

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS



**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE UNA
RED DE COLECTORES SOLARES DE BAJA
TEMPERATURA ANTE VARIACIONES DE LAS
CONDICIONES DE OPERACIÓN Y AMBIENTALES**

PRESENTA:

I.Q. CHRISTIAN CAMILO URIBE MORA

GUANAJUATO, GTO
MÉXICO
2022

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE UNA RED DE
COLECTORES SOLARES DE BAJA TEMPERATURA ANTE
VARIACIONES DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN Y
AMBIENTALES**

TESIS PROFESIONAL PARA OBTAR EL TÍTULO DE:

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA QUÍMICA
(INTEGRACIÓN DE PROCESOS)**

PRESENTA:

I.Q. CHRISTIAN CAMILO URIBE MORA

ASESORES:

DIRECTOR

DR. FERNANDO LÓPEZ CAAMAL

CO-DIRECTOR

DR. GUILLERMO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ

COMITÉ SINODAL:

DRA. BEATRIZ RUIZ CAMACHO

DR. HÉCTOR HERNÁNDEZ ESCOTO

DR. SALVADOR HERNÁNDEZ CASTRO

SUPLENTE:

DR. JESÚS IXBALANK TORRES ZÚÑIGA

GUANAJUATO, GTO

MÉXICO

2022

Dedicatoria

Dedicado a la memoria de Hernando Uribe Prieto, el mejor papá del mundo, sé que desde el cielo estarás orgulloso, mi viejo querido.

Mi familia, mi madre Gloria Mora, mi hermana Valentina Uribe y mi hermano Sebastián Uribe por todo su apoyo moral y espiritual que me impulsaron a continuar en este proceso.

Agradecimientos

Gracias a Dios por darme salud y sabiduría en este proceso de formación académica, todo un reto personal y profesional.

Agradecer a la Universidad de Guanajuato por esta gran oportunidad y especialmente a mis directores del proyecto, el Dr. Fernando López Caamal y el Dr. Guillermo Martínez Rodríguez, gracias por todo su apoyo y paciencia en este proceso, excelentes profesionales y personas siempre dispuestas a enseñar y compartir su conocimiento.

Agradecer a mi mejor amigo y colega Dr. Reinaldo Calderón, siempre ha estado en los momentos más complejos, una amistad para toda la vida.

RESUMEN

La energía solar es una fuente de energía renovable que puede ser usada a través de colectores solares, también conocidos como intercambiadores de calor, que absorben la energía solar térmica y la transfieren en forma de calor a un fluido de trabajo; sin embargo, uno de los desafíos de los sistemas solares es la intermitencia debido a que la energía solar no es constante y para las aplicaciones industriales es esencial que se entregue una carga térmica continua o una temperatura constante. En este trabajo, se desarrolló un modelo matemático para predecir la temperatura de salida del colector solar sujeto a variaciones ambientales como la irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento. Posteriormente se diseñó un esquema de control proporcional integral PI que permitió mitigar las perturbaciones y logró alcanzar la temperatura objetivo requerida de manera constante.

Abstract

Solar energy is a renewable energy source that we can use through solar collectors, also known as heat exchangers, which absorb thermal solar energy and transfer it as heat to a working fluid. However, one of the challenges of solar systems is intermittency because solar energy is not constant, but for industrial applications is essential that a continuous heat load or constant temperature is delivered. In this work, a mathematical model was developed to predict the outlet temperature of the solar collector subject to environmental variations such as irradiance, ambient temperature, and wind speed. Subsequently, an integral proportional control scheme PI was designed to mitigate disturbances and guarantee the required target temperature.

Índice general

RESUMEN	IV
Abstract	V
1. INTRODUCCIÓN	1
2. GENERALIDADES	4
2.1. Energías Limpias	4
2.2. Radiación Solar	5
2.3. Colectores Solares	6
2.3.1. Tipos de Colectores Solares	8
2.4. Redes de Colectores Solares	10
2.5. Justificación	12
2.6. Objetivos	13
2.6.1. Objetivo General	13
2.6.2. Objetivos Específicos	13
3. MODELO MATEMÁTICO	14
3.1. Ecuaciones de Balance de Energía	16
3.2. Características del Colector Solar de Placa Plana	20
3.3. Análisis de Datos Ambientales	21
4. CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS	24
4.1. Tipos de Sistemas de Control	25
4.1.1. Sistemas de Lazo Abierto	25
4.1.2. Sistemas de Lazo Cerrado	25
4.2. Aplicaciones de Control en Sistemas Solares	27
4.3. Esquema de Control para un Colector Solar	28
4.4. Controladores Automáticos	29
4.5. Control en una Red de Colectores Solares	32
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
5.1. Irradiación	33
5.2. Temperatura Ambiente	35
5.3. Velocidad del Viento	36
5.4. Simulación del Modelo Matemático	37
5.5. Control Automático del Colector Solar	38
6. CONCLUSIONES	41

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VII
A. Irradiancia Enero	43
B. Temperatura Ambiente Enero	47
C. Velocidad del Viento Enero	51

Índice de figuras

2.1. Irradiación en la República Mexicana (NREL, 2019).	6
2.2. Clasificación de los colectores solares (Blanco G. y Malato R., 2009).	9
2.3. Colector solar de placa plana (Abril Ortega et al., 2017).	10
2.4. Arreglos de redes de colectores solares (Picón-Núñez et al., 2014).	11
3.1. Red térmica para un colector solar en términos de resistencias (Duffie y Beckman, 1982).	17
3.2. Irradiancia día 13 de enero.	21
3.3. Temperatura Ambiente día 13 de enero.	22
3.4. Velocidad del viento día 13 de enero.	23
4.1. Diagrama de bloques para un sistema en lazo abierto.	25
4.2. Diagrama de bloques para un sistema en lazo cerrado [Ogata, 2010].	26
4.3. Esquema de control para un colector solar de placa plana.	30
4.4. Colectores solares conectados en serie.	32
5.1. Irradiación para cada día del mes de enero.	33
5.2. Ajuste R^2 irradiación.	34
5.3. Histograma irradiación.	34
5.4. Temperatura ambiente media para cada día del mes de enero.	35
5.5. Histograma temperatura ambiente media.	36
5.6. Velocidad del viento media para cada día del mes de enero.	36
5.7. Histograma velocidad del viento media.	37
5.8. Temperatura de salida del colector teórico y experimental.	38
5.9. Control PI para el colector solar.	39
5.10. Comportamiento del flujo másico.	39
5.11. Temperatura de salida del colector solar 2 conectado en serie.	40
5.12. Temperatura de salida del colector solar 1 conectado en serie.	40

Índice de tablas

3.1. Características del colector solar de placa plana.	20
4.1. Acciones básicas de control.	30

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la demanda mundial de energía ha aumentado significativamente por el incremento de la población y la disponibilidad de los recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el progreso de una nación. El uso de la energía es vital para la innovación y el desarrollo de las industrias que son indispensables para el crecimiento de la economía y la generación de empleo [Mundial, 2018].

Las energías fósiles se encuentran en el entorno en cantidades finitas, las cuales, no pueden ser reemplazadas una vez agotadas en su totalidad, además los efectos procedentes del uso de fuentes de energía no renovable tienen varios impactos negativos como el agotamiento de los recursos, la dependencia energética y la problemática ambiental [Martins et al., 2018].

El interés por hacer uso de energías renovables ha ido en aumento en los últimos años; en México, por medio de la Ley de Transición Energética el país busca definir las rutas y metas para transitar hacia una economía baja en carbono que permita reducir el consumo de energías fósiles y contribuir a la mejora del medio ambiente. El Artículo Tercero de la Ley de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios establece que: *“La Secretaría de Energía determinará como meta una participación mínima de energías limpias en la generación de energía eléctrica total del 35 por ciento para el año 2024; 37.7 por ciento para el año 2030 y 50 por ciento para el año 2050”* [Arreola, 2014, Secretaría de Energía, 2016].

La República Mexicana tiene todo el potencial para el aprovechamiento de energía limpias y una de ellas es la energía solar, la cual se basa en el uso de la radiación solar que a través de tecnologías especializadas permiten captar los fotones provenientes del sol y/o transformar la radiación solar en energía eléctrica o térmica.

Existen tres formas principales por las cuales se puede aprovechar la energía solar [Ahmadi et al., 2020]:

- Energía solar fotovoltaica: permite transformar la radiación solar en electricidad por medio de celdas fotovoltaicas integrantes en paneles solares.
- Energía solar térmica pasiva: consiste en la utilización directa de la energía solar mediante la incorporación de acristalamientos y elementos arquitectónicos con elevada masa y capacidad de absorción de energía térmica.
- Energía solar térmica: consiste en la transformación de la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, la cual es aprovechada para el calentamiento de fluidos por medio de intercambiadores de calor conocidos como colectores solares.

El aprovechamiento de la energía solar se considerada una alternativa viable para la integración de la energía termo solar a los procesos industriales en aplicaciones como calentamiento o enfriamiento de fluidos para industrias alimenticias, textil, calefacción de habitaciones, entre otras. Existen equipos y dispositivos diseñados con la finalidad de captar la energía solar y aprovecharla con el fin de garantizar el suministro de la carga térmica en los procesos industriales, estos equipos son conocidos como colectores solares, los cuales son un tipo de intercambiador de calor en el que el intercambio de energía se realiza entre una fuente distante y un fluido que fluye en el colector [Pandey and Chaurasiya, 2017].

Los colectores solares tienen la capacidad de suministrar la energía requerida para los procesos industriales, sin embargo, su desafío es mantener la temperatura objetivo de forma constante ante los cambios climáticos.

Esta tesis se centra en el estudio de la energía solar térmica que a través de colectores solares de placa plana pueden suplir la carga térmica en aplicaciones industriales de baja temperatura. Mediante un modelo matemático se busca predecir el comportamiento del colector solar para determinar que tanto afectan las variaciones ambientales y de operación a la temperatura de salida del colector, de esta manera proponer un esquema de control que permita mitigar estas perturbaciones y lograr la temperatura objetivo requerida para los procesos sin importar las condiciones ambientales.

Del presente trabajo se realizaron dos publicaciones, las cuales fueron presentadas en dos congresos; la primera publicación titulada “*Modeling a flat plate solar collector subject*

to time-varying environmental conditions” fue presentada y aprobada en el congreso internacional “*V IEEE CONFERENCIA COLOMBIANA DE CONTROL AUTOMÁTICO – CCAC*” [Uribe-mora et al., 2021a]; la segunda publicación titulada “*Output Temperature Control of a Flat Plate Solar Collector Subject to Time-Varying Environmental Conditions*” fue presentada y aprobada en el “*CONGRESO NACIONAL DE CONTROL AUTOMÁTICO DE LA UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO*” [Uribe-mora et al., 2021b].

Esta tesis está organizada en siete capítulos, distribuidos de la siguiente manera:

Capítulo 2. Generalidades, en este capítulo se encontrará con el estado del arte de la investigación que se realizó para el desarrollo de este proyecto y con la información necesaria para la comprensión del documento.

Capítulo 3. Modelo Matemático, en este capítulo se describe el modelo matemático y las herramientas computacionales que se utilizaron para desarrollar el proyecto.

Capítulo 4. Control Automático de Procesos, en este capítulo se propone un control para mitigar los efectos climáticos que afectan la temperatura objetivo.

Capítulo 5. Análisis de Resultados, en este apartado se muestran los resultados obtenidos en la simulación y en el control realizado para lograr los objetivos propuestos.

Capítulo 6. Conclusiones, en esta sección se presentan las conclusiones y las nuevas perspectivas del tema desarrollado.

Capítulo 7. Bibliografía, por último, se tiene la revisión bibliográfica en la que se basó para la redacción de este manuscrito.

Capítulo 2

GENERALIDADES

2.1. Energías Limpias

Debido a la problemática generada por el calentamiento global se impone la necesidad urgente por desarrollar e implementar un sistema de obtención de energía eficiente, pero sostenible que contribuya a la mejora del medio ambiente. Una alternativa de solución para este problema son las energías limpias que están relacionadas con los cuatro elementos presentes en la naturaleza como son: el aire (energía eólica), el agua (energía hidráulica/hidroeléctrica), el fuego (energía solar) y la tierra (energía geotérmica).

Energía eólica: la energía del viento proviene de las irregularidades en la superficie de la Tierra y el calentamiento de la atmósfera por parte de la radiación solar, básicamente su funcionamiento es generado por el flujo de aire que pasa con fuerza a través de aspas de molinos especiales, los cuales se activan haciendo girar engranajes y un dinamo para generar corriente eléctrica [Linderman, 2021].

Energía hidráulica/hidroeléctrica: se basa en la producción de energía derivada por un generador hidráulico o turbina, que a través del movimiento de masas de agua aprovecha la energía potencial y cinética presentes en ríos o caídas naturales como cascadas o cataratas etc.

Energía geotérmica: se obtiene aprovechando el calor interno de la Tierra donde la presión y la temperatura son elevadas, para hacer hervir agua y mediante el vapor generar energía por medio de turbinas [Raffino, 2020].

Energía solar: se basa en el aprovechamiento de la radiación solar, que a través de tecnologías especializadas permiten captar los fotones provenientes del sol y/o transformar la radiación solar en energía eléctrica o térmica.

Existen tres formas principales por las cuales se puede aprovechar la energía solar [Ahmadi et al., 2020]:

- Energía solar fotovoltaica: permite transformar la radiación solar en energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas integrantes en paneles solares.
- Energía solar térmica pasiva: consiste en la utilización directa de la energía solar mediante la incorporación de acristalamientos y elementos arquitectónicos con elevada masa y capacidad de absorción de energía térmica.
- Energía solar térmica: consiste en la transformación de la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, la cual es aprovechada para el calentamiento de fluidos por medio de intercambiadores de calor conocidos como colectores solares.

2.2. Radiación Solar

El Sol es una estrella en forma de esfera que tiene una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5777 K, con un diámetro de $1,39 \times 10^9$ m, y está a una distancia promedio de la Tierra de $1,5 \times 10^{11}$ m. La radiación solar es la energía liberada al interior del Sol, donde se da lugar a diferentes reacciones de fusión nuclear, lo que origina una pérdida de masa la cual se transforma en energía. [Duffie and Beckman, 1982].

La radiación en la superficie del Sol es de $63,450\ 72 \times 10^6$ MW/m², este valor de radiación solar que llega al exterior de la atmósfera terrestre sobre una superficie perpendicular a los rayos solares es conocido como una constante solar G_{sc} (1366 W/m²), con pequeñas variaciones del ± 3 por ciento durante el año a causa de la característica elíptica de la órbita terrestre [Planas, 2015]. La radiación solar llega a la Tierra en diferentes longitudes de onda, entre 200 nm y 4000 nm que corresponden a la radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja. La energía que llega al nivel del mar suele ser radiación infrarroja en un 49 por ciento, luz visible en un 42 por ciento y radiación ultravioleta en un 9 por ciento [Duffie and Beckman, 1982].

En la Fig. 2.1, proporcionada por Laboratorio Nacional de Energía Renovable [NREL, 2019], se puede observar la irradiación en la República Mexicana, donde la parte de color más oscuro significa que hay una alta incidencia de radiación solar, de esta manera se ha considerado el aprovechamiento de la energía solar a través de tecnologías especializadas

que permitan transformarla en energía eléctrica o térmica, ya que es una de las alternativas viables para la adecuación de sistemas energéticos industriales en aplicaciones como calentamiento y enfriamiento de fluidos. México tiene el potencial para aprovechar la energía solar, sin embargo, uno de los inconvenientes de usar este tipo de energía es la intermitencia debido a las condiciones ambientales, por medio de este trabajo se busca proponer un esquema de control que me permita mitigar estas variaciones ambientales para que la carga térmica sea continua durante el proceso.

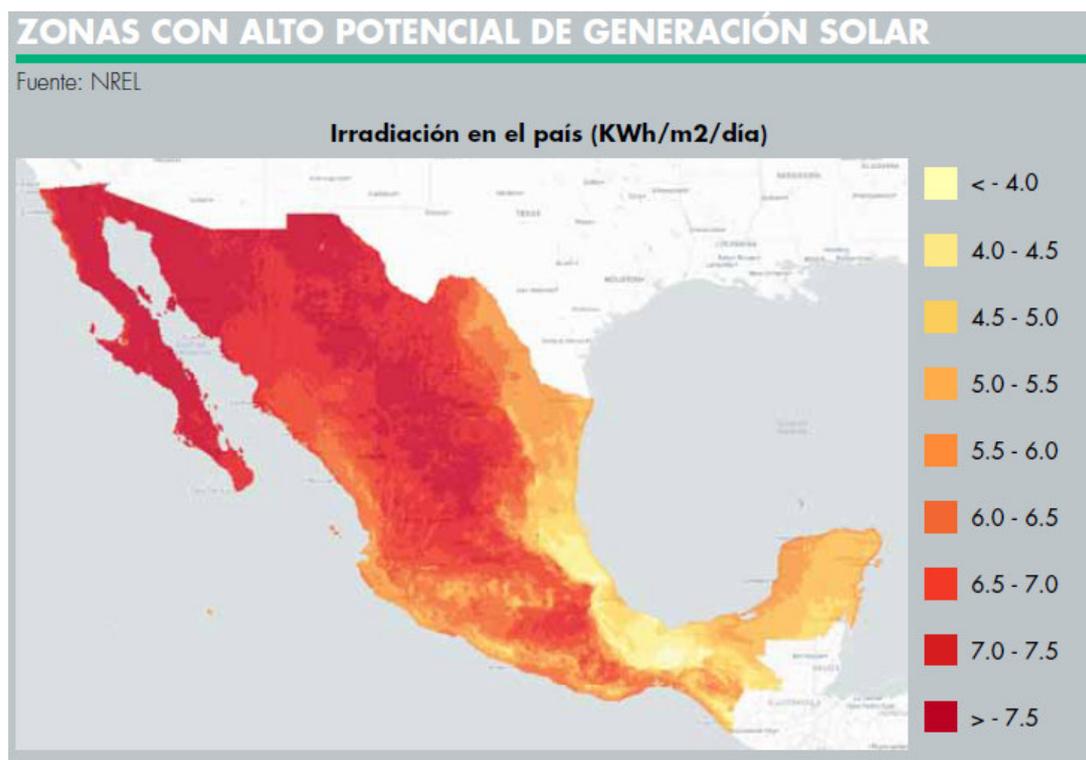


Figura 2.1: Irradiación en la República Mexicana (NREL, 2019).

2.3. Colectores Solares

El estudio de la energía solar para aplicaciones de baja temperatura es relativamente reciente; el calentamiento de agua y calefacción de hogares apareció a mediados de 1930 pero fue ganando interés hasta la segunda mitad de la década de los 40's, hasta entonces millones de hogares usaban calentadores de carbón. La idea era calentar agua usando energía solar y alimentar el sistema radiador que ya estaba instalado. En 1960 la producción en masa de los calentadores de agua usando energía solar se expandió al sector industrial a nivel global [Blanco G. and Malato R., 2009].

Según la Agencia Internacional de Energía (AIE) en Francia, los sectores de alimentos, bebidas y textil son los principales sectores industriales que podrían utilizar la energía solar térmica para acoplarla en sus procesos.

Los procesos de pasteurización ($62^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$) y esterilización ($130^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$) consumen el 23 por ciento de la energía en la industria láctea. El secado de la leche en polvo es otro consumidor importante. En la industria de los productos lácteos, se han implementado este tipo de energía usando colectores solares como es el caso de una planta de leche en polvo en Nueva Zelanda, en la que se investigó el potencial de integrar un sistema térmico solar de tubos de vacío para suplir la demanda de calor del proceso, demostrando que se podían lograr ahorros modestos en servicios públicos si el sistema solar se integraba por encima de la temperatura mínima [Atkins et al., 2010].

En el proceso de elaboración de cerveza en una compañía española, la energía térmica representa el 77 por ciento de la demanda total de energía final. Los principales consumidores son el hervido de mosto (24-50 por ciento), las lavadoras de botellas (25-38 por ciento) y la pasteurización. La energía solar térmica se puede utilizar para la generación de vapor a baja presión a $104^{\circ}\text{C} - 110^{\circ}\text{C}$ y para la refrigeración del mosto (enfriamiento por absorción). En el proceso de malteado el principal consumo energético es para el secado de la cebada, antes del malteado, y de los granos después de la germinación para detener la germinación y para la conservación (aire caliente a $60^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$) y para enfriar el aire en el proceso de germinación (durante los meses de verano) [Schweiger et al., 2013].

El calentamiento de baños líquidos cercanos a 100°C para lavado, blanqueo y teñido es un importante consumidor de energía en la industria textil. Una empresa textil ubicada en el sur de Alemania está en funcionamiento desde septiembre de 2013 mediante un campo de colectores solares de la empresa Smirro GmbH con una potencia de colector nominal total de 70 kW. El calor se transfiere a través de un intercambiador de calor desde los colectores solares a un acumulador de agua caliente que abastece a diferentes consumidores. Durante el período de un año comprendido entre septiembre de 2013 y agosto de 2014, el rendimiento del campo colector fue de aproximadamente 21.8 MWh. El coeficiente de rendimiento eléctrico total medio (COP) de todo el sistema solar térmico fue de 10.7. En relación con el sistema de referencia definido, se logró un ahorro fraccional de energía primaria del 81 por ciento, lo que corresponde a una cantidad de ahorro de energía primaria de 22.8 MWh [Frey et al., 2015].

Uno de los grandes desafíos que tienen los colectores solares es entregar una carga térmica constante, incluso si se presentan variaciones en el entorno (irradiación solar, velocidad del viento, y temperatura ambiental), ocasionadas por las estaciones climáticas [Martínez-Rodríguez et al., 2018]; la tecnología de los colectores solares y las condiciones ambientales determinan el rendimiento térmico de una red de colectores solares [Picón-Núñez et al., 2016].

2.3.1. Tipos de Colectores Solares

Los colectores solares se pueden clasificar en función de tipos concéntricos o no concéntricos, sistemas de montaje fijo o con sistemas de seguimiento, geometría, fluido de trabajo y temperatura máxima producida. Con respecto a la temperatura máxima producida, los colectores solares se dividen en tres grupos principales que incluyen colectores solares de baja temperatura, media temperatura y alta temperatura [Ehyaei et al., 2019].

En la Fig. 2.2, se describen los dispositivos tecnológicos más importantes que hacen posible la transformación de la luz solar que incide en la superficie de la Tierra, dependiendo de la conversión de la radiación solar, dos tipos de energía pueden ser consideradas, eléctrica (tecnología fotovoltaica) y calorífica (tecnología solar térmica).

En el aprovechamiento de la energía solar térmica, los equipos de captación y transformación de energía solar son los colectores solares, como se mencionó anteriormente se clasifican de acuerdo con su temperatura máxima accesible. Los colectores solares de baja temperatura están en el rango de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Blanco G. and Malato R., 2009], entre éstos, se tienen el colector solar de placa plana, compuesto parabólico, tubos de calor, y holográficos. El rango máximo de temperatura para el colector de temperatura media está entre $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ y comprende colectores como: cilindro parabólico y lineal de Fresnel; y cuando la temperatura máxima accesible supera los $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ son considerados colectores de alta temperatura como el sistema receptor central, los platos parabólicos y hornos solares [Ahmadi et al., 2020].

Para el estudio de este proyecto se va a trabajar con un colector solar de placa plana para aplicaciones de baja temperatura. En la Fig. 2.3, se observa el esquema de un colector solar de placa plana que está conformado por cinco elementos principales:

Cubierta de vidrio: debe poseer los coeficientes de transmisión y conductividad térmica adecuados para provocar el efecto invernadero y reducir las pérdidas.

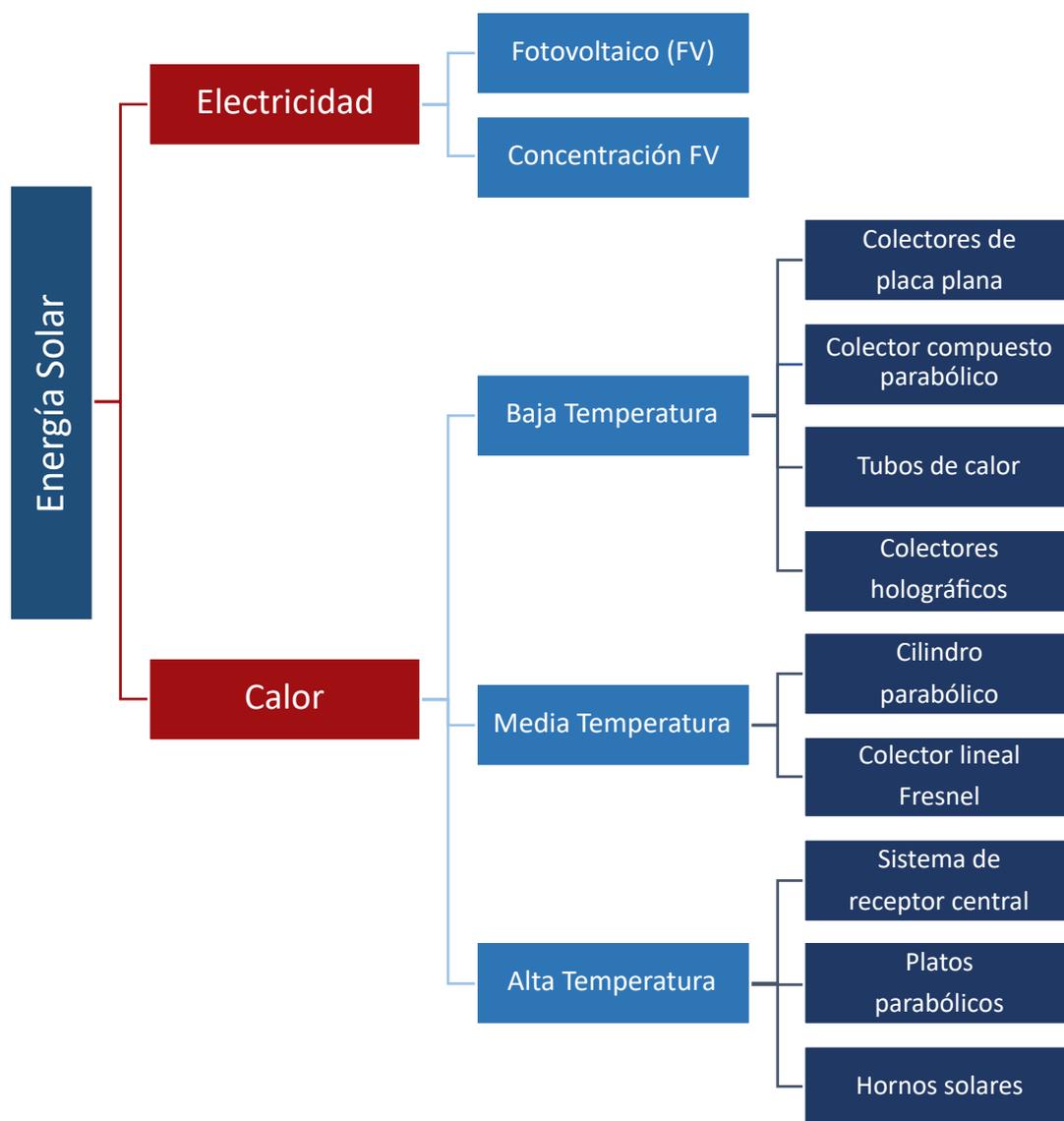


Figura 2.2: Clasificación de los colectores solares (Blanco G. y Malato R., 2009).

Placa absorbadora: recibe la radiación solar y la convierte en calor que se transmite al fluido de trabajo. La cara expuesta al sol debe captar la mayor cantidad de radiación por lo que se suele pintar de color negro o dotarla de una superficie selectiva (muy absorbente a la radiación y de baja emisividad).

Conducto de cobre: tubo de transporte del fluido de trabajo.

Aislamiento: se emplea para reducir las pérdidas térmicas en la parte trasera del absorbedor que debe ser de baja conductividad térmica. Los materiales pueden ser fibra de vidrio, fibra de roca, corcho, polietileno o poliuretano.

Carcasa: generalmente de aluminio o acero inoxidable, protege y soporta los elementos del colector, permitiendo además anclar y sujetar el colector a la estructura de

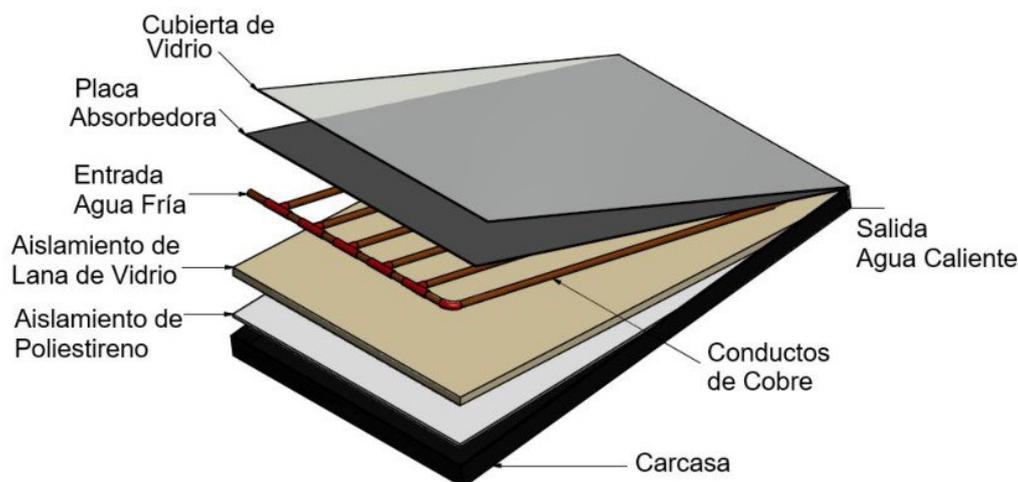


Figura 2.3: Colector solar de placa plana (Abril Ortega et al., 2017).

montaje. Debe resistir los cambios de temperatura y debe resistir la corrosión [Tiwari and Sahota, 2017].

2.4. Redes de Colectores Solares

Las redes de colectores solares consisten básicamente en conjuntos de colectores que están formados en combinaciones de arreglos en serie y paralelo. En la Fig. 2.4, se muestran las redes de colectores solares, las cuales presentan diferentes arreglos que pueden ser: arreglo en serie, arreglo en paralelo, una combinación serie-paralelo y el arreglo en cascada (es un caso particular del arreglo paralelo).

La configuración en serie (Fig. 2.4-a), está compuesta por un único circuito continuo con poco volumen de agua de circulación y un salto térmico superior, con un buen rendimiento. El arreglo de cascada (Fig. 2.4-b), funciona de manera similar que el arreglo paralelo, la diferencia radica en que el arreglo en cascada la distribución de los cabezales para la entrada y salida del flujo forman parte del colector [Picón-Núñez et al., 2014].

El arreglo en paralelo (Fig. 2.4-c) favorece que se pueda estratificar la temperatura del colector solar con mayor volumen de circulación del agua por las ramificaciones del interior del captador y así obtener un salto termodinámico de aproximadamente 10°C con un buen rendimiento. El arreglo serie-paralelo (Fig. 2.4-d) depende del caudal del fluido que se va a manejar y la carga térmica que se va a entregar.

El número de filas en paralelo se determina en función de la tasa de flujo de masa requerida para entregar la carga térmica especificada, mientras que el número de colectores

en serie se determina en función de la temperatura objetivo-requerida.

En el diseño de las redes de colectores solares se requiere el cumplimiento de objetivos térmicos, los cuales hacen referencia a la carga térmica, mientras que el objetivo hidráulico es la tasa de flujo de masa requerida que logrará la carga térmica especificada dentro de las limitaciones de la caída de presión. La cantidad de colectores solares o área de superficie de transferencia de calor requerida para alcanzar los objetivos depende de las condiciones ambientales elegidas para el diseño [Martínez-Rodríguez et al., 2018]. En base en lo discutido se observa la necesidad del desarrollo de un sistema de control que responda a los cambios meteorológicos y de operación, para esto, se recopila en una base de datos las mediciones diarias en diferentes horarios en un periodo de un año; con esta información se recurre a un modelo matemático, el cual permitirá analizar el desempeño del colector solar durante las estaciones climatológicas.

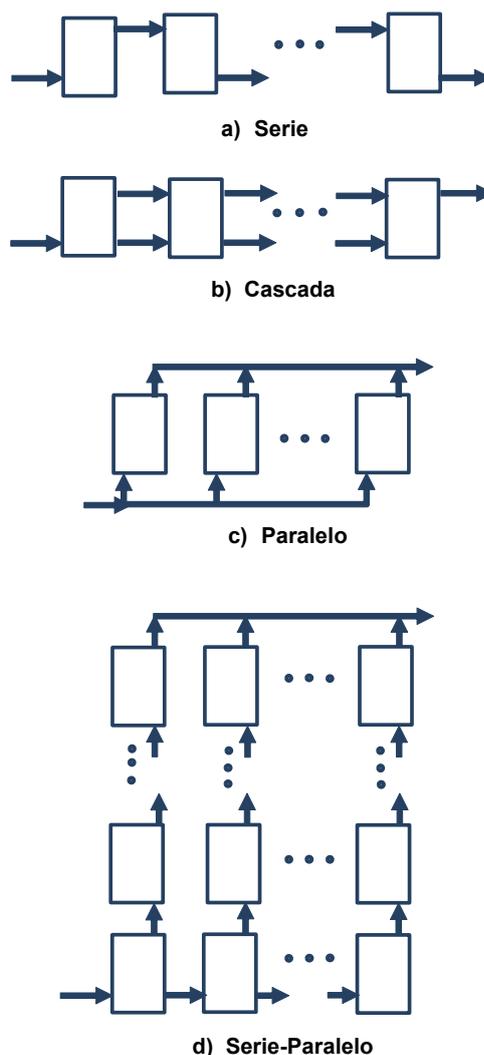


Figura 2.4: Arreglos de redes de colectores solares (Picón-Núñez et al., 2014).

2.5. Justificación

Los sistemas solares térmicos tienen el potencial de proporcionar el calor requerido para los procesos industriales de manera renovable y con una correcta integración energética pueden mejorar la eficiencia del proceso y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En los procesos es fundamental alcanzar siempre la temperatura objetivo de un colector solar, sin importar la variabilidad de las condiciones ambientales. Por esta razón es necesario realizar un esquema de control que permita mitigar las variaciones ambientales y de operación para lograr entregar una carga térmica continua.

En este trabajo de estudio se pretende evaluar por medio de un modelo matemático el efecto de la variabilidad de las condiciones ambientales y de operación en la temperatura objetivo del colector solar.

2.6. Objetivos

2.6.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de control para un colector y una red de colectores solares de baja temperatura conectados en serie que permita mitigar el efecto de la variación de las condiciones ambientales.

2.6.2. Objetivos Específicos

- Llevar a cabo un análisis de los datos de la radiación solar, velocidad del viento y la temperatura ambiente para el mes de enero, época de invierno en la ciudad de Guanajuato Capital.
- Simular el colector solar con las variaciones de las condiciones ambientales para un colector solar de placa plana y posteriormente extenderlo a una red de colectores solares de placa plana conectados en serie.
- Diseñar el esquema de control para mitigar los efectos de las condiciones ambientales.
- Evaluar cuantitativamente el esquema de control en la temperatura de salida.

Capítulo 3

MODELO MATEMÁTICO

El estudio de un modelo matemático dinámico para colectores solares de placa plana es de gran interés para predecir el comportamiento dependiente del tiempo, bajo una intensidad variable de radiación solar y condiciones climáticas, de esta manera evaluar y predecir con precisión el rendimiento térmico del colector solar reduciendo costos en la evaluación de diferentes colectores solares al comparar los parámetros del colector y en lo posible aumentado su eficiencia.

Agbo and Okoroigwe, 2007, estudiaron la influencia de la velocidad del viento, el número de cubiertas, temperatura ambiente, el espacio entre la placa absorbente y la cubierta, el ángulo de inclinación y la emisividad de la placa absorbente sobre el coeficiente general de pérdida de calor de un colector de placa plana basado en el modelo de Malhotra 1981. Demostrando que las pérdidas totales que se producen dentro de la unidad colectora del calentador de agua solar se ven afectadas por estos parámetros.

Hamed et al., 2013, desarrollaron un modelo de simulación dinámica para caracterizar el comportamiento de un colector solar de placa plana y determinar el rendimiento óptimo y los parámetros de diseño. Los parámetros de estudio fueron el caudal másico del agua, la temperatura de entrada del fluido, y el número de tubos, de esta manera se estudió la influencia de estos parámetros en la temperatura de salida del fluido y en el coeficiente de pérdidas de calor. El modelo matemático se estableció en relación con el análisis del balance energético del colector solar.

Se encontró que un aumento en los caudales de agua genera una disminución en la temperatura de salida y del coeficiente de pérdida de calor. También se observó que la temperatura de salida aumenta con la temperatura de entrada y adicionalmente se encontró que el número óptimo de tubos, que corresponde a la temperatura máxima

alcanzada por el fluido, depende del caudal del fluido en el tubo. De esta forma se obtiene una relación directa entre el flujo del fluido y el número óptimo de tubos.

Sun et al., 2016, presentaron un modelo matemático basado en el enfoque numérico de diferencias finitas para un colector solar de placa plana y se encontró que un aumento del flujo másico tiene un efecto negativo sobre la temperatura de salida, es decir, la temperatura de salida disminuye con el aumento del caudal másico. Además, con el aumento del flujo másico, aumenta la influencia de la temperatura ambiente en la eficiencia termo-hidráulica.

Silviano Mendoza and Martínez Rodríguez, 2018, presentaron el desarrollo de un modelo matemático en estado transitorio que permite predecir la temperatura de salida, considerando el coeficiente global de pérdidas de calor y la temperatura media de la placa en función del tiempo sin variar la temperatura ambiente y la velocidad del viento, que es lo que difiere al presente trabajo de estudio. Se logró observar que el modelo dinámico para un colector solar de placa plana es idóneo al predecir con exactitud la temperatura de salida del colector según los resultados obtenidos. El porcentaje de error entre la temperatura de salida teórica y experimental para los casos de estudio fue alrededor del 3 por ciento.

Sarwar et al., 2020, desarrolló un modelo termo-óptico para analizar el desempeño de un colector solar de placa plana para aplicaciones domésticas en condiciones climáticas semiáridas. Como resultado de este estudio se encontró que la eficiencia del colector era superior al 70 por ciento con ángulos de inclinación entre 12° y 52° . También se observó que no se podía mantener una temperatura de salida fija con un caudal fijo, sin embargo, se realizó la variación del flujo obteniendo una temperatura de salida fija de 50°C , si el flujo se encontraba en el rango de 0.01 kg/s a 0.1 kg/s.

Para este trabajo de investigación a diferencia de otros estudios, consideraremos las variaciones en el tiempo de la temperatura ambiente, irradiancia, velocidad del viento, coeficiente de pérdidas de calor, temperatura de entrada del fluido, flujo másico y la temperatura media de la placa. Teniendo en cuenta estas variables realizaremos el modelado matemático para predecir el comportamiento del colector solar.

3.1. Ecuaciones de Balance de Energía

A continuación, se describe el modelo matemático de transferencia de calor dinámico para un colector solar de placa plana utilizado para calcular el cambio de la temperatura de salida con respecto al tiempo, teniendo en cuenta las variaciones de la radiación, la velocidad del viento y la temperatura ambiente.

El balance global de energía para un colector solar es:

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{absorbido}} - Q_{\text{perdido}}, \quad (3.1)$$

donde $Q_{\text{útil}}$ es la energía ganada por el fluido de trabajo, $Q_{\text{absorbido}}$ es la energía total absorbida por la superficie del colector y Q_{perdido} es la energía perdida al ambiente por convección, conducción y radiación.

Definiendo cada término del balance global tenemos:

$$\begin{aligned} Q_{\text{útil}} &= \dot{m}C_p(T_o - T_i), \\ Q_{\text{absorbido}} &= A_s G_s \alpha \tau, \\ Q_{\text{perdido}} &= A_s U_L (T_{pm} - T_a), \end{aligned}$$

reemplazando cada término en el balance global obtenemos:

$$\dot{m}C_p(T_o - T_i) = A_s [G_s \alpha \tau - U_L (T_{pm} - T_a)], \quad (3.2)$$

donde \dot{m} es el flujo másico (kg/s), C_p es el calor específico (kJ/(kg °C)), T_o es la temperatura de salida del fluido (°C), T_i es la temperatura de entrada del fluido (°C), A_s es el área del colector (m²), G_s es la radiación solar (W/m²), α es la absorbancia de la capa selectiva, τ es la transmitancia de la cubierta de vidrio, U_L es el coeficiente global de pérdidas de calor (W/(m² °C)), T_{pm} es la temperatura media de la placa (°C), y T_a es la temperatura ambiente (°C).

Derivando (3.2) en función del tiempo, obtenemos el modelo matemático de transferencia de calor dinámico para un colector solar de placa plana que permite calcular el cambio en la temperatura de salida del fluido con respecto al tiempo, considerando las variaciones de irradiancia, velocidad del viento, temperatura ambiente, coeficiente global

de pérdidas de calor, temperatura de entrada del fluido, flujo másico y la temperatura media de la placa que es la temperatura en la placa que absorbe la radiación, y se transfiere al fluido en forma de calor. La absorbancia de la capa selectiva α y la transmitancia de la cubierta de vidrio τ se consideran constantes.

El balance de energía dinámico en función del tiempo se puede expresar como:

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{A_s}{\dot{m}C_p} \left[\alpha\tau \frac{dG_s}{dt} - (T_{pm} - T_a) \frac{dU_L}{dt} - U_L \frac{d(T_{pm} - T_a)}{dt} \right] + \frac{dT_i}{dt} - \frac{T_o - T_i}{\dot{m}} \frac{d\dot{m}}{dt}, \quad (3.3)$$

el coeficiente global de pérdidas de calor del colector U_L es la suma de los coeficientes de pérdida en la parte superior, inferior y en los bordes del colector:

$$U_L = U_t + U_b + U_e, \quad (3.4)$$

para desarrollar el concepto del coeficiente global de pérdidas de calor para un colector solar, se considera una red térmica para un sistema de una cubierta como se muestra en la Fig. 3.1, [Duffie and Beckman, 1982]:

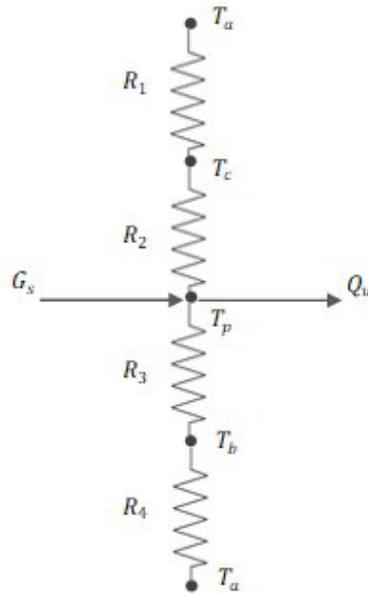


Figura 3.1: Red térmica para un colector solar en términos de resistencias (Duffie y Beckman, 1982).

U_t es el coeficiente de pérdidas de calor en la parte superior que va desde la placa del

colector al ambiente, y se define como:

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2} = \left(\frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} + \frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} \right)^{-1}, \quad (3.5)$$

donde h_w es el coeficiente de transferencia de calor del viento ($W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$), $h_{r,c-a}$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación de la cubierta hacia el ambiente ($W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$), $h_{c,p-c}$ es el coeficiente de transferencia de calor por convección de la placa hacia la cubierta ($W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$), y $h_{r,p-c}$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación de la placa hacia la cubierta ($W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$).

$$\begin{aligned} h_w &= 2.8 + 3.0v, \\ h_{r,c-a} &= \varepsilon_c \sigma (T_s^2 + T_c^2)(T_s + T_c), \\ h_{c,p-c} &= N_u \frac{k}{L}, \\ h_{r,p-c} &= \frac{\sigma (T_p^2 + T_c^2)(T_p - T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1}, \end{aligned}$$

donde k es la conductividad térmica del fluido ($W/(m \text{ } ^\circ C)$), L es la longitud característica (m), N_u es el número de Nusselt, v es la velocidad del viento (m/s), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$), ε_c es la emisividad de la cubierta, ε_p es la emisividad de la placa, T_s es la temperatura del cielo ($^\circ C$), T_p es la temperatura de la placa ($^\circ C$), y T_c es la temperatura de la cubierta ($^\circ C$).

En la ecuación (3.3) se puede observar el término de la derivada de $\frac{dU_L}{dt}$ que requiere ser derivada, para ello resolvemos la derivada de U_t de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} U_t &= \frac{1}{\Sigma R} = \left(\frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} + \frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} \right)^{-1}, \\ U_t &= \frac{1}{\left(\frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} + \frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} \right)}, \end{aligned}$$

a cada término del denominador le asignaremos una letra para reducir los términos de la ecuación:

$$\begin{aligned} h_{c,p-c} + h_{r,p-c} &= B, \\ h_w + h_{r,c-a} &= C, \end{aligned}$$

reemplazando B y C en la ecuación tenemos:

$$U_t = \frac{1}{\left(\frac{1}{B} + \frac{1}{C}\right)},$$

derivamos U_t con respecto al tiempo para obtener la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \frac{dU_t}{dt} &= -\frac{\left(-\frac{dB}{B^2} - \frac{dC}{C^2}\right)}{\left(\frac{1}{B} + \frac{1}{C}\right)^2}, \\ \frac{dU_t}{dt} &= \frac{C^2 \frac{dB}{dt} + B^2 \frac{dC}{dt}}{(B + C)^2}, \end{aligned}$$

partiendo de la igualdad de B:

$$\begin{aligned} B &= h_{c,p-c} + h_{r,p-c}, \\ B &= N_u \frac{k}{L} + \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p - T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1}, \end{aligned}$$

derivamos B con respecto al tiempo para encontrar $\frac{dB}{dt}$:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \left[\left(2T_p \frac{dT_p}{dt} + 2T_c \frac{dT_c}{dt} \right) (T_p - T_c) + (T_p^2 + T_c^2) \left(\frac{dT_p}{dt} - \frac{dT_c}{dt} \right) \right].$$

De la misma manera partiendo de la igualdad de C:

$$\begin{aligned} C &= h_w + h_{r,c-a}, \\ C &= 2.8 + 3.0v + \varepsilon_c \sigma (T_s^2 + T_c^2) (T_s + T_c), \end{aligned}$$

derivamos C con respecto al tiempo para encontrar $\frac{dC}{dt}$:

$$\frac{dC}{dt} = 3.0 \frac{dv}{dt} + \varepsilon_c \sigma \left[\left(2T_s \frac{dT_s}{dt} + 2T_c \frac{dT_c}{dt} \right) (T_s + T_c) + (T_s^2 + T_c^2) \left(\frac{dT_s}{dt} + \frac{dT_c}{dt} \right) \right].$$

Finalmente podemos reemplazar las derivadas encontradas $\frac{dB}{dt}$ y $\frac{dC}{dt}$ en la ecuación $\frac{dU_t}{dt}$.

La pérdida de energía a través de la parte inferior del colector está representada por la resistencia R_3 como se muestra en la Fig. 3.1, que representa la resistencia al flujo de calor a través del aislamiento y la resistencia R_4 representa la resistencia a la convección y la

radiación hacia el ambiente. Es posible suponer que R_4 es cero ya que toda la resistencia al flujo de calor se debe al aislamiento [Duffie and Beckman, 1982].

Por lo tanto, el coeficiente de pérdida de energía en el fondo del colector U_b se define como:

$$U_b = \frac{1}{R_3} = \frac{k}{L_b}, \quad (3.6)$$

donde k es la conductividad térmica del aislamiento ($\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$) y L_b es el espesor del aislamiento inferior (m). U_e es el coeficiente de pérdida en los bordes y se define como:

$$U_e = \frac{kP_cE_c}{L_eA_s}, \quad (3.7)$$

donde k es la conductividad térmica del aislamiento ($\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$), P_c es el perímetro del colector (m), E_c es el espesor del colector (m), L_e es el espesor del aislamiento del borde (m), y A_s es el área del colector (m^2).

3.2. Características del Colector Solar de Placa Plana

Para el estudio del proyecto se trabajará con un colector solar de placa plana, los datos experimentales se obtuvieron del banco de datos existentes en el Laboratorio de Ensayos Solares de la Universidad de Guanajuato, en la ciudad de Guanajuato Capital. Las características del colector solar se muestran en la Tabla. 3.1:

Características del Colector Solar		
Longitud del colector	L_c	1.9 m
Ancho del colector	A_c	0.9975 m
Espesor del colector	E_c	0.07 m
Perímetro del colector	P	5.595 m
Número de cubiertas	N	1
Emitancia de la cubierta	ε_c	0.91
Emitancia de la placa	ε_p	0.88
Inclinación del colector	β	21°

Tabla 3.1: Características del colector solar de placa plana.

3.3. Análisis de Datos Ambientales

Se realizó un análisis de los datos ambientales experimentales proporcionados por el Laboratorio de Ensayos Solares de la Universidad de Guanajuato, donde se obtuvo información sobre irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento, analizando para cada una de estas variables 600 datos/día para el mes de enero.

Para el estudio de este trabajo, se decidió trabajar con datos del mes de enero, debido a que en este mes en la ciudad de Guanajuato es temporada de invierno y la irradiancia es menor en esta época del año.

- Primero se graficaron los datos experimentales obtenidos para cada día del mes por un periodo de tiempo que va desde las 8 horas hasta las 16 horas del día, se obtuvo la gráfica como se muestra en la Fig. 3.2, y se consideró el ajuste a un polinomio de segundo grado para los datos de irradiancia ya que su comportamiento tiende a ser una parábola, encontrando que la ecuación de la función polinomial es $I(t) = -25,173t^2 + 646,5t - 3549,2 \text{ W/m}^2$ con un ajuste $R^2 = 0,8443$.

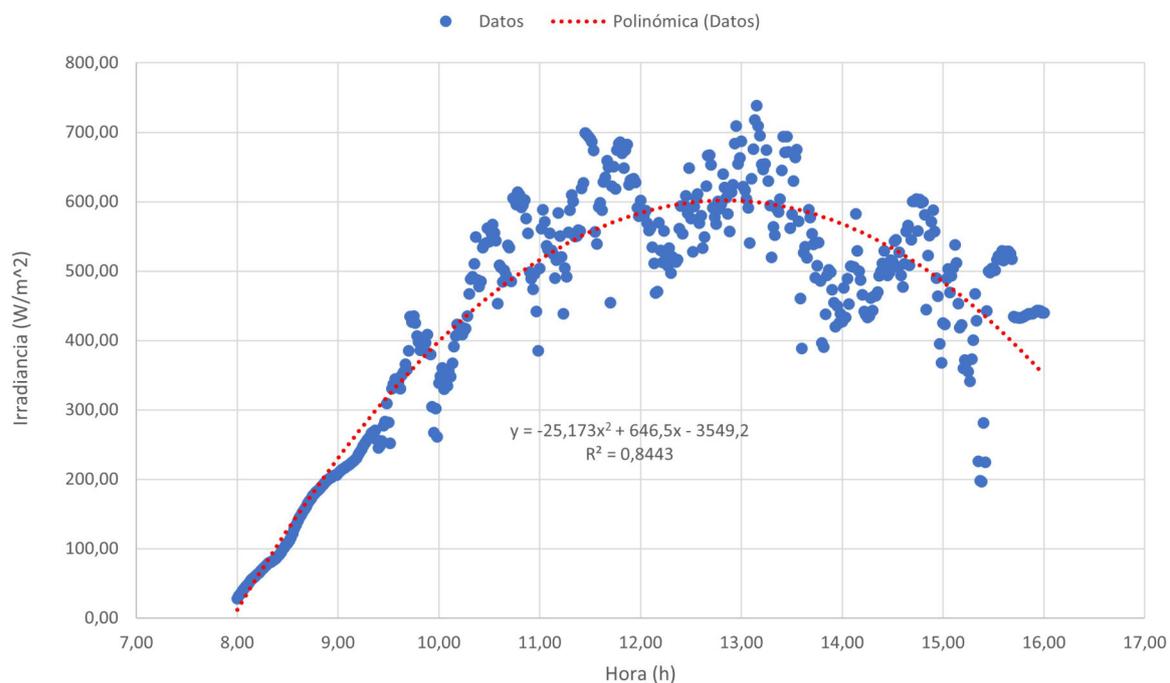


Figura 3.2: Irradiancia día 13 de enero.

Integramos este polinomio variable en el tiempo entre las 8 horas y las 16 horas de cada día y determinamos la irradiación incidente en un período de tiempo por metro cuadrado para cada día del mes de enero. Encontramos que el día 13 de enero, fue

el día con la irradiación más baja, con un valor de 3600 Wh/m^2 , de esta manera se decidió trabajar con los datos del día de menor radiación para el mes de enero.

- Utilizando como referencia los datos del día 13 de enero, se graficaron los datos de temperatura ambiente entre las 8 horas y las 16 horas del día como se muestra en la Fig. 3.3, y se consideró el ajuste a un polinomio de tercer grado, encontrando que la ecuación de la función polinomial es $T(t) = -0,0326t^3 + 1,191t^2 - 13,208t + 62,357$ °C con un ajuste $R^2 = 0,9714$.

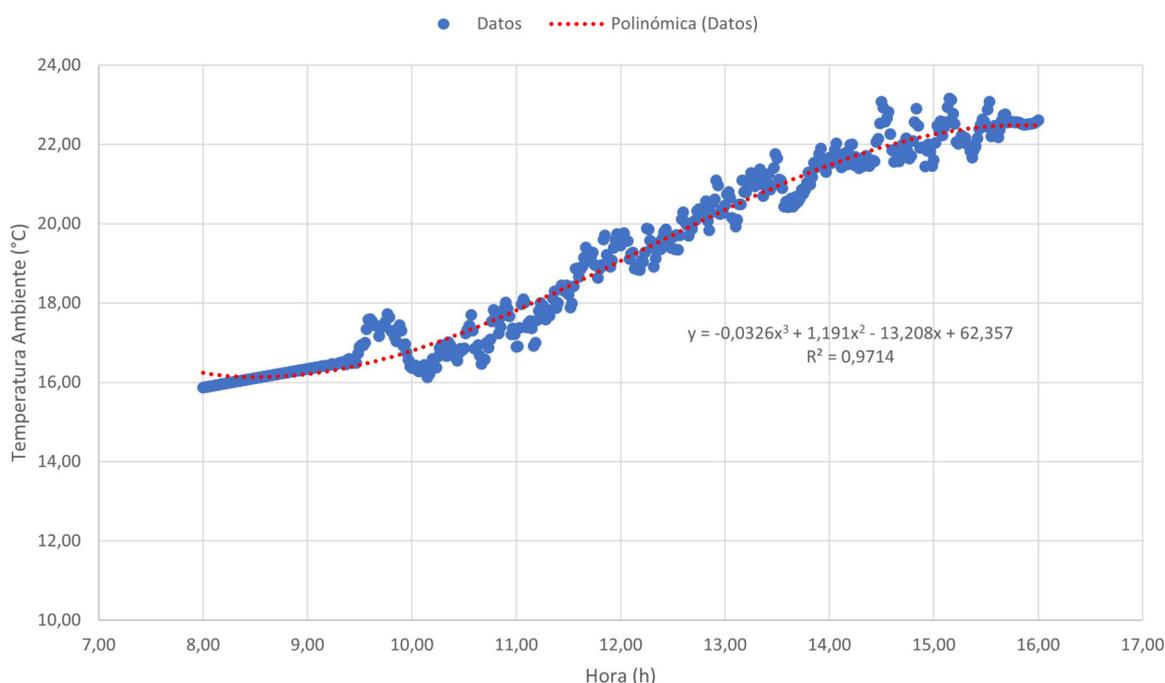


Figura 3.3: Temperatura Ambiente día 13 de enero.

Integramos este polinomio variable en el tiempo entre las 8 horas y las 16 horas de cada día utilizando el teorema del valor medio para encontrar la temperatura ambiente media de cada día, se encontró que la temperatura ambiente media para el día 13 fue de 19.5 °C.

- También se graficaron los datos de la velocidad del viento entre las 8 horas y las 16 horas del día como se muestra en la Fig. 3.4, y se consideró el ajuste a un polinomio de cuarto grado, encontrando que la ecuación de la función polinomial es $v(t) = 0,0096t^4 - 0,4614t^3 + 8,1035t^2 - 61,287t + 169,04$ m/s con un ajuste $R^2 = 0,4599$.

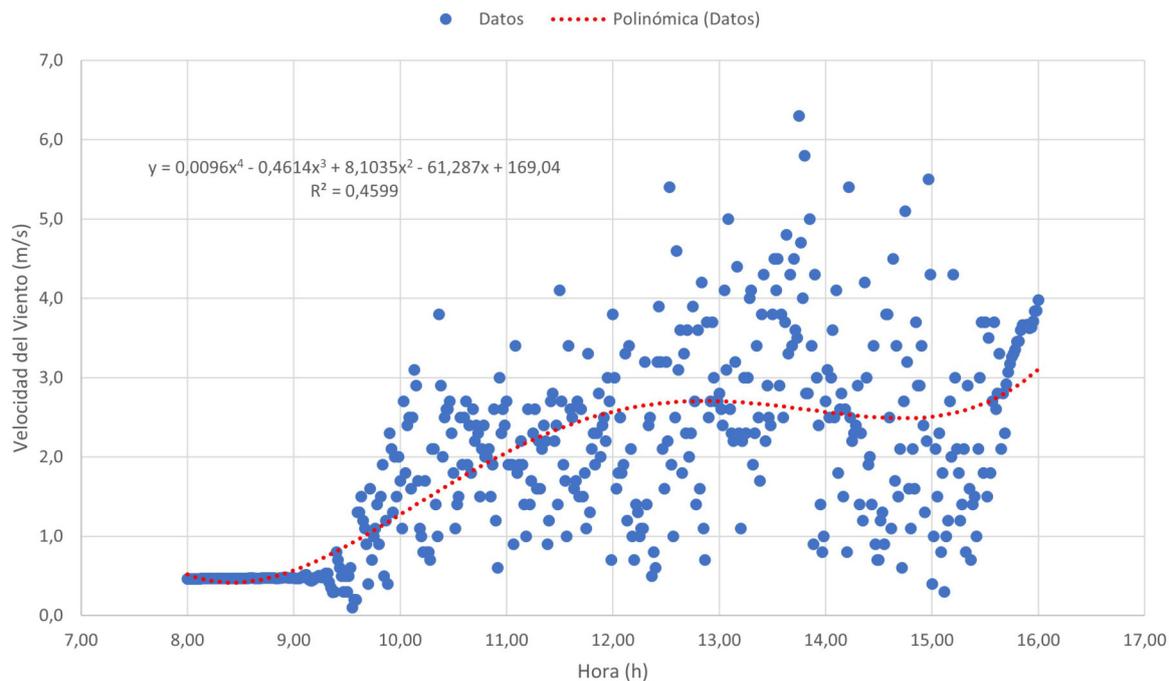


Figura 3.4: Velocidad del viento día 13 de enero.

De la misma manera integramos este polinomio variable en el tiempo entre las 8 horas y las 16 horas de cada día utilizando el teorema del valor medio para encontrar la velocidad del viento media de cada día, y se encontró que la velocidad del viento media para el día 13 fue de 2.1 m/s.

Capítulo 4

CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS

El control automático ha desarrollado un importante avance en la ingeniería y la ciencia, mejorando nuestra calidad de vida y convirtiéndose en una parte esencial e integral en los sistemas robóticos, procesos modernos de producción y en cualquier otra operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc. También es fundamental la implementación de los sistemas de control por diferentes razones como:

- Prevenir accidentes entre el personal de una planta, proteger el medio ambiente evitando emisiones contaminantes y reduciendo los desperdicios, además de prevenir daños en los equipos de procesos. La seguridad es la consideración más importante en cualquier proceso.
- Mantener y mejorar la calidad un producto (composición, pureza, color, etc.) de forma constante, con un costo mínimo.
- Los procesos se automatizan para proveer un ambiente seguro y a la vez mantener la calidad deseada de algún producto, con un alto volumen de producción y una demanda reducida de mano de obra.

En un proceso o sistema de control intervienen un conjunto de elementos interrelacionados capaces de realizar una operación dada o de satisfacer una función deseada, el objetivo de un sistema de control automático de procesos es mantener la variable controlada en su referencia o set point a pesar de las perturbaciones, ajustando la variable manipulada. Estos sistemas de control se pueden representar en forma de diagramas de bloques para simplificar las relaciones entre la entrada y la salida de un sistema físico [Smith and Corripio, 2014].

Los sistemas de control se diseñan para realizar tareas específicas, imponiendo requisitos sobre el sistema como especificaciones de comportamiento. Establecer los parámetros del controlador es el primer paso para llevar al sistema a un comportamiento satisfactorio. Para el diseño, se parte de un modelo matemático del sistema a controlar y se identifican sus parámetros. Una vez obtenido un modelo matemático satisfactorio, se debe probar el sistema en lazo abierto. Si se asegura la estabilidad en lazo abierto, se puede diseñar sin mucho problema un sistema en lazo cerrado [Ogata, 2010].

4.1. Tipos de Sistemas de Control

4.1.1. Sistemas de Lazo Abierto

Los sistemas de lazo abierto son aquellos en los que la acción de control es independiente de la salida, es decir, la señal de salida no influye sobre la señal de entrada. En la Fig. 4.1, se representa el diagrama de bloques para un sistema de lazo abierto.

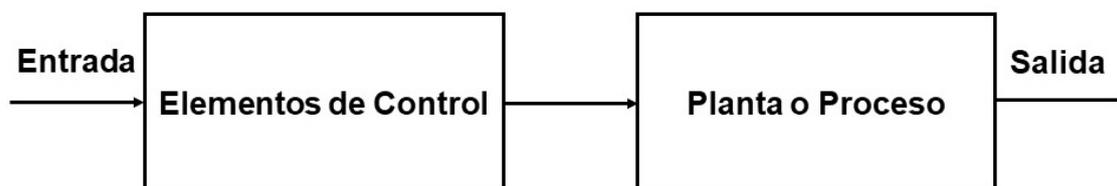


Figura 4.1: Diagrama de bloques para un sistema en lazo abierto.

4.1.2. Sistemas de Lazo Cerrado

Los sistemas de lazo cerrado son aquellos en los que la acción de control depende en cierto modo de la salida, es decir, la señal de salida influye en la entrada. Para esto es necesario que la entrada sea modificada en cada instante en función de la salida. Esto se consigue por medio de lo que llamamos retroalimentación o feedback. La retroalimentación es la propiedad de un sistema en lazo cerrado por la cual la salida o cualquier otra variable del sistema que esté controlada se compara con la entrada del sistema o una de sus entradas, de manera que la acción de control se establezca como una función de ambas.

En la Fig. 4.2, se representa el diagrama de bloques para un sistema de lazo cerrado [Smith and Corripio, 2014].

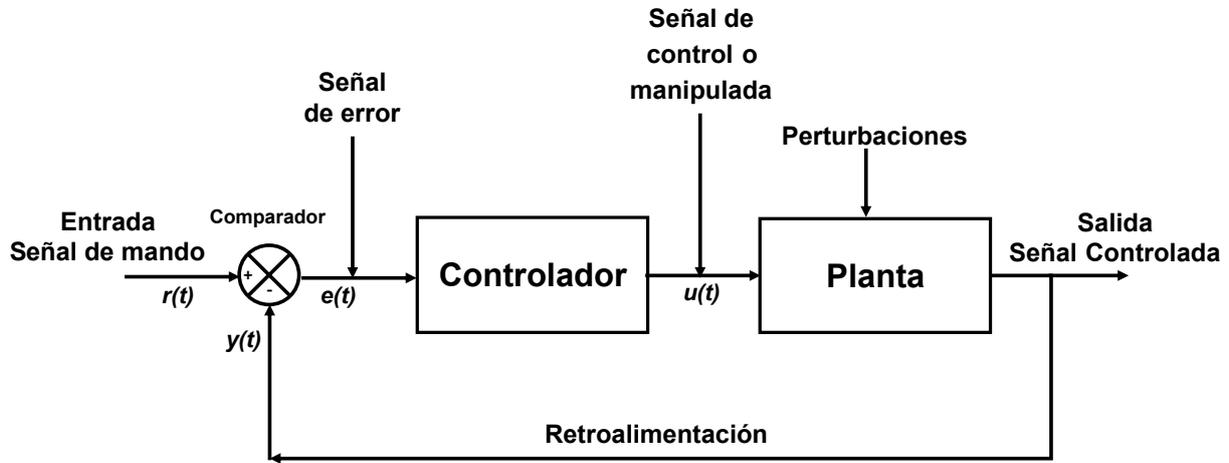


Figura 4.2: Diagrama de bloques para un sistema en lazo cerrado [Ogata, 2010].

Para el diseño de un sistema de control es fundamental obtener el modelo matemático de la planta o del objeto de control. Cualquier modelo de una planta que se quiere controlar incluirá un error debido al proceso de modelado. Se debe asumir desde el comienzo que existe una incertidumbre o error entre la planta real y el modelo matemático e incluir dicha incertidumbre o error en el proceso, este diseño se denomina sistema de control robusto [Ogata, 2010].

El error o diferencia entre los valores de entrada y salida, actúa sobre los elementos de control en el sentido de reducirse a cero y llevar la salida a su valor correcto, con lo que se genera la siguiente señal de error:

$$e(t) = r(t) - y(t),$$

donde $e(t)$ es la señal de error, $r(t)$ la señal de referencia y $y(t)$ la salida retroalimentada.

Los sistemas en lazo cerrado son mucho menos sensibles a las perturbaciones que los de lazo abierto, ya que cualquier modificación de las condiciones del sistema afectará a la salida, pero este cambio será registrado por medio de la retroalimentación como un error que es en definitiva la variable que actúa sobre el sistema de control. De este modo, las perturbaciones se compensan, y la salida se independiza de las mismas [Ogata, 2010].

4.2. Aplicaciones de Control en Sistemas Solares

La energía solar térmica es una fuente principal de energía primaria que puede ser acoplada a procesos industriales tales como; plantas de destilación para producir agua dulce [Alarcón et al., 2005], biorreactores para producir biomasa [Fernández et al., 2012], hornos y sistemas de aire acondicionado [Zambrano et al., 2008], entre otros. Estos procesos térmicos, se aplican a campos de colectores solares para calentar agua u otro fluido de trabajo, que son utilizados para alimentar en muchas ocasiones el proceso principal de la planta, como por ejemplo evaporadores en plantas de destilación o enfriadores de absorción en instalaciones de aire acondicionado.

De esta manera, la temperatura del fluido calentado debe controlarse para permitir el correcto funcionamiento de estas etapas principales, lo que constituye un problema de control importante debido a la dinámica de sistemas no lineales que suelen ser complejos debido a que se consideran diferentes variables, parámetros y perturbaciones que caracterizan o afectan el comportamiento del sistema de un colector solar [Camacho et al., 2012].

Con el tiempo se han planteado diferentes esquemas de control, Álvarez et al., 2009, propusieron un control repetitivo adaptativo a un controlador PD utilizando como variable manipulada el flujo del fluido y usando como variable controlada la temperatura de salida del fluido, con el fin de mejorar el control en campos de colectores solares, y asumiendo que las variables de perturbación como la irradiancia, temperatura ambiente y la temperatura de entrada no variaban en el modelo matemático.

Cirre et al., 2010, propusieron un esquema de control PID robusto para controlar la temperatura de salida en un campo de colector solar distribuido, manipulando la variable del flujo másico. En la configuración del control utilizaron un feedforward en serie para linealizar el sistema y compensar las perturbaciones como la irradiancia, temperatura ambiente y la temperatura de entrada.

Buzás and Kicsiny, 2014, propusieron un esquema de control PI mediante un modelo matemático lineal para aplicaciones de calentamiento de agua doméstica con el fin de controlar la temperatura de salida en el colector solar. Consideraron como variable manipulada la tasa de flujo y como perturbaciones la irradiancia, temperatura ambiente y la temperatura de entrada, sin considerar variable el coeficiente de pérdidas de calor y la velocidad del viento. Encontraron que el esquema de control era apropiado para el

sistema debido a su precisión y rapidez.

Lima et al., 2016, realizaron un control de la temperatura de salida de un campo colector solar de una planta desalinizadora utilizando el Control de Matriz Dinámica Filtrada (FDMC), el cual consiste en una estrategia de control predictivo ampliamente utilizada en la industria, manipulando la variable del flujo másico de agua y considerando como perturbaciones la irradiancia, la temperatura ambiente, y la temperatura de entrada.

Navas et al., 2018, propusieron una estrategia de control con un controlador MPC (Model Predictive Control), manipulando la variable del flujo del fluido, y controlando la temperatura de salida, logrando una mayor producción de energía generada por el campo solar teniendo en cuenta la variación de la radiación solar y la temperatura de entrada.

Guzmán et al., 2020, presentaron para un colector solar, un control PID con retroalimentación en paralelo propuesto anteriormente por Camacho et al., 2012, manipulando la variable del flujo másico y controlando la temperatura de salida del colector, con este enfoque se encontró que el sistema de control reaccionaba instantáneamente a los cambios en las perturbaciones de la temperatura ambiente, irradiancia y temperatura de entrada, mejorando la respuesta del esquema de control y manteniendo la temperatura de salida constante.

En este trabajo de investigación a diferencia de otros estudios de control en colectores solares, consideraremos un esquema de control PI mediante un modelo matemático no lineal, utilizando como variable manipulada la derivada del flujo másico y como variable controlada la temperatura de salida del fluido en el colector solar, teniendo en cuenta principalmente las perturbaciones variantes en el tiempo como la irradiancia, la temperatura ambiente, la temperatura de entrada, la velocidad del viento, el coeficiente global de pérdidas de calor, el flujo másico y la temperatura media de la placa.

4.3. Esquema de Control para un Colector Solar

En nuestro caso de estudio para lograr la temperatura objetivo en un colector solar de placa plana y mantener constante la temperatura durante toda la aplicación del proceso es necesario diseñar un esquema de control.

Primero se consolidó el modelo matemático que describe el comportamiento de la temperatura de salida en el colector solar, mediante la ecuación (3.3), descrita en la

Sección 3.1 del Capítulo 3.

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{A_s}{\dot{m}C_p} \left[\alpha\tau \frac{dG_s}{dt} - (T_{pm} - T_a) \frac{dU_L}{dt} - U_L \frac{d(T_{pm} - T_a)}{dt} \right] + \frac{dT_i}{dt} - \frac{T_o - T_i}{\dot{m}} \frac{d\dot{m}}{dt}.$$

En el modelo matemático hay tres variables que pueden ser usadas como variable manipulada como son; la derivada de la temperatura de entrada $\frac{dT_i}{dt}$, el flujo másico \dot{m} , y la derivada del flujo másico $\frac{d\dot{m}}{dt}$, analizaremos cuál de las tres variables resulta más conveniente para el esquema de control:

- La derivada de la temperatura de entrada $\frac{dT_i}{dt}$, no es la variable más conveniente ya que se requeriría de un factor externo (calentador) para cambiar la temperatura de entrada.
- El flujo másico \dot{m} , sería la variable ideal para ser manipulada, sin embargo, la variable en la ecuación está en el denominador, puesto que no se encuentra en forma lineal.
- La derivada del flujo másico $\frac{d\dot{m}}{dt}$, es la variable más conveniente para ser manipulada ya que está en forma lineal y no requiere de ningún factor externo.

Por consiguiente, se considerará como variable manipulada la derivada del flujo másico $\frac{d\dot{m}}{dt}$ y como variable controlada la temperatura de salida T_o , con el fin de mitigar las perturbaciones ambientales y de operación como la irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento, temperatura media de la placa y el coeficiente global de pérdidas de calor. En la Fig. 4.3, se presenta el esquema de control propuesto para garantizar una temperatura de salida constante.

Donde r será la temperatura objetivo de referencia o set point constante, $y(t)$ será la temperatura de salida del colector retroalimentada y $e(t)$ será la función error que es la diferencia entre la temperatura objetivo y la temperatura de salida retroalimentada.

4.4. Controladores Automáticos

Para llevar a cabo el control del colector solar es indispensable y necesario utilizar un controlador automático, el cual se encargará de comparar el valor real de la temperatura de salida del colector con la temperatura objetivo o de referencia que es el valor deseado,

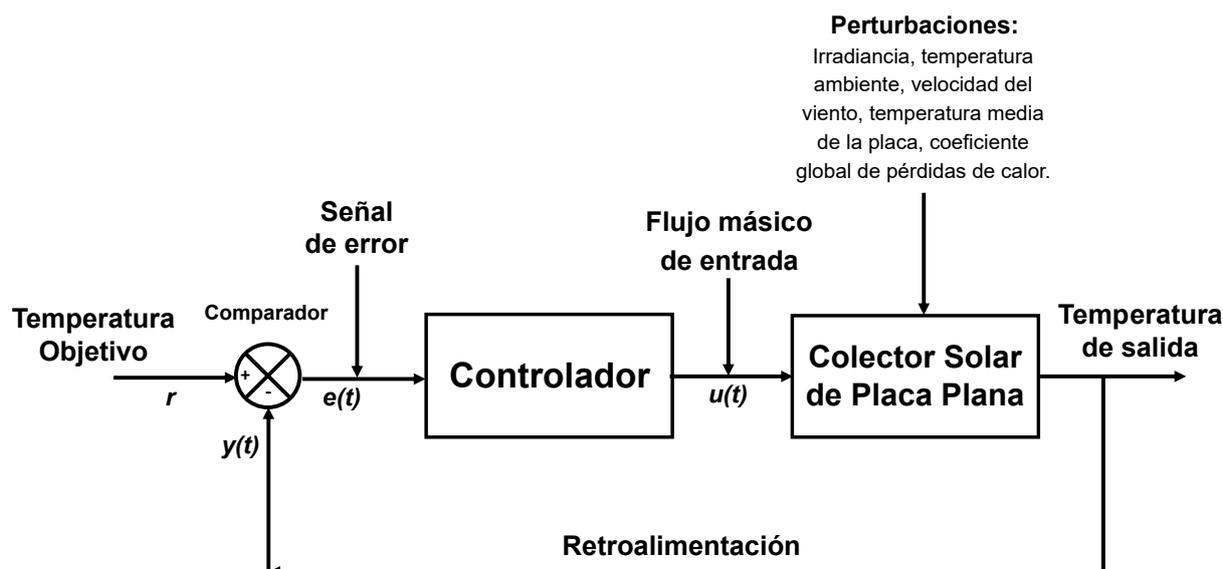


Figura 4.3: Esquema de control para un colector solar de placa plana.

para ello se determina la desviación y se genera una señal de control o acción de control que reduce la desviación a cero o a un valor muy pequeño. Algunas de estas acciones se conocen como acciones básicas de control, mientras que otras se pueden presentar como combinaciones de las acciones básicas como se muestra en la Tabla. 4.1:

Acciones básicas	Combinación de acciones básicas
Proporcional (P)	Proporcional - Integral (PI)
Derivativo (D)	Proporcional - Derivativo (PD)
Integral (I)	Proporcional - Integral - Derivativo (PID)

Tabla 4.1: Acciones básicas de control.

- Controlador Proporcional (P):** en este regulador la señal de salida del controlador $u(t)$, es proporcional a la señal del error del sistema $e(t)$. Este tipo de control se reduce a una constante, denominada ganancia proporcional K_p , que determinará el nivel de amplificación del elemento de control.

$$u(t) = K_p e(t). \quad (4.1)$$

- Controlador Integral (I):** en un controlador integral, la señal de salida del controlador $u(t)$, cambia a una razón proporcional a la señal del error $e(t)$, o dicho de otra manera, el valor de la acción de control es proporcional a la integral de la señal del error, donde K_i es una constante ajustable.

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t), \quad (4.2)$$

o bien;

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt. \quad (4.3)$$

- **Controlador Proporcional Integral (PI):** la combinación de estas dos acciones se complementan, ya que la primera en actuar es la acción proporcional (instantáneamente) mientras que la integral actúa durante un intervalo de tiempo, de esta manera, por medio de la acción integral se elimina la desviación remanente (proporcional).

Para el diseño de nuestro esquema de control en el colector solar, se regulará la temperatura de salida del colector, mediante la función error $e(t) = T_o^* - T_o$, donde T_o^* es constante, ya que es la temperatura objetivo requerida. Para llevar $e(t) \rightarrow 0$, utilizamos un control PI cuya variable de control es $u(t) = \frac{dm}{dt}$; es decir:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (4.4)$$

por lo tanto, el controlador PI tiene dos parámetros, K_p y K_i , ambos deben ajustarse o sintonizarse para obtener un control satisfactorio, en nuestro caso de estudio para lograr mantener la temperatura constante en el colector se realizó la sintonización mediante simulaciones estimando un valor de K_p de 0.1 y K_i de 0.1, en el siguiente capítulo se mostrara que estos valores son capaces de satisfacer nuestro objetivo de control [Smith and Corripio, 2014].

Aplicamos dicha ley de control al modelo dinámico en (3.3), posteriormente en el Capítulo 5 mostramos el desempeño del sistema de lazo cerrado en condiciones ambientales reales variables en el tiempo. Se debe tener en cuenta que para realizar las simulaciones (en lazo cerrado) debemos conocer los valores en el tiempo de las derivadas: $G_s(t)$, $T_{pm}(t)$, $T_i(t)$ y $U_L(t)$. Estas derivadas de tiempo se calculan fuera de línea y luego se alimentan al modelo. La exigencia de tales derivadas dificulta la implementación en línea de este esquema de control, ya que son difíciles o imposibles de medir en la práctica.

4.5. Control en una Red de Colectores Solares

Para el control de una red de colectores solares consideraremos una red conectada en serie, con las mismas condiciones ambientales y de operación, donde la temperatura de salida del primer colector se convertirá en la temperatura de entrada del segundo colector como se muestra en la Fig. 4.4.

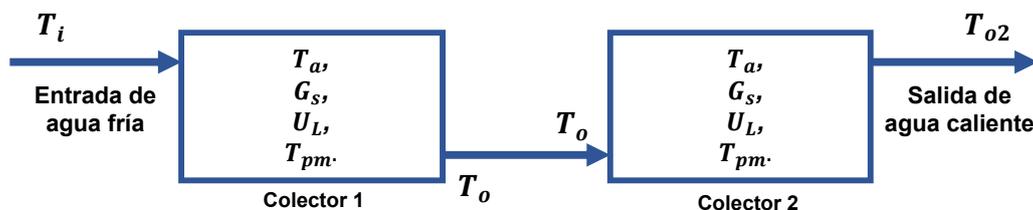


Figura 4.4: Colectores solares conectados en serie.

A continuación se presenta el modelo matemático descrito para el primer colector conectado en serie:

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{A_s}{\dot{m}C_p} \left[\alpha\tau \frac{dG_s}{dt} - (T_{pm} - T_a) \frac{dU_L}{dt} - U_L \frac{d(T_{pm} - T_a)}{dt} \right] + \frac{dT_i}{dt} - \frac{T_o - T_i}{\dot{m}} \frac{d\dot{m}}{dt},$$

y el modelo dinámico que describe al segundo colector conectado en serie es:

$$\frac{dT_{o2}}{dt} = \frac{A_s}{\dot{m}C_p} \left[\alpha\tau \frac{dG_s}{dt} - (T_{pm} - T_a) \frac{dU_L}{dt} - U_L \frac{d(T_{pm} - T_a)}{dt} \right] + \frac{dT_o}{dt} - \frac{T_{o2} - T_o}{\dot{m}} \frac{d\dot{m}}{dt},$$

donde T_{o2} es la temperatura de salida del segundo colector y T_o es la temperatura de salida del primer colector, la cual se convertirá en la temperatura de entrada para el segundo colector.

Capítulo 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Irradiación

Como se había mencionado en el Capítulo 3 en la Sección 3.3., para los datos de irradiancia se consideró el ajuste a un polinomio de segundo grado y a éste se le calculó la integral en el tiempo, para determinar la irradiación que incide durante un período de tiempo por metro cuadrado en cada día del mes de enero.

La variación en la irradiación con respecto a cada día de enero se puede observar en la Fig. 5.1 de manera ordenada de menor a mayor, encontrando que el día 13 fue el día con la irradiación más baja con un valor de 3600 Wh/m^2 y el día 30 fue el de mayor irradiación con un valor de 5200 Wh/m^2 .

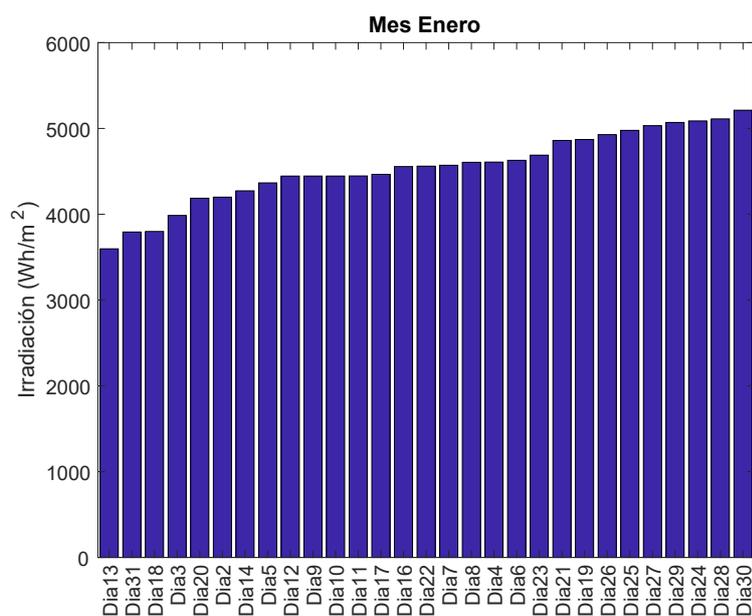


Figura 5.1: Irradiación para cada día del mes de enero.

En la Fig. 5.2, se puede observar el ajuste R^2 para la irradiación en cada día, encontrando que la curva se ajusta al polinomio de segundo orden en la mayoría de los días del mes de enero.

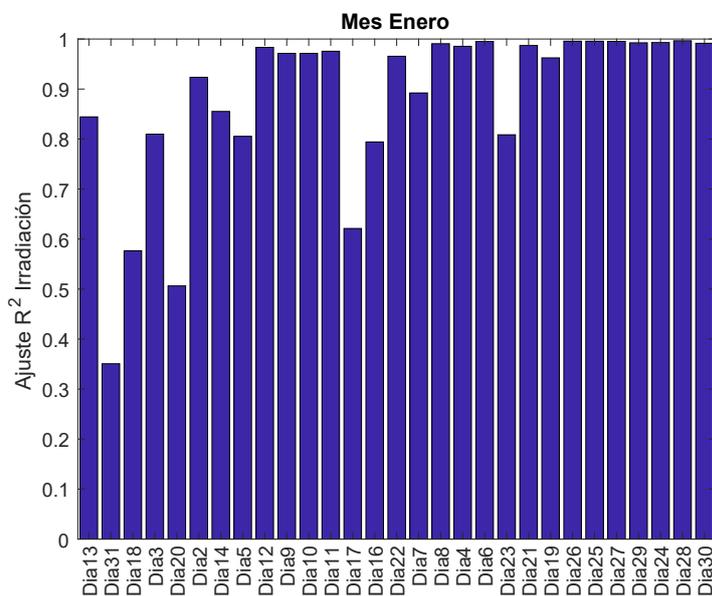


Figura 5.2: Ajuste R^2 irradiación.

Con base en los resultados de la Fig. 5.1 se realizó un histograma para tener una perspectiva de la incidencia o distribución de la energía en el mes de enero.

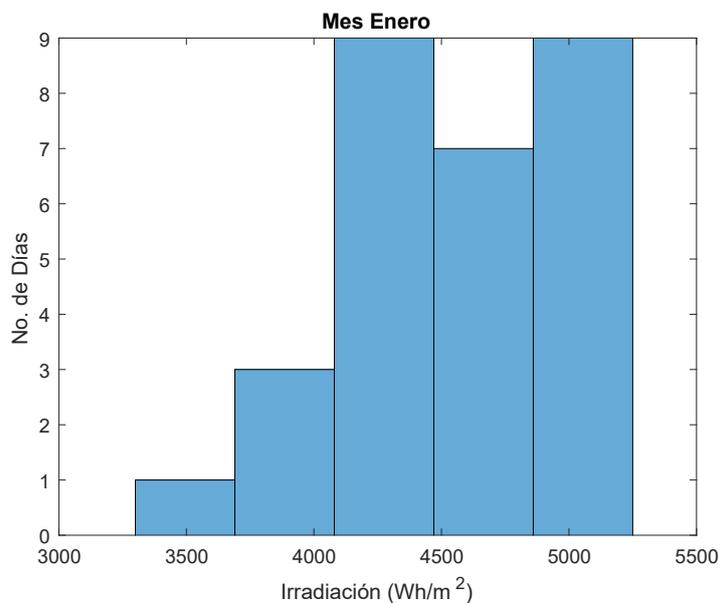


Figura 5.3: Histograma irradiación.

En la Fig. 5.3, se puede observar una distribución de la irradiación en cinco rangos, encontrando que el conjunto de datos es bimodal, esto quiere decir que hay dos picos

que se relacionan por tener la frecuencia más alta. Para el caso de estudio del mes enero es más probable que los días estén en uno de los dos rangos de irradiación entre 4080 Wh/m² y 4470 Wh/m² o entre 4860 Wh/m² y 5250 Wh/m².

5.2. Temperatura Ambiente

Para los datos de temperatura ambiente, se consideró el ajuste a un polinomio de tercer grado y se obtuvo la integral del valor medio, para determinar la temperatura ambiente media en cada día del mes de enero.

En la Fig. 5.4 se puede observar de manera ordenada de menor a mayor la variación de la temperatura ambiente media con respecto a cada día del mes de enero, encontrando que el día 16 fue el de menor temperatura media con un valor de 15 °C y el día 24 fue la de mayor temperatura media con un valor de 24 °C.

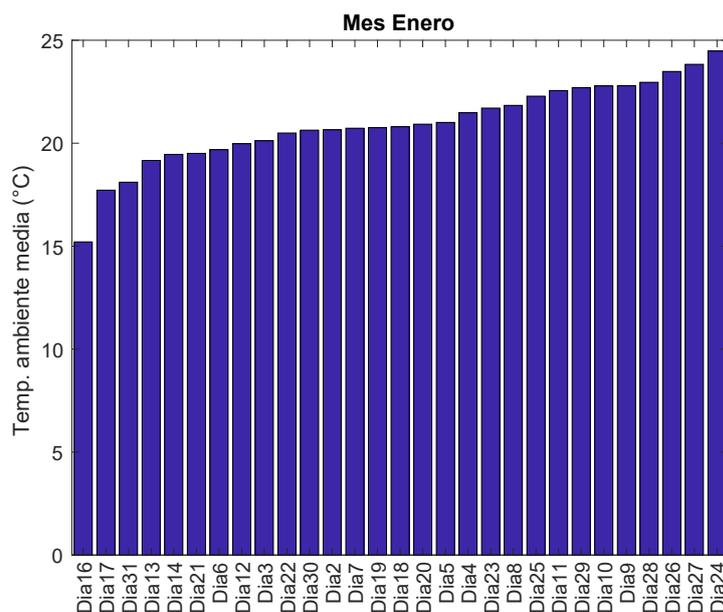


Figura 5.4: Temperatura ambiente media para cada día del mes de enero.

Con base en los resultados anteriores se realizó el histograma de la temperatura ambiente media para el mes de enero.

En la Fig. 5.5, se puede observar una distribución de la temperatura ambiente media en seis rangos, encontrando que es más probable que los días del mes de enero estén en uno de los dos rangos de temperatura ambiente media entre 19.8 °C y 21.4 °C o entre 21.4 °C y 23 °C.

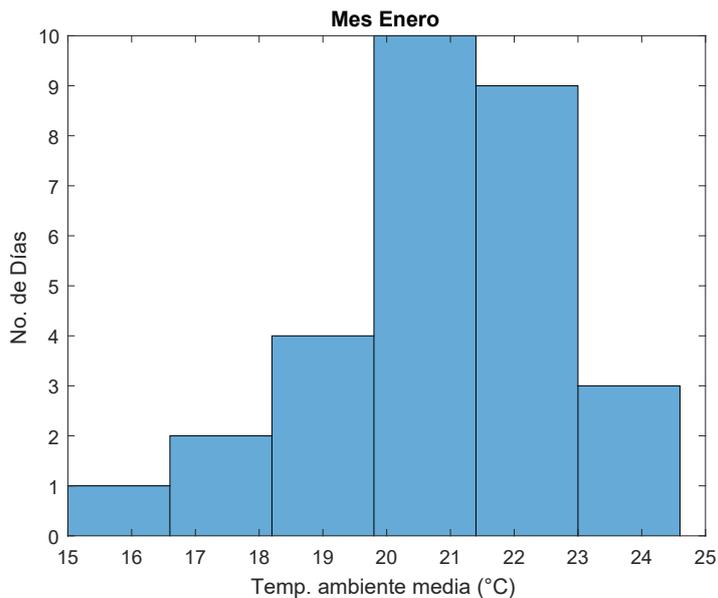


Figura 5.5: Histograma temperatura ambiente media.

5.3. Velocidad del Viento

Para los datos de velocidad del viento también se realizó el ajuste a un polinomio de cuarto grado y se obtuvo la integral del valor medio, para determinar velocidad del viento media en cada día del mes de enero.

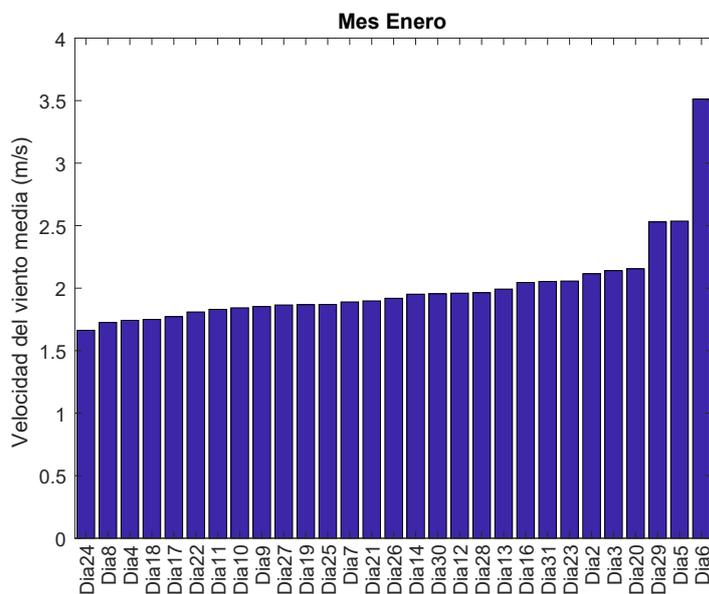


Figura 5.6: Velocidad del viento media para cada día del mes de enero.

También se realizó el histograma de la velocidad del viento media para el mes de enero.

En la Fig. 5.7, se puede observar una distribución de la velocidad del viento media en cinco rangos, encontrando que es más probable que los días del mes de enero estén en un solo rango de velocidad del viento media entre 1.5 m/s y 2.0 m/s.

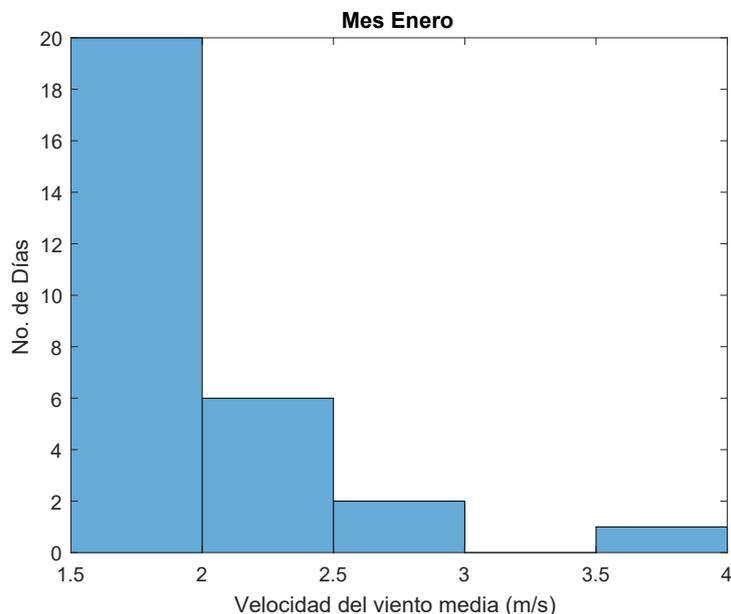


Figura 5.7: Histograma velocidad del viento media.

5.4. Simulación del Modelo Matemático

Partiendo del modelo matemático propuesto en el capítulo 3, se realizó la programación del modelo en el software matemático Matlab, variando la irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento, temperatura media de la placa y el coeficiente global de pérdidas de calor. Se utilizó un flujo de agua constante de 1.8 L/min, temperatura de entrada de 20 °C, absorbanza α de 0.96 y transmitancia τ de 0.96. El sistema de ecuaciones se resolvió mediante el integrador ode15s.

Para la simulación del modelo matemático, se consideraron los datos del mes de enero debido a la temporada de invierno, ya que la irradiación y la temperatura son más bajas en esta época del año.

En la Fig. 5.8, se puede observar una curva de color azul, la cual corresponde a la temperatura de salida del colector solar calculada mediante el modelo matemático propuesto en la ecuación (3.3), por otro lado, una curva de color rojo representa la temperatura de salida del colector de acuerdo con los datos experimentales obtenidos por el Laboratorio

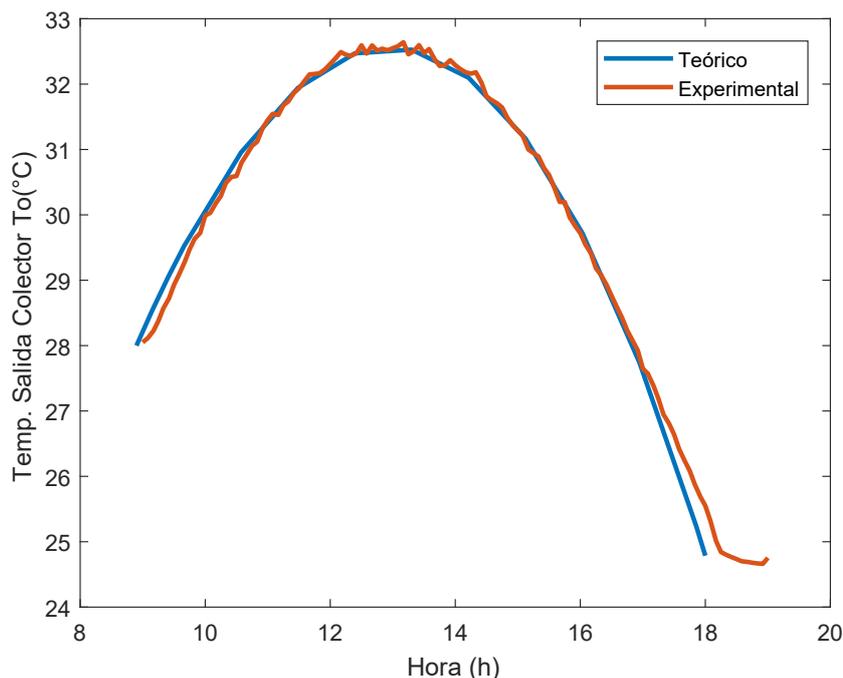


Figura 5.8: Temperatura de salida del colector teórico y experimental.

de Ensayos Solares de la Universidad de Guanajuato. Con base en la Fig. 5.8, podemos encontrar que el modelo teórico se ajusta bastante bien a los datos experimentales y predice la temperatura de salida del colector solar de manera satisfactoria.

5.5. Control Automático del Colector Solar

Con los resultados obtenidos en la simulación del modelo matemático, se diseñó un esquema de control proporcional integral PI que permitiera mitigar las perturbaciones ambientales y de operación, en la sintonización del controlador se usó un valor de K_p de 0.1 y K_i de 0.1, con el fin de lograr la temperatura objetivo requerida. Se utilizó como variable controlada la temperatura de salida del colector T_o y como variable manipulada la derivada del flujo másico $\frac{dm}{dt}$.

Aplicamos la ley de control al modelo dinámico en (3.3), obteniendo la Fig. 5.9, donde se muestra el comportamiento del sistema en circuito cerrado considerando las condiciones ambientales. En la Fig. 5.9, se puede observar una línea de color azul que corresponde al sistema de control PI (lazo cerrado), la cual alcanza la temperatura objetivo y se estabiliza de forma constante, a comparación de la línea roja que corresponde al sistema en lazo abierto.

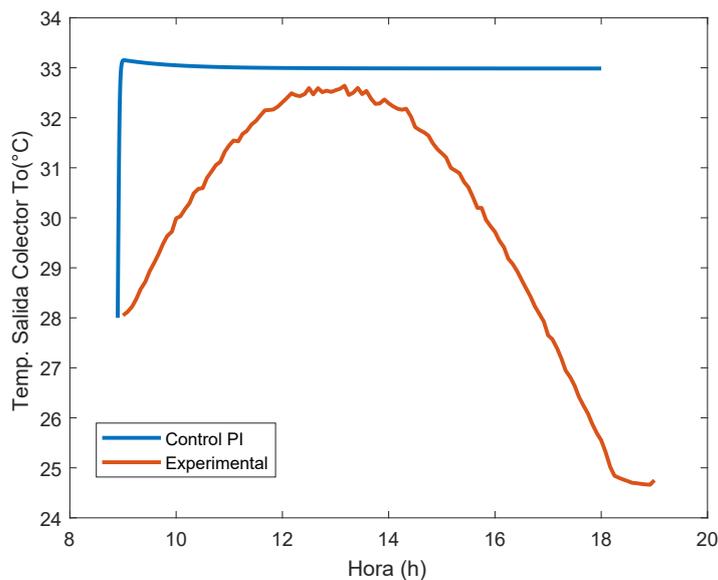


Figura 5.9: Control PI para el colector solar.

Por otro lado, se obtuvo la Fig. 5.10, en la cual se puede observar el comportamiento del gasto másico donde inicialmente disminuye y aumenta gradualmente para mantener constante la temperatura de salida del fluido en el colector.

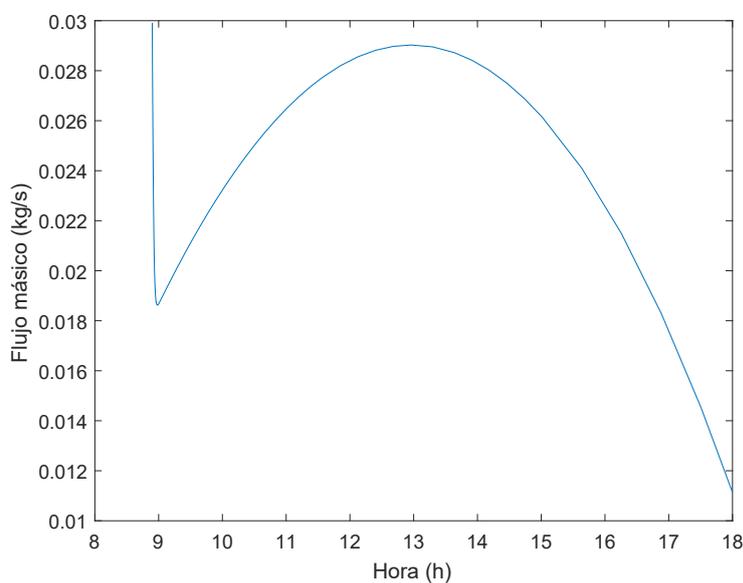


Figura 5.10: Comportamiento del flujo másico.

Como se había mencionado en el Capítulo 4 en la Sección 4.5., se diseñó un esquema de colectores solares conectados en serie, donde se realizó el control en la temperatura de salida del colector 2. En la Fig. 5.11, se puede observar que el control en la temperatura de salida de los colectores conectados en serie logra una temperatura constante al igual

que el control implementado en un solo colector.

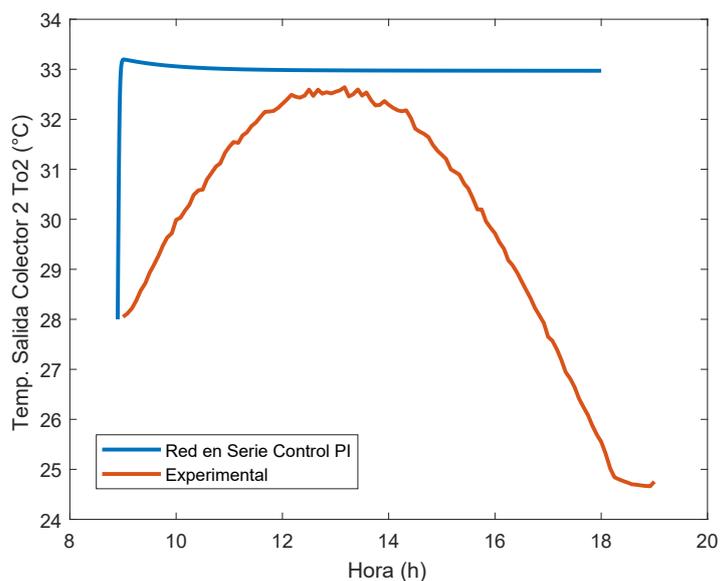


Figura 5.11: Temperatura de salida del colector solar 2 conectado en serie.

Por otra parte, se obtuvo la Fig. 5.12, en la cual se muestra la temperatura de salida del colector 1 conectado en serie. Se observa que la temperatura se mantiene constante durante las 16 horas, sin embargo, aumenta exponencialmente después de las 17 horas, esto significa que para este modelo no es conveniente que el flujo sea cero, ya que, al tener un flujo tan pequeño, incrementa en gran medida la temperatura de salida del primer colector conectado en serie.

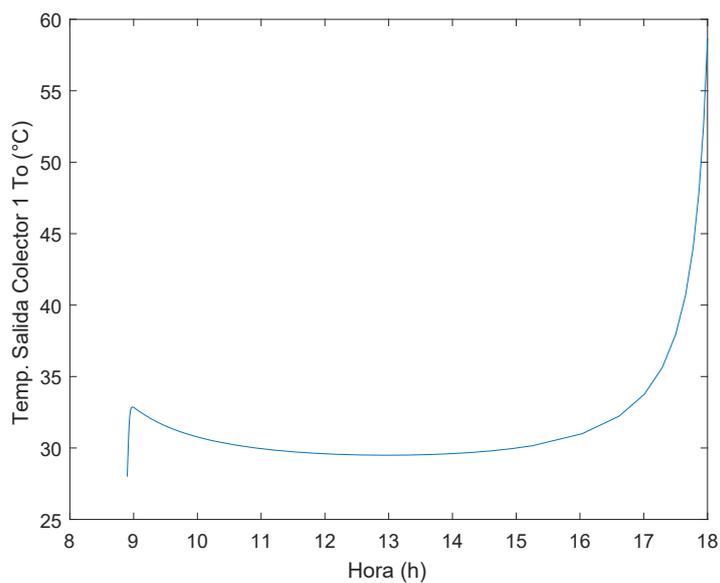


Figura 5.12: Temperatura de salida del colector solar 1 conectado en serie.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

El uso de la energía solar puede ser aplicada a los procesos industriales, sin embargo, debido a su intermitencia surge la necesidad de realizar un control para asegurar la carga térmica constante durante toda la aplicación del proceso, para ello se realizó un estudio sobre el comportamiento de la temperatura de salida del colector solar de placa plana.

Por medio del balance de energía se desarrolló un modelo matemático considerando las variaciones ambientales como la irradiancia, la velocidad del viento y la temperatura ambiente; una vez consolidado el modelo se diseñó un esquema de control que permitió mitigar las perturbaciones ambientales y de operación para mantener la temperatura de salida del colector solar constante.

1. Se validó el modelo matemático propuesto con datos experimentales de un colector solar de placa plana utilizado por el Laboratorio de Ensayos Solares de la Universidad de Guanajuato.
2. El modelo matemático propuesto fue capaz de predecir el comportamiento y la temperatura de salida del colector solar de placa plana, considerando las variaciones en la irradiancia, velocidad del viento, temperatura ambiente, coeficiente global de pérdidas de calor, temperatura de entrada del fluido y temperatura media de la placa.
3. Con el análisis de los datos experimentales, se encontraron los rangos de distribución tanto para la irradiación, la velocidad del viento y la temperatura ambiente. La irradiación del mes de enero puede estar en uno de los dos rangos entre 4080 Wh/m^2 y 4470 Wh/m^2 o entre 4860 Wh/m^2 y 5250 Wh/m^2 . La temperatura ambiente media para enero puede estar en uno de los dos rangos entre $19,8 \text{ }^\circ\text{C}$ y $21,4 \text{ }^\circ\text{C}$ o

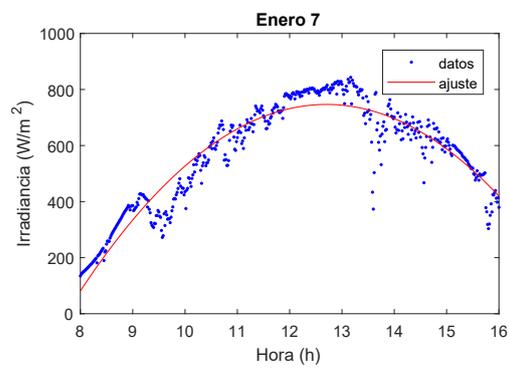
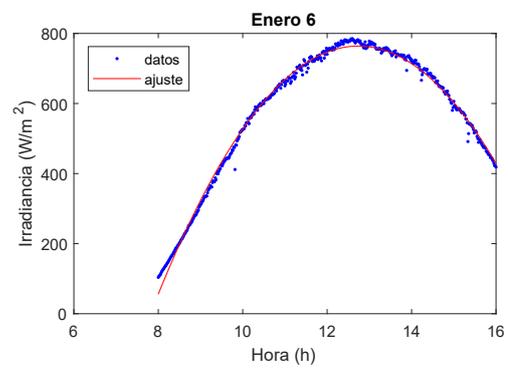
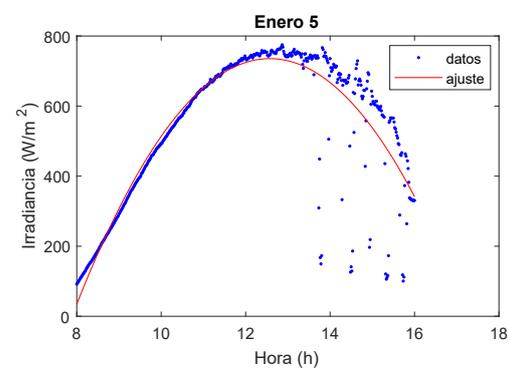
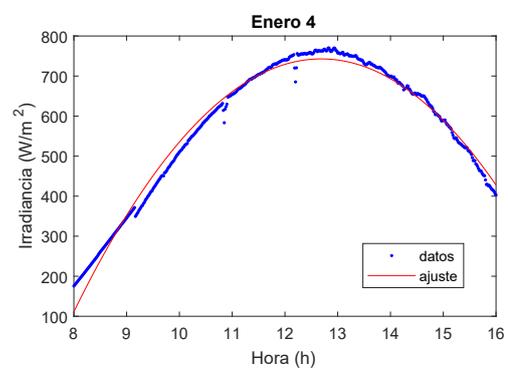
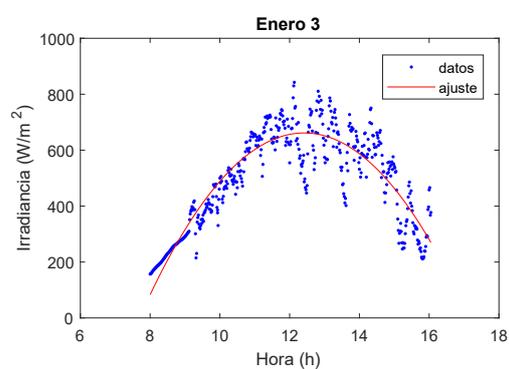
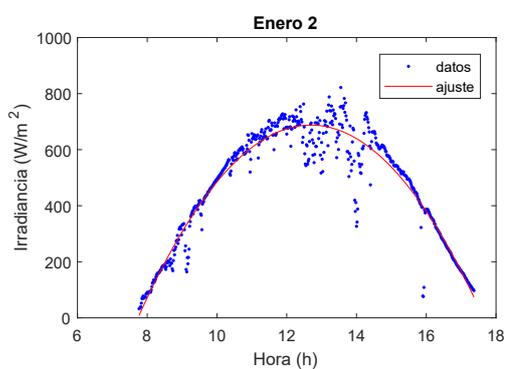
entre 21,4 °C y 23 °C. La velocidad del viento media para enero puede estar en un solo rango entre 1,5 m/s y 2,0 m/s.

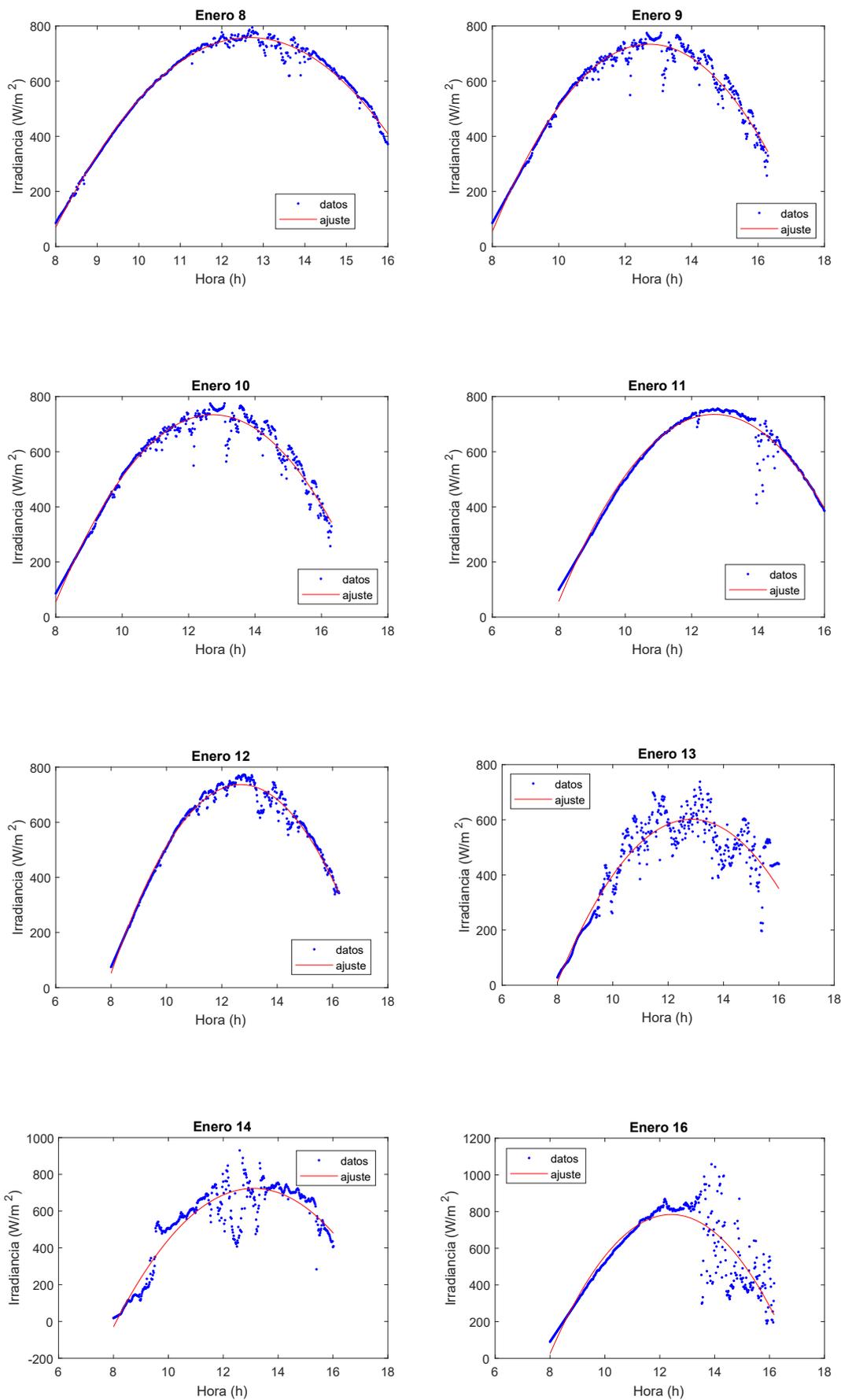
4. El esquema de control propuesto (Proporcional Integral PI), logró mantener la temperatura de salida del colector constante, considerando como variable controlada la temperatura de salida del colector T_o y como variable manipulada la derivada del flujo másico $\frac{dm}{dt}$.

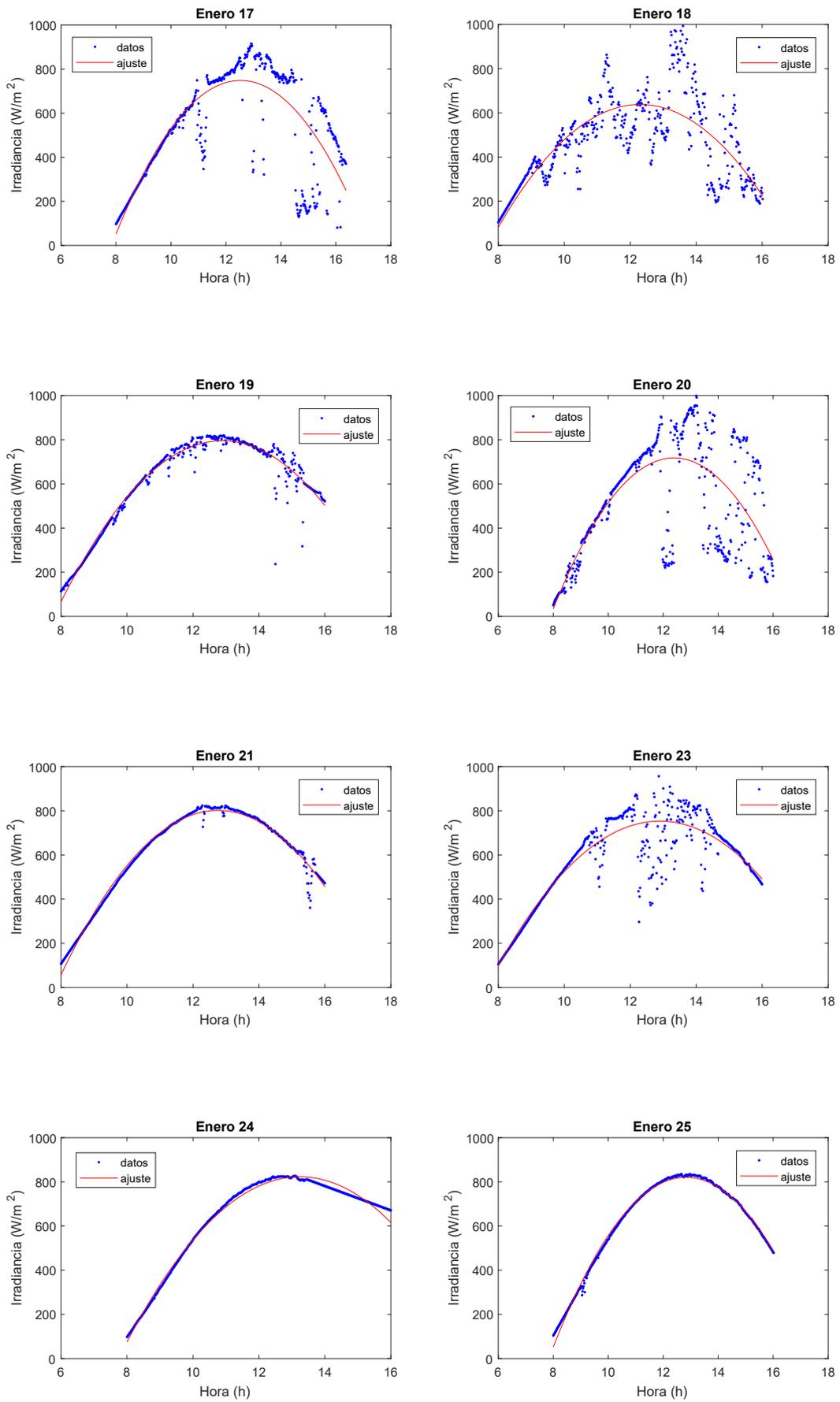
En conclusión, con el desarrollo de este trabajo de estudio se mejoró el modelo matemático, logrando predecir el comportamiento del colector solar teniendo en cuenta las pérdidas por convección del viento, variación en la temperatura ambiente e irradiancia, el cual fue validado con datos experimentales obteniendo una respuesta satisfactoria al simular el modelo teórico. Por otro lado, el esquema de control propuesto para mitigar estas variaciones ambientales y de operación, logra el objetivo requerido, se puede decir que el control PI es un buen candidato para mantener una carga térmica constante durante la aplicación del proceso. De esta manera es importante resaltar, que este tipo de energía usando colectores solares puede ser acoplada a procesos industriales de baja temperatura.

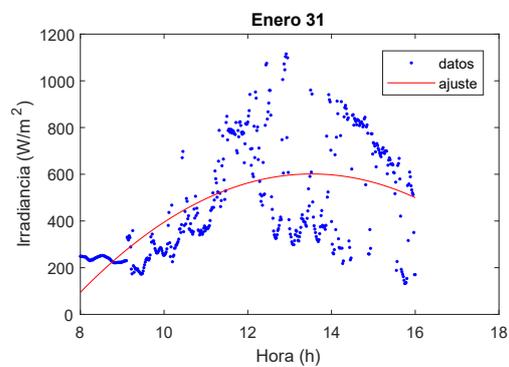
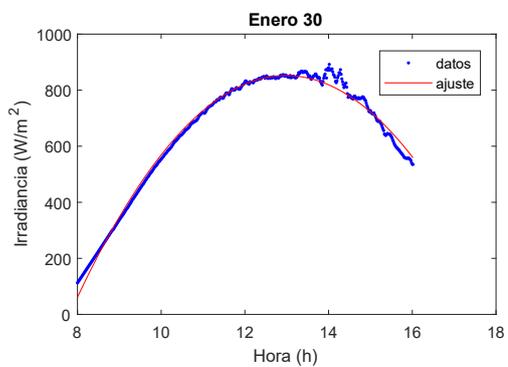
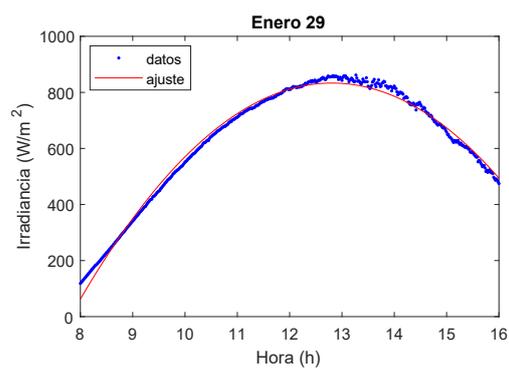
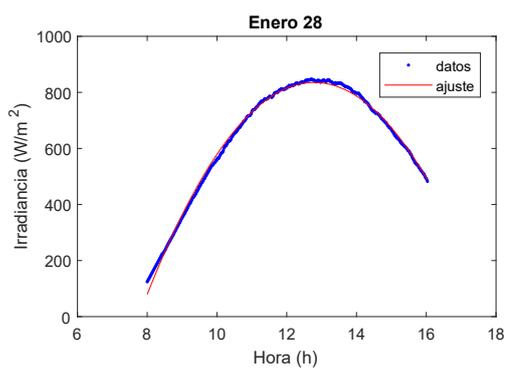
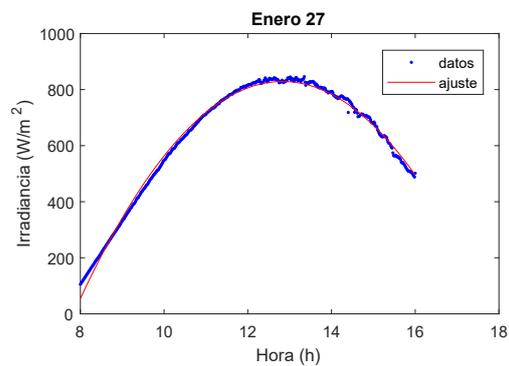
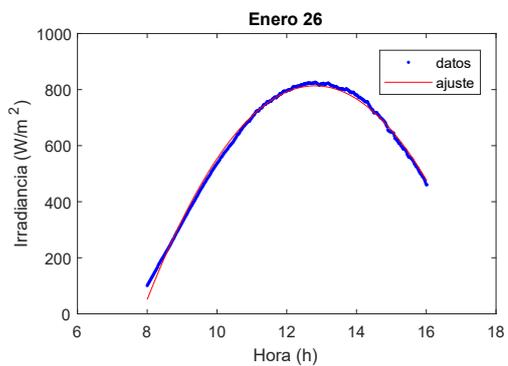
Apéndice A

Irradiancia Enero



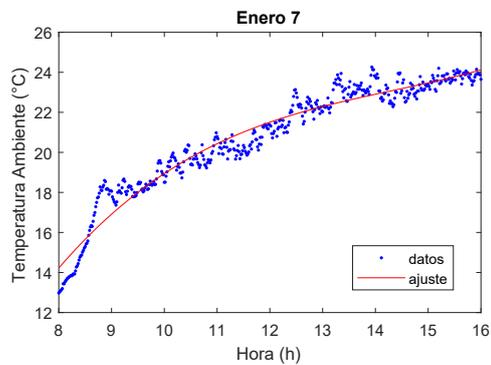
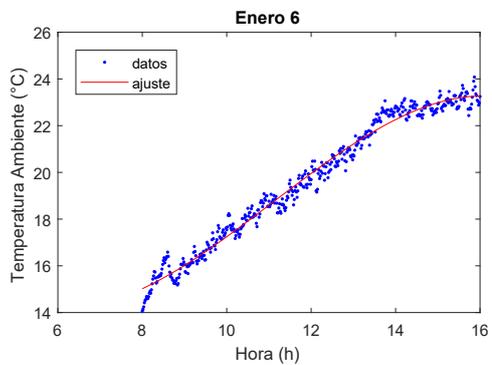
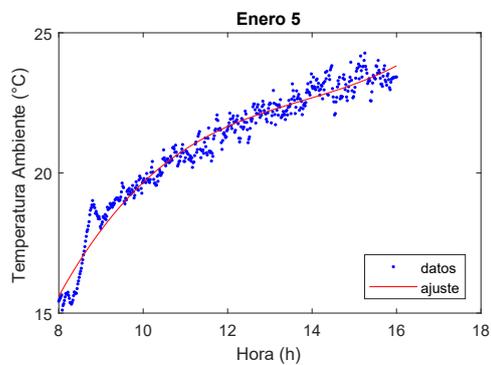
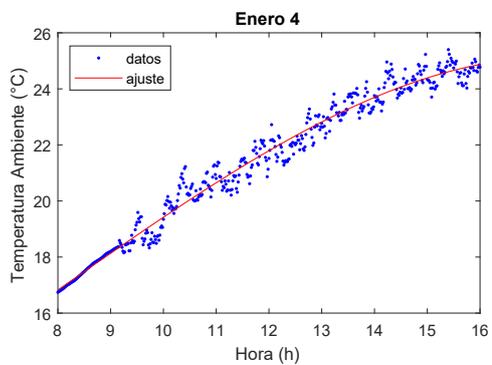
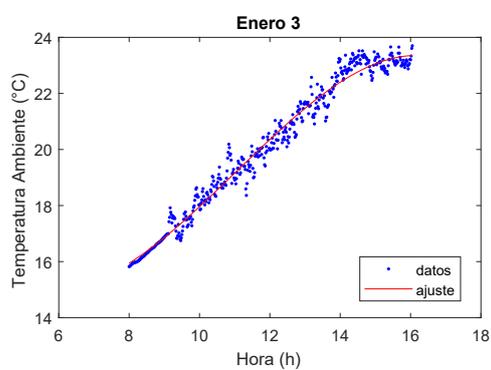
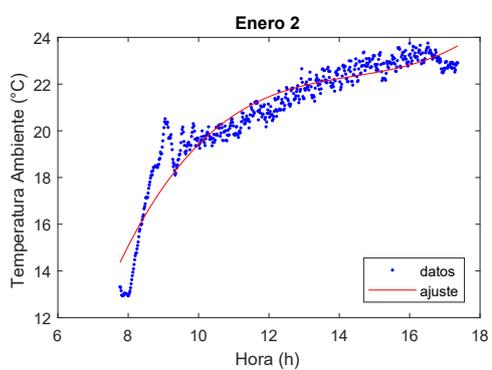


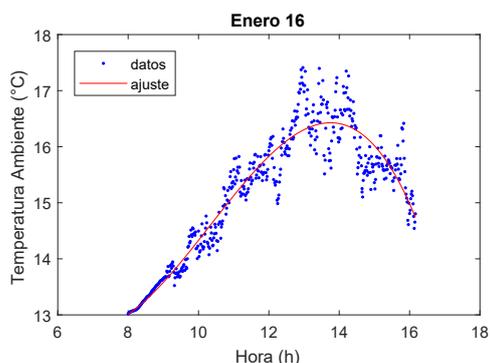
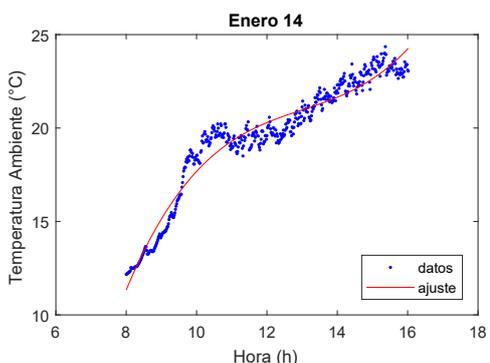
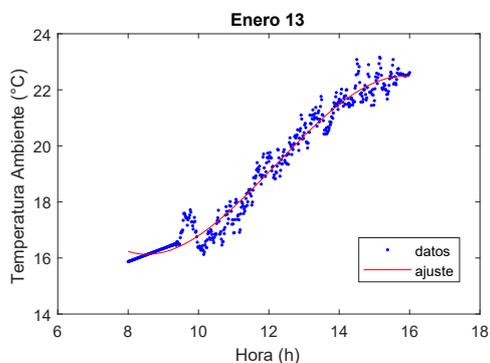
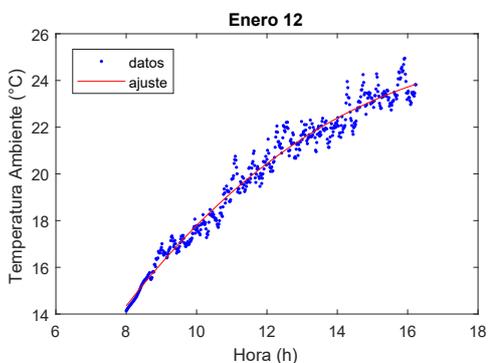
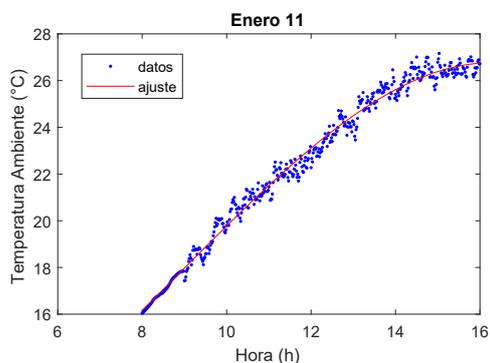
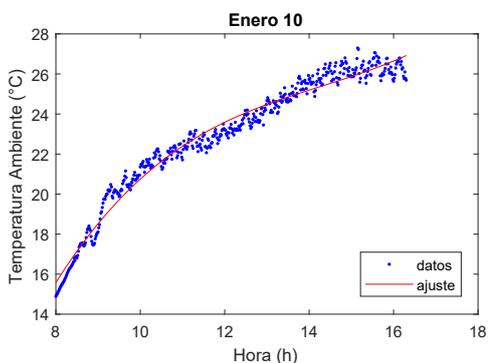
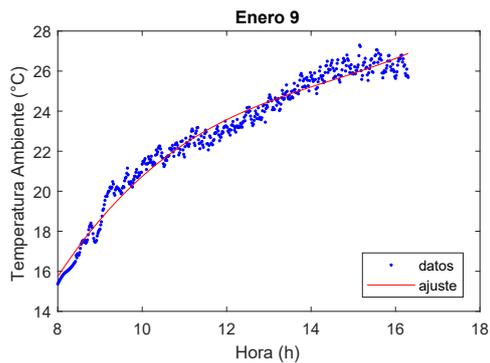
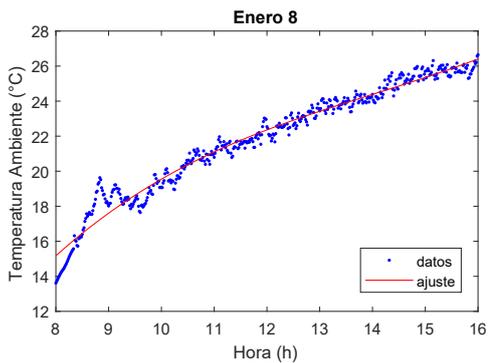


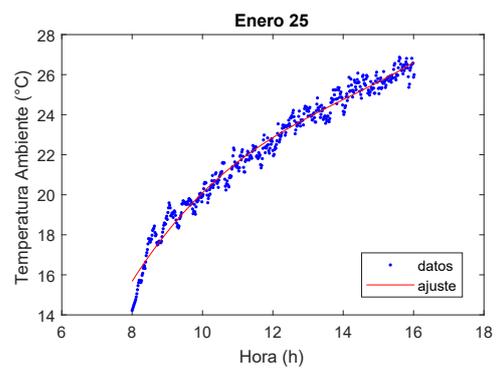
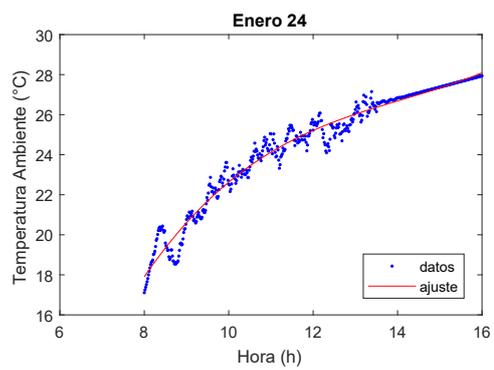
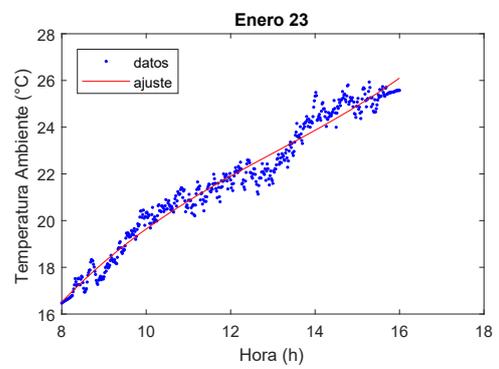
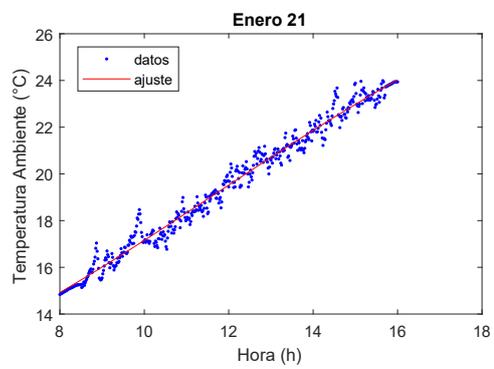
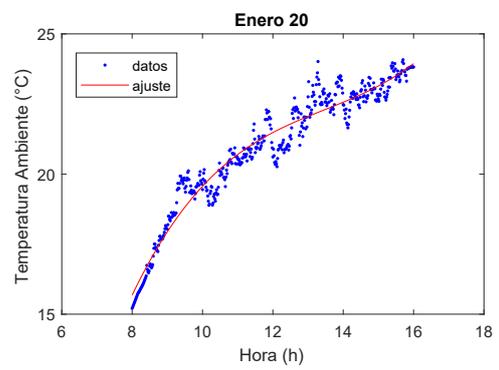
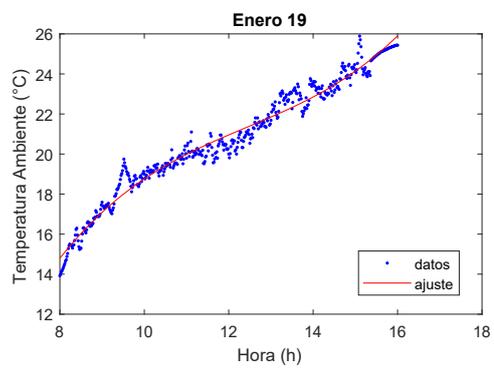
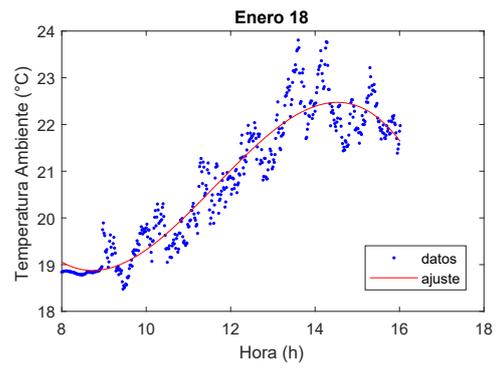
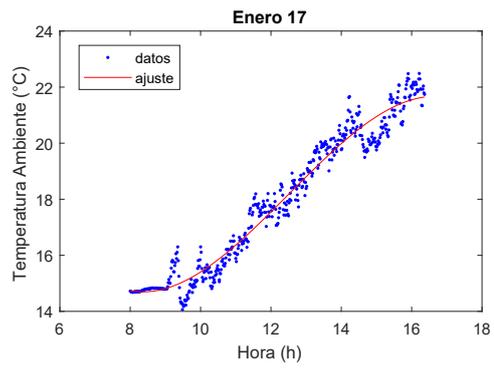


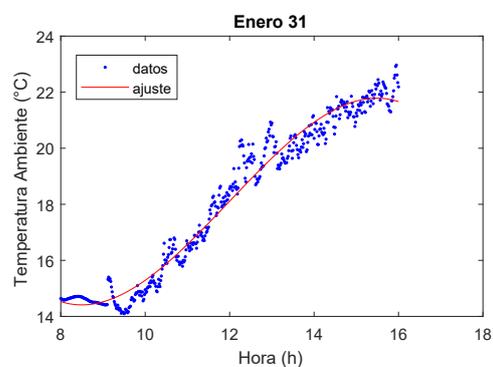
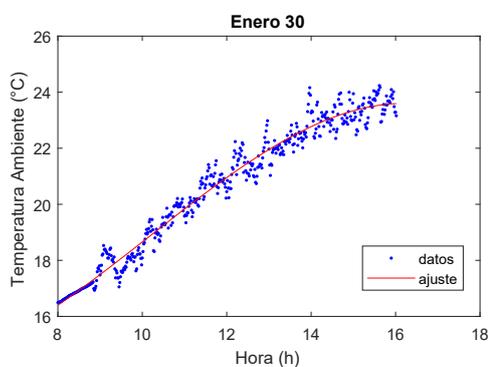
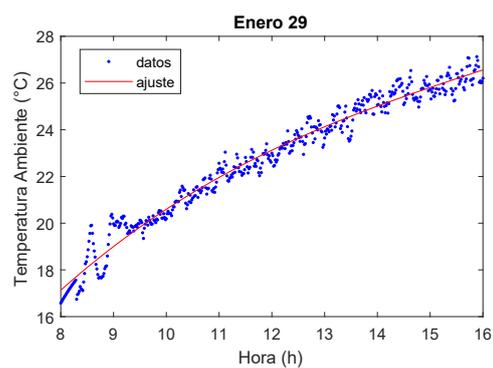
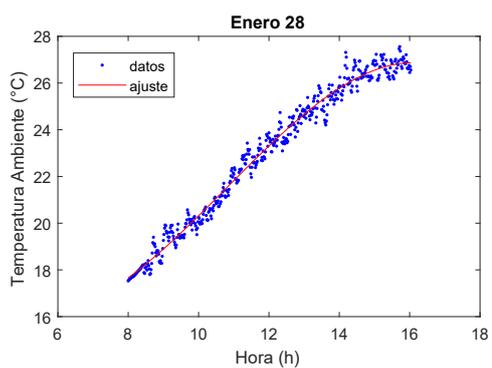
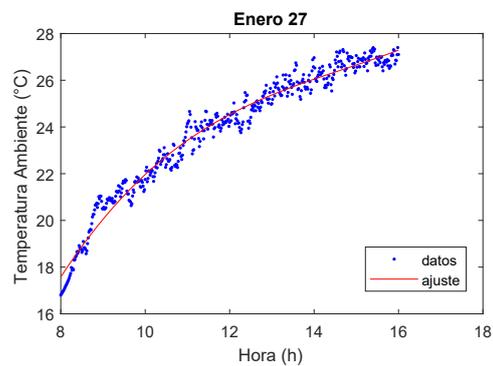
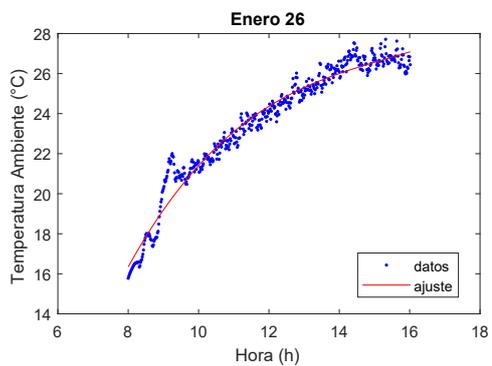
Apéndice B

Temperatura Ambiente Enero



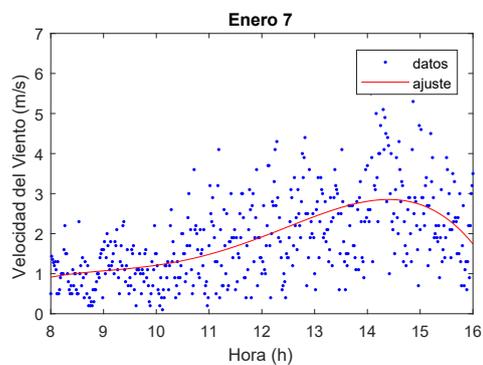
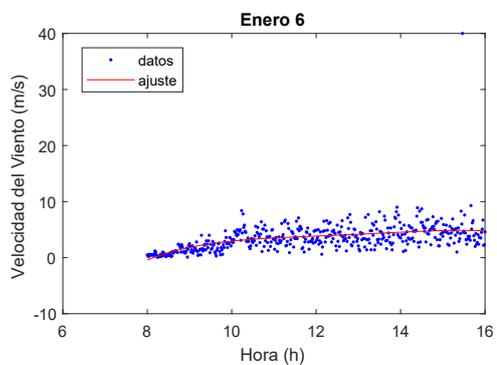
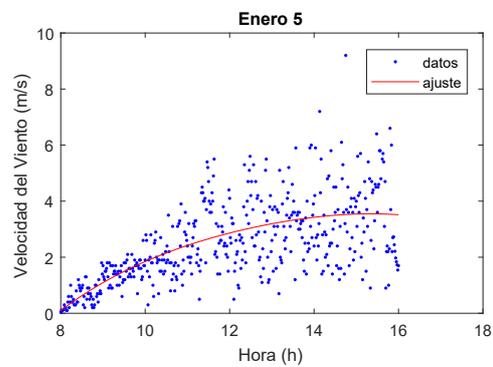
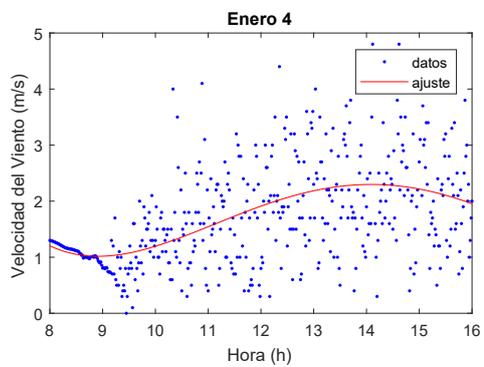
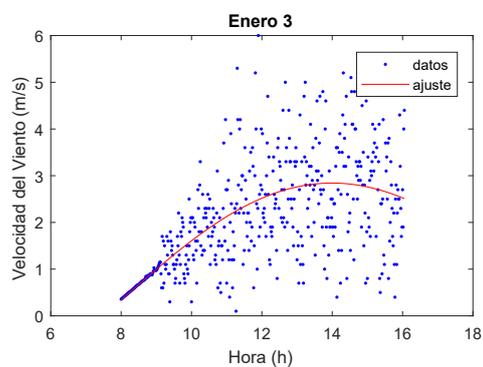
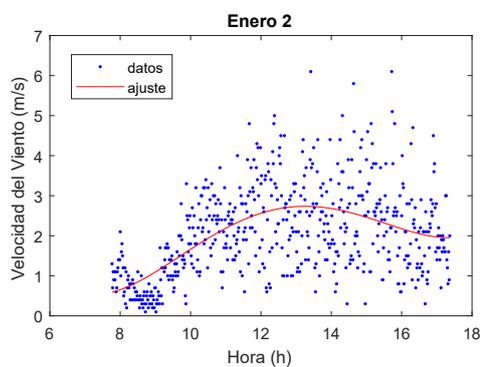


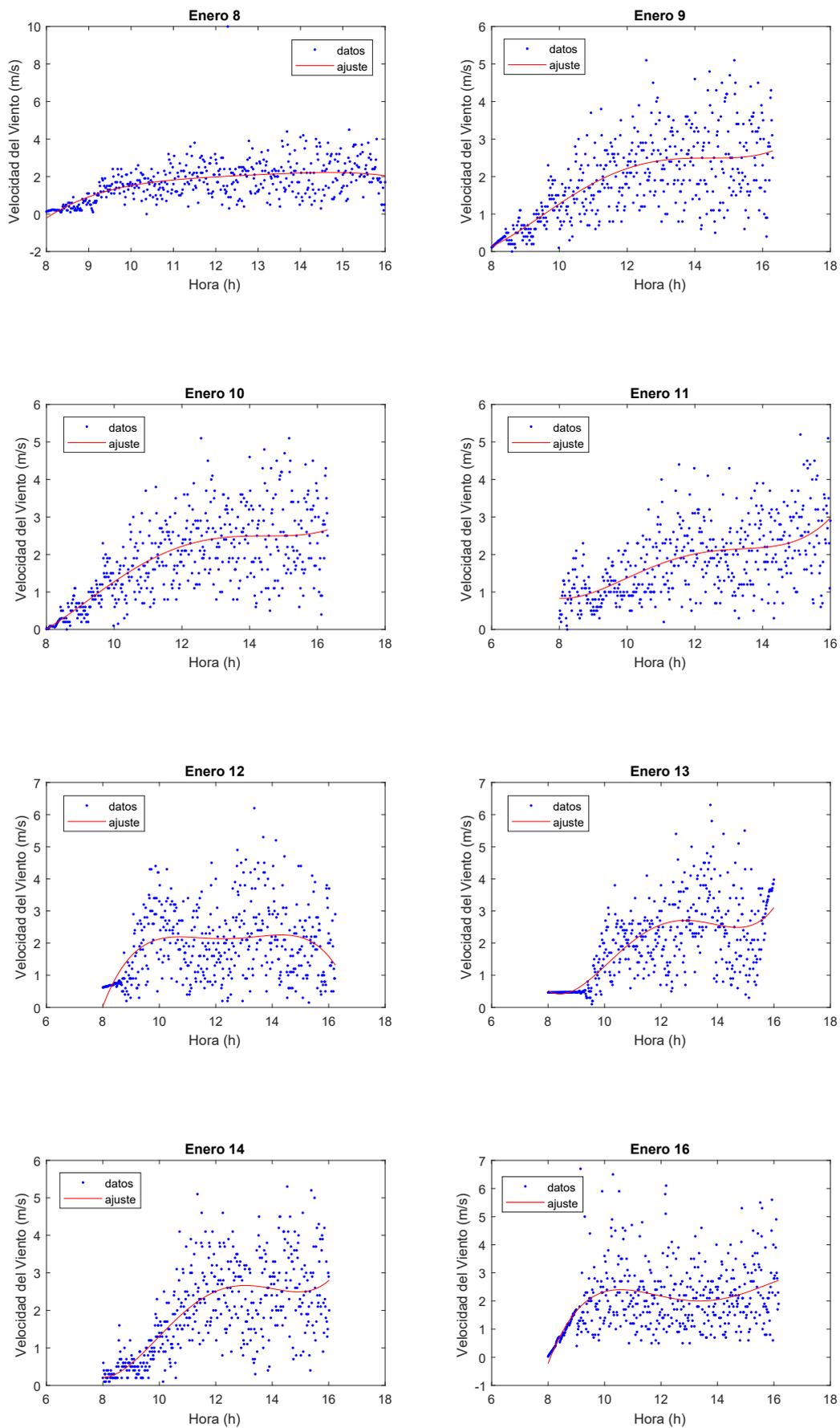


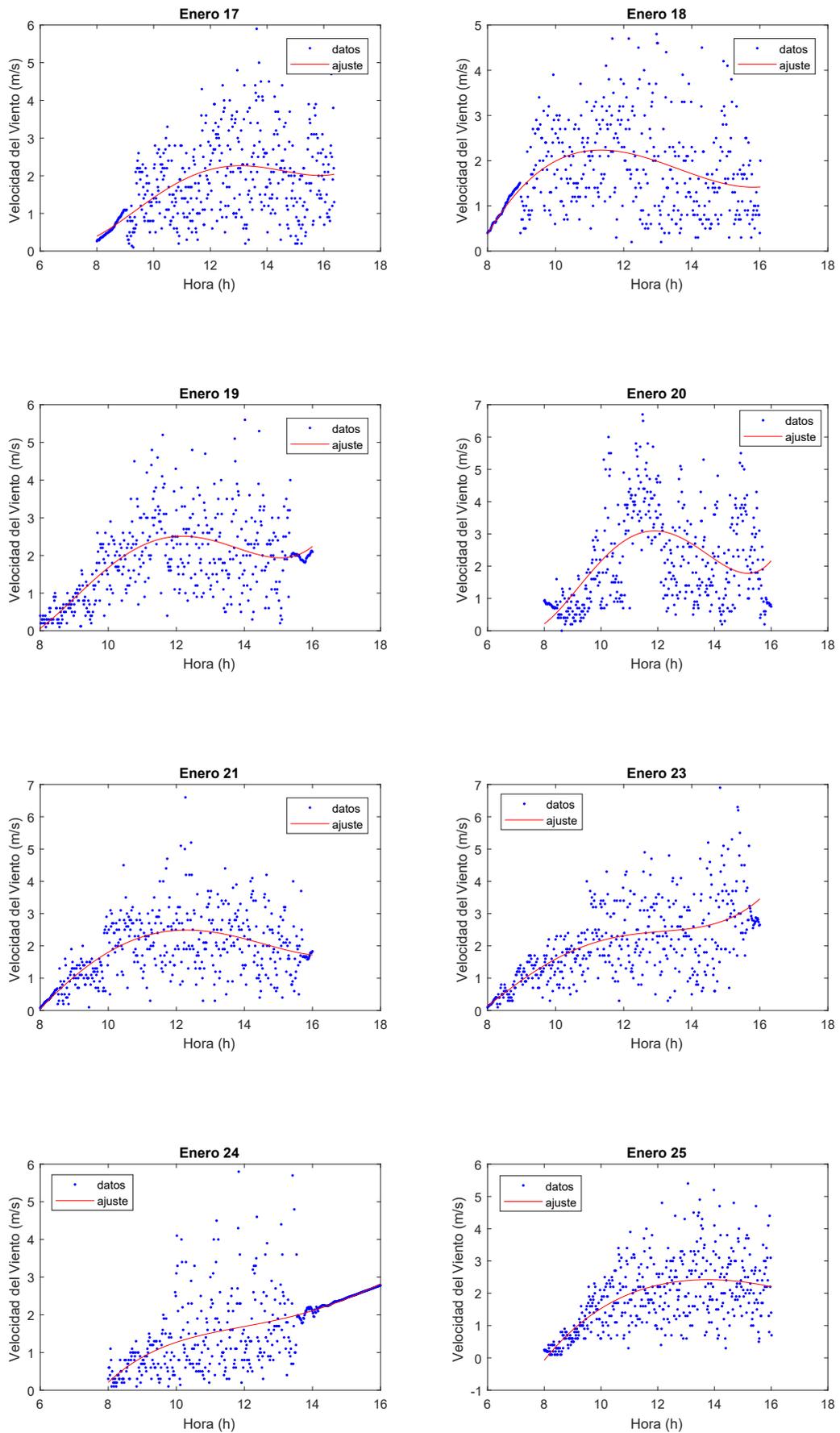


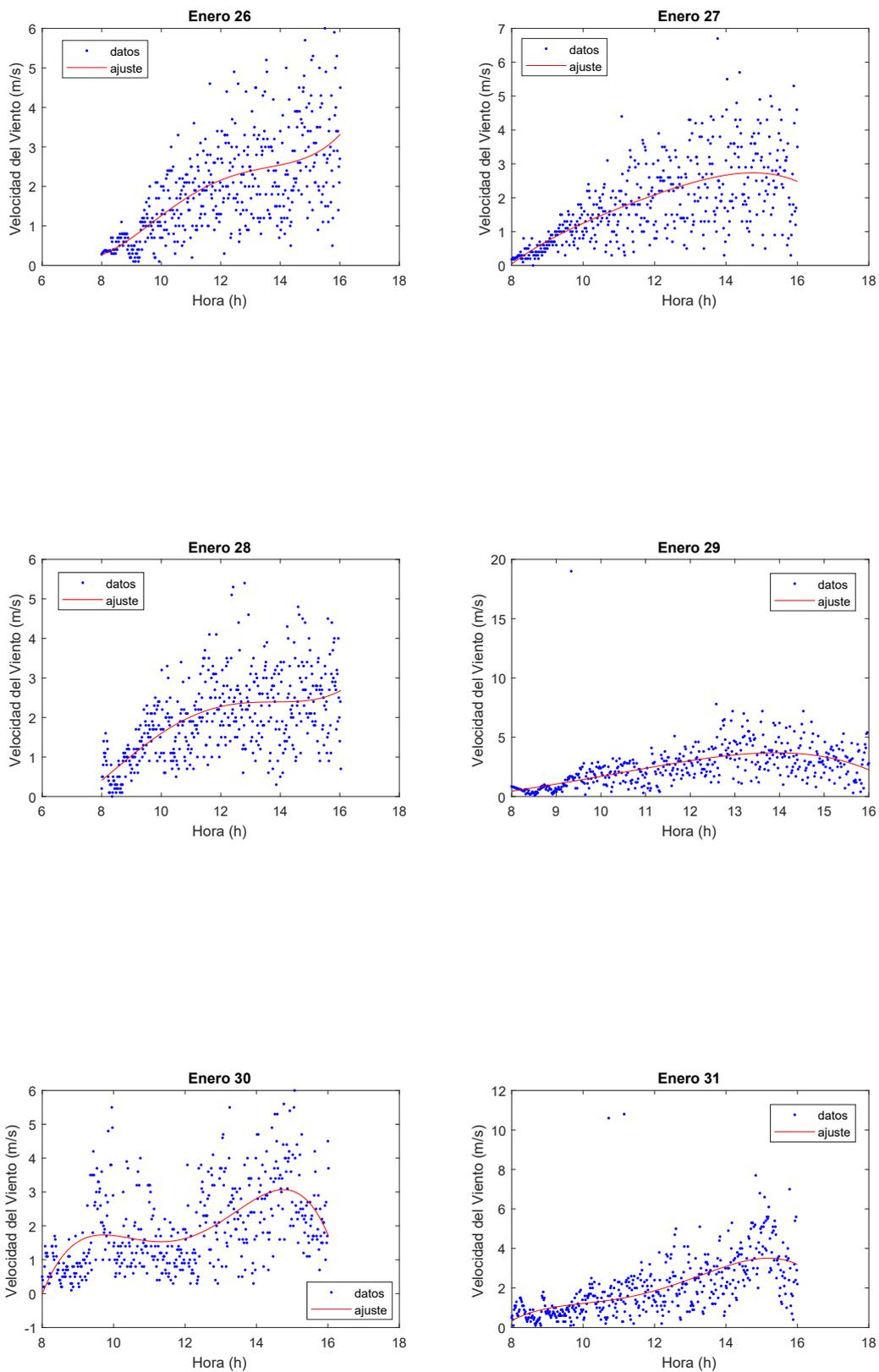
Apéndice C

Velocidad del Viento Enero









Bibliografía

- Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de control moderna*. PEARSON, Madrid, quinta ed. edition, 2010. ISBN 978-84-205-4401-4. URL www.pearsoneducacion.com.
- Banco Mundial. Energía, 2018. URL <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview#1>.
- Florinda Martins, Carlos Felgueiras, and Miroslava Smitková. Fossil fuel energy consumption in European countries. *Energy Procedia*, 153:107–111, 2018. ISSN 18766102. doi: 10.1016/j.egypro.2018.10.050. URL <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.050>.
- Javier Arreola. Reforma a energías renovables: ¿cómo vamos? • Forbes México, 2014. URL <https://www.forbes.com.mx/reforma-energias-renovables-como-vamos/>.
- Secretaría de Energía. Boletín de Prensa 131| Secretaría de Energía | Gobierno, 2016. URL <https://www.gob.mx/sener/prensa/mexico-cumplira-con-su-meta-del-35-de-generacion-electrica-con-energias-limpias-en-2024-consejo-consultivo-para-la-transicion-energetica>.
- A. Ahmadi, M.A. Ehyaei, A. Doustgani, M. El Haj Assad, A. Hmida, D.H. Jamali, R. Kumar, Z.X. Li, and A. Razmjoo. Recent Residential Applications of low-temperature solar collector. *Journal of Cleaner Production*, page 123549, 2020. ISSN 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123549. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620335940>.
- Krishna Murari Pandey and Rajesh Chaurasiya. A review on analysis and development of solar flat plate collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67:641–650, 2017. ISSN 18790690. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.078. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.078>.
- Christian Uribe-mora, Fernando López-Caamal, Guillermo Martínez-Rodríguez, and Amanda L. Fuentes-Silva. Modeling a flat plate solar collector subject to time-varying environmental conditions. *V Conferencia Colombiana de Control Automático*, page 4, 2021a.
- Christian Uribe-mora, Fernando López-Caamal, Guillermo Martínez-Rodríguez, and Amanda L. Fuentes-Silva. Output Temperature Control of a Flat Plate Solar Collector Subject to Time-Varying Environmental Conditions. *Congreso Nacional de Control Automático de la Universidad de Guanajuato*, page 5, 2021b.
- Elías Linderman. ¿Que es la Energía Eólica? – Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables, 2021. URL <https://www.uv.mx/coatza/cires/main/keeseolica/>.

- María Estela Raffino. Energías Limpias - Concepto, importancia y ejemplos, 2020. URL <https://concepto.de/energias-limpias/>.
- John A Duffie and William A Beckman. *Solar engineering of thermal processes*, volume 3. 1982. ISBN 9780470873663. doi: 10.1016/0142-694x(82)90016-3.
- Oriol Planas. Radiación solar | Energía solar, 2015. URL <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar/radiacion-solar>.
- National Renewable Energy Laboratory NREL. NSRDB Data Viewer, 2019. URL <https://www.nrel.gov/index.html>.
- Julián Blanco G. and Sixto Malato R., editors. *Solar Energy Conversion And Photoenergy Systems - Volume I*. EOLLS, Oxford, United Kingdom, 2009.
- Martin J. Atkins, Michael R.W. Walmsley, and Andrew S. Morrison. Integration of solar thermal for improved energy efficiency in low-temperature-pinch industrial processes. *Energy*, 35(5):1867–1873, 2010. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2009.06.039. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.039>.
- Hans Schweiger, João Farinha Mendes, Nikolaus Benz, Klaus Hennecke, Germán Prieto, Mercè Cusí, and Helder Gonçalves. the Potential of Solar Heat in Industrial Processes. a State of the Art Review for Spain and Portugal. 53(9):1689–1699, 2013. ISSN 1098-6596. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Patrick Frey, Stephan Fischer, Harald Drück, and Klemens Jakob. Monitoring Results of a Solar Process Heat System Installed at a Textile Company in Southern Germany. *Energy Procedia*, 70(June):615–620, 2015. ISSN 18766102. doi: 10.1016/j.egypro.2015.02.168. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.168>.
- Guillermo Martínez-Rodríguez, Amanda L. Fuentes-Silva, and Martín Picón-Núñez. Solar thermal networks operating with evacuated-tube collectors. *Energy*, 146:26–33, 2018. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.165.
- Martín Picón-Núñez, Guillermo Martínez-Rodríguez, and Amanda L. Fuentes-Silva. Targeting and design of evacuated-tube solar collector networks. *Chemical Engineering Transactions*, 52(2013):859–864, 2016. ISSN 22839216. doi: 10.3303/CET1652144.
- M. A. Ehyaei, A. Ahmadi, M. El Haj Assad, and Tariq Salameh. Optimization of parabolic through collector (PTC) with multi objective swarm optimization (MOPSO) and energy, exergy and economic analyses. *Journal of Cleaner Production*, 234:285–296, 2019. ISSN 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.210. URL <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.210>.
- G. N. Tiwari and Lovedeep Sahota. *Solar collectors*. Number 9783319268675. 2017. ISBN 9789811046728. doi: 10.1007/978-981-10-4672-8_4.
- Martín Picón-Núñez, Guillermo Martínez-Rodríguez, and Amanda L. Fuentes-Silva. Design of solar collector networks for industrial applications. *Applied Thermal Engineering*, 70(2):1238–1245, 2014. ISSN 13594311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.005. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.005>.

- S. N. Agbo and E. C. Okoroigwe. Analysis of Thermal Losses in the Flat-Plate Collector of a Thermosyphon Solar Water Heater. *Research Journal of Physics*, 1(1):35–41, 2007. ISSN 18193463. doi: 10.3923/rjp.2007.35.41.
- Mouna Hamed, Ali Fellah, and Ammar Ben Brahim. Parametric sensitivity studies on the performance of a flat plate solar collector in transient behavior. *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 2013. ISSN 0196-8904. doi: 10.1016/j.enconman.2013.09.044. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.044>.
- Chuan Sun, Yuting Liu, Chen Duan, Yao Zheng, Huawei Chang, and Shuiming Shu. A mathematical model to investigate on the thermal performance of a flat plate solar air collector and its experimental verification. *Energy Conversion and Management*, 115:43–51, 2016. ISSN 01968904. doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.048. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.048>.
- Hector Hugo Silviano Mendoza and Guillermo Martínez Rodríguez. MODELADO TEÓRICO DE UN COLECTOR SOLAR DE BAJA TEMPERATURA EN ESTADO TRANSITORIO. *Jovenes en la Ciencia*, 4(1):2805–2809, 2018.
- J. Sarwar, M. R. Khan, M. Rehan, M. Asim, and A. H. Kazim. Performance analysis of a flat plate collector to achieve a fixed outlet temperature under semi-arid climatic conditions. *Solar Energy*, 207(April):503–516, 2020. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2020.06.088. URL <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.088>.
- Carlos A. Smith and Armando B. Corripio. *CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS*. LIMUSA WILEY, México D.F., segunda ed edition, 2014. ISBN 9786070507212.
- Diego Alarcón, Julián Blanco, Sixto Malato, M. Ignacio Maldonado, and Pilar Fernández. Design and setup of a hybrid solar seawater desalination system: The AQUASOL Project. *Proceedings of the Solar World Congress 2005: Bringing Water to the World, Including Proceedings of 34th ASES Annual Conference and Proceedings of 30th National Passive Solar Conference*, 4:2764–2769, 2005.
- I. Fernández, F. G. Ación, J. M. Fernández, J. L. Guzmán, J. J. Magán, and M. Berenguel. Dynamic model of microalgal production in tubular photobioreactors. *Bioresource Technology*, 126:172–181, 2012. ISSN 09608524. doi: 10.1016/j.biortech.2012.08.087.
- Darine Zambrano, Carlos Bordons, Winston Garcia-Gabin, and Eduardo F. Camacho. Model development and validation of a solar cooling plant. *International Journal of Refrigeration*, 31(2):315–327, 2008. ISSN 01407007. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2007.05.007.
- E. F. Camacho, M. Berenguel, F. R. Rubio, and D. Martínez. *Control of Solar Energy Systems*. 2012. ISBN 9780857299154. URL <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>.
- J.D. Álvarez, L.J. Yebra, and M. Berenguel. Adaptive repetitive control for resonance cancellation of a distributed solar collector field. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 23(April):331–352, 2009. doi: 10.1002/acs.

- Cristina M. Cirre, José Carlos Moreno, Manuel Berenguel, and José Luis Guzmán. Robust control of solar plants with distributed collectors. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(5): 823–828, 2010. ISSN 14746670. doi: 10.3182/20100705-3-be-2011.00136.
- J. Buzás and R. Kicsiny. Transfer functions of solar collectors for dynamical analysis and control design. *Renewable Energy*, 68:146–155, 2014. ISSN 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2014.01.037. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.037>.
- Daniel Martins Lima, Julio Elias Normey-Rico, and Tito Luís Maia Santos. Temperature control in a solar collector field using Filtered Dynamic Matrix Control. *ISA Transactions*, 62:39–49, 2016. ISSN 00190578. doi: 10.1016/j.isatra.2015.09.016. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2015.09.016>.
- Sergio J. Navas, Francisco R. Rubio, Pedro Ollero, and João M. Lemos. Optimal control applied to distributed solar collector fields with partial radiation. *Solar Energy*, 159 (October 2017):811–819, 2018. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2017.11.052. URL <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.052>.
- J. L. Guzmán, M. Berenguel, A. Merchan, J. D. Gil, and J.D. Álvarez. A virtual lab for modeling and control of a solar collector field. *IFAC-Papers Online*, 53(2):17216–17221, 2020. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.377.