2.2.2. Fracción Difusa

La Fracción Difusa relaciona la radiación difusa con la radiación global horizontal, y se obtiene de una forma parecida que al índice de claridad. La fracción difusa mensual se define de la siguiente forma:

$$\overline{F}_D = \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}_g} \quad (2.10)$$

donde la fracción difusa horaria es,

$$F_d = \frac{I_d}{I_g} \quad (2.11)$$

El índice de claridad y la fracción difusa se relacionan de la siguiente forma: Cuanto más clara es la atmósfera, mayor es la radiación global y menor su contenido de difusa, por lo que  $k_T$  aumenta y  $F_d$  disminuye. Esto puede verse de mejor forma en la figura 2.3.

## 2.3. Leyes de la Termodinámica

La energía es una cantidad escalar que no puede observarse directamente, pero puede ser estudiada mediante mediciones indirectas. Un ejemplo de esto es la energía térmica proveniente del Sol, la cual llega en forma de calor que se transfiere desde una fuente de alta a baja temperatura. En los procesos termodinámicos la forma de la energía puede clasificarse en dos grupos: macroscópica y microscópica. Las formas macroscópicas de la energía son las que posee un sistema con respecto a una referencia. Este tipo de energía se relaciona con

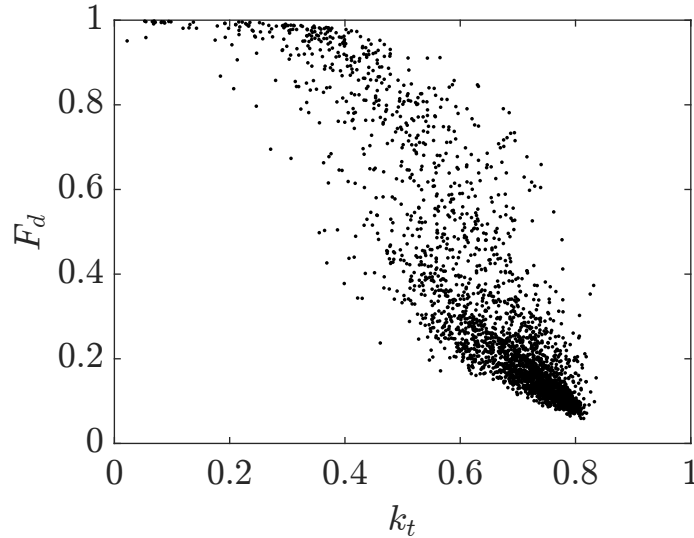


Figura 2.3: Ejemplo de Fracción difusa versus Índice de claridad horario en la ciudad de Santiago de Chile para el año 2018.

el movimiento y la influencia de los efectos externos como la gravedad, electricidad, etc. La energía que el sistema posee como resultado de su movimiento con respecto a un marco de referencia se denomina energía cinética, mientras que la energía potencial de un sistema es la suma de la energía potencial gravitatoria, centrífuga, eléctrica y magnética. Las propiedades macroscópicas de la energía son la temperatura ( $T$ ), presión ( $P$ ), densidad de masa ( $\rho$ ), etc. En un proceso termodinámico, las propiedades macroscópicas de un sistema cambian con el tiempo. En la ausencia de un proceso termodinámico, las propiedades macroscópicas no cambian con el tiempo y se dice que el sistema ha alcanzado el equilibrio térmico. Las formas microscópicas de la energía son las relacionadas con la estructura molecular del sistema y su grado de actividad molecular, por lo que son independientes de los efectos externos. La suma de todas las formas de energía microscópica de un sistema se denomina energía interna.

### 2.3.1. Primera Ley de la Termodinámica

Un sistema físico macroscópico reversible cambia su estado de equilibrio desde  $P_1$  a  $P_2$  al adicionar energía térmica ( $Q$ ), lo cual produce una cantidad de trabajo mecánico ( $W$ ) en el sistema. Este cambio se puede producir por muchos caminos diferentes, pero la primera ley de la termodinámica dice que la suma ( $Q + W$ ) es independiente de los caminos, mientras las condiciones de equilibrio son alcanzadas. Para cambios infinitesimales,  $d'Q + d'W$  dependerá de los sistemas iniciales y finales.  $d'Q + d'W$  se conoce como la energía interna ( $dU$ ) del sistema y va del estado de equilibrio  $P_1$  al estado  $P_2$ . Esto puede expresarse de la forma siguiente:

$$dU = U_{P_2} - U_{P_1} = d'Q + d'W \quad (2.12)$$

De acuerdo a la convención de signos de Clasius para procesos cíclicos, la ecuación 2.12

es escrita como,

$$\Delta U = Q - W \quad (2.13)$$

donde  $\Delta U$  es la energía interna total,  $Q$  es el calor suministrado y  $W$  es el trabajo hecho por el sistema. Además, la primera ley de la termodinámica es denominada como la Ley de la Conservación de Energía, la cual dice que la energía puede cambiar de forma, pero no puede crearse o destruirse. O en otras palabras, el cambio de energía de un sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía que entra y la que sale del sistema. Esto se expresa de la siguiente forma

$$\Delta E_{\text{sistema}} = E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} \quad (2.14)$$

donde la ecuación 2.14 se le conoce como balance de energía y puede ser aplicado en cualquier tipo de sistema que experimenta un proceso.

### 2.3.2. Segunda Ley de la Termodinámica

La segunda ley de la termodinámica relaciona el calor suministrado de una fuente y el calor extraído del sistema. Existen dos principios fundamentales y equivalentes que sirven para modelar la situación descrita anteriormente, los cuales son:

- *Principio de Clausius*: Es imposible transferir calor espontáneamente desde una fuente fría a una caliente sin causar ningún otro cambio en el sistema.
- *Principio de Kelvin-Planck*: Es imposible transformar todo el calor de la fuente a trabajo. La cantidad de calor que se rechaza al sumidero es la diferencia del calor extraído de la fuente y el trabajo obtenido del sistema.

Una máquina térmica (figura 2.4) es un dispositivo que transforma el calor en trabajo de la siguiente forma: reciben calor de una fuente de alta temperatura y convierten parte de ese calor en trabajo mientras que el resto es desechado hacia un sumidero de calor de baja temperatura. El calor extraído ( $Q_{\text{entrada}}$ ) del reservorio, el calor perdido al sumidero ( $Q_{\text{salida}}$ ) y el trabajo ( $W_{\text{neto,salida}}$ ) se relacionan de la siguiente manera,

$$W_{\text{neto,salida}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}} \quad (2.15)$$

donde el trabajo neto de salida se refiere a la diferencia entre el trabajo de entrada y de salida,

$$W_{\text{neto,salida}} = W_{\text{salida}} - W_{\text{entrada}} \quad (2.16)$$

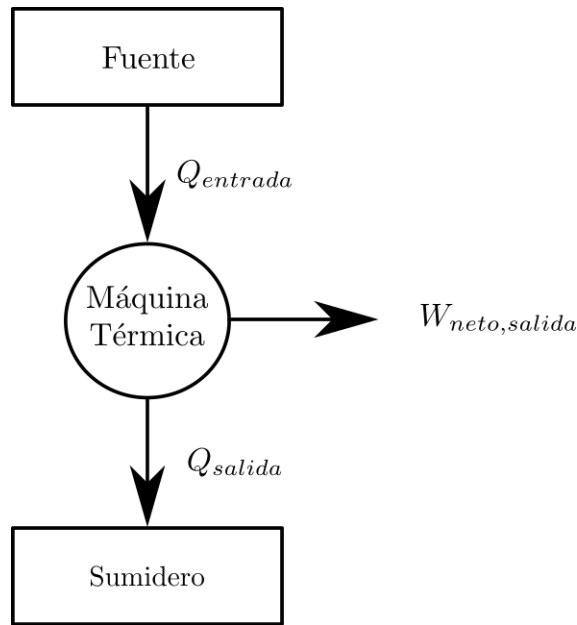


Figura 2.4: Parte del calor de la fuente de alta temperatura se transforma en trabajo, mientras que el resto es rechazado a un sumidero de baja temperatura.

### 2.3.3. Entropía

La desigualdad de Clausius establece que la integral cíclica de  $\frac{\delta Q}{T}$  siempre es menor o igual a cero.

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (2.17)$$

la cual es válida para todos los ciclos, tanto reversibles como irreversibles. La expresión 2.17 indica que cualquier transferencia de calor consiste en cantidades diferenciales de transferencia de calor y la integral de  $\frac{\delta Q}{T}$  se considera como la suma de todas las cantidades diferenciales de transferencia de calor dividida entre la temperatura en la frontera. Si no ocurren irreversibilidades en el sistema, entonces el ciclo que ocurre es internamente reversible y puede invertirse.

$$\oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int rev}} = 0 \quad (2.18)$$

Clausius estimó que la integral cíclica de cualquier propiedad en un ciclo de un sistema reversible es cero y sólo depende del estado y no de la trayectoria del proceso. Por ende, la cantidad  $\left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int rev}}$  debe representar una propiedad termodinámica la que llamó entropía, designada por la letra  $S$  y definida como

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int rev}} \quad (2.19)$$



El cambio de entropía de un sistema durante un proceso que va desde los estados inicial al final es,

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int rev}} \quad (2.20)$$

## 2.4. Exergía

La exergía es un concepto que se deriva de la segunda ley de la termodinámica, que se define como el trabajo máximo extraíble en un proceso reversible, en donde el ambiente es el sumidero de calor y que al final del proceso se llega al equilibrio termodinámico con el ambiente. La exergía se define como

$$\text{Trabajo} = f(\text{estado inicial, trayectoria del proceso, estado final}) \quad (2.21)$$

La generación de entropía en un sistema produce irreversibilidades que hacen perder exergía de forma irrecuperable. El análisis exergético de un sistema toma en consideración estas irreversibilidades y las ineficiencias de cada componente de un sistema. Algunas características importantes de la exergía son las siguientes:

- Un sistema en completo equilibrio con el ambiente no posee exergía.
- La exergía de un sistema aumenta a medida que se aleja de las condiciones del ambiente.
- Cuando la energía pierde su calidad, la exergía es destruida.
- La exergía depende no solo del estado del sistema sino que también del estado del ambiente.
- La eficiencia exergética es una medida idealizada de un sistema reversible.

### 2.4.1. Eficiencia Exergética

La eficiencia exergética se define como la razón de la exergía de salida y la exergía de entrada. La evaluación de un sistema mediante la eficiencia exergética se basa en la segunda ley de la termodinámica, mientras que un análisis de energía lo hace mediante la primera ley de la termodinámica. El balance de exergía para cualquier sistema incluye la exergía de entrada ( $\dot{E}x_{en}$ ), exergía de salida ( $\dot{E}x_{sal}$ ) y la exergía destruida ( $\dot{E}x_{dest}$ ):

$$\sum \dot{E}x_{en} - \sum \dot{E}x_{sal} = \sum \dot{E}x_{dest} \quad (2.22)$$

El flujo de exergía por unidad de masa se define como,

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (2.23)$$

en donde  $h$  y  $s$  son la entalpía específica y la entropía específica respectivamente.  $h_0$  y  $s_0$  son la entalpía y entropía específica en el estado de la temperatura  $T_0$ . La exergía destruida ( $\dot{E}x_{dest}$ ) puede escribirse como,

$$\dot{E}x_{dest} = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (2.24)$$

y la generación de entropía es:

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_{sal} s_{sal} - \sum \dot{m}_{en} s_{en} - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (2.25)$$

La eficiencia energética ( $\eta$ ) en base a la primera ley de la termodinámica se define como,

$$\eta = \frac{\text{Razón de Energía de Salida}}{\text{Razón de Exergía de Entrada}} = \frac{\dot{E}_{sal}}{\dot{E}_{en}} = 1 - \frac{\dot{E}_{perdida}}{\dot{E}_{en}} \quad (2.26)$$

donde,

$$E_{en} = E_{sal} + E_{perdida} \quad (2.27)$$

Mientras que la eficiencia exergética ( $\varepsilon$ ) del sistema se define de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{\text{Razón de Exergía Útil}}{\text{Razón de Exergía de Entrada}} = \frac{\dot{E}x_{sal}}{\dot{E}x_{en}} = 1 - \frac{\dot{E}x_{dest}}{\dot{E}x_{en}} \quad (2.28)$$

Los antecedentes de este capítulo son la base teórica para el desarrollo de los modelos de exergía de la radiación solar. Varios de los modelos de exergía son idealizaciones de la radiación comportándose como un fluido en una máquina térmica, donde se aplican las propiedades de la radiación y las leyes de la termodinámica para evaluar el trabajo que entrega la máquina. Es en esta situación, que el trabajo máximo que puede entregar la radiación es lo que se considera como exergía, lo que es descrito en mayor profundidad en el siguiente capítulo.

# Capítulo 3

## Revisión Bibliográfica

La exergía de la radiación solar ha sido un tema de estudio desde la década de los 60. Los primeros trabajos en esta área consideraron al Sol como un cuerpo negro y la radiación como no diluida, lo que significa que la emisividad ( $\varepsilon$ ) de la densidad de fotones es igual a 1 y que la radiación no es dispersada ni absorbida por el medio que atraviesa. Sin embargo, si se quieren utilizar estas expresiones en la superficie de la Tierra, una parte de los fotones de la radiación es dispersada y absorbida por la atmósfera terrestre. Debido a ello, se desarrollaron nuevos trabajos que consideraban a la radiación emitida por el Sol como diluida, lo que equivale a una emisividad de la densidad de los fotones que va entre  $0 < \varepsilon < 1$ . En los últimos años, se han desarrollado correlaciones empíricas sobre la exergía de la radiación que intentan determinar el valor de la exergía mediante variables meteorológicas. Estas correlaciones son basadas principalmente en los modelos que consideran a la radiación como no diluida. Esta revisión bibliográfica esta dividida en tres secciones, repasando los puntos descritos anteriormente sobre la exergía de la radiación y sus avances a lo largo del tiempo. De esta forma, las secciones de este capítulo son: exergía de la radiación no diluida, exergía de la radiación diluida y modelos empíricos de exergía de la radiación solar. Finalmente, la última sección de este capítulo corresponde a una discusión sobre los trabajos considerados en esta revisión bibliográfica, que permite identificar los vacíos en el conocimiento existente en esta área y que este trabajo intenta abarcar.

### 3.1. Exergía de la Radiación No Diluida

Petela [5] desarrolló el primer modelo de exergía de la radiación térmica en el año 1964. Para esto, consideró una máquina cilindro-pistón (figura 3.1) que tiene densidad de radiación encapsulada dentro del cilindro, donde las paredes internas de este son espejos perfectos y sin fricción. El pistón se mueve a la derecha si  $T_1 > T_2$  y a la izquierda si  $T_1 < T_2$  debido a las diferencias de presión radiativas. La presión radiativa se calcula de la siguiente forma:

$$P = \frac{a}{3}T^4 \quad (3.1)$$

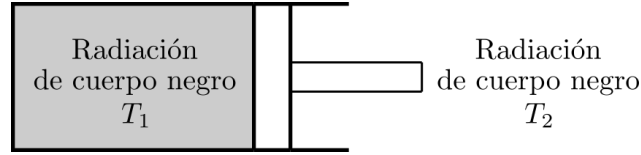


Figura 3.1: Radiación encapsulada en un cilindro-pistón sin fricción.

donde  $a$  es la constante radiativa ( $7,561 \times 10^{-19} \text{ kJ/m}^3\text{K}^4$ ) y  $T$  la temperatura de la radiación. Si se produce una expansión reversible y adiabática hasta alcanzar el equilibrio con su alrededor ( $V_2, T_2$ ), Petela definió el trabajo entregado por el pistón como,

$$W_{1-2} = \int_1^2 PdV - P_2(V_2 - V_1) \quad (3.2)$$

donde el proceso de expansión ocurre de la siguiente forma,

$$P = (\text{constante})V^{-\frac{4}{3}} \quad (3.3)$$

El trabajo útil (exergía)  $W_{1-2}$  se determina mediante la expresión 3.2 y reordenándola al considerar 3.1 y 3.3,

$$W_{1-2} = U_1 \left[ 1 - \frac{4T_2}{3T_1} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^4 \right] \quad (3.4)$$

donde  $U_1$  es la energía inicial del sistema ( $U_1 = aT_1^4V_1$ ). Al considerar la eficiencia de una máquina térmica ( $\eta$ ) como,

$$\eta = \frac{W_{1-2}}{U_1} \quad (3.5)$$

y reemplazando 3.4 en la expresión anterior se encuentra el factor de exergía de Petela,

$$\psi_P = 1 - \frac{4T_2}{3T_1} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^4 \quad (3.6)$$

El modelo de Petela ha sido debatido desde el día de su publicación, debido principalmente a que los valores calculados por la formulación de Petela sobreestiman los resultados de exergía para la radiación. El sistema cilindro-pistón es un modelo idealizado que considera al ambiente con una radiación de cuerpo negro isotrópica y a presión constante, el que no es el comportamiento real del ambiente. En el mismo año, Spanner [6] también determinó un factor de exergía de la radiación no diluida, mediante un enfoque diferente al de Petela. Considerando una máquina térmica como el cilindro-pistón de la figura 3.1, la radiación contenida en el cilindro-pistón se considera ingresando a la máquina térmica, por lo que

parte de ella es usada para generar trabajo y el resto es rechazada hacia un sumidero. El calor que entra a la máquina térmica se define como,

$$Q_{entrada} = u_1 V_1 = U_1 \quad (3.7)$$

La entropía generada en la máquina corresponde a,

$$\Delta S_1 = -\frac{4}{3} \left( \frac{U_1}{T_1} \right) \quad (3.8)$$

El calor rechazado hacia el sumidero es,

$$Q_{salida} = T_2 \Delta S_2 \quad (3.9)$$

donde  $\Delta S_2$  es la entropía generada en el sumidero. Considerando que,

$$\Delta S_1 = \Delta S_2 \quad (3.10)$$

y utilizando 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 se llega a,

$$W_{m\acute{a}x} = Q_{entrada} - Q_{salida} = U_1 \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \right] \quad (3.11)$$

Finalmente, mediante la eficiencia máxima del sistema ( $\psi$ ) se encuentra la expresión de exergía de Spanner,

$$\psi_S = 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \quad (3.12)$$

La formulación de Spanner es similar a la de Petela, pero con un término menos. Esta diferencia se genera debido a que Petela considera la definición de trabajo útil, mientras que el modelo de Spanner lo considera como el trabajo absoluto. Una incongruencia que posee la formulación de Spanner es que se hace negativa si la temperatura  $T_1$  es mayor a  $\frac{3}{4}T_2$ .

En el año 1978, Parrott [8] desarrolló una expresión de la exergía de la radiación solar no diluida tomando en consideración el componente direccional de la radiación. Parrott consideró un volumen  $V$  que contiene radiación y posee una dirección de propagación en ambos sentidos, restringida a un ángulo  $\delta$  que representa la mitad del ángulo del cono subtendido por el disco solar. La energía interna y entropía de la radiación son dadas respectivamente como,

$$U = \frac{hV}{c^3} \int \int \int N \nu^3 d\nu \sin\theta d\theta d\phi \quad (3.13)$$

$$S = \frac{kV}{c^3} \int \int \int [(N + 1)\ln(N + 1) - N\ln(N)] \nu^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (3.14)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $c$  la velocidad de la luz,  $\nu$  la frecuencia,  $\theta$  un ángulo comprendido entre  $0 < \theta < \delta$  y  $\pi - \delta < \theta < \pi$  para la energía y entropía, respectivamente y  $k$  la constante de Boltzmann.  $N$  es el número de fotones y toma la forma de,

$$N = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT_1}} - 1} \quad (3.15)$$

donde  $T_1$  es la temperatura de la radiación de cuerpo negro. Al realizar un análisis termodinámico como en los apartados anteriores de un cilindro-pistón, Parrott determinó que el máximo trabajo útil que posee la radiación de cuerpo negro considerando la dirección de la radiación es,

$$\psi_{Pa} = 1 - \frac{4T_2}{3T_1}(1 - \cos\delta)^{\frac{1}{4}} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^4 \quad (3.16)$$

Si se considera una temperatura del Sol de  $T_1 = 5800 K$ ,  $T_2 = 300 K$  y un ángulo  $\delta = 0,005 rad$  en la superficie terrestre, se puede realizar una comparación entre los modelos de Petela, Spanner y Parrott. El modelo de Petela (ecuación 3.6) y Spanner (ecuación 3.12) entregan ambos el valor de 0,931, mientras que la ecuación de Parrott (ecuación 3.16) entrega un trabajo útil de 0,996 (figura 3.3). Además, la única forma para que los modelos de Petela y Parrott entreguen el mismo resultado es que  $\delta = \frac{\pi}{2}$ .

Jeter [15] en el año 1981 realizó una modificación al modelo idealizado clásico de un cilindro-pistón, en donde consideró a la radiación como un “flujo constante” que entra al sistema de la figura 3.2. La máquina de Jeter considera paredes perfectamente reflectantes y el ambiente que está por fuera del pistón se asume que es una radiación de cuerpo negro a la temperatura  $T_2$  y presión  $P_2$ . Al inicio del proceso, el pistón se encuentra en la posición definida como 1, mientras que la pared de la izquierda del cilindro es abierta y llenada con radiación de cuerpo negro isotrópica a una temperatura  $T_1$ . Después, el pistón se mueve hacia la derecha ( $\Delta V$ ) resultando en dos tipos de trabajo:  $P_2 \Delta V$  hacia el ambiente y  $(P_1 - P_2) \Delta V$  a un mecanismo externo. La energía interna ( $\Delta U$ ) de la radiación encapsulada es,

$$\Delta U_1 = 3P_1 \Delta V \quad (3.17)$$

Posteriormente, la pared izquierda del cilindro se cierra con una superficie perfectamente reflectante, por lo que el trabajo máximo que produce la radiación encerrada es la misma que el modelo de Petela (3.6),

$$W = \Delta U_1 \left[ 1 - \frac{4T_2}{3T_1} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^4 \right] \quad (3.18)$$

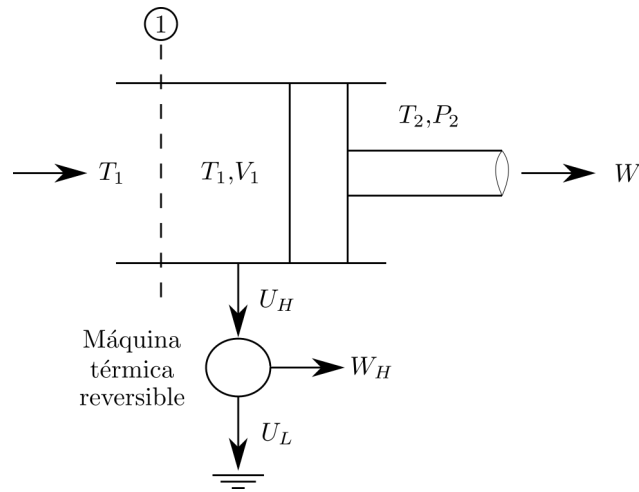


Figura 3.2: Máquina de Jeter para recuperar la energía del flujo constante de radiación.

Agregando este nuevo trabajo a los ya obtenidos durante la expansión del volumen en el cilindro, Jeter determinó el trabajo máximo total del sistema que se expresa como,

$$W = 4P_1 \Delta V \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \quad (3.19)$$

Finalmente, Jeter definió la exergía de la radiación de una forma diferente, agregando un término que él consideró como la “cantidad total de radiación” que entra al cilindro ( $4P_1 \Delta V$ ). Por lo tanto, la exergía de la radiación se expresa como,

$$\psi_{Je} = \frac{W}{4P_1 \Delta V} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3.20)$$

En el sistema idealizado de Jeter la radiación térmica la considera igual que la definición de calor, por lo que su enfoque finaliza en que la exergía de la radiación no diluida es la eficiencia de Carnot. Sin embargo, la energía radiativa de la radiación de cuerpo negro encapsulada en el cilindro es diferente de la energía térmica. Es debido a lo anterior que el modelo de Jeter considera al Sol como una fuente térmica y no una fuente radiativa.

En la figura 3.3 se han graficado los factores de exergía radiativos de Petela, Spanner, Jeter y Parrott para una temperatura  $T_2$  constante de  $300 \text{ K}$  y un semiángulo del cono subtendido igual a  $0,005 \text{ rad}$ . La temperatura radiativa está en un rango de  $0$  a  $6000 \text{ K}$  que representa teóricamente la temperatura de cuerpo negro. El factor de exergía de Spanner es negativo cuando la temperatura radiativa disminuye de los  $300 \text{ K}$ . A su vez, el modelo de Jeter toma valores negativos a una temperatura menor de  $400 \text{ K}$ . Petela y Parrott divergen en un rango menor de  $300 \text{ K}$  y  $500 \text{ K}$  respectivamente. En el rango superior a los  $300 \text{ K}$  los modelos de Petela, Spanner y Jeter tienen un comportamiento muy similar, en donde se tiene un fuerte aumento en el factor de exergía calculado hasta los  $2000 \text{ K}$ , aproximadamente. Posteriormente, se tiene un incremento que se va ralentizando a medida que aumenta la temperatura. Es de recalcar que el modelo de Jeter siempre entrega valores mayores que el

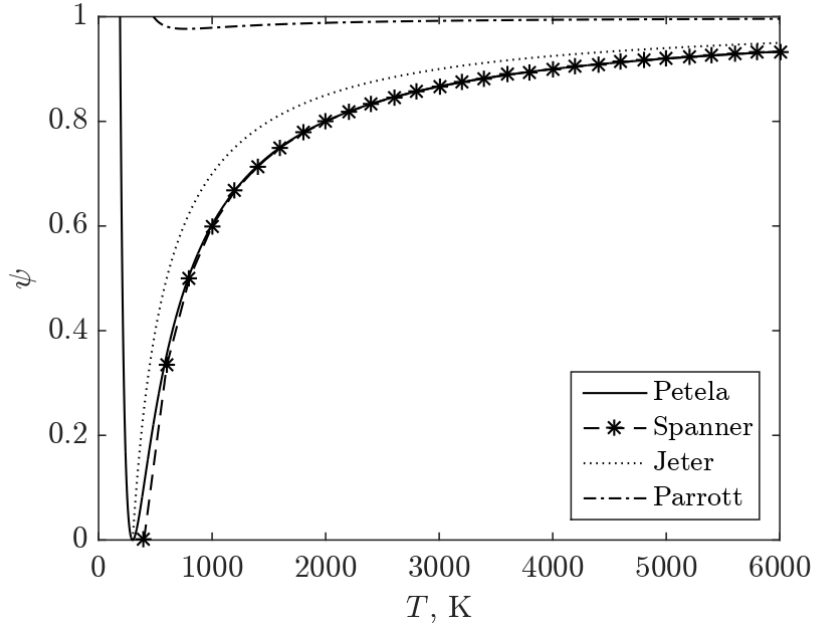


Figura 3.3: Comparación de la exergía de la radiación para Petela, Spanner, Jeter y Parrott considerando una  $T_2 = 300$  K y  $\delta = 0,005$  rad.

modelo de Petela, y a su vez, el modelo de Petela entrega factores mayores que Spanner ( $\psi_{Je} > \psi_P > \psi_S$ ). El comportamiento del modelo de Parrott es muy diferente a los demás, ya que este calcula un factor de exergía de 0,979 a una temperatura radiativa a 1000 K, mientras que Spanner, Petela y Jeter entregan un valor 0,6, 0,603 y 0,7 respectivamente. A medida que aumenta la temperatura radiativa, el modelo de Parrott se incrementa muy lentamente, haciendo que su curva en el gráfico presente una pendiente muy pequeña. A la temperatura teórica de cuerpo negro de 6000 K, los modelos de Spanner y Petela se igualan con un factor de exergía radiativo de 0,933. Jeter para esta misma temperatura entrega un valor de 0,95, mientras que Parrott calcula un valor de 0,996. Debido a que la exergía de la radiación se obtiene mediante una idealización termodinámica de una máquina térmica, la eficiencia ideal que puede tener esta máquina según la segunda ley de la termodinámica es la eficiencia de Carnot (Jeter), por lo que el modelo de Parrott se debe considerar como incorrecto debido a que entrega un factor de exergía superior a Carnot.

Los trabajos anteriormente señalados fueron debatidos durante los años posteriores a sus publicaciones. Ejemplo de esto se ve en el trabajo de Gribik & Osterle [16] del año 1984 que compararon los modelos de Petela, Spanner, Parrott y Jeter. Gribik & Osterle argumentaron que el modelo de Parrott no es correcto, debido a que la radiación de cuerpo negro que atraviesa el cono dicho por Parrott es una radiación isotrópica el cual no es el caso, ya que la radiación de cuerpo negro tiene una energía y entropía espectral que depende de su frecuencia. El modelo de Jeter también fue considerado incorrecto ya que el tomar en consideración la radiación como un flujo se asocia a un gas y no al comportamiento de un gas fotón. Finalmente, el modelo de Petela fue comparado directamente con el de Spanner, llegando a la conclusión que el modelo de Spanner es el “correcto” debido a que considera que la radiación es destruida cuando la temperatura  $T_1$  desciende para llegar al equilibrio con  $T_2$ .



Bejan en el año 1987 [17] intentó unificar las teorías de Petela, Spanner y Jeter, debido a que estos trabajos habían sido acusados de incorrectos por otros autores. Bejan, después de analizar cada teoría por separado, llegó a la conclusión de que todas las teorías eran correctas por si mismas y se relacionan entre si ya que todas consideran a la radiación de cuerpo negro como isotrópica, la cual proviene de una fuente radiativa de alta temperatura. Las diferencias que se producen en cada modelo surgen por cómo describen el trabajo producido por la radiación térmica y la concepción de un modelo apropiado para el sistema idealizado de cada uno.

En el año 2002, Wright et al. [18] evaluaron en profundidad el modelo de Petela, llegando a la conclusión de que la exergía de la radiación propuesta por Petela es la exergía de la radiación de cuerpo negro y el límite máximo de la conversión de radiación solar en trabajo útil. Esto lo dedujeron demostrando que la transformación reversible de radiación de cuerpo negro en trabajo útil es teóricamente posible. En consecuencia, se asegura que la exergía de la radiación de cuerpo negro es la exergía de la radiación encerrada en el sistema idealizado cilindro-pistón de Petela. Además, demostraron que la definición del ambiente en el sistema de Petela solo sirve para diferenciar la exergía de la radiación térmica de otros tipos de exergía.

El mismo Petela en el año 2003 [19] realizó una revisión de su propio modelo de 1964 y analizó los trabajos propuestos por Spanner y Jeter. En su análisis, llego a la misma conclusión de Bejan en cuanto a que todos los modelos son correctos y obtienen un tipo de trabajo. No obstante, el trabajo que entregan cada uno de estos modelos es diferente. Spanner entrega el trabajo absoluto, el modelo de Jeter entrega el trabajo neto de una máquina térmica y su modelo (Petela) es el que permite determinar el trabajo útil de la exergía de la radiación no diluida. Petela concluye en su trabajo que la exergía de la radiación (comportándose como materia) existe en cierto instante, independientemente de lo que va a pasar con la radiación al instante siguiente. Además, Petela propone un cambio de la idealización clásica de una radiación de cuerpo negro contenida en un cilindro-pistón por un sistema de 2 superficies radiantes en donde ocurre emisión y absorción.

En el año 2014, Badescu ([20] y [21]) intentó encontrar una formulación general que pueda englobar los diferentes modelos de exergía de la radiación no diluida postulados hasta esa fecha. Para esto, Badescu diseñó una nueva idealización de una máquina reversible que pueda generar trabajo útil a partir de la radiación incidente (figura 3.4). Consideró como estudio de caso la extracción de trabajo desde un reservorio de radiación de cuerpo negro de alta temperatura ( $T_H$ ) a un sumidero de calor a baja temperatura ( $T_L$ ). En este sistema, el absorbedor es una superficie Lambertiana de área  $A_a$  recibiendo radiación desde todo el hemisferio. El ángulo sólido ( $\Omega$ ) y el factor geométrico ( $f$ ) de un reservorio de radiación se expresan como,

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos\delta) \quad (3.21)$$

$$f = \frac{\Omega}{\pi} \left(1 - \frac{\omega}{4\pi}\right) \cos\theta_z \quad (3.22)$$

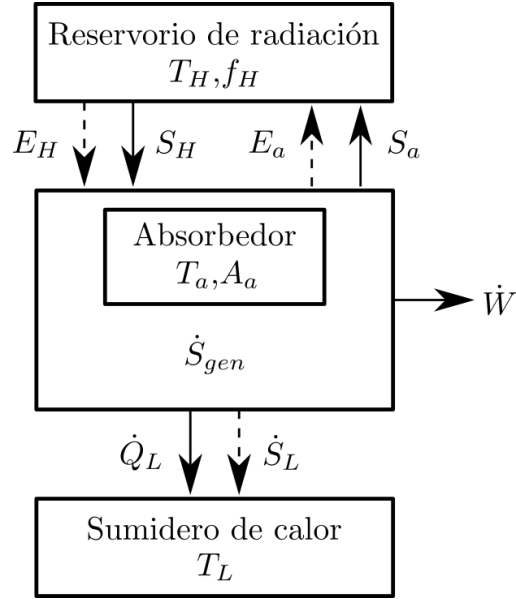


Figura 3.4: Máquina de Badescu que extrae trabajo útil, desde un reservorio de radiación a un reservorio de calor.

donde  $\delta$  es la mitad del ángulo del cono subtendido de la esfera vista desde el observador y  $\theta_z$  el ángulo cenital. El factor geométrico del absorbedor es  $f_a = 1$  y la energía y entropía se determinan respectivamente como,

$$E = f\sigma T^4 \quad (3.23)$$

$$S = \frac{4}{3}f\sigma T^3 \quad (3.24)$$

Un balance de la primera y segunda ley de la termodinámica a la máquina de Badescu queda de la siguiente forma:

$$A_a \dot{E}_H - A_a \dot{E}_a - \dot{Q}_L = \dot{W} \quad (3.25)$$

$$A_a \dot{S}_H - A_a \dot{S}_a - \dot{S}_L + \dot{S}_{gen} = 0 \quad (3.26)$$

donde  $\dot{E}_H$  es energía radiativa que llega al absorbedor desde el reservorio de radiación,  $\dot{E}_a$  la energía radiativa emitida por el absorbedor,  $\dot{Q}_L$  el calor rechazado hacia el sumidero de calor,  $\dot{W}$  el trabajo generado,  $\dot{S}_H$  la entropía radiativa recibida por el absorbedor desde el reservorio de radiación,  $\dot{S}_a$  la entropía radiativa emitida por el absorbedor,  $\dot{S}_L$  la entropía rechazada hacia el sumidero de calor y  $\dot{S}_{gen}$  la entropía generada en la máquina térmica. La eficiencia de esta máquina térmica ( $\eta_{rc}$ ) es,

$$\eta_{rc} = \frac{\dot{W}}{A_a \dot{E}_H} = 1 - \frac{A_a \dot{E}_a + \dot{Q}_L}{A_a \dot{E}_H} \quad (3.27)$$

Reemplazando la expresión de entropía y 3.26 en 3.27, queda como,

$$\eta_{rc} = 1 - \frac{\dot{E}_a + T_L \left( \dot{S}_H - \dot{S}_a + \frac{\dot{S}_{gen}}{A_a} \right)}{\dot{E}_H} \quad (3.28)$$

Para que el estado de equilibrio ocurra se necesita que  $T_L = T_a = T_H$  y  $f_H = 1$ . A su vez, el trabajo  $\dot{W}$  es positivo solo si  $\dot{E}_H \geq \dot{E}_a$  y  $\dot{Q}_L \geq 0$ . Como el trabajo máximo se obtiene en un sistema reversible, se puede suponer que  $\dot{S}_{gen} = 0$ . Por ende, reemplazando 3.23 y 3.24 en 3.28,

$$\eta_{rc,m\acute{a}x} = 1 - \frac{x_{rev}^4}{f_H} - \frac{4}{3}a \left( 1 - \frac{x_{rev}^3}{f_H} \right) \quad (3.29)$$

donde  $x_{rev}$  es la temperatura reversible  $\frac{T_a}{T_H}$  y  $a$  es  $\frac{T_L}{T_H}$ . Como la expresión 3.28 llega a un máximo cuando  $x_{rev} = a$ , esta queda finalmente,

$$\psi_{Ba} = 1 - \frac{4}{3}a + \frac{1}{3} \frac{a^4}{f_H} \quad (3.30)$$

La ecuación 3.30 es el trabajo máximo que se puede extraer desde un reservorio de radiación hasta un sumidero de calor y es válida para  $a^3 < f < 1$ . El caso  $f < a^3$  no es posible debido a que el trabajo entregado por el sistema se hace negativo. El propio Badescu al año siguiente [22] realizó una revisión de su modelo, al compararlo con los modelos de Petela y Jeter. En este trabajo se muestra que la ecuación 3.30 se transforma en la ecuación de Petela (3.6) cuando el factor geométrico del reservorio de calor es igual a 1. Además, si  $f_H = a^3$ , la expresión de Badescu se transforma en el modelo de Jeter (Carnot). La ecuación de Badescu entrega una formulación general del factor de exergía de la radiación de cuerpo negro no diluida, basada en el factor geométrico y las temperaturas del reservorio de radiación y del sumidero de calor. Más aún, las formulaciones de Petela y Jeter son un caso particular de la formulación general de Badescu.

## 3.2. Exergía de la Radiación Diluida

Los trabajos de la sección anterior se realizaron considerando a la radiación del Sol como no diluida. Estos modelos termodinámicos idealizados no consideran la entropía generada por la radiación al atravesar un medio. A su vez, la energía radiativa depende de la longitud de onda y de la frecuencia, ya que la radiación solar se compone de un espectro de frecuencias donde su contenido exergético varía en función de la longitud de onda que se quiera analizar.

En el año 1979, Landsberg & Tonge [23] evaluaron el efecto de la atenuación atmosférica en la radiación diluida de cuerpo negro. Para esto, buscaron una expresión que pueda representar esta atenuación en los flujos de energía y entropía de la radiación. Considerando al número de fotones ( $n$ ) como,

$$n_{\varepsilon,v,T} = \frac{8\pi v^2 \varepsilon}{c^3 \left( e^{\frac{hv}{E T}} - 1 \right)} \quad (3.31)$$

donde  $v$  es la frecuencia,  $c$  la velocidad de la luz en el medio que atraviesa,  $h$  la constante de Planck,  $T$  la temperatura de la radiación diluida de cuerpo negro,  $E$  la energía radiativa espectral, y  $\varepsilon$  es el factor de dilución de la radiación y es independiente de la frecuencia. La energía ( $E_{\varepsilon,v,T}$ ) y entropía ( $S_{\varepsilon,v,T}$ ) de la radiación espectral emitida por una superficie por unidad de área por unidad del ángulo sólido es, respectivamente,

$$E_{\varepsilon,v,T} = \frac{c \cdot h \cdot v \cdot n_{\varepsilon,v,T}}{4\pi} \quad (3.32)$$

$$S_{\varepsilon,v,T} = \frac{c \cdot s_{\varepsilon,v,T}}{4\pi} \quad (3.33)$$

donde  $s$  es la densidad de la entropía espectral, y se expresa como,

$$s_{\varepsilon,v,T} = \frac{8\pi v^2 k [(1+x)\ln(1+x) - x\ln x]}{c^3} \quad (3.34)$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann y  $x$  es el factor de Bose,

$$x_{\varepsilon,v,T} = \frac{\varepsilon}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1} \quad (3.35)$$

La energía radiativa isotrópica de una superficie que emite y absorbe radiación se expresa de la siguiente forma,

$$E_{\varepsilon,T} = \int \int E_{\varepsilon,v,T} \cos \theta_z dv d\omega = B \int E_{\varepsilon,v,T} dv \quad (3.36)$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital,  $\omega$  el ángulo sólido y  $B$  es,

$$B = \int \cos \theta_z d\omega \quad (3.37)$$

Reemplazando 3.32 en 3.36 queda finalmente,

$$E_{\varepsilon,T} = \frac{B\varepsilon\sigma T^4}{\pi} \quad (3.38)$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann. La expresión de la ecuación 3.38 es la energía radiativa espectral de cuerpo negro atenuada. Para la entropía espectral de la radiación atenuada se hace un proceso similar, donde finalmente queda como,

$$S_{\varepsilon,T} = \frac{4}{3} \frac{B\varepsilon X(\varepsilon)\sigma T^3}{\pi} \quad (3.39)$$

$X(\varepsilon)$  es una función que se obtiene al considerar la entropía espectral para una radiación de cuerpo negro diluida para todo el rango de frecuencias,

$$X(\varepsilon) = \frac{45}{4\varepsilon\pi^4} \int_0^\infty y^2 \cdot [(x+1) \cdot \ln(x+1) - x \cdot \ln(x)] dy \quad (3.40)$$

donde,

$$y = \frac{hv}{kT} \quad (3.41)$$

Landsberg & Tonge fueron los primeros en encontrar una solución numérica a la función  $X(\varepsilon)$ , la que solo es válida para emisividades menores a 0,1 ( $0 < \varepsilon < 0,1$ ).

$$X(\varepsilon) = 0,9652 + 0,2777\ln(\varepsilon^{-1}) + 0,0511\varepsilon \quad (3.42)$$

El mayor aporte del trabajo de Landsberg & Tonge fue la solución numérica anterior. Esta fue resuelta por primera vez y permite conocer la entropía radiativa de cuerpo negro para un rango específico de factores de dilución del medio por el cual atraviesa, el cual no depende ni de la dirección de los fotones ni de la longitud de onda. Sin embargo, el rango de validez de la resolución numérica es muy acotado tomando en cuenta que el factor de dilución se comprende entre valores que van desde 0 a 1. A su vez, no obtuvieron una expresión del factor de exergía de la radiación espectral, sino que realizaron un análisis general en que llegaron a la misma expresión propuesta por Petela para la radiación total no diluida (3.6).

Karlsson [9] en el año 1982 fue el primero en proponer una expresión para la exergía de la radiación diluida. Karlsson definió un sistema en el que la radiación en un rango de frecuencia  $dv$  alrededor de  $v$  y en un cono  $d\Omega$  se concentra de forma perpendicular en una superficie de cuerpo negro diferencial  $dY$  (figura 3.5). La energía y entropía total de la radiación espectral son respectivamente,

$$E = \left( \frac{2kv^2}{c^2} \right) [(1+n)\ln(1+n) - n\ln(n)] \quad (3.43)$$

$$S = \frac{2nhv^3}{c^2} \quad (3.44)$$

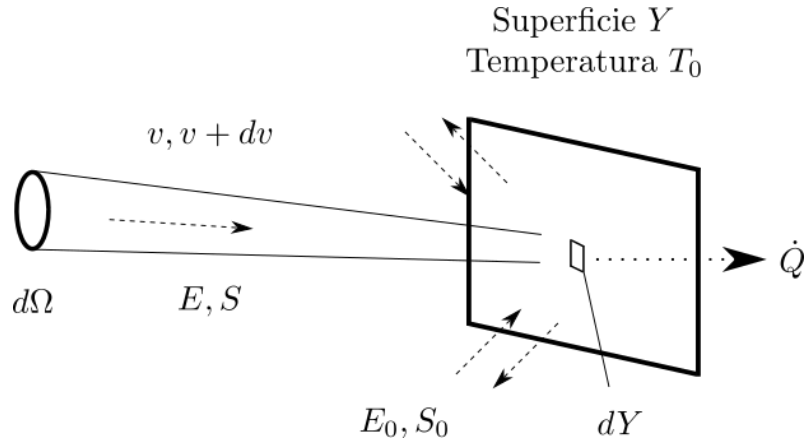


Figura 3.5: Radiación monocromática incidiendo perpendicularmente sobre una superficie de cuerpo negro  $Y$ .

La temperatura de la radiación de cuerpo negro definida por Karlsson es,

$$T = \frac{hv}{k \ln \left[ \frac{2hv^3}{c^2 K} + 1 \right]} \quad (3.45)$$

La superficie  $Y$  posee una temperatura  $T_0$  y energía y entropía espectral de  $E_0$  y  $S_0$  respectivamente. Un balance termodinámico al sistema basado en la primera y segunda ley queda de la siguiente manera,

$$0 = \dot{E} dv d\omega dY - \dot{E}_0 dv d\Omega dY - \dot{Q} \quad (3.46)$$

$$\Delta \dot{S} = \frac{\dot{Q}}{T_0} + \dot{S}_0 dv d\Omega dY - \dot{S} dv d\Omega dY \quad (3.47)$$

donde  $\dot{Q}$  es el flujo de calor en la superficie. Reemplazando 3.46 y 3.47 en la definición de entropía  $\left( \Delta \dot{S} = \frac{\dot{Q}}{T_0} \right)$  se encuentra el flujo de exergía de la radiación

$$B = [E - E_0 - T_0(S - S_0)] dv d\Omega dY \quad (3.48)$$

Por consiguiente, la exergía se expresa de la siguiente forma:

$$b = E - E_0 - T_0(S - S_0) \quad (3.49)$$

El número de fotones en el flujo radiativo para las temperaturas  $T_0$  y  $T$  son,

$$n_0 = \frac{1}{e^{\frac{hv}{kT_0}} - 1} \quad (3.50)$$

$$n = \frac{1}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1} \quad (3.51)$$

Finalmente, se reemplaza 3.43, 3.44, 3.50 y 3.51 en 3.49 para encontrar la exergía de la radiación espectral,

$$b = T_0 \frac{2kv^2}{c^2} \left[ \frac{hv}{kT_0} \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \frac{e^{\frac{hv}{kT}}}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1} + \ln \left( \frac{e^{\frac{hv}{kT}} - 1}{e^{\frac{hv}{kT_0}} - 1} \right) \right] \quad (3.52)$$

Para obtener el factor de exergía espectral de la radiación se utiliza la definición de eficiencia exergética ( $\psi = \frac{b}{E}$ ),

$$\psi_{kar} = 1 - \frac{T_0}{T} + \frac{e^{\frac{hv}{kT}} - 1}{\frac{hv}{kT_0}} \ln \left( \frac{1 - e^{-\frac{hv}{kT}}}{1 - e^{-\frac{hv}{kT_0}}} \right) \quad (3.53)$$

El modelo de Karlsson se hace cero cuando  $T = T_0$  y es siempre positivo para  $T \neq T_0$ . El modelo de Petela es también un caso particular del modelo de Karlsson al definir un promedio de la exergía de la radiación de cuerpo negro  $\left( \frac{\text{Densidad de exergía espectral}}{\text{Densidad de energía espectral}} \right)$ . La ecuación 3.53 propuesta por Karlsson establece el factor de exergía de la radiación monocromática, considerando una radiación monocromática chocando contra una superficie diferencial de cuerpo negro. Este elemento diferencial produce un flujo de calor en lugar de trabajo útil, como en los modelos de radiación no diluida. Esta expresión es complicada de usar en la practica debido a que la radiación incidente sobre una superficie se compone de un espectro radiativo de infinitas longitudes de onda. Por lo que es de mayor utilidad usar una expresión que pueda entregar un factor de exergía de la radiación espectral que represente a la radiación en un rango amplio de longitudes de onda.

21 años después, Candau [10] en el año 2003 realizó un análisis termodinámico de un motor de Carnot donde utilizó los criterios de radiación monocromática anteriormente señalados. Mediante este análisis llegó a la conclusión de que la exergía de la radiación monocromática es la expresión de Karlsson. Candau también explicó la situación de un sistema reversible de radiación monocromática que entra en contacto con una superficie gris. Parte de la radiación incidente es reflejada mientras que otra parte se refracta al atravesar la superficie. Si se suman las entropías de la radiación reflejada y refractada, se encuentra que la suma de ellas es mayor que la entropía de la radiación incidente, lo que implica que hubo una generación de entropía en un proceso que se consideraba reversible. Esta “paradoja” no se puede explicar solo en base a la primera ley de la termodinámica, lo que deja el área abierta de estudio para el análisis de la ley de Kirchhoff mediante la segunda ley.

Chu & Liu [11] en el año 2009 realizaron un análisis de la radiación solar con las ecuaciones propuestas por Karlsson. En su trabajo, analizaron la exergía de la radiación solar espectral terrestre y extraterrestre en donde desarrollan las ecuaciones de Karlsson para las componentes directa y difusa de la radiación solar. Tomando en consideración la ecuación 3.49 y una superficie horizontal donde incide la radiación solar extraterrestre, la exergía espectral de la radiación solar extraterrestre ( $b_\lambda^{ETS}$ ) se puede calcular de la siguiente forma,

$$b_\lambda^{ET} = \Delta\Omega \cos\theta_z [I_\lambda^{ET} - I_{O,\lambda} - T_0(S_\lambda^{ET} - S_{0,\lambda})] \quad (3.54)$$

donde el factor de exergía de la radiación solar extraterrestre se define como,

$$\psi_\lambda^{ET} = \frac{b_\lambda^{ET}}{E_\lambda^{ET}} \quad (3.55)$$

donde  $E_\lambda^{ET}$  es la irradiancia solar espectral extraterrestre. La radiación solar terrestre se divide en sus componentes de irradiancia espectral directa ( $E_{b,\lambda}$ ) y difusa ( $E_{d,\lambda}$ ), ambas con contenido exergético diferente. La radiación espectral global ( $E_{g,\lambda}$ ) incidente en una superficie horizontal en la superficie terrestre se expresa como,

$$E_{g,\lambda} = E_{b,\lambda} + E_{d,\lambda} \quad (3.56)$$

La radiación espectral directa  $I_{b,\lambda}$  se puede determinar mediante consideraciones geométricas de la siguiente forma,

$$I_{b,\lambda} = \frac{E_{b,\lambda}}{\Delta\Omega \cos\theta_z} \quad (3.57)$$

La radiación espectral difusa  $I_{d,\lambda}$  la consideraron asumiendo un hemisferio isotrópico, por ende,

$$I_{d,\lambda} = \frac{E_{d,\lambda}}{\pi} \quad (3.58)$$

Finalmente, la exergía de la radiación espectral terrestre directa y difusa sobre una superficie horizontal son, respectivamente,

$$b_{b,\lambda}^{TS} = \Delta\Omega \cos\theta_z [I_{b,\lambda} - I_{0,\lambda} - T_0(S_\lambda - S_{0,\lambda})] \quad (3.59)$$

$$b_{d,\lambda}^{TS} = \pi [I_{d,\lambda} - I_{0,\lambda} - T_0(S_\lambda - S_{0,\lambda})] \quad (3.60)$$



Los factores de exergía para la radiación solar terrestre directa, difusa y global se muestran a continuación,

$$\psi_{b,\lambda}^{TS} = \frac{b_{b,\lambda}^{TS}}{E_{b,\lambda}} \quad (3.61)$$

$$\psi_{d,\lambda}^{TS} = \frac{b_{d,\lambda}^{TS}}{E_{d,\lambda}} \quad (3.62)$$

$$\psi_{g,\lambda}^{TS} = \frac{b_{b,\lambda}^{TS} + b_{d,\lambda}^{TS}}{E_{b,\lambda}^{TS} + E_{d,\lambda}^{TS}} \quad (3.63)$$

Mediante el software SMARTS (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) [24] calcularon la exergía de la radiación solar terrestre y extraterrestre en el rango de 0,28 a 4,0  $\mu m$ . Chu & Liu encontraron que el contenido exergético de la radiación extraterrestre es mayor siempre al de la radiación terrestre para cada longitud de onda. Esto era esperable debido a que la radiación terrestre sufre una atenuación mientras atraviesa la atmósfera.

Zamfirescu & Dincer [25] retomaron este tema en el año 2009 cuestionando los modelos anteriormente nombrados, ya que en el caso de que se requiera utilizar los modelos de exergía para conocer el límite máximo de conversión de energía en un colector, una pregunta válida sería cual es la temperatura de la radiación solar llegando al colector de una máquina térmica en la superficie de la Tierra si se producen diferentes tipos de atenuaciones y disipaciones de la radiación de cuerpo negro que no se pueden modelar. Es debido a esto que Zamfirescu & Dincer realizaron un nuevo modelo de exergía de la radiación en donde se incluyan los efectos de atenuación atmosférica presentes en un proceso real de transformación de energía, ya que la radiación que llega a un colector primero atraviesa la atmósfera en donde una parte de ella es atenuada y disipada. Por ende, la radiación que llega finalmente a un colector es una combinación de la radiación directa y difusa. La idealización del camino de la radiación (figura 3.6) toma en consideración a la atmósfera como un disipador de calor y trabajo, y un máquina térmica produciendo trabajo útil gracias a la radiación incidente. En su modelo consideran que la radiación que llega a la capa externa de la atmósfera terrestre es la constante solar ( $I_{sc}$ ) a la misma temperatura del Sol ( $T_s$ ). La disipación en la atmósfera fue modelada como un ciclo termodinámico irreversible con una eficiencia ( $\eta_{dis}$ ), el que actúa entre la temperatura del Sol y la temperatura del colector ( $T_c$ ). Esta primera parte del sistema es similar al modelo de Jeter, pero con la diferencia que Jeter considera a la radiación como una de cuerpo negro, mientras que Zamfirescu & Dincer la consideran como una radiación gris. Por consiguiente, la eficiencia disipada ( $\eta_{dis}$ ) es menor a la eficiencia de Jeter (Carnot). Esto lo asumieron multiplicando la eficiencia de Jeter aplicado a este nuevo caso por un factor decimal ( $\varphi \leq 1$ ), lo cual se expresa como,

$$\eta_{dis} = \varphi \left( 1 - \frac{T_c}{T_s} \right) \quad (3.64)$$

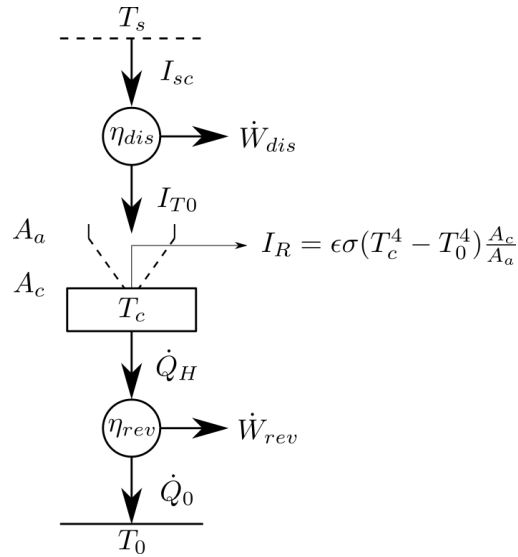


Figura 3.6: Máquina de Zamfirescu & Dincer para determinar la exergía de la radiación solar.

Para la radiación incidente en el colector, consideraron que fuera una radiación normal a la dirección del Sol ( $I_{TO}$ ) con lo que se asegura que la radiación incidente sea la máxima posible. Esta radiación incidente se obtiene de la siguiente forma,

$$I_{TO} = Q_H + I_R \quad (3.65)$$

donde  $Q_H$  es el flujo de calor entregado por el colector a la máquina térmica y  $I_R$  es la radiación reflejada desde el área del colector ( $A_c$ ) y se obtiene como,

$$I_R = \varepsilon \sigma (T_c^4 - T_o^4) \frac{A_c}{A_a} \quad (3.66)$$

donde  $\varepsilon$  es la emisividad y  $A_a$  es el área de apertura del colector. La eficiencia de la disipación en la atmósfera es,

$$\eta_{dis} = \frac{W_{dis}}{I_{sc}} = \frac{I_{sc} - I_{TO}}{I_{sc}} \quad (3.67)$$

Resolviendo 3.64 y 3.67 en función de  $T_c$  se obtiene,

$$\frac{T_c}{T_s} = 1 - \frac{1}{\varphi} \left( 1 - \frac{I_{TO}}{I_{sc}} \right) \quad (3.68)$$

en donde la temperatura del colector debe encontrarse entre la temperatura del ambiente ( $T_0$ ) y la temperatura del Sol ( $T_s$ ). La temperatura máxima del colector es obtenido solo para un  $\varphi$  máximo igual a 1. Por ende,

$$T_c^{\text{máx}} = \frac{I_{T0}}{I_{sc}} T_s \quad (3.69)$$

El trabajo reversible generado por la máquina térmica ( $\eta_{rev}$ ) se puede obtener al considerar que  $\dot{Q}_H \approx I_{T0}$ ,

$$\dot{W}_{rev} = \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right) I_{T0} \quad (3.70)$$

El cual es un trabajo máximo que no es alcanzable en la práctica porque  $Q_H$  no es igual a  $I_{T0}$ . Este trabajo máximo es alcanzado cuando la temperatura del colector también es máxima, lo que significa que reemplazando la expresión 3.69 en 3.70 y obteniendo la eficiencia del trabajo máximo de la forma usual se obtiene la exergía de la radiación solar de Zamfirescu & Dincer,

$$\psi_{Z\&D} = 1 - \frac{T_0}{T_s} \frac{I_{sc}}{I_{T0}} \quad (3.71)$$

El análisis realizado por Zamfirescu & Dincer sigue el mismo tipo de lógica pensado para un análisis termodinámico idealizado de la radiación como se pudo observar para la radiación no diluida. En este caso, al hacer ingresar al sistema un proceso anterior de pérdida de trabajo útil, hace aparecer en la ecuación de Zamfirescu & Dincer el índice de claridad  $\left(\frac{I_{sc}}{I_{T0}}\right)$  que representa la razón de energía radiativa entre la radiación extraterrestre y la radiación total normal. Sin embargo, la entropía emitida y absorbida no fue considerada en ninguna parte del balance para los diferentes componentes de la máquina de Zamfirescu & Dincer.

En el año 2012, Akyuz et al. [26] propuso una nueva forma de determinar el factor de exergía de un panel fotovoltaico mediante el modelo de Zamfirescu & Dincer. El balance exergético utilizado mayormente en la literatura para este caso es el siguiente,

$$\psi = \frac{Ex_{sal}}{Ex_{ent}} \quad (3.72)$$

donde  $Ex_{sal}$  corresponde a la exergía de salida y  $Ex_{ent}$  la exergía de entrada. La exergía de salida  $Ex_{sal}$  es la suma de la exergía eléctrica  $Ex_{elec}$ , exergía térmica  $Ex_{ter}$  y la exergía destruida  $Ex_{dest}$ .

$$Ex_{sal} = Ex_{elec} + Ex_{ter} + Ex_{dest} \quad (3.73)$$

La exergía eléctrica se calcula mediante el voltaje en circuito abierto  $V_m$  y la corriente de corto circuito  $I_m$  de la siguiente forma,

$$Ex_{elec} = V_m \cdot I_m \quad (3.74)$$

La exergía térmica son las pérdidas térmicas que se producen en la superficie del panel fotovoltaico y se expresa como,

$$Ex_{ter} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \cdot Q \quad (3.75)$$

donde  $T_0$  es la temperatura ambiente y  $T_{cel}$  la temperatura de la celda. El flujo de calor convectivo  $Q$  en el área superficial  $A$  es,

$$Q = h_c A (T_{cel} - T_0) \quad (3.76)$$

y

$$h_c = 5,7 + 3,8v \quad (3.77)$$

donde  $h_c$  es el coeficiente de transferencia convectivo y  $v$  la velocidad del viento. La exergía de salida del panel fotovoltaico queda entonces de la siguiente forma,

$$Ex_{sal} = V_m \cdot I_m - \left[ \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \cdot (h_c A (T_{cel} - T_0)) \right] \quad (3.78)$$

La exergía de entrada  $Ex_{ent}$  corresponde a la exergía de la radiación solar, donde en este caso, la literatura usa la expresión de Jeter. Por ende, la expresión queda de la siguiente forma,

$$Ex_{ent} = \left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right) \cdot E_g \cdot A \quad (3.79)$$

donde  $T_S$  es la temperatura del Sol y  $E_g$  es la radiación solar global. El factor de exergía del panel fotovoltaico  $\psi_{PV}$  se determina utilizando la expresión 3.72 y reemplazando 3.78 y 3.79.

$$\psi_{PV} = \frac{V_m \cdot I_m - \left[ \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \cdot (h_c A (T_{cel} - T_0)) \right]}{\left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right) \cdot E_g \cdot A} \quad (3.80)$$

La ecuación 3.80 es la formulación tradicional para determinar el factor de exergía de un panel fotovoltaico ([27], [28], [29] y [30]). Akyuz et al. propusieron en su trabajo utilizar el modelo de Zamfirescu & Dincer en vez de Jeter para calcular la exergía de entrada al sistema. De esta forma, la expresión 3.80 queda como,

$$\psi_{PV} = \frac{V_m \cdot I_m - \left[ \left( 1 - \frac{T_0}{T_{cel}} \right) \cdot (h_c A (T_{cel} - T_0)) \right]}{\left( 1 - \frac{T_0}{T_s} \frac{I_{sc}}{I_{T0}} \right) \cdot I_{T0} \cdot A} \quad (3.81)$$

El trabajo de Akyuz et al. es el primero en definir la eficiencia exergética de un panel fotovoltaico en términos de la posición del Sol y el tiempo mediante el índice de claridad. La propuesta de Akyuz et al. determina un factor de exergía del sistema fotovoltaico menor que el modelo de Jeter. Esto es esperable debido a que el modelo de Jeter es la eficiencia de Carnot y la expresión de Zamfirescu & Dincer toma en consideración la atenuación atmosférica mediante una máquina térmica previa, por lo que el valor calculado de la exergía de la radiación solar es menor. Es importante recalcar que la mayoría de los trabajos en la literatura utilizan la expresión de Jeter para determinar el factor de exergía de la radiación solar en un sistema fotovoltaico, lo que hace que no se tome en consideración el efecto de dispersión en la atmósfera.

El cálculo del contenido exergético de la radiación solar directa y difusa se puede encontrar mediante la expresión de Karlsson. Sin embargo, se necesita conocer la energía radiativa directa y difusa para cada longitud de onda lo que hace que se complejice la utilización de este modelo. Pons [12] en el año 2012 realizó este análisis donde considero el valor instantáneo de la radiación solar directa y difusa. La expresión de la exergía esta basada en la ecuación siguiente,

$$\dot{B} = \dot{E} - T_0 \cdot S \quad (3.82)$$

en donde  $\dot{B}$  es el flujo de exergía,  $\dot{E}$  la densidad radiativa,  $T_0$  la temperatura del medio circundante y  $S$  la densidad de entropía. Debido a que las mediciones de radiación solar estaban medidas en un espacio temporal reducido durante 1 año completo, las definiciones del flujo de energía, entropía y exergía son respectivamente,

$$I = \int i(t) dt \quad (3.83)$$

$$J = \int j(t) dt \quad (3.84)$$

$$B = \int b(t) dt = I - T_0 J \quad (3.85)$$

Para determinar la exergía de la radiación directa, el flujo de energía directa depende del ángulo cenital  $\theta_z$  y el ángulo sólido  $\omega$ , en donde este ángulo para la radiación directa del Sol se considera como  $\omega_s = 6,79 \times 10^{-5}$  sr. Por ende, la energía de la radiación directa es,

$$I_{dr} = \frac{i_{dr}}{\omega_s \cos \theta_z} \quad (3.86)$$

La energía de la radiación difusa tiene un ángulo sólido de  $2\pi$  sr considerando que viene desde la mitad del hemisferio. Entonces, la energía de la radiación difusa se considera como,

$$I_{df} = \frac{i_{df}}{\pi} \quad (3.87)$$

La entropía de la radiación directa y difusa se consideran mediante la definición de Landsberg & Tonge (ecuación 3.39), el que en este caso se utiliza como,

$$j = X(\varepsilon) \frac{4}{3} \frac{i}{T} \quad (3.88)$$

donde  $X(\varepsilon)$  es la expresión 3.40. El factor de dilución ( $\varepsilon$ ) para la radiación directa y difusa es, respectivamente

$$\varepsilon_{dr} = \frac{I_{dr}}{\frac{\sigma T_s^4}{\pi}} \quad (3.89)$$

$$\varepsilon_{df} = \frac{I_{df}}{\frac{\sigma T_s^4}{\pi}} \quad (3.90)$$

Pons encontró una solución numérica para  $X(\varepsilon)$  en que se define un rango en el cual se comprende  $\varepsilon$  para cada componente de la radiación. El rango del factor de dilución de la directa y difusa es  $0,03 < \varepsilon < 0,8$  y  $10^{-6} < \varepsilon < 10^{-5}$  respectivamente. Por consiguiente, la solución numérica considerando este rango es,

$$X_{dr}(\varepsilon_{dr}) = 0,973 - 0,275 \ln \varepsilon_{dr} + 0,0273 \varepsilon_{dr} \quad (3.91)$$

$$X_{df}(\varepsilon_{df}) = 0,9659 - 0,2776 \ln \varepsilon_{df} \quad (3.92)$$

El flujo de entropía para ambas componentes utilizando la expresión 3.88 queda de la siguiente forma,

$$j_{dr} = X_{dr}(\varepsilon_{dr}) \frac{4}{3} \frac{i_{dr}}{T_s} \quad (3.93)$$

$$j_{df} = X_{df}(\varepsilon_{df}) \frac{4}{3} \frac{i_{df}}{T_s} \quad (3.94)$$

Finalmente, el flujo de exergía utilizando la expresión 3.85 es:

$$b_{dr} = i_{dr} - T_0 j_{dr} \quad (3.95)$$

$$b_{df} = i_{df} - T_0 j_{df} \quad (3.96)$$

El desarrollo que realizó Pons fue posteriormente evaluado en su trabajo con datos meteorológicos de 2 estaciones meteorológicas y datos satelitales del software Meteonorm para distintas localidades de Francia. Los resultados que encontró fueron que la exergía de la radiación global es mayor que el de la directa en las 3 localidades. A su vez, realizó un análisis de las pérdidas de exergía para los colectores solares. Aquí identificó tres tipos de pérdidas: para el tipo de tecnología del colector, la disipación térmica y la utilidad suministrada por el colector. El gran aporte de Pons fue obtener una solución empírica para la función  $X(\varepsilon)$  en la radiación directa y difusa en un rango espectral amplio. Es así como en el año 2017, Neri et al. [31] utilizó el desarrollo de Pons para evaluar el factor de exergía de Italia. Para esto, utilizó datos meteorológicos de todas las capitales de las provincias de Italia. Neri et al. determinaron mediante las ecuaciones de Pons que la exergía de la radiación total en Italia corresponde a 0,839 y que el contenido exergético de la radiación directa es mayor que al de la difusa.

### 3.3. Modelos Empíricos de la Exergía de la Radiación Solar

Como se ha visto en las secciones anteriores, se han desarrollado diferentes modelos a lo largo del tiempo enfocados en resolver la pregunta de cuanto es el contenido exergético de la radiación solar. Los dos enfoques con los que se ha trabajado son para conocer la exergía de la radiación diluida y no diluida. En años recientes, se han desarrollado trabajos para obtener expresiones empíricas para la exergía de la radiación solar, utilizando análisis de regresión para ligar la exergía con alguna otra variable meteorológica. Es en este contexto que en el año 2016, Arslanoglu [13] desarrolló el primer modelo empírico para la exergía de la radiación solar en Turquía basado en el modelo de Angstrom, que intenta determinar al índice de claridad considerando el promedio mensual de las horas de Sol diarias ( $\bar{n}$ ) y la duración del día promedio del mes ( $\bar{N}$ ). El modelo original de Angstrom considerando las modificaciones hechas por Page [32] es el siguiente,

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \left( \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (3.97)$$

donde  $\bar{H}$  es la radiación global diaria mensual en una superficie horizontal,  $\bar{H}_0$  la radiación extraterrestre diaria en una superficie horizontal y  $a$  y  $b$  son constantes empíricas dependientes del lugar a analizar. La exergía de la radiación solar la consideró como no diluida y utilizando el modelo de Petela 3.6. La exergía de la radiación solar es entonces,

$$H_{ex} = \psi \cdot H \quad (3.98)$$

Finalmente, el factor de exergía de la radiación solar fue calculado mediante una análisis de regresión de la siguiente forma,

$$\frac{H_{ex}}{H_0} = f(a', b', c', d', \bar{n}, \bar{N}) \quad (3.99)$$

donde  $a', b', c', d'$  son constantes empíricas. Arslanoglu desarrolló tres modelos de regresión: lineal, cuadrático y cúbico. Estos modelos se muestran a continuación

$$\frac{H_{ex}}{H_0} = a' + b' \left( \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (3.100)$$

$$\frac{H_{ex}}{H_0} = a' + b' \left( \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) + c' \left( \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^2 \quad (3.101)$$

$$\frac{H_{ex}}{H_0} = a' + b' \left( \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) + c' \left( \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^2 + d' \left( \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^3 \quad (3.102)$$

Arslanoglu utilizó datos meteorológicos de siete estaciones en diferentes lugares de Turquía. Estos datos son promedios mensuales de la radiación solar global y la duración del día. Arslanoglu determinó los tres modelos para las siete localidades, en donde para su posterior validación utilizó los siguientes indicadores estadísticos: coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error porcentual medio ( $MPE$ ), error porcentual absoluto medio ( $MAPE$ ), error con sesgo medio ( $MBE$ ), error con sesgo absoluto medio ( $MABE$ ), error cuadrático medio ( $RMSE$ ) y el T-estadístico ( $t - stats$ ).

Las conclusiones de Arslanoglu fueron que todos los modelos sirven para calcular el factor de exergía de la radiación solar debido a que todos obtuvieron bajos errores en sus respectivos indicadores. Sin embargo, no indicó cual de los tres modelos era el que se comportaba de mejor forma debido a que los resultados fueron dispares para cada error y para cada localidad. Además, el cálculo de la exergía que utilizó fue mediante el modelo de Petela que es para la radiación solar no diluida. Si se quisiera realizar un análisis que obtuviera resultados más acordes a la realidad, se debería utilizar como base alguno de los modelos de exergía para la radiación diluida.

En el año 2019, Jamil & Bellos [14] desarrollaron modelos empíricos para la exergía de la radiación solar utilizando datos meteorológicos con promedios mensuales de 23 estaciones distribuidas por toda India. Los datos recopilados corresponden a los años 1986 al 2000: radiación global horizontal, radiación difusa horizontal, horas de Sol y temperatura ambiente. En su trabajo utilizaron el modelo de Petela para obtener el factor de exergía de la radiación directa ( $\psi_b$ ) y difusa ( $\psi_d$ ). En la ecuación 3.6 la temperatura del Sol ( $T_s$ ) considerada para la



radiación directa y difusa es 5760 K y 1459,5 K respectivamente. La exergía de la radiación directa  $\overline{H}_{b,ex}$  y difusa  $\overline{H}_{d,ex}$  la obtuvieron de la siguiente manera,

$$\overline{H}_{b,ex} = \psi_b \cdot \overline{H}_b = \psi_b(\overline{H}_g - \overline{H}_d) \quad (3.103)$$

$$\overline{H}_{d,ex} = \psi_d \cdot \overline{H}_d \quad (3.104)$$

La exergía de la radiación solar global la definieron de la siguiente manera:

$$\overline{H}_{g,ex} = \overline{H}_{b,ex} + \overline{H}_{d,ex} \quad (3.105)$$

ó

$$\overline{H}_{g,ex} = \psi_g \cdot \overline{H}_g \quad (3.106)$$

Finalmente, el factor de exergía de la radiación solar global es,

$$\psi_g = \frac{\overline{H}_{g,ex}}{\overline{H}_g} = \frac{\psi_b \cdot \overline{H}_b + \psi_d \cdot \overline{H}_d}{\overline{H}_g} \quad (3.107)$$

A su vez, definieron un término denominado como la “razón del factor de exergía solar global” ( $\psi_{go}$ ) el que considera la razón de la exergía solar global mensual con la radiación solar extraterrestre mensual.

$$\psi_{go} = \frac{\overline{H}_{g,ex}}{\overline{H}_0} \quad (3.108)$$

Las correlaciones empíricas desarrolladas por Jamil & Bellos están basadas en el promedio mensual de las horas de Sol diarias ( $\overline{n}$ ) y la duración del día promedio del mes ( $\overline{N}$ ). Además, también desarrollaron expresiones basadas en el índice de claridad mensual ( $K_T$ ). De esta forma, las cuatro categorías de correlaciones se muestran a continuación,

$$\psi_g = f(a, b, c, d, e, K_T) \quad (3.109)$$

$$\psi_g = f(a, b, c, d, e, n, N) \quad (3.110)$$

$$\psi_{go} = f(a, b, c, d, e, K_T) \quad (3.111)$$

$$\psi_{go} = f(a, b, c, d, e, n, N) \quad (3.112)$$

Para cada una de las cuatro categorías mostradas anteriormente, se desarrollaron ocho modelos mediante un análisis de regresión. Estos modelos son: lineal, cuadrático, cúbico, cuarto, logarítmico, exponencial, potencial e inversa. Posteriormente, la validación se llevó a cabo mediante 10 errores estadísticos: Error con Sesgo Medio (*MBE*), Error Absoluto Medio (*MAE*), Error Cuadrático Medio (*RMSE*), Error Porcentual Medio (*MPE*), Incertidumbre al 95 % (*U<sub>95</sub>*), Error Cuadrático Medio Relativo (*RRMSE*), T-estadísticos (*t-stats*), Error Absoluto Máximo Relativo (*erMAX*), Error Absoluto Medio Relativo (*MARE*), Coeficiente de Correlación (*R*). Debido a que los errores estadísticos indicaban diferentes resultados de cual era el modelo que mejor se ajustaba a los datos utilizados, Jamil & Bellos calcularon un indicador denominado “indicador global de desempeño” (*GPI*) el cual aúna todos los errores estadísticos calculados. Cada indicador es escalado entre 0 a 1 ( $\tilde{y}_{ij}$ ). Este valor es sustraído a la mediana del respectivo indicador ( $\tilde{y}_j$ ) para finalmente realizar una sumatoria después de multiplicar estos por su respectivo factor de peso ( $\alpha_j$ ). Matemáticamente esto se puede expresar como,

$$GPI_i = \sum_{j=1}^{10} \alpha_j (\tilde{y}_j - \tilde{y}_{ij}) \quad (3.113)$$

donde,

$$\alpha_j = \begin{cases} -1, & \text{para el Coeficiente de Correlación, R} \\ +1, & \text{para todos los otros errores estadísticos} \end{cases} \quad (3.114)$$

Jamil & Bellos obtuvieron mediante este análisis estadístico el modelo que mejor se ajustaba a sus datos en cada una de las cuatro categorías planteadas. El *GPI* es una buena herramienta que sirve para categorizar los resultados de los diferentes modelos calculados, lo cual no se realizó en el trabajo de Arslanoglu. Jamil & Bellos calcularon la exergía de la radiación directa y difusa mediante el modelo de Petela, el cual es un modelo idealizado de la exergía de la radiación solar no diluida, lo que se contrapone al hecho de que la radiación directa y difusa en la superficie se atenúan en su paso por la atmósfera terrestre. Por ende, el hecho de que no se considere la generación de entropía de la radiación para el análisis de regresión, puede generar una gran diferencia entre el valor calculado por su modelo con el valor real de exergía en la superficie terrestre. Además, según lo visto mediante el trabajo de Badescu [20] (ecuación 3.30), la exergía de la radiación directa y difusa poseen diferentes factores geométricos, los cuales en su trabajo no fueron considerados.

### 3.4. Discusión

Como se describió en las secciones anteriores, existen diferentes visiones para conocer el contenido exergético de la radiación solar. Por un lado, existen trabajos que buscan determi-

nar la exergía radiativa no diluida, considerando que no existe generación de entropía por el medio que atraviesa. Estos modelos son idealizaciones de sistemas termodinámicos donde la radiación de cuerpo negro está encerrada en un sistema cilindro-pistón con paredes perfectamente reflectantes. De los diferentes modelos descritos en esta revisión, el que finalmente se ha llegado a un consenso a lo largo de la años que entrega el factor de exergía de la radiación solar no diluida es el modelo de Petela. Este modelo ha sido ratificado por otros trabajos como Bejan, Wright et al. y Badescu. Este último, desarrolló una ecuación constitutiva para el factor de exergía de la radiación no diluida, considerando el factor geométrico de la superficie que recibe la radiación. Por otro lado, el modelo de Spanner usa el trabajo absoluto en vez del trabajo útil para expresar el trabajo máximo que puede extraerse al sistema, por lo que su modelo no entrega la exergía radiativa. El modelo de Parrott considera que la radiación se concentra de manera isotrópica en un cono a nivel de la superficie terrestre, descartando así el efecto de dispersión que se genera en la atmósfera. El modelo de Jeter expresa la exergía radiativa como la eficiencia de Carnot. Por ende, su modelo entrega el trabajo neto del sistema de la máquina térmica y no la exergía de la radiación.

Con respecto a la radiación diluida, el primer trabajo se remonta al año 1979 con Landsberg & Tonge que propusieron por primera vez una solución numérica a la función  $X(\varepsilon)$  de la entropía radiativa espectral. Karlsson desarrolló la teoría del factor de exergía de la radiación espectral, el cual fue posteriormente ratificado por Candau mediante un análisis termodinámico de un motor-absorbedor de Carnot. Chu & Liu extendieron esta teoría a la radiación directa y difusa. Debido a que la exergía de la radiación espectral debe calcularse para cada longitud de onda, hace que su utilización sea un poco más complejo que los modelos de radiación no diluida. Zamfirescu & Dincer volvieron a tomar las idealizaciones clásicas de la radiación no diluida, pero aplicando previamente una nueva máquina térmica que equivale a la disipación de la atmósfera. Pons tomó en consideración el trabajo de Landsberg & Tonge para proponer un nuevo modelo de exergía radiativa considerando la entropía generada. Pons desarrolló una solución numérica de la función  $X(\varepsilon)$  para las componentes directa y difusa que es válida para un rango amplio de factores de dilución ( $\varepsilon$ ), la que posteriormente utilizó para calcular la exergía de la radiación directa y difusa por separado. Neri et al. recogió el trabajo de Pons para calcular la exergía de la radiación solar en Italia, llegando a un valor que se condice con trabajos anteriores de exergía.

En los últimos años se han desarrollado trabajos empíricos para obtener la exergía de la radiación solar. La finalidad de estos trabajos es poder obtener la exergía de la radiación mediante alguna otra variable meteorológica, que sea fácil de medir y de bajo costo. Arslanoglu desarrolló diferentes modelos empíricos basados en el promedio mensual de las horas de Sol diarias ( $\bar{n}$ ) y la duración del día promedio del mes ( $\bar{N}$ ) para Turquía. en su trabajo realizó un análisis estadístico para evaluar el comportamiento de los modelos desarrollados con el modelo de exergía de Petela, llegando a la conclusión que todos los modelos pueden ser utilizados para las localidades que evaluó. Sin embargo, no indicó cual era el modelo que mejor se ajustaba a los datos debido a la disparidad de resultados que entregaba cada error estadístico. Jamil & Bellos también realizaron el mismo análisis considerando el modelo de Petela, donde basaron sus modelos en el índice de claridad mensual y el promedio mensual de las horas de Sol diarias ( $\bar{n}$ ) y la duración del día promedio del mes ( $\bar{N}$ ) para la India. En este trabajo realizaron un análisis comparativo mediante un indicador denominado *GPI* el cual hace un ranking que ordena los modelos mediante sus errores estadísticos. De esta

forma, entregaron una ecuación válida para las localidades que evaluaron.

En nuestro país, un análisis de este tipo no se ha desarrollado hasta el momento. Chile posee condiciones radiativas excepcionales, lo que hace relevante conocer el trabajo máximo que se puede extraer de la radiación solar para las condiciones meteorológicas particulares de esta parte del planeta. De esta forma, se propone en este trabajo evaluar el contenido exergético de la radiación solar mediante una expresión desarrollada con las condiciones climáticas de una localidad en Chile. Los datos meteorológicos utilizados corresponden a la ciudad de Santiago de Chile y fueron medidos durante todo el año 2018 por la estación meteorológica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Mediante un análisis de regresión, se desarrollaron diferentes modelos empíricos de la exergía de la radiación solar que tienen como variable independiente el índice de claridad ( $k_t$ ). Se tomó en consideración para calcular el factor de exergía de la radiación solar el modelo de Pons en vez de Petela, debido a que el modelo de Pons determina la entropía espectral que se genera en la atmósfera para la radiación directa y difusa. Posteriormente, mediante un análisis estadístico basado en los criterios del trabajo de Jamil & Bellos, se encuentra el modelo empírico que mejor se ajusta a los datos utilizados. La validación del modelo propuesto se llevó a cabo mediante un montaje experimental, que toma en consideración los criterios usados por Akyuz et al., donde se realiza un balance exergético a un panel fotovoltaico y se comparan los resultados con los modelos de exergía de Petela, Press y Jeter.

# Capítulo 4

## Metodología

En este capítulo se describe la metodología con la que se desarrolló y validó la expresión empírica de la exergía de la radiación solar para Santiago de Chile. En la figura 4.1 se puede observar un esquema con todas las etapas que se desarrollaron durante este trabajo, las cuales se describirán a continuación. Se recopilaron datos meteorológicos durante el año 2018, con la finalidad de calcular el factor de exergía de la radiación solar mediante el modelo de Pons [12]. Después de filtrar los datos meteorológicos, se desarrollaron 8 diferentes modelos por medio de un análisis de regresión entre el factor de exergía de la radiación solar global y el índice de claridad ( $k_t$ ) siguiendo los criterios de Jamil & Bellos [14]. Estos modelos fueron evaluados mediante 10 tipos de errores estadísticos, con tal de encontrar la ecuación que se ajustaba de mejor forma a los datos. Posteriormente, se desarrolló un montaje experimental siguiendo los criterios propuestos en el trabajo de Akyuz et al. [26] para un panel fotovoltaico donde se le realizó una modelación térmica y eléctrica, con la finalidad de evaluar el cumplimiento de la primera ley de la termodinámica mediante un balance de energía al sistema. Una vez realizado este balance, se utilizó el montaje para realizar una validación experimental del modelo propuesto, por medio de un balance de exergía al sistema basado en la segunda ley de la termodinámica. Este balance de exergía realizado con el modelo propuesto, fue comparado con los balances de exergía mediante los modelos de Petela [5], Press [7] y Jeter [15] y, de esta forma, validar la expresión propuesta en este trabajo.

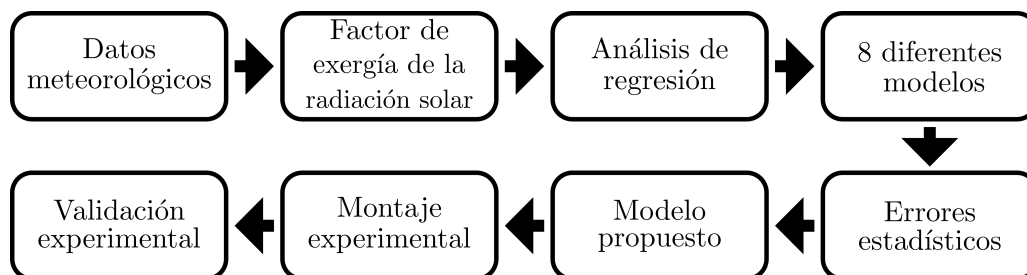


Figura 4.1: Esquema de los criterios desarrollados en este trabajo.

Los datos meteorológicos fueron medidos durante todo el año 2018, mediante la estación que se encuentra en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile (figura 4.2). Los datos se registraron de forma minutal y fueron medidos por diferen-

tes instrumentos que pueden observarse en la tabla 4.1. Estas variables fueron posteriormente utilizadas para generar una base de datos mediante el software Matlab, el cual contiene las siguientes variables: año, mes, día, hora, minutos, segundos, temperatura ambiente ( $K$ ), radiación global horizontal ( $\frac{W}{m^2}$ ), radiación difusa horizontal ( $\frac{W}{m^2}$ ), radiación directa normal ( $\frac{W}{m^2}$ ), día correlativo  $n$ , declinación solar, hora solar y ángulo solar.



Figura 4.2: Estación meteorológica ubicada en Santiago de Chile.

Tabla 4.1: Datos meteorológicos medidos en base minutal para todo el año 2018.

Medición	Instrumento
Radiación Global Horizontal	Piranómetro CMP-22, Kipp & Zonnen
Radiación Difusa Horizontal	Piranómetro CMP-22, Kipp & Zonnen
Radiación Directa Normal	Pirheliómetro CHP1, Kipp & Zonnen
Temperatura Ambiente	CS-500, Campbell Scientific

## 4.1. Filtrado de Datos

Dentro de los datos recolectados se pueden encontrar valores espurios que influyen de manera negativa en el análisis posterior. Estos valores erróneos pueden deberse a una infinidad de causas. Por ende, la base de datos debe pasar previamente por un proceso de filtrado, el cual valide la calidad de la base de datos. Los criterios usados para eliminar los datos espurios se adoptan siguiendo la propuesta de Lemos et al. [33], quienes en su trabajo desarrollaron un procedimiento de validación de una base de datos meteorológica basada en diferentes trabajos de la literatura, los cuales son detallados a continuación.

Younes et al. [34] consideraron a la elevación solar ( $\alpha$ ) para eliminar los datos con una elevación menor o igual a  $7^\circ$  (4.1) y utilizaron el factor de persistencia ( $\psi_{pers}$ ) descrito por Ridley et al. [35] para eliminar la inercia atmosférica que pudiera afectar el cálculo del índice de claridad (4.2). El factor de persistencia debe estar entre 0 a 1 para que su valor sea aceptado. Además, se eliminaron los datos que teóricamente no se condicen con la realidad,

los cuales son: fracción difusa ( $F_d$ ) e índice de claridad ( $k_t$ ) minutal, horario y diario para los valores menores o iguales a 0 y mayores o iguales a 1 (4.3 y 4.4).

$$\alpha > 7^\circ \quad (4.1)$$

$$0 < \psi_{pers} < 1 \quad (4.2)$$

$$0 < k_{T,min}, k_{T,hora}, K_{T,día} < 1 \quad (4.3)$$

$$0 < F_{d,min} < 1 \quad (4.4)$$

Posteriormente, se utilizaron los criterios propuestos por Long & Shi [36] que utiliza la Baseline Surface Radiation Network (BSRN), organización a cargo de colocar los estándares de precisión para la medición de la radiación en la superficie terrestre. Estos criterios son llamados como “Verosimilitud Física de la Radiación” y corresponden a los límites superior e inferior en los que puede estar comprendida la radiación solar global ( $I_g$ ), difusa ( $I_d$ ) y directa normal ( $I_{bn}$ ) al analizarlas por medio de la constante solar ( $G_{sc}$ ) (4.5, 4.6 y 4.7). A su vez, otro criterio denominado “Consistencia de las Mediciones de Radiación” determina la coherencia de las mediciones de estas tres variables mediante las expresiones 4.8, 4.9 y 4.10, respectivamente.

$$0 < I_g < 1,5G_{sc}(\sin(\alpha))^{1,2} + 100 \quad (4.5)$$

$$0 < I_d < 0,95G_{sc}(\sin(\alpha))^{1,2} + 50 \quad (4.6)$$

$$0 < I_{bn} < G_{sc} \quad (4.7)$$

$$\left| \frac{I_g - (I_d + I_{bn}\sin(\alpha))}{I_g} \right| < 0,08 \text{ si } \alpha > 15^\circ \text{ y } I_d + I_{bn}\sin(\alpha) > 50 \quad (4.8)$$

$$\left| \frac{I_g - (I_d + I_{bn}\sin(\alpha))}{I_g} \right| < 0,15 \text{ si } \alpha < 15^\circ \text{ y } I_d + I_{bn}\sin(\alpha) > 50 \quad (4.9)$$

$$\text{Si } I_d + I_{bn}\sin(\alpha) < 50, \text{ se descarta} \quad (4.10)$$

La World Meteorological Organization (WMO) [37] define la variación máxima que pueden tener las mediciones de radiación solar global en pasos temporales, siendo este un valor menor a  $800 \frac{W}{m^2}$  (4.11).

$$|I_{g,i} - I_{g,i-1}| < 800 \text{ y } |I_{g,i+1} - I_{g,i}| < 800 \quad (4.11)$$

Finalmente, Journée & Bertrand [38] proponen un límite mínimo para el índice de claridad mediante la elevación solar (4.12). El promedio diario del índice de claridad debe ser mayor o igual a 0,03 (4.13).

$$\frac{I_g}{I_0} \geq 10^{-4}(\alpha - 10), \text{ si } \alpha > 10 \quad (4.12)$$

$$\mu \left( \frac{I_g}{I_0} \right) \geq 0,03, \text{ promedio del día} \quad (4.13)$$

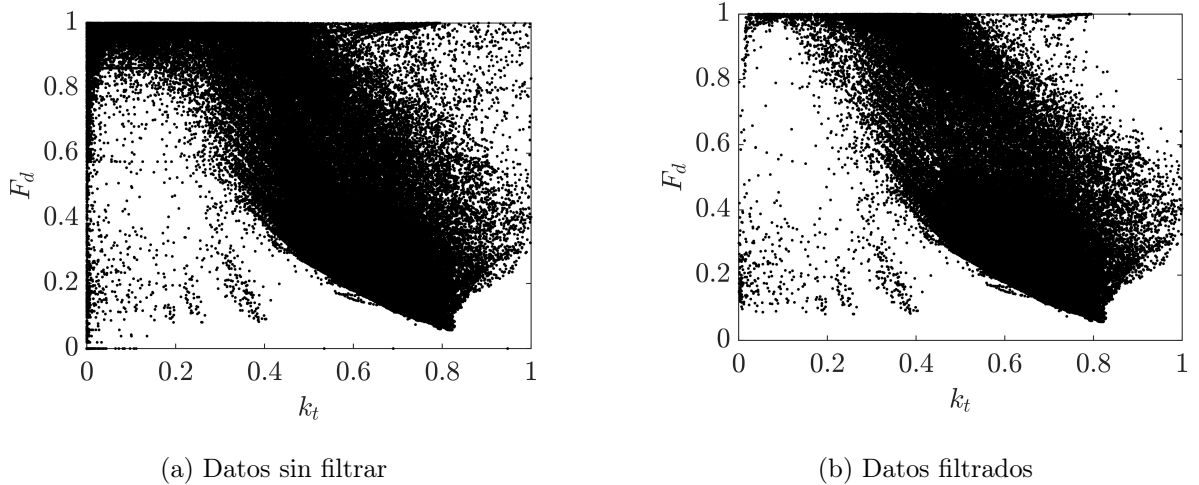


Figura 4.3: Comparativa de los datos minutales brutos y filtrados para la ciudad de Santiago de Chile (2018).

Como se puede apreciar en la figura 4.3, una gran cantidad de datos espurios fueron eliminados gracias a los criterios de filtrado descritos anteriormente. Sin embargo, aún se mantienen datos inconsistentes que no pudieron ser eliminados por el proceso de filtrado y que pueden afectar el posterior análisis de los datos. Boland et al. [39] propusieron un proceso de filtrado empírico donde se generan polinomios como límite inferior y superior que envuelvan los datos que son considerados correctos. Todos los datos que se encuentren fuera de esta área son eliminados. Boland et al. demostraron en su trabajo que la función que se ajusta de mejor forma a los gráficos de fracción difusa versus índice de claridad es una función logarítmica del tipo:

$$f = \frac{1}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 k_t)}} \quad (4.14)$$



Mediante un análisis de regresión no lineal se aproximó la ecuación 4.14 a los datos filtrados, resultando en la ecuación 4.15. Se determinaron los límites superior e inferior mediante iteraciones, lo que en consecuencia entregó los datos finales que fueron utilizados en este trabajo (figura 4.4).

$$f = \frac{1}{1 + e^{(-4,118+7,698k_t)}} \quad (4.15)$$

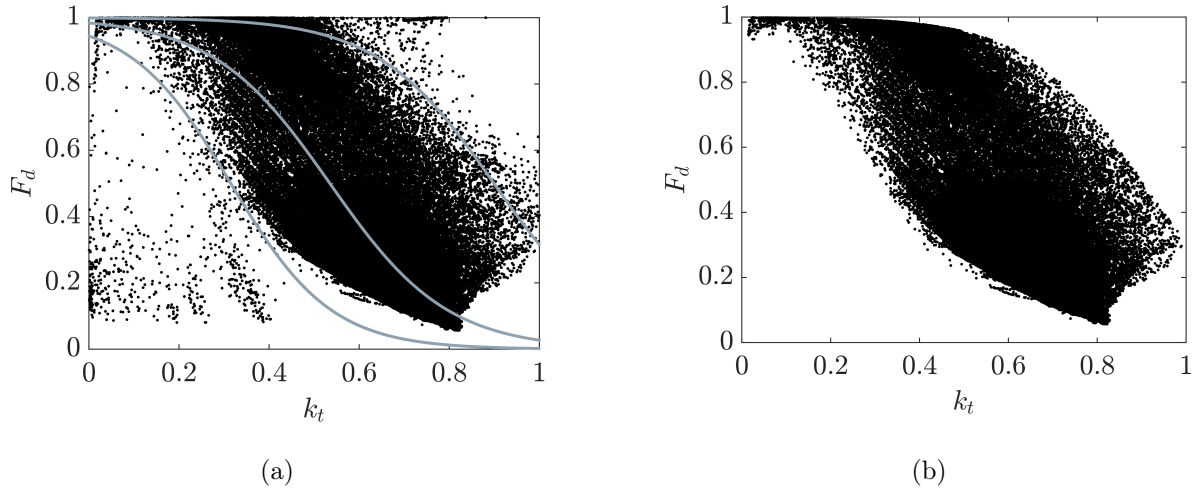


Figura 4.4: Datos meteorológicos (a) con los límites superior e inferior generados por la función logarítmica y (b) datos aceptados después del proceso de filtrado final.

Las variables meteorológicas del año 2018 después del proceso de filtrado pueden visualizarse en las figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8. Estas figuras corresponden a la radiación solar global horizontal, difusa horizontal, directa normal y temperatura ambiente, siendo observadas mediante un mapa de calor (Heatmap) que corresponde a un gráfico en 2D donde las diferentes intensidades de colores representan la magnitud de la variable a analizar. Como se describió anteriormente, los datos meteorológicos pasaron por un proceso de filtrado que eliminó los datos espurios y que no eran necesarios para la realización de este trabajo. Por ende, las horas que fueron tomadas en cuenta son las comprendidas entre las 6 de la mañana hasta las 19 horas para cada día del año. A su vez, como puede observarse en los Heatmap de las figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, los días del año 2018 no tienen todos los datos comprendidos en el mismo horario. Esto se debe en particular a la variabilidad meteorológica que se produce durante el año, pudiendo ocurrir que durante el proceso de filtrado se hayan eliminado datos que se consideraban erróneos por no alcanzar a representar los criterios establecido. Además, se tienen ciertos vacíos en los datos para algunos días en específico que corresponden a fallas ocurridas en la estación meteorológica que hace que deje de tomar datos. En los días comprendidos entre el 28 de junio (día 179) al 10 de julio (día 191) del 2018 se tienen pocos datos presumiblemente por ser días con presencia de una alta nubosidad acompañado de lluvias, lo que hace que los datos principales, que son los de radiación, no sean posibles de utilizar y por ende son eliminados por el proceso de filtrado.

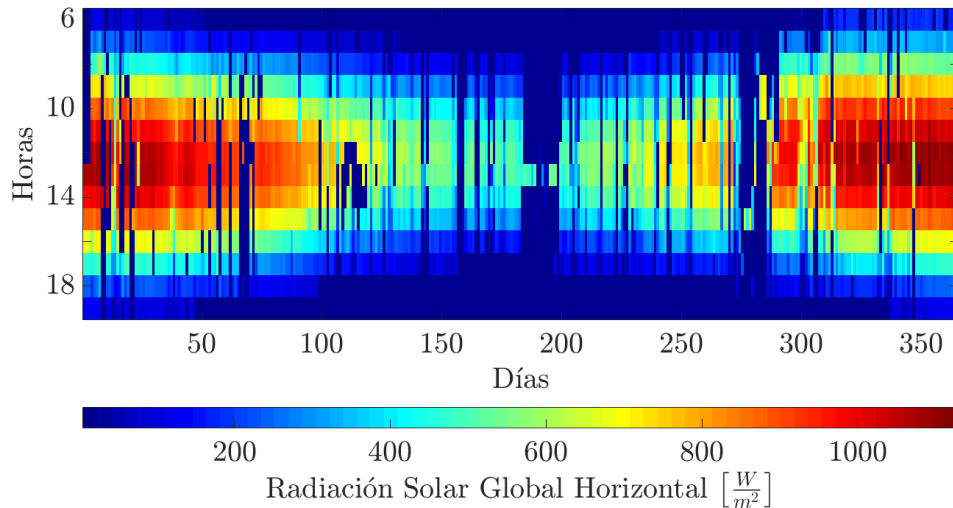


Figura 4.5: Radiación solar global horizontal para cada día del año 2018.

El mapa de calor de la radiación solar global horizontal para Santiago de Chile puede observarse en la figura 4.5. En los primeros días del año, correspondientes al Verano para esta parte del mundo, se pueden apreciar valores de radiación solar global horizontal superiores a los  $1000 \frac{W}{m^2}$  en horas cercanas al mediodía. Estos elevados valores se concentran principalmente en los meses de Enero y principios de Febrero (los primeros 60 días del año). El día 21 de Marzo comienza el Otoño y se puede observar una disminución de la intensidad de la radiación a contar de esa fecha en adelante. A su vez, las horas de registro de datos van disminuyendo, hasta solo registrar tramos del mediodía en los primeros días de Julio equivalentes al Invierno. Durante el mes de Julio la intensidad radiativa baja a valores cercanos de los  $480 \frac{W}{m^2}$  al mediodía. A contar del mes de Agosto en adelante, los valores máximos diarios comienzan a aumentar gradualmente. Para el inicio de la Primavera, la intensidad de la radiación máxima diaria bordea los  $790 \frac{W}{m^2}$ . El día 15 de Octubre comienzan a registrarse valores por sobre los  $900 \frac{W}{m^2}$ , superando nuevamente los  $1000 \frac{W}{m^2}$  el día 4 de Noviembre. En el tramo final del año, la intensidad de la radiación global supera los  $1100 \frac{W}{m^2}$  a contar de mediados de Diciembre, coincidiendo este con el inicio del Verano.

La radiación solar directa normal del año 2018 se puede apreciar en la figura 4.6. Al inicio y final del año se pueden encontrar intensidades mayores a  $800 \frac{W}{m^2}$  entre las 9 de la mañana hasta las 17 horas, registrándose máximas por sobre los  $1000 \frac{W}{m^2}$ . Este comportamiento se mantiene hasta principios de Abril donde se puede apreciar una disminución de la intensidad de la radiación directa registrada a lo largo del día. Durante el Invierno la radiación directa normal alcanza valores máximos de  $600 \frac{W}{m^2}$  en los meses de Junio y Julio. El aumento de la intensidad radiativa directa vuelve a comenzar en el mes de Agosto, registrándose en algunos días valores mayores a  $800 \frac{W}{m^2}$  al mediodía. Las máximas diarias se mantienen estables alrededor de los  $900 \frac{W}{m^2}$  en los días siguientes. Para el día 13 de Noviembre, se vuelven a encontrar valores máximos diarios por sobre los  $1000 \frac{W}{m^2}$ , donde se tiene comportamientos muy similares a los vistos al principio de año. A su vez, el inicio de la medición para estos días finales del año comienzan con intensidades que ya superan los  $500 \frac{W}{m^2}$ .

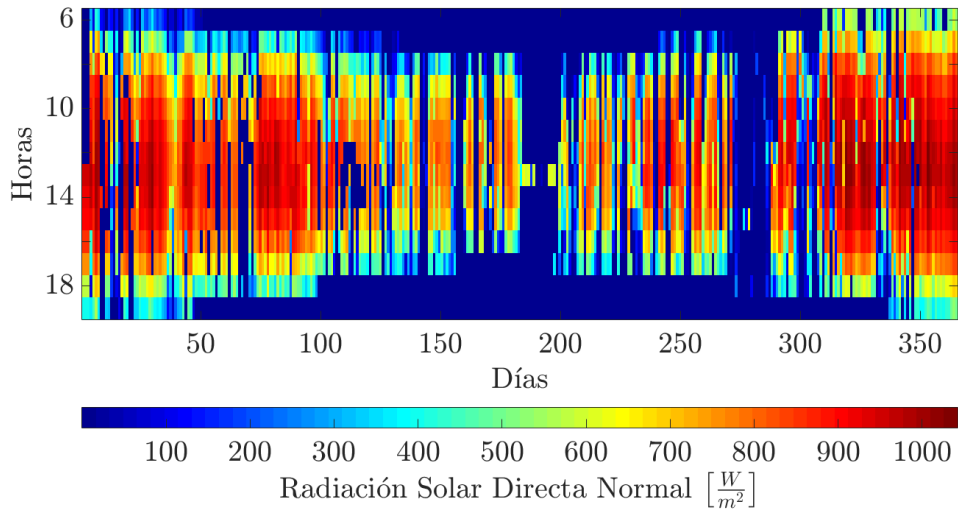


Figura 4.6: Radiación solar directa normal para cada día del año 2018.

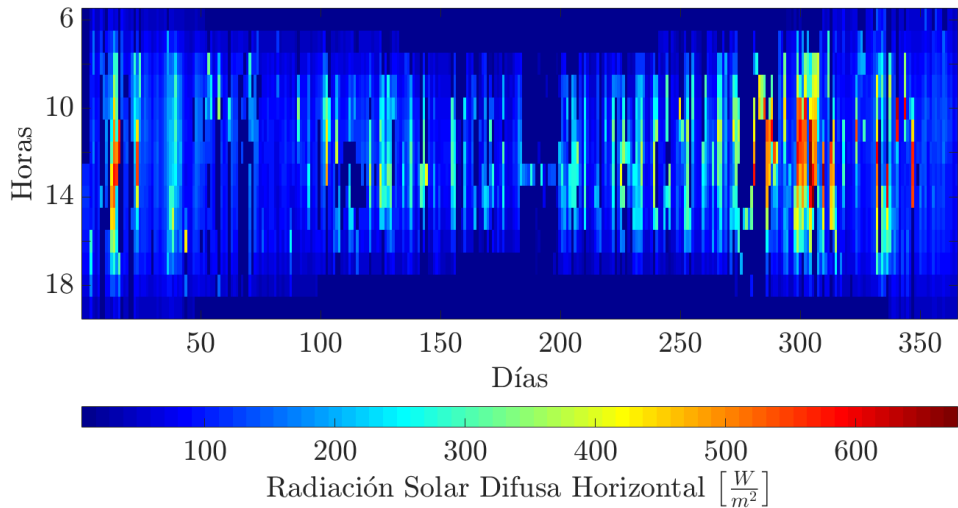


Figura 4.7: Radiación solar difusa horizontal para cada día del año 2018.

La figura 4.7 describe el comportamiento de la radiación difusa horizontal en Santiago de Chile. Los valores por sobre los  $200 \frac{W}{m^2}$  ocurren en los momentos que baja considerablemente la radiación directa normal vista en la figura 4.6. Es así como se puede observar el día 13 de Enero a las 13 horas una radiación difusa horizontal por sobre los  $500 \frac{W}{m^2}$  mientras que la radiación directa normal registró  $75 \frac{W}{m^2}$  para el mismo horario, lo que indica que en ese día y hora en particular hubo una nubosidad presente en Santiago de Chile, que disparó los valores de radiación difusa. Este fenómeno vuelve a presentarse durante varios días al final de Octubre y principios de Noviembre, donde el día 31 de Octubre al mediodía se puede encontrar una intensidad de la radiación difusa superior a los  $650 \frac{W}{m^2}$  y una radiación directa normal de solo  $174 \frac{W}{m^2}$ . La mayor parte del año, las intensidades radiativas registradas se encuentran por debajo de los  $200 \frac{W}{m^2}$  para todas las horas.

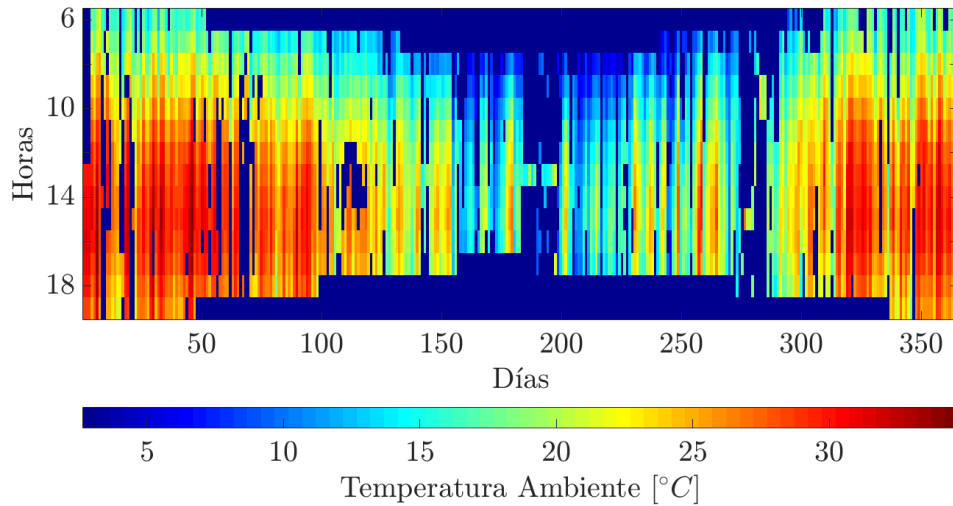


Figura 4.8: Temperatura ambiente para cada día del año 2018.

La temperatura ambiente se puede apreciar en la figura 4.8. El mes de Enero es el mes más cálido del año con temperaturas máximas superiores a los  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las mínimas registradas al inicio del día para el periodo de Verano se encuentra cercano a los  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 6 de la mañana, lo que indica que la variación diaria de temperatura durante el Verano es bastante alto. Durante el Invierno, las mínimas giran en torno a los  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y las máximas están cerca de los  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A su vez, se registraron algunos días con temperaturas por sobre los  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  como lo ocurrido el 28 de Junio al inicio del Invierno. El mes donde la máxima diaria es la menor del año se registra en el mes de Julio con máximas cercanas a los  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En el tramo final del año, las temperaturas vuelven a aumentar, con un comportamiento similar al mes de Febrero.

## 4.2. Factor de Exergía de la Radiación Solar

El contenido exergético de la radiación solar directa y difusa se determinaron por medio del método de Pons [12] detallado en el capítulo anterior. Mediante un análisis de regresión entre el factor de exergía de la radiación global y el índice de claridad (figura 4.9), se desarrollaron 8 modelos empíricos que pueden observarse en la tabla 4.2. Para encontrar el modelo que representa de mejor forma el factor de exergía de la radiación solar, se siguieron los criterios de Jamil & Bellos [14] quienes calcularon 10 tipos de errores estadísticos con el fin de evaluar la estimación de cada modelo ( $\overline{H}_{i,e}$ ) con respecto al factor de exergía calculado ( $\overline{H}_{i,c}$ ). Los errores estadísticos determinados para cada modelo son: Error con Sesgo Medio ( $MBE$ ), Error Absoluto Medio ( $MAE$ ), Error Cuadrático Medio ( $RMSE$ ), Error Porcentual Medio ( $MPE$ ), Incertidumbre al 95% ( $U_{95}$ ), Error Cuadrático Medio Relativo ( $RRMSE$ ), T-estadísticos ( $t\text{-stats}$ ), Error Absoluto Máximo Relativo ( $erMAX$ ), Error Absoluto Medio Relativo ( $MARE$ ), Coeficiente de Correlación ( $R$ ).

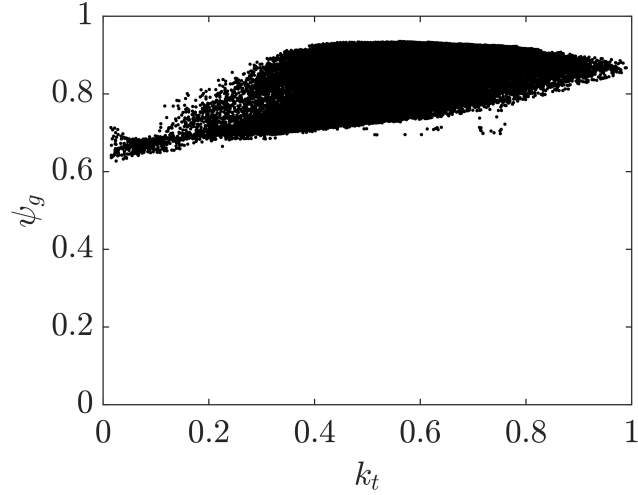


Figura 4.9: Factor de exergía de la radiación global horizontal en función del índice de claridad.

Tabla 4.2: Modelos propuestos para el factor de exergía global en donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  son constantes a determinar.

Modelo	Tipo
Lineal	$\psi_g = ak_t + b$
Cuadrático	$\psi_g = ak_t^2 + bk_t + c$
Cúbico	$\psi_g = ak_t^3 + bk_t^2 + ck_t + d$
Logarítmico	$\psi_g = a + b \cdot \ln(k_t)$
Exponencial	$\psi_g = a \cdot (\exp)^{bk_t}$
Potencial	$\psi_g = ak_t^b$
Potencial con un termino	$\psi_g = ak_t^b + c$
Inverso	$\psi_g = \frac{a}{k_t} + b$

- Error con Sesgo Medio ( $MBE$ ): Este error muestra la tendencia de un modelo para sobre o subestimar los valores del factor de exergía solar. Sobrestimar significa un valor positivo y subestimar un valor negativo. Los valores de  $MBE$  buscados son los más cercanos a 0.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{H}_{i,e} - \bar{H}_{i,c}) \quad (4.16)$$

- Error Absoluto Medio ( $MAE$ ): Es la suma del valor absoluto de los errores dividido por el número de observaciones. Este indicador evalúa que tan cerca las estimaciones están de los valores medidos.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{H}_{i,e} - \bar{H}_{i,c}| \quad (4.17)$$

- Error Cuadrático Medio ( $RMSE$ ): Es usado para comparar los errores medidos con

los errores predichos. Mientras más pequeño es el valor entregado, mejor es el comportamiento del modelo estudiado.  $RMSE$  es siempre positivo e idealmente el valor que entrega es 0 para una estimación perfecta.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{H}_{i,e} - \bar{H}_{i,c})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.18)$$

- Error Porcentual Medio ( $MPE$ ): Es el promedio de los errores porcentuales en que los valores predichos del modelo difieren de los valores medidos.

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{H}_{i,c} - \bar{H}_{i,e}}{\bar{H}_{i,c}} \right) \times 100 \quad (4.19)$$

- Incertidumbre al 95 % ( $U_{95}$ ): La incertidumbre dentro del 95 % del intervalo de confianza muestra la desviación de los datos con respecto al modelo, en donde  $SD$  es la desviación estándar de la resta entre los valores calculados y medidos.

$$U_{95} = 1,96 (SD^2 + RMSE^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.20)$$

- Error Cuadrático Medio Relativo ( $RRMSE$ ): En este indicador se divide el  $RMSE$  por el promedio de los datos medidos.

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{H}_{i,c} - \bar{H}_{i,e})^2}}{\sum_{i=1}^n \bar{H}_{i,c}} \quad (4.21)$$

- T-estadísticos ( $t - stats$ ): Este indicador se usa en conjunto con el  $RMSE$  y  $MBE$  donde los mejores resultados para un modelo son los que entregan valores cercanos a 0.

$$t - stats = \left[ \frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.22)$$

- Error Absoluto Máximo Relativo ( $erMAX$ ): Representa el máximo valor de los errores absolutos obtenidos de los datos del modelo. Un valor bajo de  $erMAX$  significa que un modelo funciona de mejor forma.

$$erMAX = \max \left( \left| \frac{\bar{H}_{i,c} - \bar{H}_{i,e}}{\bar{H}_{i,c}} \right| \right) \quad (4.23)$$

- Error Absoluto Medio Relativo ( $MARE$ ): Este error muestra los valores absolutos promedios de la resta entre los valores calculados y medidos.

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\bar{H}_{i,e} - \bar{H}_{i,c}}{\bar{H}_{i,c}} \right| \quad (4.24)$$

- Coeficiente de Correlación ( $R$ ): El coeficiente de correlación entrega valores entre 0 a 1. Valores cercanos a 1 representan una relación lineal entre los valores calculados y

medidos. Por el contrario, un valor cercano a 0 muestra que no hay una relación lineal entre ellos.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{H}_{i,e} - \bar{H}_{e,av}) (\bar{H}_{i,c} - \bar{H}_{c,av})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{H}_{i,e} - \bar{H}_{e,av})^2 \sum_{i=1}^n (\bar{H}_{i,c} - \bar{H}_{c,av})^2}} \quad (4.25)$$

Para encontrar el modelo que mejor se ajustaba a los datos, se evaluaron los diferentes errores estadísticos como un conjunto, ya que, al hacerlo por separado, se puede encontrar una disparidad de tendencias que apuntan a diferentes modelos como el que entrega mejores resultados. Es por esta razón que se utilizó el Global Performance Indicator (*GPI*) descrito en la sección anterior (Jamil & Bellos [14]), donde se determinó el modelo empírico que mejor representa al factor de exergía de la radiación solar.

### 4.3. Montaje Experimental

Se realizó un montaje experimental de un panel fotovoltaico (figura 4.10) para realizar un balance de energía mediante una modelación térmica y eléctrica. Este montaje fue ubicado en la azotea de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile. El montaje siguió los criterios propuestos por Akyuz et al. [26] y consistió en un panel fotovoltaico de 10 W instalado de forma horizontal que estuvo siendo medido por diferentes instrumentos descritos en la tabla 4.3. La radiación solar global, temperatura ambiente y velocidad del viento fueron medidos por la estación meteorológica descrita al inicio de este capítulo. La potencia eléctrica se registró mediante un microinversor marca Enphase Energy que tiene la limitación de guardar los datos de la potencia eléctrica con una resolución máxima de un decimal. Tanto la temperatura de la celda como la del tedlar se registraron por una termocupla tipo K y se almacenaron mediante un datalogger CR300 de la marca Campbell Scientific. El panel recibió una limpieza previa a cada día medido. Todas las mediciones se registraron con un espacio temporal de 1 minuto durante los días 10, 11, 12, 18 y 19 de Junio del 2019.

Tabla 4.3: Variables medidas en el montaje experimental.

Medición	Instrumento
Radiación Global Horizontal	Piranómetro CMP-22, Kipp & Zonnen
Temperatura Ambiente	CS-500, Campbell Scientific
Velocidad del Viento	Anemómetro 03001 Young Wind Sentry Set, Campbell Scientific
Potencia Eléctrica	Microinversor M215, Enphase Energy
Temperatura de la Celda	Termocupla tipo K
Temperatura del Tedlar	Termocupla tipo K

El balance de energía desarrollado al sistema tiene por finalidad evaluar el cumplimiento de la primera ley de la termodinámica en el montaje experimental desarrollado. Este balance de energía consistió en realizar una modelación térmica y eléctrica al panel fotovoltaico.

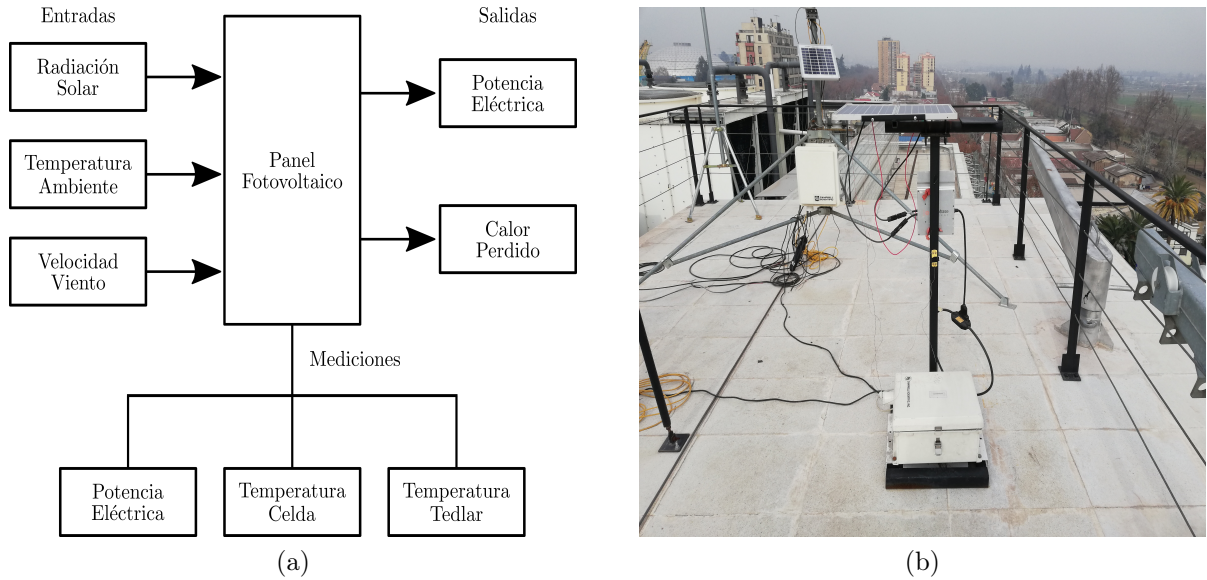


Figura 4.10: (a) Esquema general del montaje experimental con las variables de entrada, salida y mediciones y (b) Fotografía del experimento ubicado en la azotea poniente de Beauchef 851.

Además, Los resultados de las modelaciones térmica y eléctrica fueron utilizadas posteriormente para realizar un balance de exergía al sistema. De esta forma, se realizó un análisis unidimensional y transiente de la transferencia de calor del panel fotovoltaico mediante el método de diferencias finitas. En particular, se analizó la transferencia de calor por el método de Crank-Nicholson debido a que se considera numéricamente estable para cualquier paso temporal. Las propiedades del panel fotovoltaico se detallan en el apéndice B. Mediante un microscopio electrónico de barrido se evaluó el espesor de las capas que tiene este panel (figura 4.11), encontrándose que las capas que lo componen son: vidrio, EVA, celda y tedlar. De esta forma, los espesores medidos para cada capa pueden observarse en la tabla 4.4. A su vez, el resto de las propiedades (conductividad, densidad y calor específico) fue supuesto tomando como referencia los valores estándares encontrados en la literatura ([40], [41], [42], [43] y [44]).

Tabla 4.4: Propiedades de las capas del panel fotovoltaico.

Capa	Espesor <i>mm</i>	Conductividad térmica $\frac{W}{mK}$	Densidad $\frac{kg}{m^3}$	Calor específico $\frac{J}{kgK}$
Vidrio	1,58	1,8	3000	500
EVA	0,002	0,35	960	2090
Celda	0,328	148	2330	677
Tedlar	0,15	0,2	1200	1250



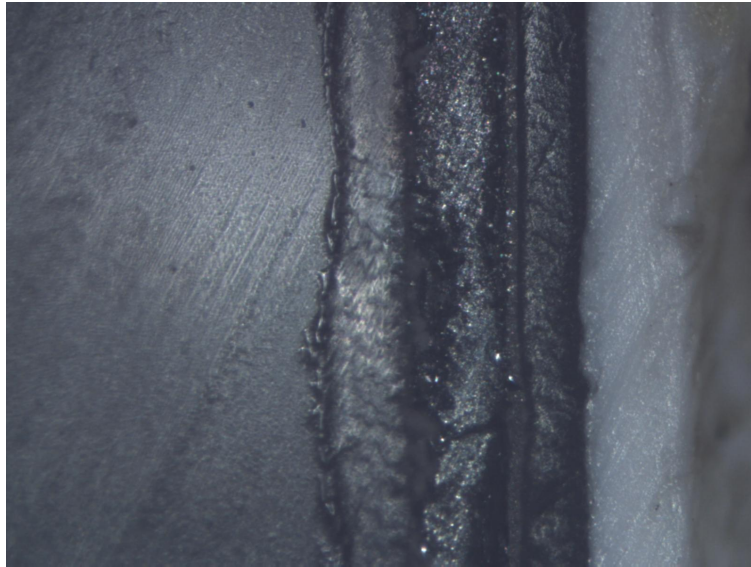


Figura 4.11: Microscopía del espesor del panel fotovoltaico. De izquierda a derecha: Vidrio, EVA, Celda y Tedlar.

### 4.3.1. Balance de Energía

#### Modelo Térmico

El modelo térmico se desarrolló mediante los supuestos observados en la figura 4.12. La radiación solar llega hasta la superficie del vidrio del panel fotovoltaico donde una parte de esta se refleja hacia el ambiente y otra parte se pierde por convección de calor entre la superficie del vidrio y el aire circundante. Mediante conducción, la radiación térmica se va transmitiendo a través de las capas del panel hasta llegar a la celda donde parte de esta se convierte en energía eléctrica. Posteriormente, se transfiere calor por conducción hacia el tedlar donde se libera calor por radiación y convección hacia el ambiente. La ecuación que gobierna la transferencia de calor transiente y unidimensional es la siguiente,

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (4.26)$$

donde  $\alpha$  es la difusividad térmica. El balance de energía del sistema es de la siguiente forma,

$$\Delta E_{sistema} = E_{entra} - E_{sale} \quad (4.27)$$

La ecuación de transferencia de calor 4.26 es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, que depende del espacio y del tiempo. Para encontrar una solución al caso que aquí se estudia, esta ecuación se resuelve mediante el método de diferencias finitas, el cual entrega soluciones numéricas al dividir el dominio del sistema en una malla de elementos llamados nodos. Dentro de los métodos de diferencias finitas, la solución para este caso particular se llevo a cabo mediante el método de Crank-Nicolson, el cual ofrece la ventaja de ser incon-

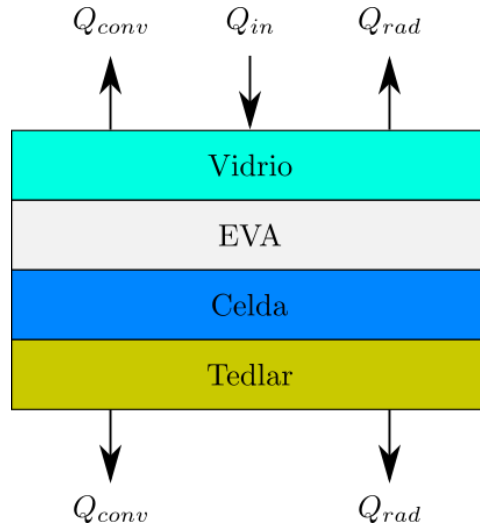


Figura 4.12: Esquema idealizado del flujo de calor transiente en el panel fotovoltaico.

dicionalmente estable para cualquier paso de tiempo ( $\Delta t$ ) y seguir obteniendo una precisión aceptable. La discretización mediante Crank-Nicolson para la ecuación 4.26 es,

$$\frac{T_{i,t+1} - T_{i,t}}{\Delta t} = \alpha \frac{(T_{i+1,t} + T_{i-1,t} - 2T_{i,t}) + (T_{i+1,t+1} + T_{i-1,t+1} - 2T_{i,t+1})}{2 \Delta x^2} \quad (4.28)$$

donde  $T_{i,t+1}$  es la temperatura del nodo  $i$  en el tiempo  $t + 1$ ,  $T_{i,t}$  la temperatura del nodo  $i$  en el tiempo  $t$ ,  $T_{i+1,t}$  la temperatura del nodo  $i + 1$  en el tiempo  $t$ ,  $T_{i-1,t}$  la temperatura del nodo  $i - 1$  en el tiempo  $t$ ,  $T_{i+1,t+1}$  la temperatura del nodo  $i + 1$  en el tiempo  $t + 1$ ,  $T_{i-1,t+1}$  la temperatura del nodo  $i - 1$  en el tiempo  $t + 1$  y  $\Delta x$  el paso espacial. Para la superficie que recibe la radiación solar (figura 4.13a), la ecuación 4.27 queda como,

$$Q_{sensible} = Q_{in} - Q_{conv} - Q_{rad} - Q_{cond} \quad (4.29)$$

donde  $Q_{conv}$  es el flujo de calor convectivo,  $Q_{rad}$  el flujo de calor radiativo,  $Q_{cond}$  el flujo de calor conductivo. El calor sensible en un volumen de control finito ( $Q_{sensible}$ ) y la radiación solar absorbida en el volumen de control ( $Q_{in}$ ) son,

$$Q_{sensible} = \rho_v C p_v \frac{\Delta T}{\Delta t} \Delta x \quad (4.30)$$

$$Q_{in} = \alpha_v G \frac{\Delta x}{2} \frac{1}{x_v} \quad (4.31)$$

donde  $\rho_v$  es la densidad del vidrio,  $C p_v$  el calor específico del vidrio,  $\Delta T$  la variación de la temperatura,  $\alpha_v$  la absorptancia del vidrio,  $G$  la radiación solar global incidente sobre el panel y  $x_v$  el espesor total del vidrio. Reemplazando 4.30 y 4.31 en 4.29, el balance de energía en su forma discretizada mediante el método de diferencias finitas se escribe de la siguiente forma,

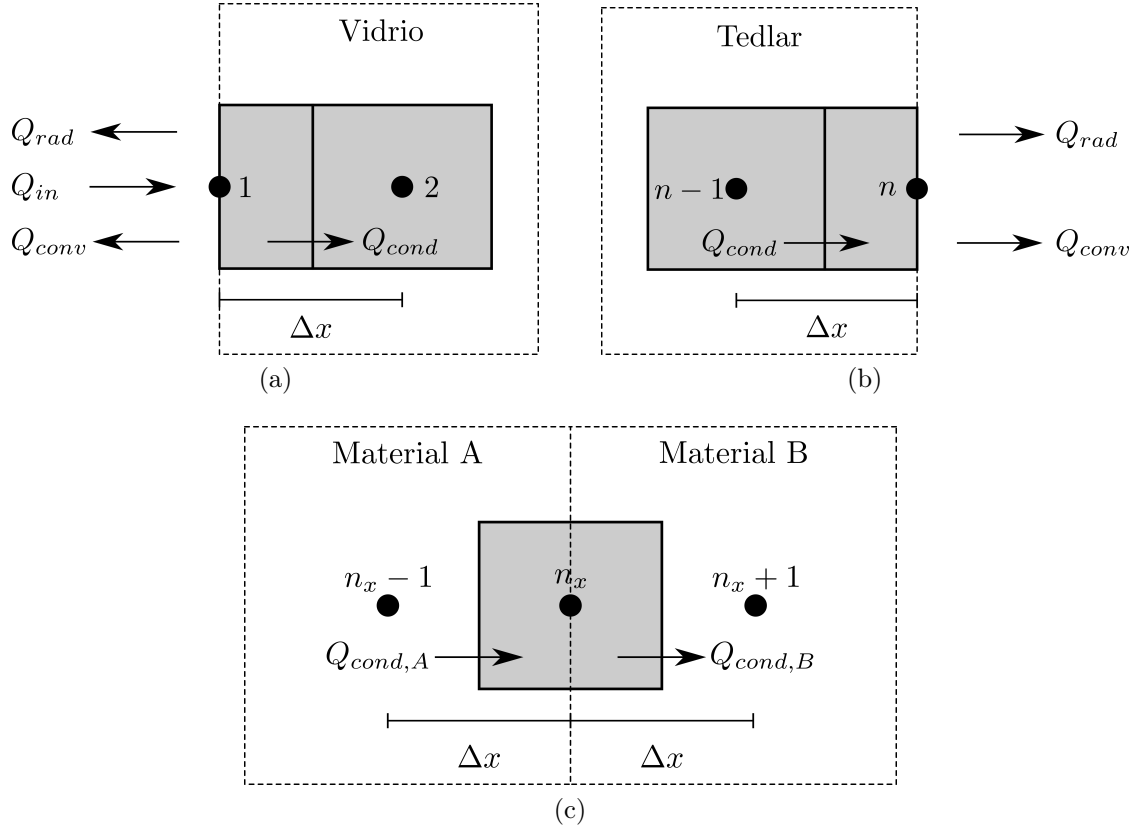


Figura 4.13: Volúmenes de control para las condiciones de borde. (a) Nodos de la parte frontal del panel. (b) Nodos de la parte posterior. (c) Nodos de interfase entre los materiales.

$$\rho_v C p_v (T_{1,t+1} - T_{1,t}) \frac{\Delta x}{2 \Delta t} = Q_{in,t} - h_{1,t} (T_{1,t} - T_{\infty,t}) - \varepsilon_v \sigma (T_{1,t}^4 - T_{\infty,t}^4) - \frac{k_v}{\Delta x} (T_{1,t} - T_{2,t}) \quad (4.32)$$

donde  $T_{1,t+1}$  la temperatura en el nodo 1 en el tiempo  $t + 1$ ,  $T_{1,t}$  la temperatura en el nodo 1 en el tiempo  $t$ ,  $Q_{in,t}$  la radiación absorbida por el vidrio en el tiempo  $t$ ,  $h_{1,t}$  es el coeficiente de convección en el nodo 1 en el tiempo  $t$ ,  $T_{\infty,t}$  la temperatura del ambiente en el tiempo  $t$ ,  $\varepsilon_v$  la emisividad del vidrio,  $\sigma$  la constante de Boltzmann,  $k_v$  la conductividad térmica del vidrio y  $T_{2,t}$  la temperatura del nodo 2 en el tiempo  $t$ . La condición de borde del lado posterior del panel fotovoltaico (figura 4.9b) sigue un análisis similar, donde el balance de energía queda como,

$$Q_{sensible} = Q_{cond,izq} - Q_{conv} - Q_{rad} \quad (4.33)$$

donde  $Q_{cond,izq}$  es la conducción de calor por la izquierda. La forma discretizada de la ecuación 4.33 es,

$$\rho_{ted} C p_{ted} (T_{n,t+1} - T_{n,t}) \frac{\Delta x}{2 \Delta t} = \frac{k_{ted}}{\Delta x} (T_{n-1,t} - T_{n,t}) - h_{n,t} (T_{n,t} - T_{\infty,t}) - \varepsilon_{ted} \sigma (T_{n,t}^4 - T_{\infty,t}^4) \quad (4.34)$$

donde  $\rho_{ted}$  es la densidad del tedlar,  $Cp_{ted}$  el calor específico del tedlar,  $T_{n,t+1}$  la temperatura del nodo  $n$  en el tiempo  $t + 1$ ,  $T_{n,t}$  la temperatura en el nodo  $n$  en el tiempo  $t$ ,  $k_{ted}$  la conductividad térmica del tedlar,  $T_{n-1,t}$  la temperatura en el nodo  $n - 1$  en el tiempo  $t$ ,  $h_{n,t}$  el coeficiente de convección en el nodo  $n$  en el tiempo  $t$ ,  $T_{\infty,t}$  la temperatura del ambiente en el tiempo  $t$  y  $\varepsilon_{ted}$  la emisividad del tedlar. El balance de energía que se tiene en la interfase de cada material (figura 4.13c) y su forma discretizada son,

$$Q_{sensible} = Q_{cond,izq} - Q_{cond,der} \quad (4.35)$$

$$\rho Cp \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_{n_x,t+1} - T_{n_x,t}) = \frac{k_A}{\Delta x} (T_{n_x-1,t} - T_{n_x,t}) - \frac{k_B}{\Delta x} (T_{n_x,t} - T_{n_x+1,t}) \quad (4.36)$$

donde  $\rho$  es la densidad del material,  $Cp$  el calor específico del material,  $T_{n_x,t+1}$  la temperatura de interfase del nodo  $n_x$  en el tiempo  $t + 1$ ,  $T_{n_x,t}$  la temperatura de interfase del nodo  $n_x$  en el tiempo  $t$ ,  $k_A$  la conductividad térmica del *material A*,  $T_{n_x-1,t}$  la temperatura del nodo  $n_x - 1$  anterior a la interfase en el tiempo  $t$ ,  $k_B$  la conductividad térmica del *material B* y  $T_{n_x+1,t}$  la temperatura del nodo  $n_x + 1$  siguiente a la interfase en el tiempo  $t$ .

## Modelo Eléctrico

Se desarrolló un modelo eléctrico con tal de validar las mediciones de potencia eléctrica del panel fotovoltaico. El modelo se basa en el trabajo de Sánchez Barroso et al. [45] quienes desarrollaron un modelo de estimación de la corriente eléctrica mediante la representación de la celda como un diodo conectado en paralelo a la fuente de corriente. De esta forma, la relación entre la corriente calculada del modelo ( $I_{calc}$ ) y el voltaje ( $V$ ) se expresa de la siguiente forma,

$$I_{calc} = I_{sc} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + I_{calc} \cdot R_s}{a} \right) - 1 \right] \quad (4.37)$$

donde  $R_s$  es la resistencia en los contactos metálicos frontales y traseros del semiconductor. La corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), la corriente de saturación del diodo ( $I_0$ ) y el factor de idealización del diodo ( $a$ ) se calculan de la siguiente manera,

$$I_{sc} = G \frac{I_{sc}(STC)}{1000} \quad (4.38)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\exp \left( \frac{V_{oc}}{a} \right) - 1} \quad (4.39)$$

$$a = \frac{N_s \sigma A T_{cel}}{q_e} \quad (4.40)$$

donde  $G$  es la radiación solar global incidente sobre el panel,  $I_{sc}(STC)$  la corriente de cortocircuito en condiciones STC (Condiciones Estándar de Operación),  $V_{oc}$  el voltaje de circuito abierto,  $N_s$  el número de celdas del panel,  $\sigma$  la constante de Boltzmann,  $A$  el factor de idealización del diodo,  $T_{cel}$  la temperatura de la celda y  $q_e$  la carga del electrón (tabla B.1). La ecuación 4.37 debe resolverse mediante iteración para encontrar el valor de la corriente del panel fotovoltaico ya que se encuentra a ambos lados de la ecuación.

## 4.4. Validación Experimental

Para validar la expresión propuesta del factor de exergía de la radiación solar, se realizó un balance de exergía al montaje experimental descrito en la sección anterior. Este balance de exergía se realizó para evaluar el cumplimiento de la segunda ley de la termodinámica en el sistema. Esta validación se basó en el trabajo de Akyuz et al. [26] donde realizaron un análisis de la segunda ley de la termodinámica a un panel fotovoltaico. Para realizar el balance de exergía, se necesitó cuantificar el contenido exergético de la radiación solar. Por ende, esta cuantificación se realizó mediante el modelo propuesto en este trabajo. A su vez, con tal de evaluar la efectividad del modelo propuesto y así validar esta expresión, se desarrollaron más balances de exergía al sistema pero, esta vez, utilizando los modelos de exergía para la radiación solar de Petela [5], Pons [12] y Jeter [15]. El hecho de realizar una validación mediante las estimaciones de otros modelos de exergía, se debe a que el valor de exergía no es una variable que se pueda medir, por lo que solo se pueden realizar estimaciones del contenido exergético del sistema mediante modelaciones. Finalmente, se compararon los resultados del balance de exergía de todos los modelos de la literatura, con el balance mediante el modelo propuesto y así validar la expresión desarrollada. Esta validación se realizó utilizando dos días de la campaña de medición realizada para el balance de energía, en donde se buscó representar un día despejado y otro completamente nublado. Además, las estimaciones de las modelaciones térmica y eléctrica descritas anteriormente fueron utilizadas para realizar el balance de exergía. Por ende, los días representativos fueron el día 18 y 19 de Junio del 2019 como los días despejados y nublados, respectivamente.

### 4.4.1. Balance de Exergía

El balance de exergía para el montaje experimental se realizó de la siguiente forma,

$$\sum Ex_{en} = \sum Ex_{sal} \quad (4.41)$$

donde  $Ex_{en}$  es la exergía de entrada al sistema correspondiente a la exergía de la radiación solar ( $Ex_{rad}$ ) y  $Ex_{sal}$  es la exergía de salida que equivale a,

$$Ex_{sal} = Ex_{elec} + Ex_{ter} + Ex_{dest} \quad (4.42)$$

donde  $Ex_{elec}$  corresponde a la exergía de la corriente eléctrica,  $Ex_{ter}$  la exergía de las pérdidas térmicas del panel fotovoltaico y  $Ex_{dest}$  la exergía destruida por el resto de irreversibilidades que ocurren en el sistema y que no pueden medirse por ningún instrumento. La exergía eléctrica y térmica se expresan de la siguiente forma,

$$Ex_{elec} = V_m I_m \quad (4.43)$$

$$Ex_{ter} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \dot{Q} \quad (4.44)$$

donde  $V_m$  es el voltaje máximo,  $I_m$  la corriente máxima,  $T_0$  la temperatura ambiente,  $T_{cel}$  la temperatura de la celda y  $\dot{Q}$  el flujo de calor convectivo y se expresa como,

$$\dot{Q} = h_c A (T_{cel} - T_0) \quad (4.45)$$

donde  $h_c$  es el coeficiente de calor convectivo y  $A$  el área efectiva del panel fotovoltaico. Considerando que la  $Ex_{dest}$  no se puede obtener como un valor numérico, este valor se termina por omitir en el análisis. Reemplazando 4.43 y 4.44 en 4.42 se define la exergía de salida del sistema,

$$Ex_{sal} = V_m I_m + \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \dot{Q} \quad (4.46)$$

El factor de exergía del sistema ( $\psi_{PV}$ ) se define de la siguiente forma,

$$\psi_{PV} = \frac{Ex_{elec} + Ex_{ter}}{Ex_{rad}} \quad (4.47)$$

$$\psi_{PV} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \dot{Q}}{Ex_{rad}} \quad (4.48)$$

Para comparar el modelo propuesto con otros modelos que se encuentran en la literatura, la exergía de la radiación solar ( $Ex_{rad}$ ) representó los valores calculados por el modelo propuesto de este trabajo ( $Ex_{mod}$ ). A su vez,  $Ex_{rad}$  toma los valores calculados por los modelos de Petela [5], Pons [12] y Jeter [15] con tal revisar el comportamiento del modelo propuesto al comparar y validar los resultados con otros modelos de la literatura. Además, mediante la representación de un día despejado y un día nublado, se buscaba evaluar el comportamiento del modelo bajo diferentes condiciones climáticas. Esto conllevó a elegir un día completamente despejado, como es el caso del 18 de Junio del 2019, y otro con una gran nubosidad, representado por el día 19 de Junio del 2019.

# Capítulo 5

## Resultados

Los resultados logrados durante el desarrollo de este trabajo, se dividen en diferentes secciones a lo largo de este capítulo. La primera sección, corresponde a la evaluación del factor de exergía de la radiación solar global, directa y difusa, mediante la formulación del modelo de Pons con los datos meteorológicos filtrados. Se desarrollaron 8 modelos propuestos mediante un análisis de regresión entre el índice de claridad y el factor de exergía de la radiación solar global. Estos modelos propuestos fueron analizados mediante 10 tipos de indicadores estadísticos, donde la evaluación de los resultados se desarrolló mediante el indicador global de desempeño (*GPI*). Con el *GPI* se logró encontrar el modelo que mejor se ajustaba a los datos utilizados. La segunda sección de este capítulo entrega el resultado del balance de energía realizado al montaje experimental. El balance de energía se desarrolló mediante una modelación térmica y eléctrica al panel fotovoltaico. A su vez, con la intención de validar la modelación desarrollada, se compararon los resultados de ambas modelaciones con las mediciones realizadas en el sistema. Finalmente, la última sección enseña los resultados de la validación experimental mediante un día despejado y un día nublado para el balance de exergía desarrollado en el sistema fotovoltaico. Se realizó una comparación de los balances de exergía del sistema con el modelo propuesto y los modelos de Petela, Pons y Jeter. Mediante un análisis de dispersión, se evaluó el comportamiento del modelo propuesto con los resultados de los modelos de la literatura.

### 5.1. Factor de Exergía de la Radiación Solar

Los datos meteorológicos, después del proceso de calificación de datos, se utilizaron para calcular el factor de exergía de la radiación solar mediante el método de Pons. Siguiendo el criterio establecido por Pons, se determinó el factor de exergía de la radiación solar directa y difusa a través de los datos meteorológicos del año 2018. Posteriormente, se calculó el factor de exergía de la radiación solar global en función de los factores de exergía de la radiación directa y difusa. De este modo, se puede observar en la figura 5.1 los resultados del factor de exergía de la radiación solar directa ( $\psi_{dr}$ ) en función de la radiación directa normal al Sol y la hora solar. Se pueden diferenciar tres grandes zonas con un contenido exergético

predominante, representados en los colores azul, amarillo y rojo. Para valores de la radiación directa normal cercanos a 0, el contenido exergético varía entre 0,7 y 0,85. Esta zona se encuentra en la parte baja del gráfico y se puede observar que está presente en todas las horas de estudio. La segunda zona corresponde a la de color amarillo, que va entre los 20 a  $100 \frac{W}{m^2}$ . En esta zona, se tiene un contenido exergético cercano a 0,87 y se encuentra como una franja presente en todas las horas del día. Además, se pueden observar algunos puntos por sobre los  $200 \frac{W}{m^2}$  alrededor del mediodía solar. La tercera zona corresponde a las radiaciones directas mayores a  $100 \frac{W}{m^2}$ . Esta tercera zona tiene un contenido exergético por sobre los 0,9 durante todo el espectro de tiempo. Al inicio del día, entre las 6 a 9 de la mañana, se produce un aumento de la radiación directa normal, donde la pendiente positiva comienza a disminuir cuando se acerca a las 8 AM. Posteriormente, la pendiente tiene un valor muy pequeño alcanzando su máximo al mediodía solar. Durante la tarde, la pendiente es negativa y va disminuyendo la intensidad radiativa con el paso de las horas. En esta última zona, se encuentran intensidades radiativas alrededor de los  $1000 \frac{W}{m^2}$ . Finalmente, el promedio anual del factor de exergía de la radiación directa normal fue de 0,93 para el año 2018 en Santiago de Chile.

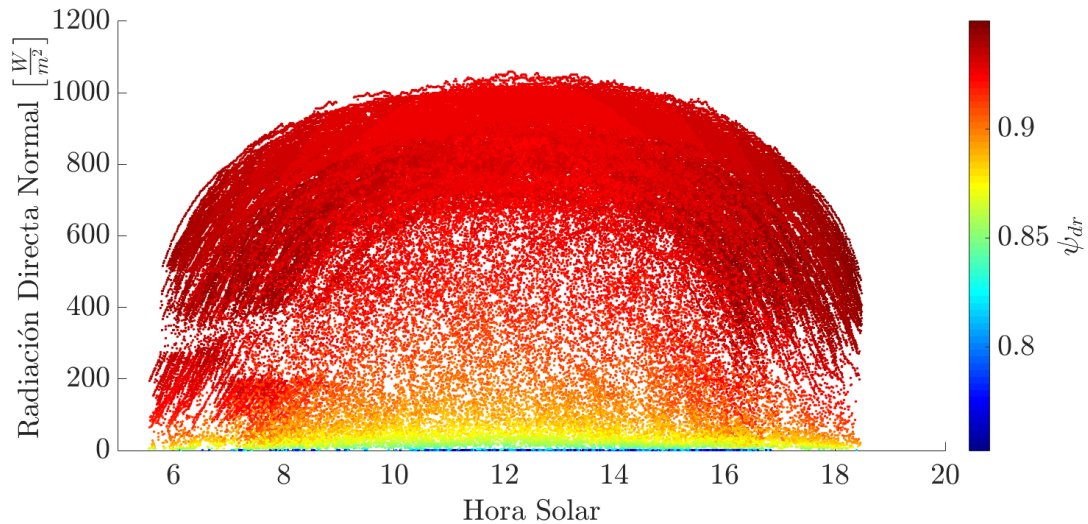


Figura 5.1: Factor de exergía de la radiación solar directa en función de la radiación directa normal y la hora solar mediante el método de Pons para el año 2018.

El factor de exergía de la radiación solar difusa horizontal ( $\psi_{df}$ ) se puede observar en la figura 5.2. En esta figura, también se pueden diferenciar tres zonas marcadas por las intensidades de color celeste, amarillo y rojo. La primera zona de color celeste, va desde 0 a  $60 \frac{W}{m^2}$  con un factor de exergía que va entre 0,63 a 0,67. Los factores de exergía más bajos representados con un color azul, son pocos puntos dispersos que se encuentran entre las 7 de la mañana a las 17 horas. Estos puntos se encuentran por debajo de la zona de color celeste con una intensidad radiativa alrededor de los  $15 \frac{W}{m^2}$ . La segunda zona de color amarillo se encuentra para intensidades que van entre los 60 a  $160 \frac{W}{m^2}$ . Esta segunda zona posee un factor de exergía alrededor de 0,68 y se pueden encontrar durante todas las horas del día. Para intensidades radiativas que van de 160 a  $250 \frac{W}{m^2}$ , se encuentra una zona de transición con un factor de exergía cercano a 0,69. Esta zona de transición se ve acortada su duración a lo largo del día, iniciando a las 7 de la mañana y finalizando cerca de las



17 horas. Por último, la zona que va con intensidades radiativas superiores a  $250 \frac{W}{m^2}$  posee factores de exergía cercanos a 0,72. Estas altas mediciones se encuentran más dispersas que en las zonas anteriores, donde además se ve acortada la duración a lo largo del día a medida que va aumentando la intensidad de la radiación difusa. Estos valores altos se encuentran en horas cercanas al mediodía. El promedio anual del factor de exergía de la radiación difusa horizontal en este periodo es de 0,68.

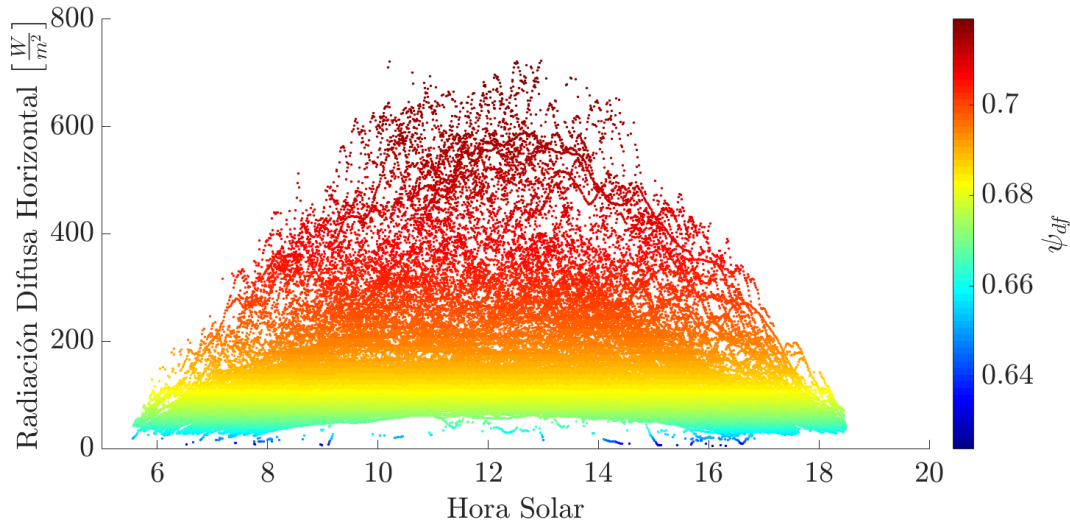


Figura 5.2: Factor de exergía de la radiación difusa en función de la radiación difusa horizontal y la hora solar mediante el método de Pons para el año 2018.

Mediante los factores de exergía de la radiación directa y difusa, se calculó el factor de exergía de la radiación global ( $\psi_g$ ) siguiendo los criterios de los trabajos de Pons y Neri et al.. Los resultados del factor de exergía de la radiación global se pueden observar en la figura 5.3. De la misma forma como están construidas las figuras de  $\psi_d$  y  $\psi_{df}$ ,  $\psi_g$  también se encuentra en función de la radiación global horizontal y la hora solar. En esta figura no se puede apreciar con claridad las diferentes zonas (representadas por colores) debido a la gran dispersión de puntos que se observa. El comportamiento de la radiación global horizontal en función de las horas, corresponde al de una distribución normal donde las máximas intensidades se registran al mediodía. Las intensidades radiativas cercanas a 0 ocurren a lo largo de todas las horas del día, las cuales poseen un factor de exergía menor a 0,7. Estos puntos de muy baja intensidad corresponden presumiblemente a días de Invierno con una gran nubosidad. Se observan mediciones que tienen un  $\psi_g$  cercano a 0,75 con un color celeste en la parte inferior. Además, mediciones con este  $\psi_g$  se encuentran presentes en diferentes áreas dentro de la densidad de puntos medidos. De la misma forma, los  $\psi_g$  que van entre 0,75 a 0,88 se encuentran dispersos dentro de todo el espectro de mediciones, no lográndose apreciar zonas con un  $\psi_g$  predominante. Sin embargo, en la zona superior de la densidad de puntos si se puede observar una zona con un  $\psi_g$  predominante correspondiente a valores por sobre los 0,9. Las máximas intensidades radiativas al mediodía solar se encuentran cercanos a los  $1150 \frac{W}{m^2}$ . El promedio anual del factor de exergía de la radiación global fue de 0,88 para Santiago de Chile.

Algunas mediciones se encuentran por sobre la distribución normal de la radiación global horizontal, midiéndose intensidades por sobre los  $1300 \frac{W}{m^2}$ . Estos puntos pueden atribuirse a

un fenómeno conocido como "Cloud Enhancement" ( $CE$ ), el cual aparece en días parcialmente nublados y se produce cuando la irradiación es reflejada por la nubosidad del cielo. Este fenómeno hace que el instrumento de medición no solo esté midiendo la radiación global de su alrededor, sino que también está recibiendo la irradiación aumentada por el fenómeno de reflexión en las nubes. Es por esta razón que los puntos de esta zona tienen un factor de exergía que va entre 0,8 a 0,9. El fenómeno de  $CE$  puede observarse sólo con mediciones temporales cortas, como las utilizadas en este trabajo (espacio de tiempo de 1 minuto).

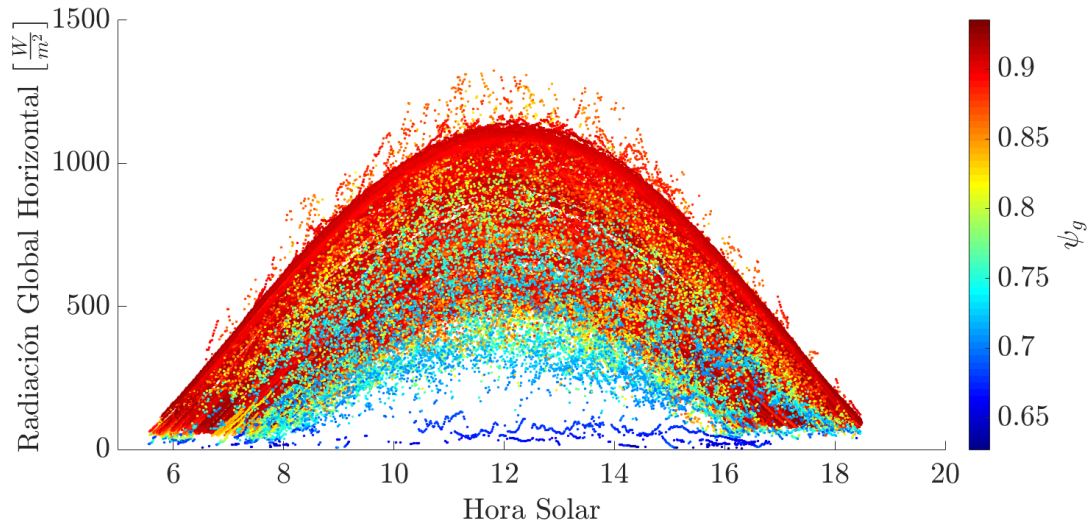


Figura 5.3: Factor de exergía de la radiación global en función de la radiación global horizontal y la hora solar mediante el método de Pons para el año 2018.

Después de evaluar el factor de exergía de la radiación global, se realizó un análisis de regresión entre  $\psi_g$  y el índice de claridad ( $k_t$ ). Este análisis de regresión tenía por objetivo desarrollar diferentes ecuaciones que pudieran representar de buena forma al factor de exergía. Se utilizó un modelo de robustez al análisis de regresión, en donde se le asignó un peso a cada dato medido. Este peso es un valor numérico, que es menor a medida que se aleja de la tendencia de la concentración de puntos. De esta forma, mediante el análisis se determinaron 8 diferentes modelos: lineal, cuadrático, cúbico, logarítmico, exponencial, potencial, potencial con un termino e inverso. Los modelos desarrollados se pueden observar en la tabla 5.1. Con tal de encontrar la ecuación que mejor se ajustaba a los datos, se desarrolló un análisis estadístico de estas ecuaciones, donde se evaluaron 10 tipos de errores estadísticos para cada modelo. Los resultados de los errores estadísticos se encuentran en la tabla 5.2.

Como se puede apreciar en la tabla 5.2, los indicadores estadísticos logran errores bajos para todos los modelos evaluados. El  $MPE$  tiene resultados negativos, lo que indica que el valor del  $\psi_g$  estimado por el modelo propuesto es mayor que el valor del  $\psi_g$  calculado por el método de Pons en aproximadamente un 2% para todos los modelos. El  $RRMSE$  calcula un error muy pequeño para todos los modelos, lo que indica que la diferencia entre el valor estimado y el valor calculado es muy pequeña. Con respecto al  $t-stats$ , se determinan valores bastante altos para este indicador. Estos altos valores se deben a la gran cantidad de datos evaluados ( $n = 156379$  datos).  $n$  se encuentra en el numerador de la expresión, lo que en consecuencia aumenta el valor de  $t-stats$ . A su vez, esta gran cantidad de datos también se

Tabla 5.1: Modelos propuestos para el factor de exergía de la radiación global.

Modelo	Tipo
Lineal	$\psi_g = -0,017k_t + 0,916$
Cuadrático	$\psi_g = -0,635k_t^2 + 0,841k_t + 0,63$
Cúbico	$\psi_g = 0,836k_t^3 - 1,916k_t^2 + 1,408k_t + 0,572$
Logarítmico	$\psi_g = 0,9 - 0,01 \cdot \ln(k_t)$
Exponencial	$\psi_g = 0,916 \cdot (\exp)^{-0,019k_t}$
Potencial	$\psi_g = 0,9k_t^{-0,01}$
Potencial con un termino	$\psi_g = -2,034 \times 10^{-4} \cdot k_t^{-2,894} + 0,904$
Inverso	$\psi_g = \frac{0,004}{k_t} + 0,897$

ve reflejado en el coeficiente de determinación ( $R$ ), donde este coeficiente se encuentra en el orden de 0,93 para la mayoría de los modelos evaluados. La evaluación estadística realizada a los 8 modelos, entrega diferencias en el momento de señalar al modelo que mejor se ajusta a los datos utilizados. El modelo lineal se señala como el más representativo mediante el coeficiente de determinación  $R$  con 0,932, el valor más alto de todos los modelos. Sin embargo, este es el único indicador en el que obtiene los mejores resultados, siendo el  $t - stats$  el indicador donde obtiene su peor resultado con 162,146. El modelo cuadrático es el que obtiene los mejores resultados en 6 errores estadísticos, los cuales son:  $MAE$ ,  $RMSE$ ,  $U95$ ,  $RRMSE$ ,  $erMAX$  y  $MARE$ . Sin embargo, este modelo obtiene el coeficiente de determinación  $R$  más bajo, siendo de 0,915. Los modelos cúbico, logarítmico, exponencial y potencial no son señalados por ningún indicador como el más representativo de los datos. El modelo potencial con un termino tiene resultados dispares entre los indicadores estadísticos. Este modelo determina los errores más bajos en tres indicadores:  $MBE$ ,  $MPE$  y  $t - stats$ . No obstante, en los indicadores  $RMSE$ ,  $U95$ ,  $RRMSE$ ,  $erMAX$  y  $MARE$ , calcula los errores más altos. El modelo inverso no es favorecido por ningún indicador. Más aún, este modelo tiene los errores estadísticos más altos en las categorías de  $MBE$ ,  $MAE$  y  $MPE$ .

Tabla 5.2: Resultados de los errores estadísticos para cada modelo desarrollado.

Modelo	MBE	MAE	RMSE	MPE	U95	RRMSE	t-stats	erMAX	MARE	R
Lineal	0,022	0,029	0,057	-2,876	0,112	4,147e-7	162,146	0,459	0,037	<b>0,932</b>
Cuadrático	0,015	<b>0,024</b>	<b>0,043</b>	-2,002	<b>0,095</b>	<b>3,144e-7</b>	147,214	<b>0,303</b>	<b>0,030</b>	0,915
Cúbico	0,017	0,025	0,047	-2,250	0,100	3,388e-7	155,642	0,305	0,031	0,928
Logarítmico	0,022	0,029	0,057	-2,884	0,113	4,167e-7	161,642	0,491	0,037	0,932
Exponencial	0,022	0,029	0,057	-2,876	0,112	4,147e-7	162,144	0,459	0,037	0,932
Potencial	0,022	0,029	0,057	-2,884	0,113	4,167e-7	161,633	0,491	0,037	0,932
Potencial con un termino	<b>0,013</b>	0,033	0,310	<b>-1,663</b>	0,860	2,247e-6	<b>17,210</b>	56,597	0,043	0,927
Inverso	0,022	0,029	0,058	-2,903	0,115	4,234e-7	159,598	0,854	0,037	0,931

Debido a que no hubo uniformidad en las tendencias de los resultados, se utilizó el indicador global de desempeño ( $GPI$ ) descrito en el trabajo de Jamil & Bellos con la finalidad de que un solo indicador pudiera agrupar a todos los errores estadísticos y entregara una tendencia del mejor ajuste de los datos. De esta forma, siguiendo el criterio descrito por Jamil & Bellos, los errores estadísticos de la tabla 5.2 fueron escalados entre 0 a 1, pudiendo a estos observarse en la tabla 5.3. A su vez, en esta tabla se agregan dos columnas adicionales a la derecha donde se pueden observar los resultados del  $GPI$  y el ranking del comportamiento

Tabla 5.3: Errores estadísticos normalizados, *GPI* y ranking (*RANK*) para cada modelo desarrollado.

Modelo	MBE	MAE	RMSE	MPE	U95	RRMSE	t-stats	erMAX	MARE	R	GPI	RANK
Lineal	0,981	0,546	0,052	0,022	0,022	0,052	1	0,003	0,520	1	0,042	3
Cuadrático	0,197	0	0	0,727	0	0	0,897	0	0	0	0,418	2
Cúbico	0,434	0,098	0,013	0,526	0,006	0,013	0,955	3,071e-5	0,099	0,757	0,853	1
Logarítmico	0,987	0,553	0,053	0,015	0,023	0,053	0,997	0,003	0,528	0,979	0,006	5
Exponencial	0,981	0,546	0,052	0,022	0,022	0,052	0,999	0,003	0,520	0,999	0,042	4
Potencial	0,987	0,553	0,053	0,016	0,023	0,053	0,996	0,003	0,528	0,979	0,006	6
Potencial con un termino	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0,705	-4,056	8
Inverso	1	0,571	0,056	0	0,026	0,056	0,982	0,010	0,547	0,935	-0,074	7

de cada modelo. Este ranking fue realizado considerando al número 1 como el modelo que determinó el *GPI* más alto. Los *GPI* calculados se encuentran en un rango entre  $-4,056$  a  $0,853$ , donde los modelos que obtuvieron el más bajo *GPI* corresponden a los modelos potencial con un termino, inverso y potencial con valores de  $-4,056$ ,  $-0,074$  y  $0,006$  respectivamente. Los modelos que lograron los mejores resultados mediante el *GPI* son el modelo lineal, cuadrático y cúbico. El modelo cúbico fue el que logró el mayor *GPI* con un valor de  $0,853$ , siendo por ende elegido este modelo como el más representativo de los datos utilizados.

El comportamiento del modelo cúbico, siendo contrastado con los datos utilizados, se puede observar en la figura 5.4. Se pueden identificar 4 grandes zonas que representan a la radiación global horizontal en los colores azul, celeste, verde y rojo. En la primera zona de color azul, se produce una gran densidad de puntos que tienen un índice de claridad cercano a  $0,1$  y un factor de exergía alrededor de  $0,67$ . El modelo cúbico inicia con un factor de exergía correspondiente a  $0,57$  para un  $k_t$  de  $0$ . Posteriormente, comienza a aumentar los valores entregados por el modelo, pasando por la zona de mayor concentración de puntos y aumentando su factor de exergía a medida que aumenta el índice de claridad. Cuando se acercan los puntos a un  $k_t$  de  $0,2$ , los factores de exergía de las mediciones se van dispersando, ampliando el rango de  $\psi_g$  entre  $0,66$  a  $0,8$ . Para el rango de  $0,2$  a  $0,4$  del  $k_t$ , se encuentran intensidades radiativas hasta los  $600 \frac{W}{m^2}$  de color verde en la zona inferior de la densidad de puntos. El modelo cúbico continúa aumentando paulatinamente los  $\psi_g$  calculados, pasando por la zona superior de la densidad de puntos que se encuentran cercanos a un índice de claridad de  $0,4$ .

Para un  $k_t$  entre  $0,4$  a  $0,6$ , las intensidades radiativas máximas aumentan a un valor alrededor de  $800 \frac{W}{m^2}$ . Estas intensidades son representadas en color amarillo, las que pueden apreciarse en la zona inferior de la densidad de puntos y también en la zona media cercana a un  $k_t$  de  $0,6$ . El modelo cúbico comienza a disminuir su aumento del  $\psi_g$  a medida que se acerca a un  $k_t$  de  $0,5$  y se estabiliza cuando se encuentra cercano a un  $k_t$  de  $0,6$  en adelante. Esta zona de color celeste por la que atraviesa el modelo, tiene intensidades radiativas cercanas a  $400 \frac{W}{m^2}$ . El área del  $k_t$  que va entre  $0,6$  a  $0,8$ , las intensidades radiativas máximas aumentan a valores por sobre los  $1000 \frac{W}{m^2}$ , siendo esto representados por mediciones con un color rojo. El modelo cúbico tiene una pequeña pero constante disminución del  $\psi_g$  calculado. La zona de mayor concentración de puntos por donde atraviesa el modelo posee intensidades radiativas que van entre  $400$  a  $1100 \frac{W}{m^2}$ . En el último rango, comprendido entre  $0,8$  a  $1$  para el  $k_t$ , las intensidades radiativas máximas se encuentran por sobre los  $1200 \frac{W}{m^2}$  para  $k_t$  cercanos a  $1$ . La densidad de puntos medidos en esta zona disminuye a medida que aumenta el  $k_t$ , lo que

indica que son pocas las mediciones que pueden encontrarse en este rango tan alto del índice de claridad. El modelo cúbico en esta zona se encuentra en el orden de  $\psi_g = 0,9$ , mientras que las mediciones se encuentran alrededor de 0,87.

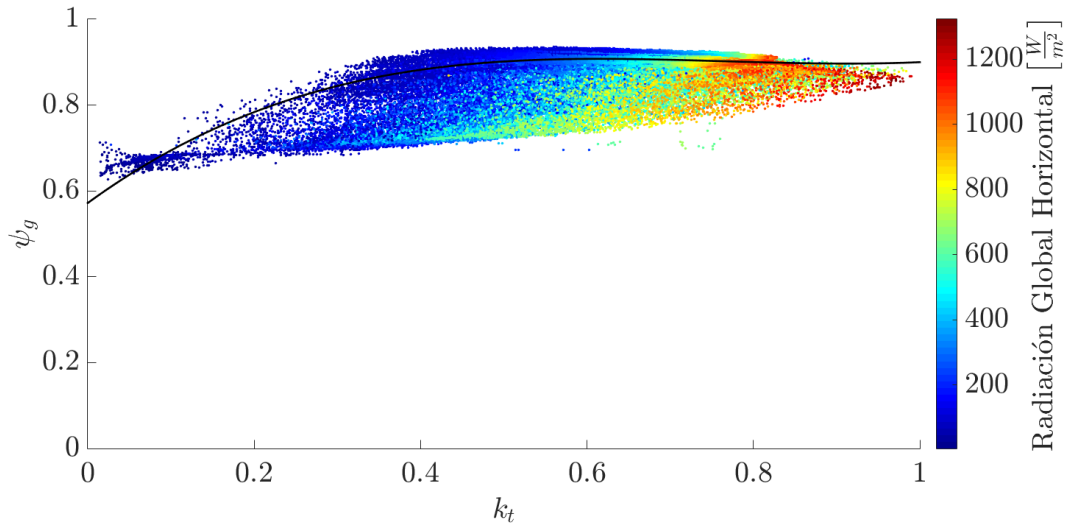


Figura 5.4: Comportamiento del modelo polinómico cúbico con respecto al factor de exergía de la radiación solar global.

El desarrollo de una expresión empírica para el factor de exergía de la radiación solar se basó en el trabajo de Pons, en donde se calcularon los contenidos exergéticos de la radiación solar global, difusa y directa. Se desarrollaron 8 expresiones mediante un análisis de regresión entre  $\psi_g$  con la formulación de Pons y el  $k_t$ . A su vez, se desarrolló un análisis estadístico con el que se evaluó el comportamiento de estas 8 expresiones con respecto al factor de exergía de Pons. Se determinaron 10 tipos diferentes de indicadores estadísticos para cada modelo, lo que resultó en que no hubo congruencia entre los indicadores. Por consiguiente, se utilizó el indicador global de desempeño (*GPI*), el que logró determinar cual era el modelo con el mejor ajuste. Este análisis resultó en la elección del modelo cúbico como el modelo que representa de mejor forma al factor de exergía de Pons. Debido a que los datos meteorológicos correspondían a un año completo en un espacio de tiempo de 1 minuto, se tuvo una gran dispersión para la contrastación del modelo cúbico con respecto a los datos (figura 5.4). En ese sentido, el modelo propuesto no representa de buena forma a los datos en los extremos del índice de claridad, ya que se aleja de la tendencia por donde van las mediciones. Esto se puede observar en el rango del  $k_t$  cercanos a 0 y a 1. El rango muy cercano a 0 corresponde a días con una gran nubosidad y con muy poca radiación global, lo que hace que esto influya de manera negativa en la estimación del factor de exergía del modelo propuesto. A su vez, para  $k_t$  cercanos a 1, corresponde a mediciones que toman valores muy cercanos a la constante solar, lo que hace que estas mediciones puedan ser atribuibles a otros fenómenos meteorológicos como el *CE*. Gracias al análisis de robustez desarrollado para el análisis de regresión, los puntos más alejados tienen un peso menor que los datos que están cercanos a la concentración de puntos. Esto se reflejó en el comportamiento de la expresión cúbica al atravesar las mediciones por la parte superior, lugar donde se encuentra efectivamente una mayor cantidad de datos.

## 5.2. Montaje Experimental

Una vez desarrollado el análisis estadístico y elegido el modelo que mejor se ajustó a los datos, se realizó el montaje experimental descrito en el capítulo de Metodología. Este montaje experimental consistió en un panel fotovoltaico colocado de forma horizontal en la azotea de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. El montaje tiene por finalidad realizar una validación experimental del modelo cúbico. Sin embargo, esta validación debe realizarse mediante un análisis de la segunda ley de la termodinámica para evaluar la exergía que entra y sale del sistema. Por ende, previo a realizar esta validación, se debe hacer un balance de energía basado en la primera ley de la termodinámica. Este balance de energía intentó evaluar que las mediciones realizadas, así como el modelo térmico y eléctrico desarrollado, tuvieran congruencia para que sus resultados fueran utilizados en el balance de exergía posterior. El modelo térmico realizado, mediante un análisis unidimensional transiente de diferencias finitas, entregó la temperatura de cada nodo evaluado a través del panel fotovoltaico. Para evaluar la congruencia de los resultados, se comparó la temperatura de la celda fotovoltaica y del tedlar por medio de las mediciones realizadas al panel. El modelo eléctrico, basado en el trabajo de Sánchez Barroso et al., también fue contrastado con las mediciones de potencia eléctrica producidas por el panel fotovoltaico. El microinversor utilizado para realizar esta medición tiene la restricción de tener una resolución máxima de un decimal. La campaña de medición para realizar el balance de energía correspondió a los días 10, 11, 12, 18 y 19 de Junio del 2019 entre las 9 de la mañana hasta las 16 horas. Los resultados de la comparación se realizaron por medio de un gráfico de dispersión entre la temperatura de la celda, temperatura del tedlar y potencia eléctrica los cuales pueden observarse en las figuras 5.5, 5.6 y 5.7 respectivamente.

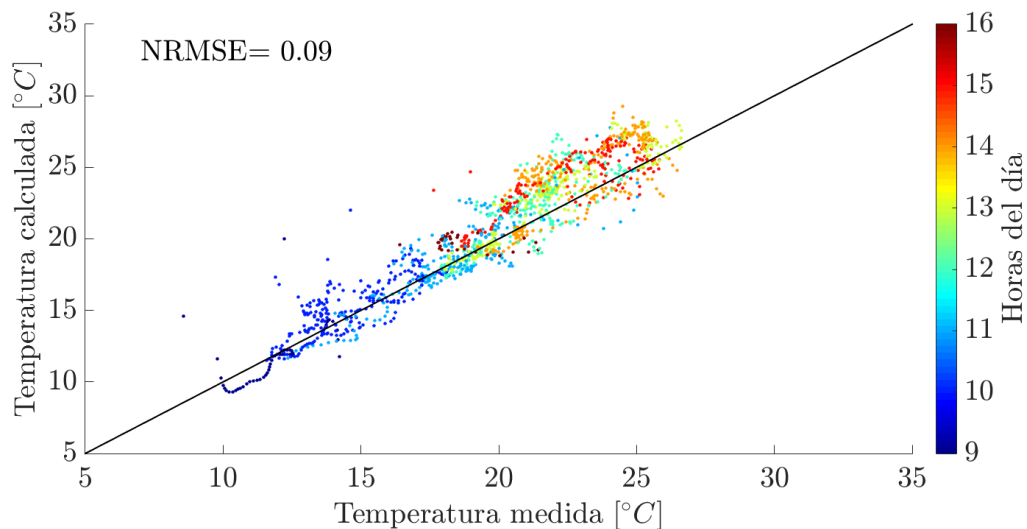


Figura 5.5: Dispersión entre la temperatura medida y calculada de la celda en el panel fotovoltaico.

La primera comparación del comportamiento del modelo térmico con las mediciones, se realizó con la temperatura de la celda en el panel fotovoltaico. Esta comparación puede apreciarse en la figura 5.5 y toma en consideración la temperatura calculada en el nodo central de la celda solar como el punto de referencia. Se usó este nodo en particular, debido

a que la medición de temperatura se encontraba en la misma celda fotovoltaica mediante la termocupla. En la figura se pueden observar las temperaturas registradas a lo largo de los días considerando las horas a las cuales fueron medidas. Las horas del día correspondientes a cada punto son visualizadas mediante diferentes intensidades de colores. Para las horas registradas antes del mediodía solar, se pueden observar que las temperaturas de la celda se encuentran entre los  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta los  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Al mediodía se registran temperaturas en todo el rango de temperaturas, lo que indica la variabilidad meteorológica de los días de estudio. El rango de horas de la tarde se encuentra entre las  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  a los  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las temperaturas más altas registradas se encuentran entre las 13 a 14 horas para los días de estudio. El indicador estadístico utilizado para evaluar que tan diferentes son los valores calculados y medidos, corresponde al Error Cuadrático Medio Normalizado ( $NRMSE$ ), con el que se puede evaluar la calidad de las estimaciones realizadas por el modelo térmico con respecto a las mediciones. De esta forma, la estimación de la temperatura de la celda tiene un  $NRMSE$  de 0,09 entre las temperaturas calculadas y medidas.

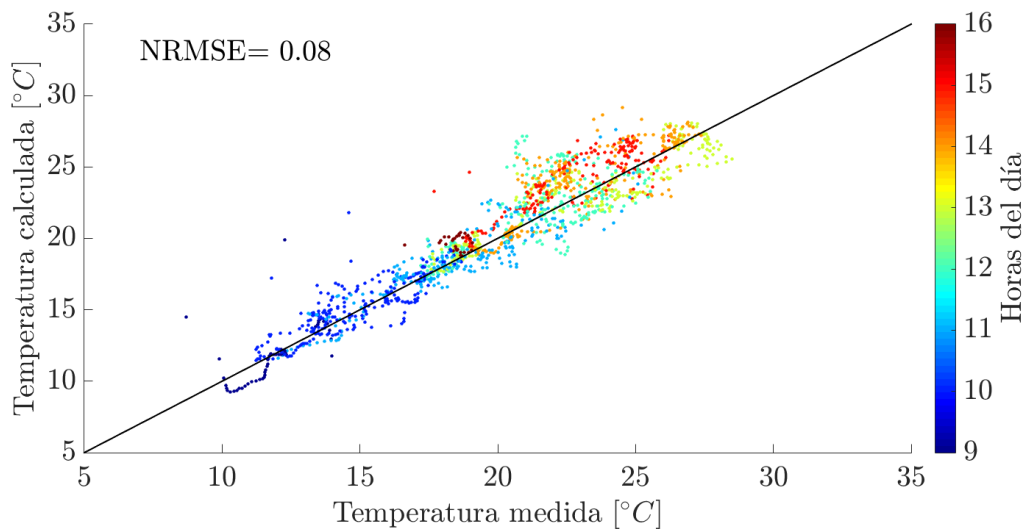


Figura 5.6: Dispersión entre la temperatura medida y calculada del tedlar en el panel fotovoltaico.

La evaluación de la temperatura del tedlar se puede observar en la figura 5.6. El nodo utilizado para realizar la comparación con las mediciones, fue el nodo que se encuentra en contacto con el ambiente debido a que la termocupla utilizada estaba en contacto con la superficie del tedlar. El comportamiento de las temperaturas del tedlar es similar al de la celda fotovoltaica, donde se registran por la mañana temperaturas menores a los  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con una temperatura mínima calculada de  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Al mediodía se pueden observar temperaturas que van entre  $12$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por la tarde el rango de temperaturas aumenta, encontrándose algunos puntos que van entre los  $18$  a  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las temperaturas máximas se encuentran entre las 13 a 14 horas y corresponden a temperaturas alrededor de los  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  para las mediciones y el modelo. El  $NRMSE$  para la temperatura del tedlar equivale a 0,08, lo que indica que el modelo está estimando de buena forma las temperaturas al compararlas con las mediciones realizadas mediante la termocupla.

La potencia eléctrica medida por el microinversor M215 y la estimación del modelo eléctrico se puede apreciar en la figura 5.7. En la evaluación de la potencia eléctrica, influye de

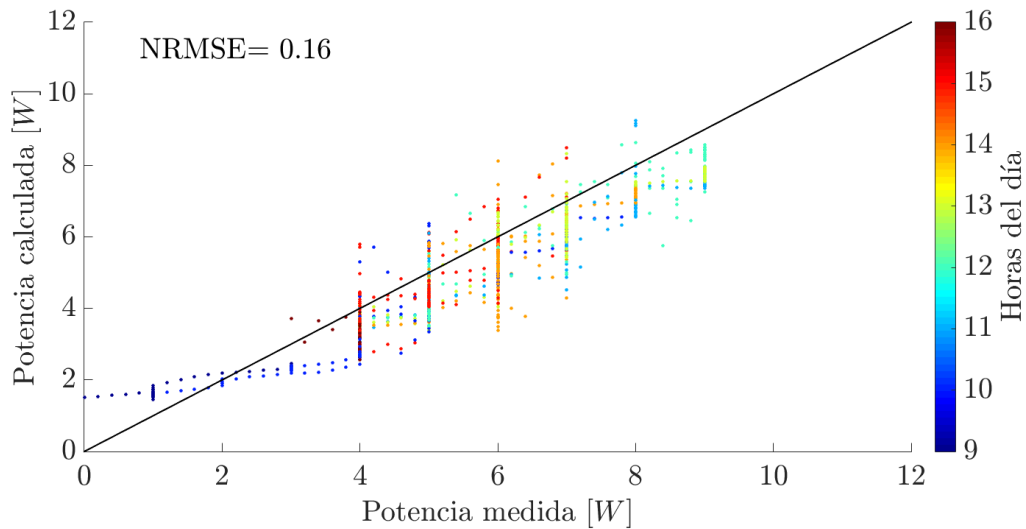


Figura 5.7: Dispersión entre la potencia medida y calculada de la potencia eléctrica generada por el panel fotovoltaico.

manera negativa que las mediciones tengan la restricción de que sean registrados los valores con solo un decimal, haciendo que el comportamiento de las mediciones al evaluarlas con la potencia calculada por el modelo se originen concentraciones de puntos de manera vertical en cada decimal para todo el rango de evaluación. En las horas iniciales del día, se observa que la potencia calculada por el modelo comienza con una potencia estimada de  $1,6\text{ W}$ , mientras que las mediciones para estos puntos se encuentran cercanos a  $0\text{ W}$ . Cuando la potencia medida llega a  $2\text{ W}$ , la potencia calculada entrega un resultado muy cercano a la medición. A medida que aumenta la potencia eléctrica, la mayoría de los puntos encuentran un valor más alto con la medición de la potencia. Este comportamiento puede deberse a la resolución de un decimal de la medición, haciendo que se aproximen los valores medidos y cambiando a su vez el comportamiento de las mediciones con respecto a la potencia calculada por el modelo eléctrico. La potencia eléctrica en condiciones nominales entrega una potencia eléctrica de  $10\text{ W}$ . En este caso, la potencia medida del panel fotovoltaico se encuentra entre  $0$  a  $9\text{ W}$ , registrándose una mayor concentración de puntos cuando mide una potencia de  $6\text{ W}$ . Como puede apreciarse por las intensidades de colores, los  $6\text{ W}$  ocurren entre las 13 a 15 horas del día. El *NRMSE* de la potencia eléctrica alcanza los  $0,16$  para el periodo de estudio.

El balance de energía desarrollado al panel fotovoltaico, tuvo por finalidad evaluar si la modelación térmica y eléctrica es correcta para utilizarla en el desarrollo de la validación del modelo propuesto mediante el balance de exergía. La modelación térmica se comparó con las mediciones de temperatura de la celda solar y del tedlar, logrando un bajo error en el indicador estadístico utilizado. La modelación eléctrica fue desfavorecida por la restricción en las mediciones de potencia eléctrica a un decimal, lo que conllevó a un aumento del error *NRMSE* a  $0,16$ . Sin embargo, este indicador estadístico no entregó un error muy alto a pesar de esta restricción. Además, el comportamiento de los puntos en el gráfico de dispersión (figura 5.7) indican que la estimación del modelo no está muy alejado de las mediciones. Por ende, el modelo eléctrico también entrega resultados aceptables con los que puede desarrollarse el posterior balance de exergía al sistema.



### 5.3. Validación Experimental

Como se pudo evaluar mediante el indicador estadístico  $NRMSE$ , las estimaciones del modelo térmico y eléctrico alcanzaron buenos resultados con respecto a las mediciones en el panel. El  $NRMSE$  de la potencia eléctrica evaluada entre el modelo eléctrico y la medición del microinversor entregó un valor de 0,16, más alto que los resultados del modelo térmico. Este aumento del  $NRMSE$  se debe principalmente a la restricción del microinversor de registrar datos con una resolución máxima de un decimal, resultando esto en un aumento del error calculado por el indicador estadístico utilizado. Sin embargo, los resultados del indicador estadístico para las tres variables evaluadas entregaron resultados aceptables, lo que indica que el modelo térmico y eléctrico puede ser utilizado para la posterior evaluación de un balance de exergía mediante la segunda ley de la termodinámica. Este nuevo análisis siguió la evaluación desarrollada por Akyuz et al. vista en el capítulo anterior, donde se desarrolló un análisis de los flujos exergéticos que entran y salen al panel. El balance de exergía del sistema fotovoltaico ( $\psi_{Sys}$ ) culmina en la expresión 4.48 vista en el capítulo anterior, la cual reescrita para este caso queda como,

$$\psi_{Sys} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \dot{Q}}{Ex_{rad}} \quad (5.1)$$

La expresión 5.1 lleva en el numerador de la expresión a la exergía de la corriente eléctrica y la exergía de las pérdidas térmicas del panel fotovoltaico. Los valores del numerador de la expresión se toman de los resultados del balance de energía desarrollado previamente. En el denominador de la expresión se encuentra la exergía de la radiación solar ( $Ex_{rad}$ ).  $Ex_{rad}$  es utilizado como medida de comparación entre la exergía de la radiación solar mediante el modelo propuesto ( $Ex_{Mod}$ ) y los modelos de Petela ( $Ex_{Petela}$ ), Pons ( $Ex_{Pons}$ ) y Jeter ( $Ex_{Jeter}$ ). Por ende, se realizaron cuatro balances de exergía al sistema fotovoltaico que pueden verse a continuación,

$$\psi_{Sys,Mod} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \dot{Q}}{Ex_{Mod}} \quad (5.2)$$

$$\psi_{Sys,Petela} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \dot{Q}}{Ex_{Petela}} \quad (5.3)$$

$$\psi_{Sys,Pons} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \dot{Q}}{Ex_{Pons}} \quad (5.4)$$

$$\psi_{Sys,Jeter} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_0}{T_{cel}}\right) \dot{Q}}{Ex_{Jeter}} \quad (5.5)$$

donde  $\psi_{Sys,Mod}$  es el balance de exergía del sistema fotovoltaico utilizando el modelo propuesto,  $\psi_{Sys,Petela}$  el balance de exergía mediante la expresión de Petela,  $\psi_{Sys,Pons}$  el balance por medio del trabajo de Pons y  $\psi_{Sys,Jeter}$  el balance de exergía usando el modelo de Jeter. La elección de estos tres modelos de la literatura se basó en que el modelo de Petela corresponde al máximo trabajo útil que se puede extraer de la radiación solar en las condiciones donde no exista atenuación atmosférica. El modelo de Pons fue el modelo con el que se desarrolló la expresión propuesta, por lo que es importante corroborar el comportamiento del modelo original de Pons con la expresión empírica que se basó en él. Por último, el modelo de Jeter es el modelo que se usa en la literatura para evaluar el contenido exergético de un sistema fotovoltaico ([26]). Para desarrollar el balance de exergía, se tomaron los dos días más característicos de la campaña de medición del balance de energía, correspondientes a un día despejado y un día nublado. El día despejado corresponde al día 18 de Junio del 2019, mientras que el día nublado se representa mediante el día 19 de Junio del 2019.

### 5.3.1. Día Despejado

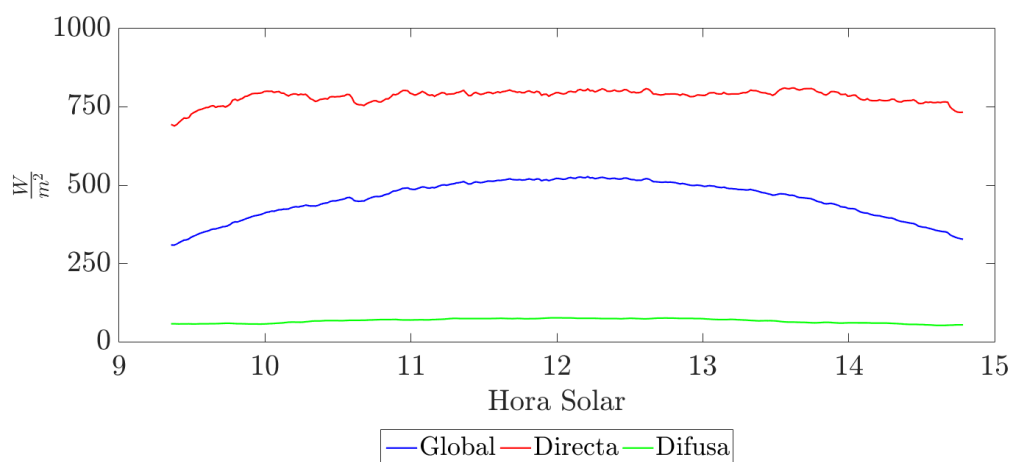


Figura 5.8: Comportamiento de la radiación solar global horizontal, directa normal y difusa horizontal del día 18 de junio del año 2019.

En la figura 5.8 se observan las mediciones de la radiación global horizontal, directa normal y difusa horizontal para el día 18 de Junio del 2019, el cual representa un día completamente despejado. Es por esta razón que la radiación difusa horizontal se mantuvo con valores bajos a lo largo del día, teniendo una mínima de  $52 \frac{W}{m^2}$  a las 14:30 horas y una máxima de  $76 \frac{W}{m^2}$  al mediodía. La radiación directa normal a lo largo del día también mantiene un comportamiento estable. Al inicio de la campaña de medición, la radiación directa normal alcanza una intensidad de  $690 \frac{W}{m^2}$  donde posteriormente comienza un aumento paulatino hasta alcanzar los  $790 \frac{W}{m^2}$  cercano a las 10 de la mañana. Durante el resto del día se mantiene oscilando alrededor de este valor de intensidad. Cerca de las 14 horas comienza una disminución de la intensidad radiativa de la radiación directa normal, llegando al final de la campaña de medición a una intensidad de  $733 \frac{W}{m^2}$ . Con todo lo anterior, se puede apreciar la curva de la

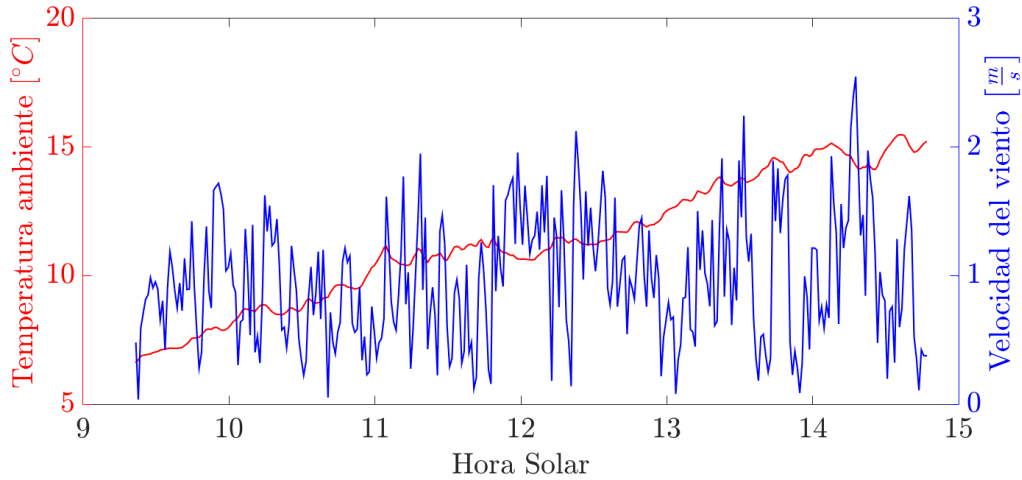


Figura 5.9: Temperatura ambiente y velocidad del viento del día 18 de junio del año 2019.

radiación global horizontal sin grandes variaciones durante todo el periodo de estudio. El día inicia con una intensidad de  $308 \frac{W}{m^2}$  a las 9:30 de la mañana. Al mediodía la radiación global horizontal alcanza su valor máximo correspondiente a  $522 \frac{W}{m^2}$ . La medición finaliza con un registro de  $328 \frac{W}{m^2}$  a las 14:50.

Las otras variables meteorológicas necesarias para el balance de exergía al panel fotovoltaico son la temperatura ambiente y la velocidad del viento, las cuales pueden observarse en la figura 5.9 como las líneas de color rojo y azul, respectivamente. La temperatura durante el día de estudio tiene un comportamiento ascendente durante todo el rango de tiempo, iniciando con un primer valor registrado de  $6,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Al mediodía, la temperatura ambiente es de  $11 \text{ }^\circ\text{C}$  y al finalizar el día de medición alcanza una temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . La velocidad del viento es baja y presenta un comportamiento muy variable durante el día. Durante la mañana, se encuentra una mínima de  $0,03 \frac{m}{s}$  a las 9:20 de la mañana y un peak a las 11:20 con una velocidad de  $2 \frac{m}{s}$ . Durante la tarde, la mayor velocidad registrada se encuentra a las 14:15 con un peak de  $2,5 \frac{m}{s}$ , la cual es la mayor velocidad medida durante el día despejado.

Los datos meteorológicos observados anteriormente fueron recolectados con la finalidad de realizar un balance de exergía al panel fotovoltaico. Se realizó una validación del modelo térmico y eléctrico con las mediciones del panel para utilizar los valores estimados de ambos modelos en el balance de exergía. La expresión 4.47 y 4.48 vistas en el capítulo anterior tienen en el numerador la exergía de la electricidad producida y las pérdidas térmicas del panel fotovoltaico. Estas dos variables fueron las mismas para los 3 casos de comparación del modelo propuesto. En el denominador de la expresión se encuentra la exergía de la radiación solar, el cual es reemplazado por la expresión desarrollada en este trabajo. A su vez, la exergía de la radiación solar tomó las formas de los modelos de Petela, Pons y Jeter a modo de comparación entre estos modelos y el modelo propuesto. Los gráficos de dispersión desarrollados para realizar esta comparación se pueden observar en las figuras 5.10, 5.11 y 5.12. Además, se usan dos líneas punteadas en los gráficos para representar al indicador estadístico *NRMSE* y como los datos se encuentran adentro o fuera del rango promedio de este indicador.

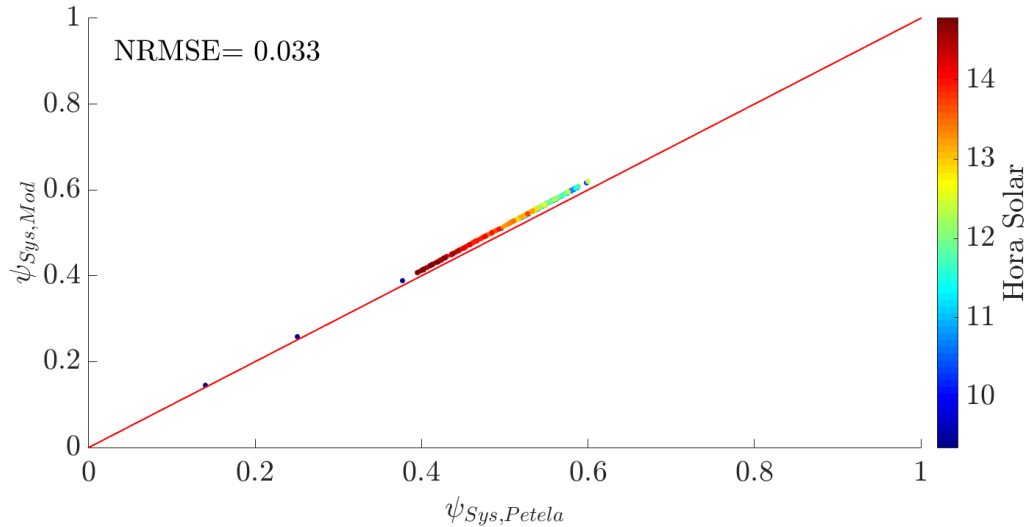


Figura 5.10: Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Petela.

Como se puede apreciar en la figura 5.10, la exergía del sistema mediante el modelo propuesto ( $\psi_{Sys,Mod}$ ) determina valores mayores que la exergía del sistema mediante la expresión de Petela ( $\psi_{Sys,Petela}$ ). Como el numerador de ambas expresiones es el mismo, esta diferencia proviene del factor de exergía de la radiación solar utilizado, el cual se encuentra en el denominador de la expresión. Por ende, el modelo propuesto calcula valores menores que la formulación de Petela, lo cual se encuentra en concordancia con la propuesta de que el modelo de Petela calcula la exergía de la radiación solar no diluida. Por ende, expresiones que tomen en consideración la atenuación atmosférica mediante el  $k_t$ , deben resultar en un valor menor que la expresión de Petela. Se utilizaron intensidades de colores para visualizar el comportamiento del factor de exergía a lo largo del día, en donde se observan tres puntos fuera de la densidad de puntos que corresponden a una hora muy temprana de la mañana. Estos tres puntos tienen un factor de exergía de aproximadamente 0,14, 0,25 y 0,38 para ambos ejes. Los puntos con mayor contenido exergético corresponden a las horas que van comprendidas entre las 11 a las 13 horas del día. El indicador estadístico *NRMSE* calcula un error de 0,033 entre  $\psi_{Sys,Mod}$  y  $\psi_{Sys,Petela}$ .

En la figura 5.11 se encuentra la comparación desarrollada entre el factor de exergía del sistema mediante el modelo propuesto y la expresión de Pons. El modelo de Pons fue el que se utilizó como base para desarrollar las expresiones propuestas en este trabajo, por lo que era esperable que los resultados del balance de exergía con el modelo propuesto fuera muy similar al desarrollado con el modelo de Pons. A su vez, se puede observar que el balance de exergía es mayor utilizando el modelo propuesto, lo que denota que el factor de exergía del modelo propuesto es menor que el modelo de Pons para este día particular. El comportamiento del contenido exergético con respecto a las horas es el mismo que se describió anteriormente. El *NRMSE* en este caso corresponde a un valor de 0,014, el menor de los resultados de este indicador estadístico para el balance de exergía.

La última evaluación realizada corresponde al balance de exergía del modelo propuesto con el balance mediante el modelo de Jeter. Este modelo es usado en la literatura para

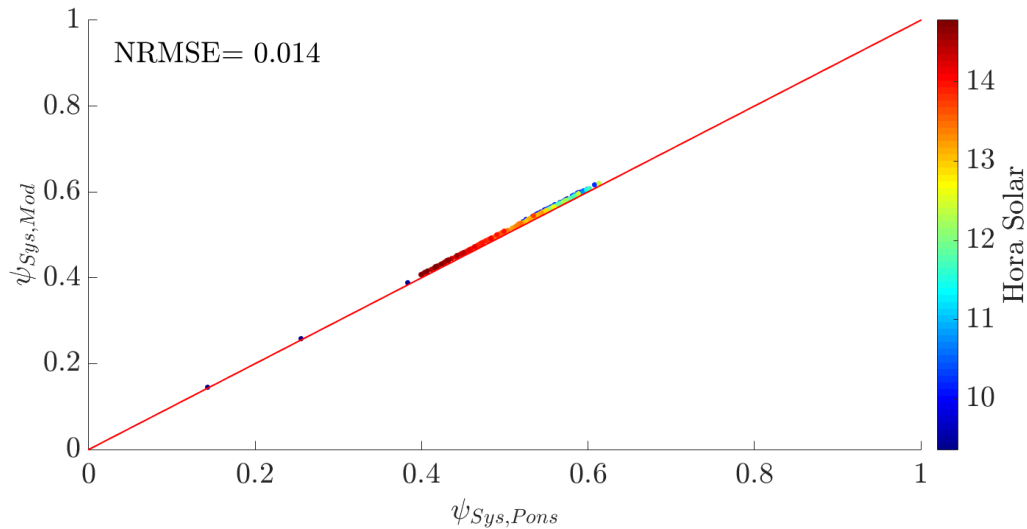


Figura 5.11: Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Pons.

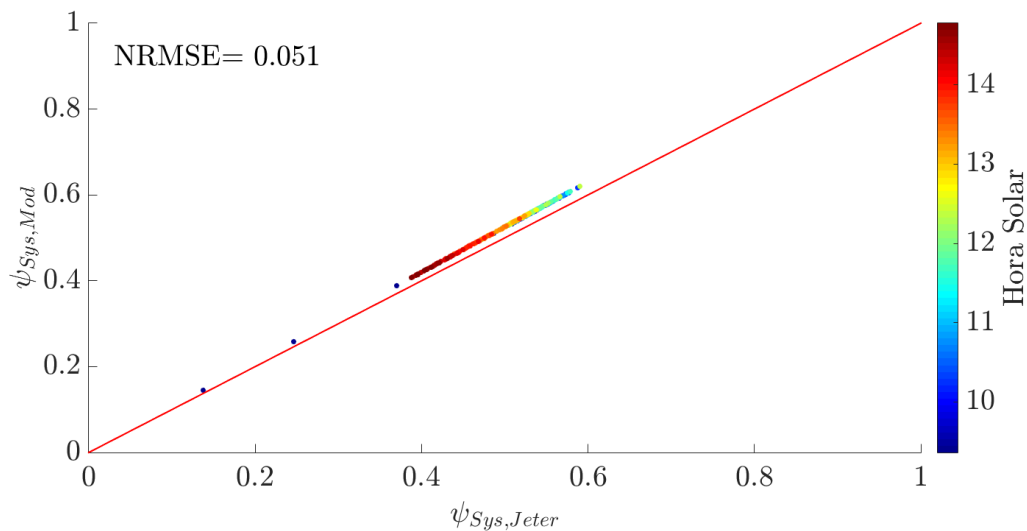


Figura 5.12: Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Jeter.

realizar el balance de exergía a un panel fotovoltaico, por lo que fue tomado también en consideración para realizar la validación. Como puede apreciarse en la figura 5.12, la diferencia del indicador  $NRMSE$  es de 0,051, el mayor entre los casos evaluados. Esta mayor diferencia tiene congruencia en la evaluación que se hizo en la figura 3.3, donde se observa que para todo el rango de temperaturas radiativas, el modelo de Jeter entrega valores superiores a lo entregado por Petela. Además, se puede observar que el factor de exergía entregado por el modelo es menor que la formulación de Jeter.

### 5.3.2. Día Nublado

El día nublado fue representado por el día 19 de Junio del 2019 y se puede observar el comportamiento de la radiación global, difusa y directa en la figura 5.13. Como se puede apreciar en esta figura, el día tiene una gran variabilidad a lo largo de todas las horas. Al inicio del día, la radiación directa es prácticamente inexistente, mientras que la radiación difusa y global poseen el mismo valor, representando entonces que la nubosidad en ese rango de horas fue total. A contar de las 11 de la mañana en adelante, se tiene un comportamiento irregular, lo que significa que en este día en particular hubo instantes de tiempo donde el cielo se despejó. Durante la tarde, la radiación directa aumentó hasta llegar a los  $509 \frac{W}{m^2}$  a las 13 horas. La intensidad máxima de la radiación global correspondió a las 11:10 de la mañana con una intensidad de  $611 \frac{W}{m^2}$ . La temperatura ambiente y la velocidad del viento se pueden observar en la figura 5.14. En este día la temperatura ambiente es más alta que el día anterior, en donde la máxima registrada de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ocurre a las 14:30 horas. La velocidad del viento presenta un comportamiento menos variable que el del día anterior, donde la máxima velocidad se registró a las 14:08 con  $2 \frac{m}{s}$ .

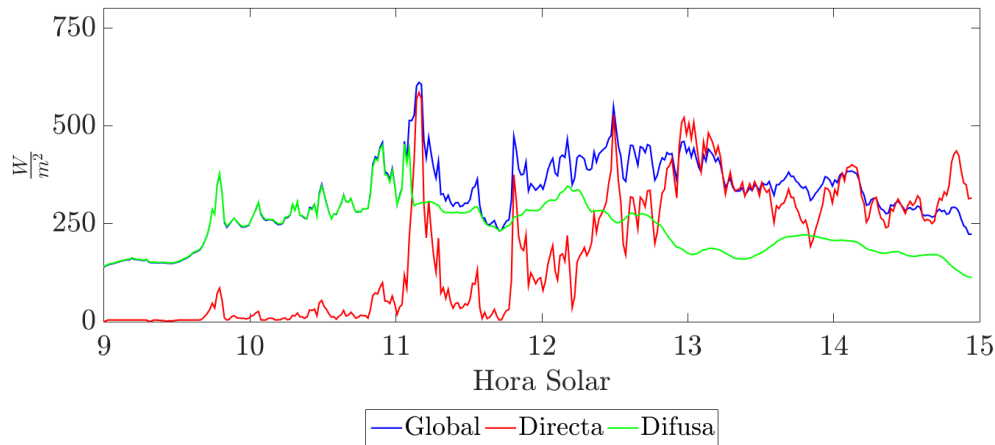


Figura 5.13: Comportamiento de la radiación solar global horizontal, directa normal y difusa horizontal del día 19 de junio del año 2019.

Mediante los datos meteorológicos de este día con una gran nubosidad, se desarrollaron las mismas evaluaciones con respecto a los modelos de Petela, Pons y Jeter. En primer lugar, se evaluó el comportamiento del modelo cúbico con respecto al modelo de Petela, el cual puede observarse en la figura 5.15. Debido a que en este día la variabilidad de la radiación solar es muy alta, los resultados del indicador  $NRMSE$  es mayor en comparación del día despejado. En este día nublado el  $NRMSE$  ascendió a 0,133. Se puede observar además como en la mañana y en la tarde, representados con los colores azul y rojo, son los que obtienen un  $\psi_{Sys}$  menor usando el modelo de Petela, así como también el modelo cúbico. A diferencia de lo ocurrido en el día despejado, en este día nublado se puede observar claramente como la exergía del sistema es diferente en la mañana que por la tarde. Además, se pueden observar dos puntos cercanos a las 11 de la mañana que tienen el mayor contenido exergético del día. Estos dos puntos equivalen a las tres mediciones máximas de la radiación solar del día

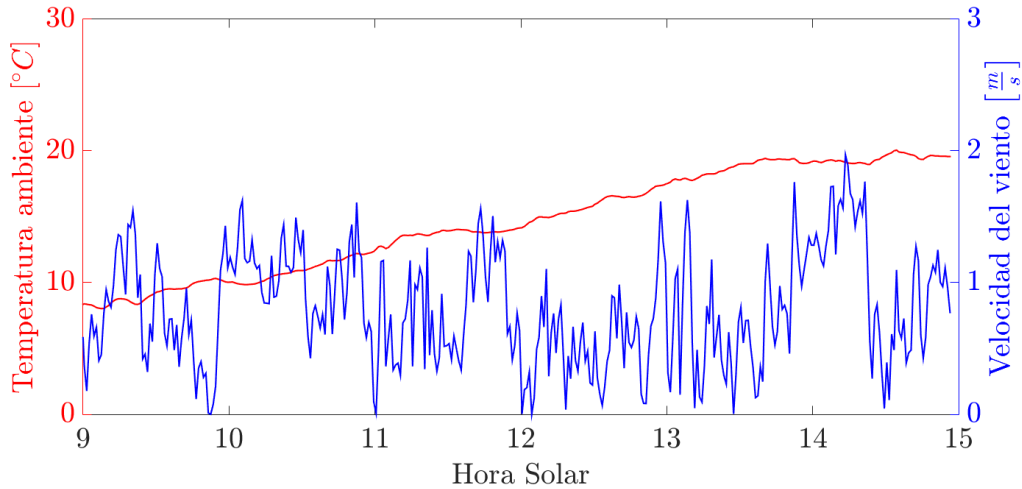


Figura 5.14: Temperatura ambiente y velocidad del viento del día 19 de junio del año 2019.

nublado. Finalmente, el modelo cúbico logra resultados menores que el modelo de Petela, misma situación ocurrida en el día despejado.

Para este día nublado el modelo cúbico entrega resultados mayores que el modelo de Pons, tal como puede observarse en la figura 5.16. Se puede observar que los  $\psi_{S_{ys}}$  durante la mañana y en la tarde son muy similares mediante el modelo cúbico y la expresión de Pons. Esta es una situación diferente a la que se describe mediante la evaluación con el modelo de Petela, donde las exergías son diferentes durante la mañana y en la tarde. Además, se puede observar como aumenta la diferencia entre las exergías calculadas en las horas cercanas al mediodía. El indicador  $NRMSE$  en este caso es de un 0,094, mayor que la evaluación para el día despejado.

La evaluación con el modelo de Jeter se puede observar en la figura 5.17. El comportamiento de los datos calculados en la figura es muy similar al ocurrido con el modelo de Petela. De manera similar a lo ocurrido en el día despejado, para este día nublado el modelo cúbico es menor que el modelo de Jeter con una diferencia de  $NRMSE = 0,151$ , la más alta diferencia entre los modelos evaluados. Se puede observar además una clara diferencia de los contenidos exergéticos para la mañana y en la tarde.

La validación de la expresión del factor de exergía propuesto se desarrolló mediante un balance de exergía a un sistema fotovoltaico basado en el trabajo de Akyuz et al. Esta validación consistió en una comparación del balance de exergía del sistema utilizando la expresión propuesta, con balances de exergía mediante diferentes modelos de la literatura. Estos modelos de la literatura fueron las formulaciones de Petela, Pons y Jeter. En la expresión del balance de exergía, la exergía de la radiación solar se encuentra en el denominador de la expresión. Por ende, este valor es el que se toma como punto de comparación entre el modelo propuesto y los modelos de la literatura. Además, se realizó el balance de exergía para un día despejado y otro nublado, utilizando para ello los dos días más representativos de la campaña de medición del balance de energía.

El día despejado se pudo observar en las figuras 5.10, 5.11 y 5.12, donde la evaluación

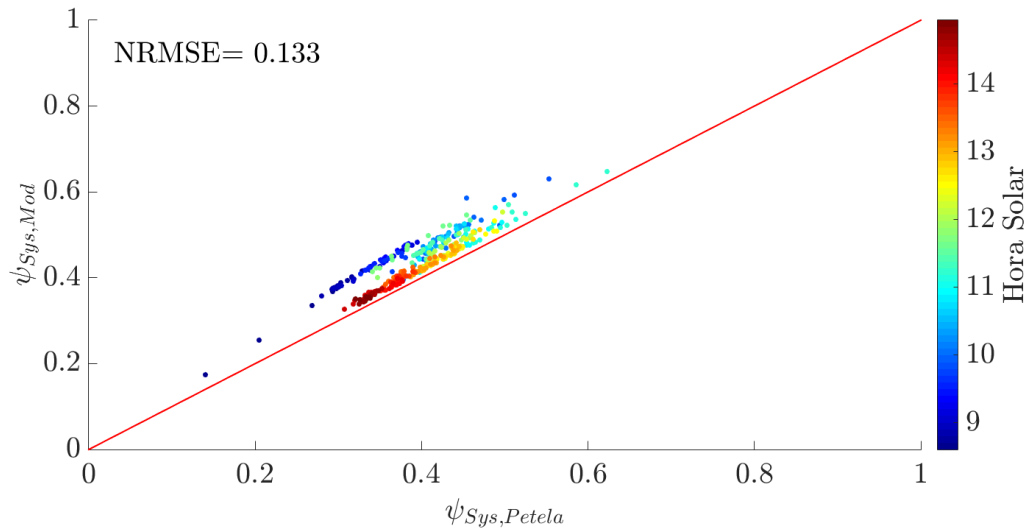


Figura 5.15: Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Petela.

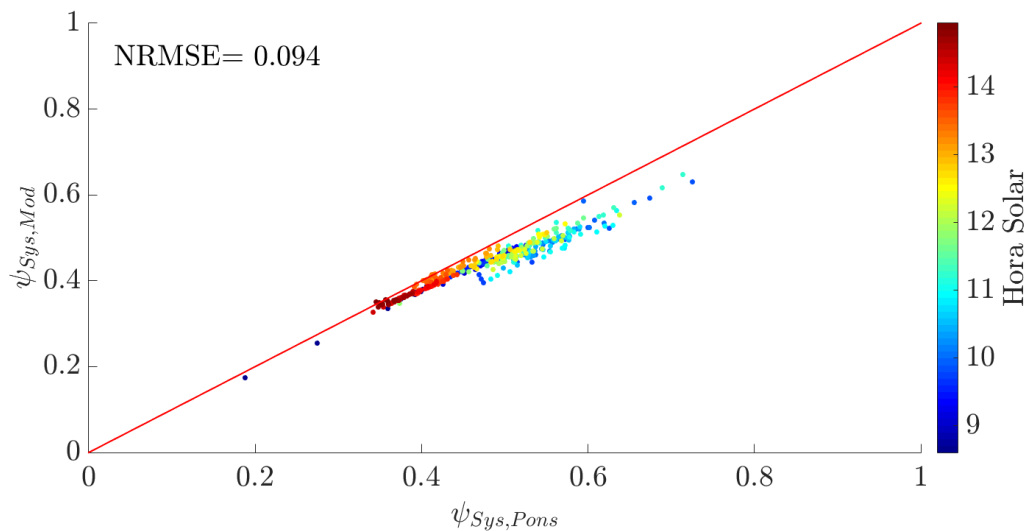


Figura 5.16: Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Pons.

mediante el indicador estadístico del *NRMSE* entregó buenos resultados para todas las comparaciones. El *NRMSE* más alto corresponde a la evaluación realizada entre los balances de exergía por el modelo propuesto y la formulación de Jeter con un 0,051. Esto tiene congruencia al quedar demostrado en la figura 3.3 que el modelo de Jeter entrega valores superiores que el modelo de 1964, lo que en consecuencia significó que el *NRMSE* fuera el mayor de todos los modelos evaluados. La comparación con el modelo de Petela también resultó en que los valores del modelo propuesto fueran menores. El modelo de Pons fue en el que se basó el análisis de regresión para desarrollar el modelo propuesto. Por ende, es de suma importancia también evaluar el comportamiento del modelo propuesto con el modelo de Pons. El resultado del *NRMSE* indica que sus resultados son muy cercanos, con un 0,014. Debido a que las mediciones usadas fueron de un día sin nubosidad, no se logra apreciar una



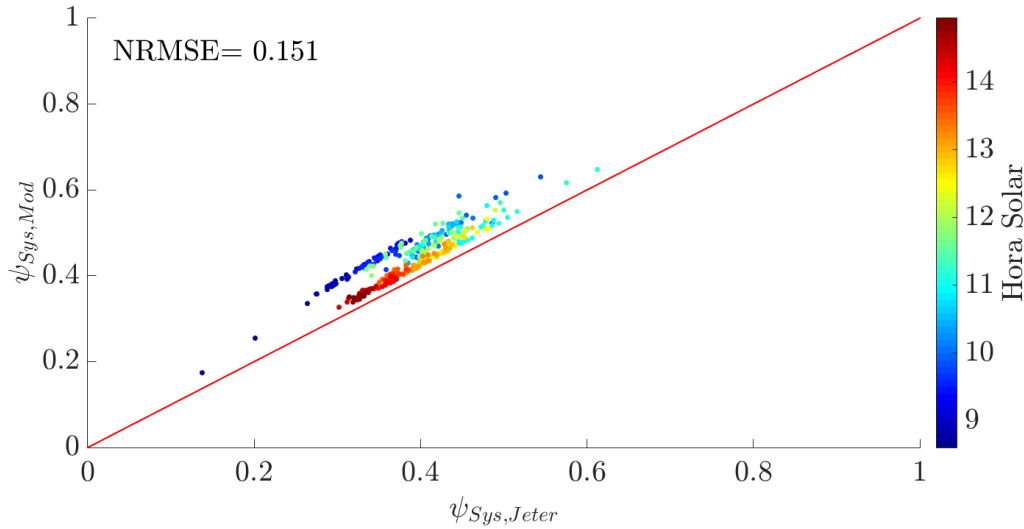


Figura 5.17: Dispersión entre el factor de exergía del sistema fotovoltaico calculado mediante el modelo propuesto y la formulación de Jeter.

diferencia entre los factores de exergía de la mañana y de la tarde, lo que hace inferir que el contenido exergético para un día despejado es el mismo durante las mañanas y las tardes.

La evaluación mediante el día nublado se realizó en las figuras 5.15, 5.16 y 5.17. Debido a la gran variabilidad de la radiación durante el día, los resultados del indicador estadístico aumentaron para todas las evaluaciones. Así mismo, se puede apreciar una diferencia notoria entre los contenidos exergéticos de la mañana y la tarde. Con la evaluación de los modelos de Petela y Jeter se puede apreciar como el contenido exergético es diferente durante las mañanas y en las tardes, cosa que no ocurre mediante la evaluación con el modelo de Pons. Esta diferencia puede atribuirse a que los modelos de Petela y Jeter dependen íntegramente de la temperatura ambiente, la cual en este día asciende a una temperatura de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Además, la radiación solar es muy variable durante el día, lo que hace que durante la mañana la radiación directa sea muy pequeña y casi inexistente durante las primeras horas, y en la tarde ascienda hasta los  $400\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Como el contenido exergético de la radiación directa es mayor que la difusa, es esperable que los contenidos exergéticos sean diferentes para el día nublado. Esto se puede observar en las figuras 5.15 y 5.17 donde el contenido exergético del sistema fotovoltaico es mayor durante la mañana que por la tarde. Por consiguiente, la exergía de la radiación solar es mayor por la tarde que por la mañana, debido a que se encuentra en el denominador de la expresión del balance de exergía.

## 5.4. Discusión

La estimación del máximo trabajo útil que puede utilizarse de la radiación solar, es un área de estudio que continua en desarrollo actualmente. Conocer el valor de la exergía radiativa facilitará la estimación de la producción energética en los procesos industriales reales. La medición de las condiciones radiativas no es suficiente para evaluar la factibilidad de una

instalación solar, ya que existe gran cantidad de variables atmosféricas que afectan a la radiación en su paso por la atmósfera terrestre. La generación de entropía que ocurre en la atmósfera se debe a la gran cantidad de moléculas que se encuentran en el paso del flujo radiativo, donde cada molécula afecta de forma diferente a la energía radiativa que posee. Cada molécula en suspensión atenúa a la radiación en diferentes longitudes de onda, produciéndose así una generación de entropía y pérdida de energía en el flujo radiativo que llega a la superficie terrestre. A su vez, estas moléculas producen tres fenómenos conocidos como reflexión, absorción y transmisión de las ondas electromagnéticas. La evaluación de como afectan las diferentes moléculas del aire al paso de la onda radiativa se debe realizar para todas las longitudes de onda del espectro solar.

Los primeros modelos que evaluaban la exergía radiativa consideraron a la radiación sin pérdidas de energía en su paso por la atmósfera. Esta evaluación se denomina radiación no diluida, donde se desarrollaron los primeros modelos en la década del 60. En los años posteriores se evaluó a la exergía radiativa considerando los efectos de atenuación. Este nuevo enfoque se denominó exergía de la radiación diluida, lo que llevó a expresiones que determinaban el contenido exergético de la radiación solar para una longitud de onda en particular. Estos dos enfoques de evaluación son complementarios para el concepto de exergía radiativa, ya que uno se refiere en la evaluación de la radiación directa (no diluida) y el otro a la radiación difusa (diluida), las dos componentes que conforman a la radiación solar global.

La estimación de la exergía radiativa también se ha explorado en el ámbito de los análisis empíricos. Este tipo de evaluaciones se realizan mediante un análisis de regresión, en donde se desarrollan expresiones del factor de exergía radiativo en base a otra variable meteorológica. Este método de análisis se desarrolla con el fundamento de que no siempre se pueden tener los datos meteorológicos de la radiación directa, difusa y global para toda la superficie del planeta. Los componentes de la radiación son mediciones que se realizan en base a estaciones meteorológicas de alto costo, lo que hace difícil realizar una medición para grandes territorios. Existen también estimaciones de las componentes radiativas que se realizan por medio de satélites, donde estiman las tres variables de la radiación para grandes espacios de superficie. Las mediciones satelitales son corroboradas con estaciones meteorológicas en la superficie, entregando de esta forma una validación de los datos estimados. Sin embargo, en muchos casos la validación se realiza con una estación muy lejana al lugar de estudio deseado, haciendo que el error de la estimación sea muy grande. De esta forma, poder conocer el contenido exergético a través de otras variables meteorológicas es un gran beneficio para las zonas que no cuenten con mediciones confiables de las tres componentes de la radiación solar. De las tres componentes de la radiación solar, la que es medida con mayor frecuencia en las estaciones meteorológicas es la radiación solar global. Existe una gran cantidad instrumentos que miden la radiación global en una amplia gama de precios, lo que hace que su uso sea muy extendido en las mediciones que se realizan en la superficie terrestre. Por esta razón, es posible utilizar a la radiación global como base para la estimación de un modelo empírico de la exergía de la radiación solar.

Como se pudo apreciar en este capítulo, el desarrollo del modelo cúbico logró buenos resultados para los dos casos probados. El hecho de probar al modelo con un día despejado y otro nublado, se debe a que de esta forma se puede evaluar al modelo en condiciones climáticas muy diferentes. Durante el día despejado, el modelo cúbico logró un bajo *NRMSE* al ser

comparado con otros modelos de la literatura, lo que indica que el comportamiento del modelo es muy bueno para este tipo de condiciones climáticas. Con respecto al día nublado, los errores aumentaron debido a la variabilidad de la nubosidad para el caso de estudio. Sin embargo, aún logra obtener resultados aceptables dentro del área meteorológica. De esta forma, el modelo cumple con entregar una buena estimación de la exergía de la radiación solar para la ciudad de Santiago de Chile bajo diferentes condiciones climáticas.

# Capítulo 6

## Conclusiones

Este trabajo tuvo por objetivo el desarrollo de un modelo empírico de la exergía de la radiación solar utilizando las condiciones particulares de nuestro país. Este modelo es el primer intento en Chile por estimar la exergía radiativa, lo cual abre las puertas para que siga siendo estudiada en el futuro. El factor de exergía para la radiación solar se desarrolló con una base de datos meteorológica de la ciudad de Santiago de Chile correspondiente al año 2018. Esta base de datos tuvo un registro cada 1 minuto, lo que hace que sea imperante realizar un proceso de filtrado a los datos. Esta filtración se realizó siguiendo diferentes criterios usados en la literatura, lo que hizo que se eliminaran una gran cantidad de datos espurios que pudieron haber afectado negativamente el análisis posterior. El modelo propuesto tomó como base al modelo de Pons, que logra estimar el contenido exergético de la radiación directa y difusa por separado. Pons logró estimar por primera vez las entropías de ambos flujos radiativos válidos para una amplia gama de frecuencias, lo que hace que su modelación sea tomada en consideración para realizar el análisis de regresión por sobre otros modelos exergéticos de la literatura. El criterio de evaluación estadístico que resultó en la elección del modelo cúbico fue tomado en consideración debido a las experiencias encontradas en la literatura. Los trabajos donde se proponían modelos empíricos para la exergía radiativa no lograban determinar una única tendencia para todos los indicadores estadísticos. Es por esto que se usó el indicador global de desempeño con tal de hacer un ranking con los resultados de los errores para cada modelo.

La forma de validar la expresión propuesta fue un innovador experimento en el que se desarrolló un balance de exergía a un sistema fotovoltaico. Este tipo de validación experimental tuvo como primera parte el desarrollo de una modelación térmica y eléctrica del sistema fotovoltaico. El modelo térmico unidimensional desarrollado por el método de diferencias finitas logró estimar de buena forma las temperaturas a través del panel, siendo corroborado sus estimaciones con las mediciones de la celda solar y el tedlar. El modelo eléctrico fue basado en un trabajo de la literatura, y sufrió el inconveniente de que las mediciones no tenían la resolución necesaria para realizar una buena comparación de los resultados del modelo eléctrico. Esto perjudicó el resultado del  $NRMSE$ , indicador utilizado como medida del error entre los resultados de ambos modelos y de las mediciones. Sin embargo, a pesar de esta limitación, los resultados aún se encuentran dentro del rango de lo aceptable, por lo que la modelación eléctrica también se usó para el análisis siguiente.

El balance de exergía se realizó como una validación experimental del modelo cúbico propuesto en este trabajo. Esta validación consistió en comparar la exergía del sistema fotovoltaico mediante el modelo cúbico y los balances de exergía mediante los modelos de Petela, Pons y Jeter. Para esto, se utilizó dos días de la campaña de medición del montaje experimental que representaran a un día despejado y otro nublado. Durante el día despejado, los resultados indican que el modelo cúbico se encuentra muy cercano al modelo de Pons, lo cual es esperable debido a que este modelo fue el que se utilizó para elaborar el modelo cúbico propuesto en este trabajo. El modelo cúbico se encontró por debajo de los modelos de Petela y Jeter para el día de estudio, lo cual es un buen indicador ya que el primero es el límite teórico de la radiación solar no diluida y el segundo es la eficiencia de Carnot, lo que resulta en que el modelo cúbico al considerar los efectos de atenuación debe resultar menor que los modelos antes mencionados. Con respecto al día nublado, los errores calculados mediante el *NRMSE* son mayores que durante el día despejado, lo cual es esperable debido a la gran variabilidad de las mediciones de radiación durante este día en particular. Como el modelo cúbico depende fuertemente del contenido radiativo, el hecho de que se presente una alta nubosidad impide que las estimaciones exergéticas tengan una alta precisión. Sin embargo, aún se encuentran dentro del rango aceptable en el área de la estimación de las variables meteorológicas, lo que resulta en que es factible utilizar a la expresión cúbica aquí propuesta para estimar el contenido exergético de la radiación solar en la ciudad de Santiago de Chile.

Como se pudo apreciar en la revisión bibliográfica de este trabajo, el desarrollo de expresiones que logren estimar el contenido exergético de la radiación solar se ha abordado por diferentes caminos. El camino que se tomó en este trabajo fue el de realizar una modelación experimental con datos reales y calcularlo en base a una expresión de la literatura. Los trabajos experimentales de esta índole se habían desarrollado en base a la formulación de Petela, lo cual contrasta con la elección en este trabajo de utilizar una formulación que considere el contenido exergético de la radiación difusa y directa por separado. Este tipo de procedimiento realizado aquí no se ha realizado hasta la fecha, donde realizar una modelación experimental en base a una formulación de la radiación diluida y no diluida es algo completamente nuevo. Este nuevo enfoque logra valorizar el contenido exergético de las componentes de la radiación solar y usar a estas para una nueva expresión en base a una sola variable meteorológica. Estas modelaciones experimentales son un campo nuevo de estudio, donde hasta la fecha solo se han desarrollado dos trabajos de esta índole. La gran ventaja que se tiene en este tipo de análisis es el poder relacionar a la exergía radiativa con alguna otra variable meteorológica que sea de fácil medición, ya que, como se describió anteriormente, las estaciones meteorológicas que midan todas las variables climáticas son de un precio muy elevado. En Chile se tiene una red de estaciones meteorológicas a lo largo del país, pero no todas ellas miden las tres componentes de la radiación solar. La única variable radiativa que si está siendo medida en esta red de estaciones es la radiación solar global, variable utilizada para desarrollar el modelo propuesto.

En nuestro país, análisis exergéticos de la radiación no se han realizado hasta la fecha. Conocer el máximo trabajo útil que se puede extraer de la radiación solar facilitará la decisión de instalar una tecnología solar. El norte de Chile tiene un potencial enorme de recurso solar, lo que hace muy atractivo conocer los lugares que tienen mayor potencial de uso para su aprovechamiento en otro tipo de energía. De esta forma, el desarrollo de modelos exergéticos para la radiación en Chile se hace un tema relevante que es importante estimar

y evaluar. Además, el contenido exergético radiativo puede usarse para mejorar los balances termodinámicos de los procesos de la industria solar, lo que conlleva finalmente en un mejor diseño de una planta al ser estimada considerando la exergía radiativa. Este mejor diseño de las plantas supone una mejora en la evaluación de los costos asociados de la instalación, lo que produce una baja en los costos totales. Este ahorro de dinero puede ser en algunos casos un valor considerable, lo que supone que, al conocer la exergía de la radiación solar y considerarla al momento de diseñar plantas solares, una baja de los costos iniciales y, por ende, un retorno de ingresos en un menor plazo de tiempo.

Este trabajo tuvo como objetivo principal desarrollar una expresión empírica del contenido exergético de la radiación solar con las condiciones particulares de la ciudad de Santiago de Chile. Este es el primer trabajo en Chile que se desarrolla en esta área, lo cual hace que pueda continuar siendo estudiado y analizado. Con respecto a los trabajos futuros que continúen el trabajo aquí desarrollado, se puede recomendar que la característica principal que deben tener los modelos empíricos es que la base de datos con la que se trabaja debe ser una base de datos confiable y de un largo periodo de tiempo. Por ende, para mejorar el trabajo aquí desarrollado, estas expresiones deberían tener una cantidad de datos mayor a la utilizada en este trabajo, con un periodo ideal de 10 años, con datos medidos por estaciones meteorológicas. El análisis de regresión desarrollado también puede ser evaluado con otras variables meteorológicas como la duración del día, variable usada en los trabajos de la literatura junto al índice de claridad. Una evaluación de este tipo también puede ser desarrollada para grandes zonas territoriales con los datos necesarios, evaluando así regiones completas de nuestro país con tal de definir el potencial exergético de todo el territorio nacional y no solamente en una localidad. Este tipo de análisis se denominan mapas exergéticos, el cual tiene todas las condiciones necesarias para ser elaborado en nuestro país. Con respecto al montaje experimental, el desarrollo del modelo térmico se elaboró de forma unidimensional a través del panel fotovoltaico, debido a las pequeñas dimensiones que tenía el panel. Sin embargo, realizar un análisis tridimensional del flujo de calor en el panel fotovoltaico es un paso más allá con el cual se puede realizar una mejor evaluación de las pérdidas térmicas en el panel. A su vez, la modelación eléctrica debería ser validada con un instrumento de medición con una mayor resolución. La validación experimental desarrollada en este trabajo consistió de un día despejado y un día nublado, correspondientes al mes de Junio del año 2019. Con tal de realizar una validación más rigurosa, se debería contar con una campaña experimental de al menos 1 año completo de datos. De esta forma, se podría evaluar el comportamiento del modelo cúbico mediante el montaje experimental para todas las estaciones del año. Esta tipo de evaluación tendría datos de Verano con intensidades muy altas, así como también para días de Invierno con muy baja radiación global.

# Bibliografía

- [1] Ministerio de Energía. *Energía 2050: Política Energética de Chile*. 2015. URL <http://www.energia2050.cl/wp-content/uploads/2017/12/Politica-Energetica-Nacional.pdf>.
- [2] Ministerio de Energía. Anuario Estadístico de Energía 2019. Technical report, 2019. URL <http://energiaabierta.cl/reportes/>.
- [3] Rodrigo A. Escobar, Cristián Cortés, Alan Pino, Marcelo Salgado, Enio Bueno Pereira, Fernando Ramos Martins, John Boland, & José Miguel Cardemil. Estimating the potential for solar energy utilization in Chile by satellite-derived data and ground station measurements. *Solar Energy*, 121:139–151, 2015. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2015.08.034.
- [4] Catalina Hernández, Rodrigo Barraza, Alejandro Saez, Mercedes Ibarra, & Danilo Estay. Potential Map for the Installation of Concentrated Solar Power Towers in Chile. *Energies*, 13:1–15, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/en13092131>.
- [5] R. Petela. Exergy of Heat Radiation. *Journal of Heat Transfer*, 86(2):187, 1964. ISSN 00221481. doi: 10.1115/1.3687092.
- [6] D. C. Spanner. Introduction to Thermodynamics. *Academic Press, London*, 1964.
- [7] William H. Press. Theoretical maximum for energy from direct and diffuse sunlight. *Nature*, 264(5588):734–735, 1976. ISSN 00280836. doi: 10.1038/264734a0.
- [8] J. E. Parrott. Theoretical upper limit to the conversion efficiency of solar energy. *Solar Energy*, 21(3):227–229, 1978. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/0038-092X(78)90025-7.
- [9] Sten Karlsson. The exergy of incoherent electromagnetic radiation. *Physica Scripta*, 26(4):329–332, 1982. ISSN 14024896. doi: 10.1088/0031-8949/26/4/009.
- [10] Yves Candau. On the exergy of radiation. *Solar Energy*, 75(3):241–247, 2003. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2003.07.012.
- [11] S. X. Chu & L. H. Liu. Analysis of terrestrial solar radiation exergy. *Solar Energy*, 83(8):1390–1404, 2009. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2009.03.011.
- [12] Michel Pons. Exergy analysis of solar collectors, from incident radiation to dissipation. *Renewable Energy*, 47:194–202, 2012. ISSN 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2012.03.040.

- [13] Nurullah Arslanoglu. Empirical modeling of solar radiation exergy for Turkey. *Applied Thermal Engineering*, 108:1033–1040, 2016. ISSN 13594311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.002.
- [14] Basharat Jamil & Evangelos Bellos. Development of empirical models for estimation of global solar radiation exergy in India. *Journal of Cleaner Production*, 207:1–16, 2019. ISSN 0959-6526. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.246.
- [15] Sheldon M. Jeter. Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation. *Solar Energy*, 26(3):231–236, 1981. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/0038-092X(81)90207-3.
- [16] J. Gribik & J. Osterle. The second law efficiency of solar energy conversion. *Solar Energy*, 106(6):553, 1984. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/0038-092X(81)90168-7.
- [17] A. Bejan. Unification of Three Different Theories Concerning the Ideal Conversion of Enclosed Radiation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 109(February 1987):46–51, 1987. ISSN 01996231. doi: 10.1115/1.3268177.
- [18] S.E. Wright, M.A. Rosen, D.S. Scott, & J.B. Haddow. The exergy flux of radiative heat transfer for the special case of blackbody radiation. *Exergy, An International Journal*, 2(1):24–33, 2002. ISSN 11640235. doi: 10.1016/S1164-0235(01)00040-1.
- [19] R. Petela. Exergy of undiluted thermal radiation. *Solar Energy*, 74(6):469–488, 2003. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/S0038-092X(03)00226-3.
- [20] Viorel Badescu. Is Carnot efficiency the upper bound for work extraction from thermal reservoirs? *Epl*, 106(1), 2014. ISSN 12864854. doi: 10.1209/0295-5075/106/18006.
- [21] Viorel Badescu. How much work can be extracted from a radiation reservoir? *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 410:110–119, 2014. ISSN 03784371. doi: 10.1016/j.physa.2014.05.024.
- [22] Viorel Badescu. Maximum reversible work extraction from a blackbody radiation reservoir. A way to closing the old controversy. *Epl*, 109(4), 2015. ISSN 12864854. doi: 10.1209/0295-5075/109/40008.
- [23] P T Landsberg & G Tonge. Thermodynamics of the conversion of diluted radiation. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 12:551–562, 1979.
- [24] Christian Gueymard. *SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment*. Number March. 1995.
- [25] C. Zamfirescu & I. Dincer. How much exergy one can obtain from incident solar radiation? *Journal of Applied Physics*, 105(4), 2009. ISSN 00218979. doi: 10.1063/1.3081637.
- [26] E. Akyuz, C. Coskun, Z. Oktay, & I. Dincer. A novel approach for estimation of photovoltaic exergy efficiency. *Energy*, 44(1):1059–1066, 2012. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2012.04.036.



- [27] F Bayrak, N Abu-Hamdeh, K A Alnefaie, & H F Öztop. A review on exergy analysis of solar electricity production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(March): 755–770, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.012.
- [28] Fatih Bayrak, Gamze Ertürk, & Hakan F. Oztop. Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 164:58–69, 2017. ISSN 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.108.
- [29] Anand S. Joshi, Ibrahim Dincer, & Bale V. Reddy. Thermodynamic assessment of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 83(8):1139–1149, 2009. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2009.01.011.
- [30] K. Sudhakar & Tulika Srivastava. Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module. *International Journal of Ambient Energy*, 35(1):51–57, 2014. ISSN 01430750. doi: 10.1080/01430750.2013.770799.
- [31] Manuela Neri, Davide Luscietti, & Mariagrazia Pilotelli. Computing the Exergy of Solar Radiation From Real Radiation Data. *Journal of Energy Resources Technology*, 139(6): 061201, 2017. ISSN 0195-0738. doi: 10.1115/1.4036772.
- [32] John K. Page. The Estimation of Monthly Mean Values of Daily Total Short-Wave Radiation of Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Records for Latitudes 40°N—40°S. In *Proc. UN Conf. New Sources of Energy*, page 8, 1961.
- [33] Leonardo F.L. Lemos, Allan R. Starke, John Boland, José M. Cardemil, Rubinei D. Machado, & Sergio Colle. Assessment of solar radiation components in Brazil using the BRL model. *Renewable Energy*, 108:569–580, 2017. ISSN 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2017.02.077.
- [34] S Younes, R Claywell, & T Ñ Muneer. Quality control of solar radiation data : Present status and proposed new approaches. *Energy*, 30:1533–1549, 2005. doi: 10.1016/j.energy.2004.04.031.
- [35] Barbara Ridley, John Boland, & Philippe Lauret. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy*, 35(2):478–483, 2010. ISSN 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2009.07.018.
- [36] C N Long & Y Shi. The QCRad Value Added Product : Surface Radiation Measurement Quality Control Testing , Including Climatology Configurable Limits. *Atmospheric Radiation Measurement Program*, ARM TR-074, 2006.
- [37] WMO. Guide to the Global Observing System. Report No. 488. WMO-No. 48:170, 2007. URL [http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Manual/488\\_{\\_}Guide\\_{\\_}2007.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Manual/488_{_}Guide_{_}2007.pdf).
- [38] Michel Journée & Cédric Bertrand. Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. *Solar Energy*, 85(1):72–86, 2011. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2010.10.021.
- [39] John Boland, Barbara Ridley, & Bruce Brown. Models of diffuse solar radiation. *Renewable Energy*, 35(2):478–483, 2010. ISSN 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2009.07.018.

- wable Energy*, 33(4):575–584, 2008. ISSN 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2007.04.012.
- [40] S. Armstrong & W. G. Hurley. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*, 30(11-12):1488–1495, 2010. ISSN 13594311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.03.012.
- [41] Jannik Heusinger, Ashley M. Broadbent, David J. Sailor, & Matei Georgescu. Introduction, evaluation and application of an energy balance model for photovoltaic modules. *Solar Energy*, 195(November 2019):382–395, 2020. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2019.11.041.
- [42] Sandro Nižetić, Ivo Marinić-Kragić, Filip Grubišić-Čabo, Agis M. Papadopoulos, & Gongnan Xie. Analysis of novel passive cooling strategies for free-standing silicon photovoltaic panels. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020. ISSN 15882926. doi: 10.1007/s10973-020-09410-7.
- [43] Aly M.A. Soliman, Hamdy Hassan, Mahmoud Ahmed, & Shinichi Ookawara. A 3d model of the effect of using heat spreader on the performance of photovoltaic panel (PV). *Mathematics and Computers in Simulation*, 167:78–91, 2020. ISSN 03784754. doi: 10.1016/j.matcom.2018.05.011.
- [44] M. Usama Siddiqui, A. F.M. Arif, Leah Kelley, & Steven Dubowsky. Three-dimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions. *Solar Energy*, 86(9):2620–2631, 2012. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2012.05.034.
- [45] J. C. Sánchez Barroso, J. P.M. Correia, N. Barth, S. Ahzi, & M. A. Khaleel. A PSO algorithm for the calculation of the series and shunt resistances of the PV panel one-diode model. *Proceedings of 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2014*, pages 1–6, 2014. doi: 10.1109/IRSEC.2014.7059883.
- [46] John A. Duffie & William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved, Hoboken, New Jersey, fourth edi edition, 2013. ISBN 1118418123. doi: 10.1115/1.2930068.

# Apéndice A

## El Sol

### A.1. Hora Solar

La hora solar se define como el tiempo aparente del movimiento angular del Sol, que va desde el amanecer hasta el ocaso. El mediodía solar se produce cuando el Sol pasa por el meridiano en el que se encuentra el observador. La hora solar es diferente de la hora que marcan los relojes, llamada esta como la hora estándar. Por ende, se debe realizar una conversión desde la hora estándar del lugar a la hora solar. Esta corrección se realiza considerando que el Sol se demora 4 minutos en avanzar  $1^\circ$  de longitud y se debe considerar que el signo puede ser positivo o negativo dependiendo de si el observador se encuentra al Oeste o Este del meridiano de Greenwich respectivamente. De esta forma, la hora solar (en minutos) es

$$\text{Hora Solar} = \text{Hora Estándar} \pm 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (\text{A.1})$$

en donde  $L_{st}$  es el meridiano estándar para la zona horaria,  $L_{loc}$  es la longitud de la localidad en grados aumentando hacia el Este desde el meridiano  $0^\circ$  y  $E$  es llamada la ecuación del tiempo y se obtiene como,

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (\text{A.2})$$

donde  $B$  es una constante que está en función de  $n$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (\text{A.3})$$

## A.2. Espectro Solar

La radiación emitida por el Sol se encuentra a longitudes de onda ( $\lambda$ ) que van desde 0 a infinito, lo cual es llamado como el espectro solar. La radiación espectral en la ausencia de atmósfera puede verse en la figura A.1 (Duffie & Beckman [46]). La radiación térmica es una forma de energía de emisión y transmisión que depende de la temperatura característica de la superficie de emisión. La radiación térmica es una onda electromagnética que viaja a la velocidad de la luz ( $C \approx 300000$  km/s en el vacío), y se relaciona con la longitud de onda y la frecuencia ( $\nu$ ) de la siguiente forma:

$$C = \lambda \nu \quad (\text{A.4})$$

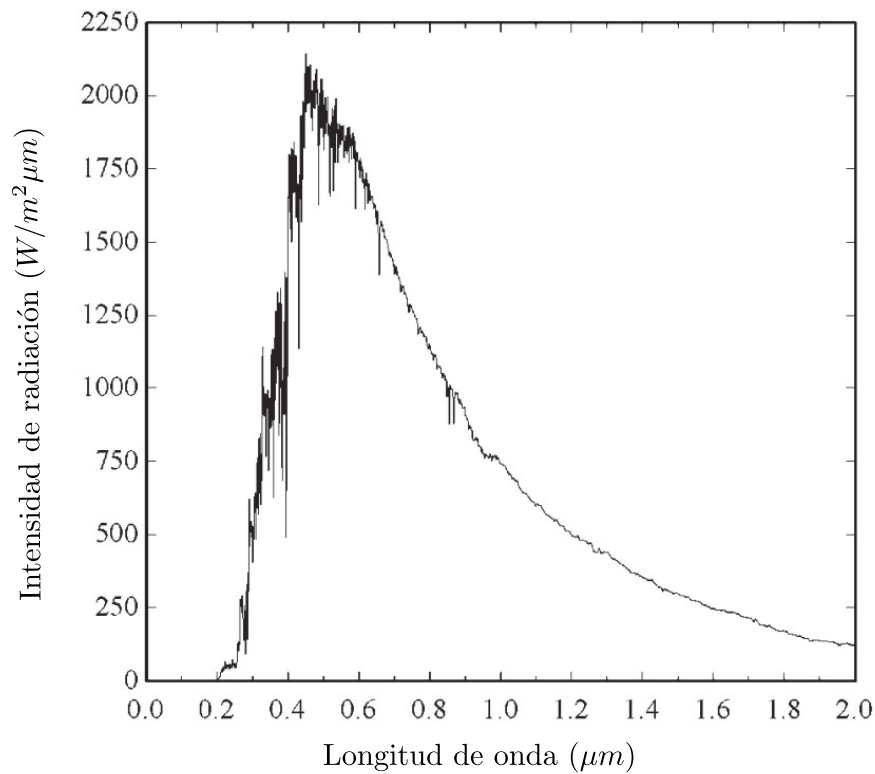


Figura A.1: Irradiancia espectral estándar de la WRC a una distancia Sol-Tierra promedio.

Cuando la radiación directa choca contra un cuerpo, se producen diferentes fenómenos que alteran el paso de la radiación. La reflectividad ( $\rho$ ) es la fracción de la radiación que es reflejada. La fracción de radiación que es absorbida en el cuerpo se denomina absorptividad ( $\alpha$ ) y la fracción que es transmitida se llama transmisividad ( $\tau$ ). Estos tres fenómenos se relacionan entre sí como,

$$\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (\text{A.5})$$

El sufijo  $\lambda$  en la ecuación A.5 significa que estas propiedades de la radiación dependen de la dirección y la longitud de onda de la radiación incidente sobre un cuerpo. Un cuerpo negro

se le denomina a un absorbedor perfecto de energía y se caracteriza como el límite máximo de la emisión de la radiación térmica. Según la Ley de Planck para la radiación, un cuerpo negro a una temperatura  $T$  (Kelvin) y a una longitud de onda determinada se define como:

$$E_{\lambda b} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]} \quad (\text{A.6})$$

en donde  $E_{\lambda b}$  es la potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro ( $W/m^2\mu m$ ),  $T$  la temperatura de la superficie ( $K$ ),  $\lambda$  es la longitud de onda ( $\mu m$ ) y  $C_1$  y  $C_2$  son constantes que tienen el valor de  $3,742 \times 10^8 (W\mu m^4/m^2)$  y  $1,43878 \times 10^4 (\mu m K)$  respectivamente. La potencia total emisiva ( $E_b$ ) y la potencia emisiva monocromática ( $E_{b\lambda}$ ) de un cuerpo negro se relacionan de la siguiente manera,

$$E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda \quad (\text{A.7})$$

La radiación total emitida desde 0 a cualquier longitud de onda desde el Sol se puede obtener de la ecuación A.8,

$$E_{0-\lambda, b} = \int_0^\lambda E_{\lambda b} d\lambda \quad (\text{A.8})$$

Si la ecuación anterior es integrada entre 0 a  $\infty$  nos da

$$E_{0-\lambda, b} = \int_0^\lambda E_{\lambda b} d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{A.9})$$

donde  $\sigma$  es la Constante de Stefan-Boltzmann igual a  $5,6697 \times 10^{-8} (W/m^2 K^4)$ . La ecuación A.9 es conocida como la Ley de Stefan-Boltzmann.

### A.3. Geometría Solar

Para cualquier proyecto de índole solar, es importante conocer el recorrido del Sol para cualquier día del año en cualquier punto del planeta. Este movimiento aparente del Sol desde el punto de vista de un observador está caracterizado en una serie de relaciones geométricas que serán detalladas en esta sección. El ángulo horario ( $\omega$ ) se define como el ángulo que forma el Sol entre el mediodía y el instante de tiempo actual, en términos de una rotación cada 24 horas ( $15^\circ$  por hora). El ángulo horario es 0 al mediodía, negativo por la mañana y positivo en la tarde. La hora solar (en horas) y el ángulo horario se relacionan de la siguiente forma:

$$\omega = (\text{Hora Solar} - 12)15 \quad (\text{A.10})$$

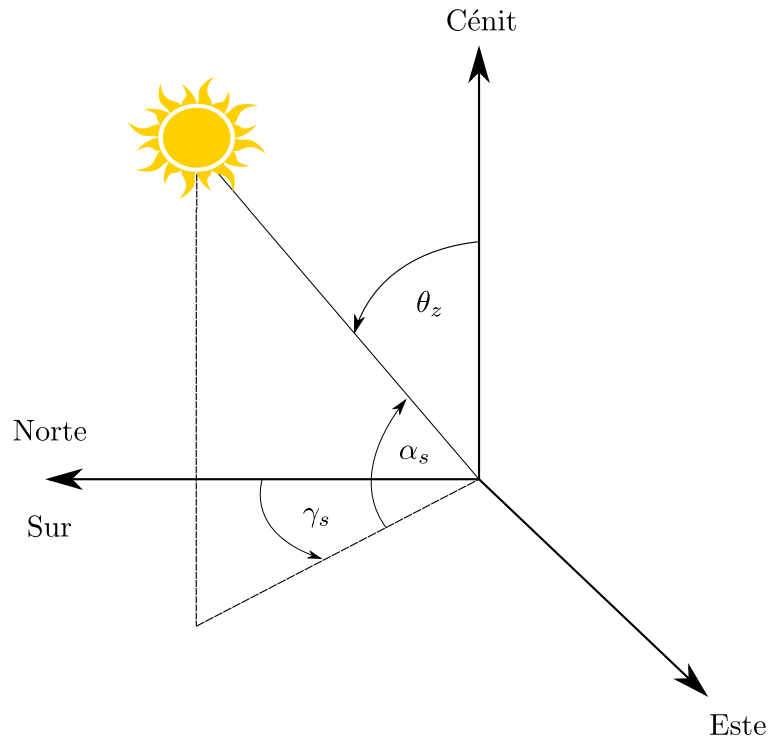


Figura A.2: Posición del Sol con respecto a un lugar de la Tierra.

La posición del Sol se caracteriza en ángulos formados con el plano horizontal y vertical del lugar (figura A.2). El eje vertical se denomina cénit y el ángulo formado por la dirección normal del Sol y esta vertical se denomina ángulo cenital ( $\theta_z$ ).

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (\text{A.11})$$

en donde  $\phi$  corresponde a la latitud del lugar. Este ángulo es positivo en el hemisferio Norte y negativo en el hemisferio Sur. La elevación solar ( $\alpha_s$ ) es el complemento del ángulo cenital,

$$\sin \alpha_s = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (\text{A.12})$$

El ángulo azimutal ( $\gamma_z$ ) es el ángulo formado por el meridiano del Sol y la vertical y comprende valores en el rango de  $180^\circ$  a  $-180^\circ$ . El ángulo azimutal es negativo cuando la hora solar es negativa y positivo cuando la hora solar es positiva, lo que se representa mediante  $\text{sign}(\omega)$  el cual se reemplaza por  $+1$  o  $-1$  dependiendo de  $\omega$ .

$$\gamma_z = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left( \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (\text{A.13})$$

El ángulo de salida del Sol al amanecer,  $\omega_s$ , cuando  $\theta_z = 90^\circ$ , es dado como,

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (\text{A.14})$$

# Apéndice B

## Propiedades del Panel Fotovoltaico

Tabla B.1: Características del panel fotovoltaico marca König-Sonne modelo KS-10WPS en las condiciones estándar de operación (STC).

Parámetro	Valor Nominal
Potencia máxima ( $P_{\text{máx}}$ )	10 <i>W</i>
Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ )	21,5 <i>V</i>
Corriente en corto circuito ( $I_{sc}$ )	0,88 <i>A</i>
Voltaje en potencia máxima ( $V_{mp}$ )	17,2 <i>V</i>
Corriente en potencia máxima ( $I_{mp}$ )	0,58 <i>A</i>
Tolerancia de la potencia	$\pm 5$ %
Rango de sobrecorriente máxima	15 <i>A</i>
Voltaje máximo del sistema	1000 <i>VDC</i>
Tipo de celda	Policristalino
Factor de idealización del diodo ( $A$ )	1,025
Tamaño	360×240×17
Número de celdas	72
Área efectiva	0,1155 <i>m</i>