



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Instrumentación y Control Automático

Integración de estructura IoT a un concentrador de disco parabólico para mejorar la eficiencia de un horno solar

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

Presenta
Ing. Diego Arana Ruiz

Dirigido por:
Dr. José Manuel Álvarez Alvarado

Co-dirigido por:
M. en C. Raúl Alejandro Martínez-Sánchez

Dr. José Manuel Álvarez Alvarado
Presidente

M. en C. Raúl Alejandro Martínez-Sánchez
Secretario

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz
Vocal

Dr. Gonzalo Macías Bobadilla
Suplente

Dra. Diana Carolina Toledo Pérez
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Mayo de 2024.
México.

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

Resumen

Hoy en día las energías sustentables buscan resolver los recursos limitados y aliviar problemas ambientales. El Sol emite una radiación equivalente a $1,366 W/m^2$, la cual se puede aprovechar a través de concentradores solares de disco parabólicos (SDP) transformándola en energía térmica en el punto focal, y que instalados sobre a un sistema de seguimiento solar (SS), superan la eficiencia en hasta 36.8% con respecto los sistemas fijos. Entre las aplicaciones de SDP, los hornos solares para la cocción de alimentos son un método alternativo, seguro, saludable y económico a los hornos convencionales. Sin embargo, persisten limitaciones y necesidades que atender en estos sistemas debido a factores imprevisibles como el clima y la falta de visibilidad y controlabilidad, que se traducen en la disminución de su rendimiento. Una estructura de Internet de las Cosas (IoT), en conjunto de técnicas de predicción dan respuesta a estas necesidades. En búsqueda del máximo aprovechamiento energético, este trabajo evalúa el rendimiento de predictores RLM y SVR, y analiza el efecto en la eficiencia al integrar una estructura IoT a un SDP con SS aplicado para hornos solares de cocción de alimentos. Se construyó un prototipo experimental y con un circuito integrado ESP32 se traducen las variables de temperatura focal, radiación y, temperatura y humedad ambiental, para luego ser enviadas, a partir de una topología de red Mesh, a una Raspberry que carga los datos a la nube, en un entorno de Google Sheet y una aplicación móvil para la visualización del usuario y posterior análisis. Se obtuvo un incremento en la eficiencia de conversión en un 5.07% con la IoT. Adicionalmente, se obtuvieron resultados aceptables, frente al poco número de muestras, al optimizar el algoritmo de predicción SVR con un algoritmo genético. Traduciendo esto a un posible ahorro en la eficiencia productiva para ser evaluado en futuros experimentos.

Palabras clave:

Horno Solar, Disco Parabólico, IoT, Eficiencia, Predicción

Abstract

Today, sustainable energies try to solve limited resources and relieve environmental problems. The sun emits radiation equivalent to $1,366 W/m^2$, which can be harnessed and transformed through solar parabolic dish concentrators (SDP) transforming it into thermal energy at the focal point, and that installed on a solar tracking system (SS), exceed efficiency by up to 36.8% with respect to fixed systems. Among SDP applications, solar ovens for food cooking are a safe, healthy and economical alternative to conventional ovens. However, there remain limitations and needs to be addressed in these systems due to unpredictable factors such as weather and lack of visibility and controllability, which result in decreased performance. An Internet of Things (IoT) structure, together with predictive techniques, provides an answer to these needs. In search of maximum energy utilization, this work evaluates the performance of RLM and SVR predictors and analyzes the effect on efficiency when integrating an IoT structure to an SDP with SS applied to solar ovens for food cooking. An experimental prototype was built and with an ESP32 integrated circuit the variables of focal temperature, radiation and ambient temperature and humidity are translated and sent to a Raspberry, throughout a Mesh network topology. Then, the Raspberry uploads the data to the cloud, in a Google Sheet environment and a mobile application for user visualization and further analysis. An increase in conversion efficiency of 5.07% was obtained with the IoT. Additionally, acceptable results were obtained, despite the small number of samples, by optimizing the SVR prediction algorithm with a genetic algorithm. This translates into possible savings in production efficiency to be evaluated in future experiments.

Keywords:

Solar Oven, Parabolic dish, IoT, Efficiency, Forecasting



“Dedicado con mucho cariño a todas las personas que han anhelado un mejor futuro; especialmente a aquellas que avanzaron contracorriente a pesar de existentes miedos, no desistiendo de su sueño y se empeñaron a hacer de este planeta un lugar hermoso, armonioso y habitable”



Agradecimientos

A Dios que se hizo presente durante todo este periodo, abriéndome las puertas para lograr desarrollar este trabajo de manera fluida y dotándome de espíritu para realizarlo en medio de las tensiones y el estrés. Por su dedicación y amor en la creación de los recursos naturales que me permiten aprovecharlos para gloria propia.

A las instituciones del CONAHCYT y la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo económico brindado durante un periodo de dos años que me permitió dedicar mis esfuerzos al estudio y realización de esta Tesis.

A los Fondos de Proyectos Especiales de Rectoría (FOPER) por el otorgamiento de recurso económico para la construcción del prototipo utilizado en el desarrollo de este proyecto.

A todos mis profesores que tuvieron el detalle de detenerse, mirarme y buscar la forma creativa de que yo aprendiera los conceptos necesarios; y especialmente aquellos quienes me brindaron su apoyo incondicional, para lograr este proyecto.

A mi sínodo que se mostró disponible y acompañó durante el proceso de esta Tesis, en especial a Mane y Juve, por su paciencia y fe en mí.

A mis colegas y amigos de generación, Jovheiry, Judith y Alberto que siempre se mostraron dispuestos a ayudarme e hicieron de esta maestría un camino más agradable.

A mis colegas y amigos de profesión, Froy, Julio Cesar, Luis, Mau, Ernesto, Marco, Dulce, Perla, Cane, Jorge, Mafer, que me dedicaron asesoramiento y apoyo gratuito sin escatimar su tiempo.

A los becarios Mauricio, Mariana, Rodrigo y Guillermo que en medio de su ajetreo escolar dedicaron tiempo y esfuerzo a este proyecto.

A Naty que con paciencia supo resistir mi ausencia, dedicado a este trabajo. Por dejarme compartir los logros y fracasos que supuso este trabajo, y por escucharme y acompañarme fiel hasta el final.

Y por supuesto, a mis padres y hermanos, que estuvieron presentes y me proveyeron de espacio y tiempo para que lograra esta nueva meta. Por su cariño y paciencia durante el periodo que me asumieron económicamente, sin ningún tipo de exigencia. Especialmente a mi madre que ha sabido leer muy bien mis necesidades y apoyado cuando lo necesitaba.

Índice general

<i>Resumen</i>	<i>I</i>
<i>Abstract</i>	<i>II</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>IV</i>
<i>Índice general</i>	<i>V</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>VIII</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>IX</i>
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Justificación	2
1.2. Descripción del problema	5
1.3. Hipótesis	6
1.4. Objetivos	6
Objetivo general.....	6
Objetivos particulares	6
1.5. Estructura de la tesis	7
Capítulo 2. Antecedentes	8
2.1. Revisión del estado del arte	8
Colectores solares	8
Sistema de seguimiento de solar	10
Integración de IoT a colectores solares	14
Aplicación de colectores solares como hornos	17
2.2. Fundamentación teórica	20
Introducción.....	20
Física de la energía	20
Consideraciones para la eficiencia.....	23
Otras consideraciones	26
Capítulo 3. Metodología	28
3.1. Identificación de parámetros	29

3.2. Diseño, construcción e instrumentación de prototipo.....	33
Diseño y construcción de prototipo	34
Instrumentación	36
3.4. Diseño de estructura IoT.....	40
Capa de captura y control	40
Capa de comunicación	42
Capa de nube y aplicación	42
3.5. Desarrollo de aplicación web.....	45
Aplicación móvil	45
Base de datos	46
3.6. Diseño de algoritmo.....	48
Recolección y procesamiento de datos	48
Cálculo de la eficiencia.....	49
Predicción de temperatura en foco puntual.....	50
Regresión lineal múltiple.....	51
Máquinas de vectores para regresión	51
Algoritmo genético	52
Métricas de evaluación	53
3.7. Integración del sistema.....	54
Diseño de la investigación	54
Integración de arquitectura IoT.....	55
Pruebas piloto y monitoreo de variables	56
Obtención y preparación de los datos	57
Análisis y síntesis de datos	58
Capítulo 4. Experimentación y resultados.....	59
Resultados de la eficiencia.....	62
Resultados de la predicción	63
Otros resultados de interés	67
Capítulo 5. Conclusiones.....	70
5.1. Conclusiones.....	70
5.2. Trabajos futuros	71

<i>Bibliografía</i>	73
<i>Anexos</i>	84
A. Reconocimiento FOPER 2022	84
B. Aprobación de FOPER 2023	85
C. Constancia IXV Coloquio de Ingeniería	86

Índice de figuras

FIG. 2.3. DIAGRAMA DE MÉTODOS MÁS COMUNES DE CONTROL EN LAZO CERRADO.	11
FIG. 2.4 COMUNICACIÓN PROVISTA POR IoT.....	13
FIG. 2.5. CAPACIDADES Y CARACTERÍSTICAS DE IoT.	14
FIG. 2.6. COMPONENTES Y MÓDULOS MÁS UTILIZADOS PARA APLICACIONES IoT.....	16
A) NODEMCU, B) ARDUINO® CON WiFi, C) RASPBERRY PI®	16
FIG. 2.7 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS HORNO SOLARES [62].	18
FIG. 3.1. DIAGRAMA DEL PROCESO METODOLÓGICO.	28
FIG. 3.2. COLECTORES SOLARES: A) CSP, B) CCP, c) CL Y D) PF	30
FIG. 3.3. DIAGRAMA CONCEPTUAL DEL DISEÑO DEL PROTOTIPO.	33
FIG. 3.4. MARCO PRINCIPAL, ARMADO Y EXPLOSIONADO, RESPECTIVAMENTE.	35
FIG. 3.5. MARCO Y BASE DEL SS.	35
FIG. 3.6. PROTOTIPO EXPERIMENTAL.	36
FIG. 3.7. CONTROLADOR SEGUIDOR SOLAR.	37
FIG. 3.8. DIAGRAMA DE CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTURA DE DATOS.	39
FIG. 3.9. PROTOTIPO EXPERIMENTAL DEL HORNO SOLAR.	39
FIG. 3.10. DIAGRAMA GENERAL DE ARQUITECTURA IoT.	40
FIG. 3.11. DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL MÓDULO ESP32.....	41
FIG. 3.14. APLICACIÓN MÓVIL Y SUS PÁGINAS:	46
A) DASHBOARD PRINCIPAL, B) GRÁFICOS, C) PRONÓSTICO Y D) NOTIFICACIONES.....	46
FIG. 3.15. HISTÓRICO DE DATOS CON FILTRO ACTIVADO.....	46
FIG. 3.16. DASHBOARD EN GOOGLE SHEETS.....	47
FIG. 3.17. DIAGRAMA GENERAL DE SDP CON SS INTEGRANDO IoT.....	54
FIG. 3.18. DIAGRAMA DE TIPO DE INVESTIGACIÓN.	55
FIG. 3.19. SUPUESTO DE CUADRO COMPARATIVO.....	55
FIG. 3.20. PROTOTIPO DE SDP CON SS CON LA INTEGRACIÓN DE LA ARQUITECTURA IoT.	56
FIG. 3.21. PRUEBAS DE VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS.....	57
FIG. 4.1. PROTOTIPO EN EXPERIMENTACIÓN.....	59
FIG. 4.3. RADIACIÓN, TEMPERATURA EN EL FOCO Y EFICIENCIA EN RELACIÓN CON LA HORA DEL DÍA.....	60
FIG. 4.8. RESPUESTA DEL SISTEMA SIN IoT, VISTO EN EL DASHBOARD.	63
FIG. 4.10. COMPARATIVA DE DISPERSIÓN ENTRE MODELOS: A) RLM, B) SVR-2500 :[C = 2500; $\sigma = 0.0001$]	65

Índice de tablas

TABLA 2.1. ALGORITMOS, MÉTODOS Y HERRAMIENTAS MÁS UTILIZADAS PARA SS.	12
TABLA 2.2. APLICACIONES MÁS RECIENTES DE IoT A SISTEMAS DE COLECTORES SOLARES.	15
TABLA 2.3. COMPONENTES UTILIZADOS PARA APLICACIONES IoT.	17
TABLA 3.1. RESULTADOS DE LA BÚSQUEDA Y ARTÍCULOS ACEPTADOS.	31
TABLA 3.2. VARIABLES Y MÉTODO DE MEDICIÓN.	32
TABLA 3.3. MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SEGUIDOR SOLAR.	34
TABLA 3.4. COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS PARA SEGUIDOR SOLAR.	36
TABLA 3.5. MOTORES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.	37
TABLA 3.6. VARIABLES, SENSORES Y CARACTERIZACIÓN	38
TABLA 3.7. COMPONENTES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.	41
TABLA 3.8. PLATAFORMAS Y PROGRAMAS UTILIZADOS EN LA CAPA DE NUBE Y APLICACIÓN	44
TABLA 3.9. VALORES CONSTANTES PARA CÁLCULO DE LA ENERGÍA.	50
TABLA 4.1. RESULTADOS DE ALGORITMOS DE PREDICCIÓN	65
TABLA 4.2. RESULTADOS DE ALGORITMOS DE PREDICCIÓN CON KERNEL RBF CON $C = 2277$.	67
TABLA 4.3. DATOS PARA CÁLCULO DE PODER CALORÍFICO DURANTE LAS HSP.	69
TABLA 4.4. CONDICIONES PARTICULARES PARA EL CÁLCULO DE BTU/H.	69

Capítulo 1. Introducción

Hoy en día las fuentes principales de energía, con un 80% sobre las demás, son los combustibles fósiles. Al ser estos un recurso limitado y ante la creciente demanda, las energías renovables buscan ser la solución.

El Sol emite una radiación equivalente a $1,366 \text{ W/m}^2$, la cual se puede aprovechar y transformar a través de concentradores solares de disco parabólicos (SDP) que logran hasta un 23% de aprovechamiento, que instalados sobre un sistema de seguimiento del Sol (SS), superan la eficiencia en hasta 36.8% con respecto los sistemas fijos.

Entre las aplicaciones de SDP, los hornos solares para la cocción de alimentos ofrecen características como la conservación del sabor y los nutrientes de los alimentos; siendo un método alternativo, seguro, saludable y económico a los hornos convencionales. A pesar de presentar contribuciones muy atractivas para el aprovechamiento eficiente de la energía, aún tienen limitaciones y necesidades debido a factores imprevisibles y falta de visibilidad y controlabilidad por la lejanía a la que tienen que estar ubicados, además de exponer al usuario a la irradiación solar durante su operación y mantenimiento. A la fecha no hay control sobre la temperatura o el uso eficiente de la energía.

Una estructura de Internet de las Cosas (IoT) integrada al sistema, por sus características de monitoreo, y comunicación directa y a distancia, dan respuesta a estas necesidades, ofreciendo visibilidad, seguridad, controlabilidad, previsibilidad, rentabilidad, comunicación a distancia, fiabilidad y ahorro energético, abonando en la precisión, desempeño y eficiencia del sistema completo.

En búsqueda del máximo aprovechamiento de estos sistemas, este trabajo integra una estructura IoT al sistema de control y analizará las implicaciones y afectaciones a la eficiencia de integrar una estructura IoT a un SDP con SS aplicado para hornos solares de cocción de alimentos.

1.1. Justificación

La energía es un elemento esencial para el desarrollo y supervivencia de nuestra especie. Hoy en día las fuentes principales de energía, con un 80% sobre las demás, son los combustibles fósiles [1]. Sin embargo, al ser estos un recurso limitado y ante la creciente demanda, la humanidad ha volteado a mirar otras fuentes de energía, tales son las llamadas energías renovables. Los organismos gubernamentales ya apuntan estrategias para extenderse en el uso de las energías renovables [2]. Dichas energías no solo buscan resolver el tema de los recursos limitados, sino que también surgen como respuesta y alivio ante el incremento de problemas ambientales [1]. Como, por ejemplo, en China se ha disminuido el uso de los combustibles fósiles en un 63%, en contraste de las energías renovables que han aumentado en un 11% en la producción total de electricidad; en el año 2020, con un 3.36% de participación de la energía solar [3].

La energía solar está siendo reconocida como una alternativa muy competitiva al ser un recurso ilimitado, renovable y limpio para su obtención [4]. Se dice que es ilimitado por la inmensa densidad de potencia emitida por el Sol incidente en la Tierra de $1,366 W/m^2$; el equivalente a 7,000 veces el consumo mundial de la energía primaria [5]. Parte de esta potencia puede ser utilizada, transformando la irradiancia solar en energía térmica por colectores solares (CS), y absorbida por el fluido de transferencia de calor (FTC) [6], reincidiendo así en un ciclo de aprovechamiento y adaptación de los recursos provistos por la naturaleza [7]. Por su alta eficiencia energética, se prevé que las plantas de CS produzcan una contribución global de electricidad del 25% para el año 2050 [8].

Entre estos CS están los concentradores solares de disco parabólicos (SDP) que concentran en un área pequeña toda la energía irradiada por el Sol, reflejada en el área comprendida por su disco, reportando hasta 90-94% de reflectancia solar [1] y logrando un aprovechamiento de hasta 23% [9]. Con una eficiencia de 50-100% superior a tecnologías como las torres solares o los concentradores parabólicos de tubo, respectivamente [10]. Dadas estas características, este tipo de concentrador será nuestro modelo de estudio, buscando mejorar su eficiencia. Por lo mismo, se considera la integración de un sistema de seguimiento del Sol (SS), los cuales

han superado en eficiencia los sistemas fijos en un promedio de hasta 36.8% para sistemas de dos ejes [11].

Los hornos solares para la cocción de alimentos con SDP pueden ser utilizados para la pasteurización y esterilización de los alimentos, además de ofrecer características superiores a otros hornos convencionales como la conservación del sabor y los nutrientes de los alimentos [12], abonando a la tendencia de búsqueda de alimentos cada vez más saludables y orgánicos, conservando el sabor. Son un método alternativo, saludable y económico para las familias que puedan estar expuestas a sustancias tóxicas peligrosas por el uso de otros métodos de cocción [13]. Además de ofrecer un ambiente seguro reduciendo riesgos de incendios al ser dispositivos que no utilizan fuego [14]. Incluso, pueden sustituir métodos convencionales al ofrecer resultados aceptables en los tiempos de cocción[15].

Los hornos solares, SDP y SS, a pesar de presentar contribuciones muy atractivas para el aprovechamiento eficiente de la energía, aún tienen algunas limitaciones y necesidades por ser atendidas, como: La disminución de su rendimiento por factores imprevisibles, como los cambios climáticos, y la falta de visibilidad y controlabilidad por la lejanía a la que tienen que estar ubicados [14]. Requieren ser atendidos in situ exponiendo al usuario a la irradiación. No existe a la fecha, un sistema en el que se regule o controle la temperatura y cuantifique el uso eficiente de la energía [12]. Dando así paso y justificando la incorporación de una estructura IoT al sistema, por sus características de monitoreo, y comunicación directa y a distancia, que dan respuesta a estas necesidades, contribuyendo a la eficiencia en el camino al máximo aprovechamiento de las energías renovables; en concreto, la solar [16].

Incorporar IoT a un horno solar, permitiría la revisión periódica de la temperatura y el tiempo de cocción; mantener el horno a una distancia considerable, fuera del alcance los niños pero sin perder la controlabilidad; notificar al usuario en caso de fallas, daños o cambios no deseados de las variables de interés; intercambiar datos usuario-máquina con facilidad, de modo que puedan ir aprendiendo (ambos) de la relación temperatura-tiempo de cocción de los alimentos, integrando las pérdidas por los imprevistos climáticos y prediciendo posibles escenarios para aprovechar al máximo el recurso.

Por lo anterior, se propone incorporar una estructura IoT al sistema completo, con sus características de monitoreo y operatividad a distancia y en tiempo real aportando al sistema múltiples beneficios: Uso consciente al usuario del consumo energético [17], así como el uso más eficiente del recurso al establecer límites remotamente en los parámetros de control [18]. Los sistemas se vuelven estables, más seguros y visibles por su característica de funcionar de forma independiente y comunicarse de forma inalámbrica a un dispositivo móvil o computadora [19]. Ayudan a resolver fallas potenciales [20] y problemas importantes de imprevisibilidad, ya que se puede vigilar el sistema y los sensores en tiempo real y detectar fallas oportunamente [21], además de identificar posibles pérdidas del sistema debido a la incertidumbre del cambio del clima y sus efectos, el error en la estimación de la irradiación y la suciedad [2]. Aportan a la evolución del sistema, ya que optimiza el rendimiento de los recursos y aumenta su rentabilidad, aumentando así la eficiencia y la precisión del sistema, además de mejorar las ganancias comerciales y minimizar la intervención humana [22], impactando así también a la seguridad del usuario al no exponerlo a zonas de riesgo o estar bajo la radiación directa del Sol [12]. Aportan a la educación y al desarrollo científico al mejorar el entorno de aprendizaje, permitiendo una mejor comprensión, estudio, experimentación y análisis del sistema [23]. Integración con otras fuentes de energía sustentable, o mismos sistemas, a través de una red asociada a las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) [2], con la posibilidad de hacer comparación y análisis de sistemas con diseños diferentes de hardware, software, materiales, geometrías, entre otras, para inferir sobre el sistema más eficiente, según el lugar y ambiente geográfico de operación.

Por lo tanto, se puede concluir que una estructura IoT puede aportar a un sistema visibilidad, seguridad, controlabilidad, previsibilidad, rentabilidad, comunicación a distancia, fiabilidad y ahorro energético, a un sistema de hornos solar con SDP con SS, abonando en la precisión, desempeño y eficiencia del sistema completo.

Adicional, como se ha demostrado en el estado del arte, uno de los parámetros de interés para los hornos solares, es la temperatura alcanzada, ya que el tratamiento de los alimentos depende principalmente de esta variable [12]. Y conocer la eficiencia es crucial para los sistemas de aprovechamiento de energía [9]. Uno de los principales retos en el estudio de la

temperatura alcanzada y la eficiencia, es que estas dependen de la cantidad de energía solar recolectada y otros parámetros ambientales [12]. Esto se ve limitado debido a que se requiere de una instrumentación más precisa y altos tiempos de ejecución de experimentos [24]. No obstante, el comportamiento no lineal de la temperatura se ve afectada también por la presencia de nubes que pueden afectar el proceso de cocción [25]. Para esto, las técnicas de Inteligencia Artificial han demostrado ser útiles para la predicción o descripción de parámetros de interés de estos sistemas [26]. Debido a esto, las técnicas de regresión podrán ayudar a que el usuario conozca con anterioridad la temperatura de foco puntual y en consecuencia la eficiencia del sistema. Los modelos de regresión lineal múltiple (RLM) y las máquinas de vectores como regresión (SVR) son técnicas muy utilizadas y se caracterizan por tener una interpretación geométrica simple y brindar una solución aproximada [27]. Motivo por el cual este trabajo compara los modelos SVR y MLR como predictores de la temperatura del foco puntual en el colector.

1.2. Descripción del problema

Los sistemas de control para los SS de colectores presentan fallas o pérdidas energéticas cuando agentes no controlables perturban el sistema (nubosidad, sombras, suciedad en los sensores, por mencionar algunos) [2], se requiere de una alternativa para asegurar su funcionalidad. Integrar un colector con SS a una estructura IoT provee de información adicional, como el pronóstico del clima consultado en internet o la advertencia de alguna posible falla de modo que el controlador SS o el usuario puedan responder oportunamente a las perturbaciones y garantizar funcionalidad y eficiencia [21]. Adicional, incorporar técnicas de Inteligencia Artificial para predecir la temperatura en el foco puntual favorece a este objetivo [26].

En la literatura se encuentran muy pocos trabajos de la integración de SDP con sistema SS a estructuras IoT, siendo que los SDP reportan mayores porcentajes de eficiencia [1]. Otras tecnologías de captación solar han integrado IoT a sus sistemas, sin embargo, ninguno de los trabajos presenta si estas características son un aporte real y cuantificado de la eficiencia del sistema, o contrario a esto, si la energía utilizada para la integración de sistemas IoT a este tipo de sistemas solares la reducen [28].

Algunas aplicaciones de los hornos solares en procesos de cocción pueden ser lentos, como lo es en la producción de miel de agave con un mínimo de 8 horas, además de requerir una supervisión periódica y la manipulación intuitiva del producto según vaya siendo la temperatura concentrada para garantizar la cocción y densidad adecuada [29]. Las plataformas IoT dotan de características como el monitoreo: que facilita la supervisión al no ser in situ, reduciendo la carga laboral y las exposiciones a fuentes calientes; que reduce los posibles errores humanos [22] de manipulación del producto y facilita la lectura de la temperatura y tiempo de cocción. Un modelo de predicción para la temperatura en el foco puntual anticipa información para conocer los mejores horarios y maximizar el uso de la energía. Integrar, tanto una IoT con monitoreo de la temperatura con respecto el tiempo de cocción, como un modelo de predicción a un sistema de hornos solar podría garantizar un mejor producto y un proceso más eficiente.

1.3. Hipótesis

La integración de la tecnología IoT en un colector solar mejora la eficiencia energética hasta en un 5% en comparación a un sistema sin IoT, al emplear sensores remotos para la adquisición, monitoreo y análisis de variables meteorológicas y correlaciona a través de una regresión por Machine Learning, la temperatura del foco puntual para la estimación futura.

1.4. Objetivos

Objetivo general

Diseñar un sistema de monitoreo para un SDP con SS mediante una arquitectura IoT en combinación de una técnica de predicción, para aumentar la eficiencia de conversión de calor en hornos solares y evaluar el desempeño.

Objetivos particulares

1. **Identificar parámetros** para el estudio del comportamiento dinámico y control del sistema, y su eficiencia, a través del estudio del estado del arte.

2. **Diseñar prototipo** experimental de SDP con SS integrando componentes IoT y sensores de los parámetros meteorológicos necesarios para cálculo de la eficiencia del sistema.
3. **Diseñar estructura IoT** utilizando componentes y protocolos conocidos para la gestión de los parámetros a la nube.
4. **Desarrollar aplicación web y móvil** para monitorear remotamente los parámetros del sistema y posterior análisis de los datos.
5. **Diseñar algoritmo** embebido para la obtención de los parámetros y el cálculo de la eficiencia, así como el diseño de un modelo de predicción para la temperatura en el foco.
6. **Integrar sistema** de monitoreo de IoT y predicción en el prototipo experimental y evaluar su desempeño.

1.5. Estructura de la tesis

El presente trabajo se divide en cinco capítulos. El capítulo antecedente presenta el problema identificado durante la investigación con respecto a los SDP con SS en su aplicación de hornos solares, además de la justificación y motivaciones para integrar una estructura IoT al sistema y realizar este trabajo, finalizando con los objetivos para la comprobación de la hipótesis propuesta. El segundo capítulo expone la investigación y revisión de la literatura existente, así como los conceptos necesarios para el desarrollo e implementación de este proyecto, donde se incluye información referente a la eficiencia de conversión y otras consideraciones. El tercer capítulo presenta la metodología utilizada, que comprende los instrumentos, métodos, recursos y procedimiento para conseguir el objetivo planteado. El cuarto capítulo presenta los resultados de la experimentación realizada con su respectiva discusión. Por último, el quinto capítulo presenta las conclusiones del proyecto, así como las recomendaciones para quienes estén interesados en futuros desarrollos en esta misma área.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1. Revisión del estado del arte

Colectores solares

La energía solar ha tenido gran relevancia por sus características al ser una energía renovable, de recursos ilimitados y amigable con el medio ambiente. Sin embargo, su auge comienza en la búsqueda de un recurso distinto a los combustibles fósiles, ahora considerados como una fuente de energía que se agota y responsables de la emisión de más de 34 Gigatoneladas de CO_2 [30]. Países como China han puesto la mira en este tipo de energía, debido a las presiones ambientales, a tal grado que ha disminuido el uso de los combustibles fósiles en un 63% en contraste de las energías renovables que han aumentado en un 11% en la producción total de electricidad, en el año 2020, con un 3.36% de participación de la energía solar [3]. Dicha energía solar ha sido aprovechada y transformada en energía útil para nuestro consumo, con su primera aplicación como tecnología de secado que se remonta al año 8000 a.C. [31] y a través de la historia con distintas tecnologías como paneles fotovoltaicos, calentadores solares, luminaria, por mencionar algunos. Otra tecnología que está ganando terreno en el campo del aprovechamiento de las energías solares son los Concentradores solares (CS), que concentran la radiación solar en un punto y la transforman en energía térmica o eléctrica. Las tecnologías de energía solar concentrada satisfacen con mayor eficiencia las demandas de energía térmica y eléctrica [32]. Éstas se aprovechan para el almacenamiento de energía térmica y la generación de electricidad ofreciendo variedad en sus aplicaciones, así como: generación de electricidad [10], bombeo de agua [33], soluciones de climatización [34] y calefacción [35], y soluciones de cocción de alimentos a partir de hornos solares [36], entre las más conocidas. Hasta el día de hoy, se encuentran cuatro tipos diferentes de CS; esos son: 1) Concentrador de Disco Parabólico (SDP), 2) Concentrador Parabólico de Tubo (SPL), 3) Concentrador de Torre (STH) y 4) Reflectores Lineales Fresnel (LFR) [1]. De los cuales el SDP, con una vida útil que apunta a los 25 años [37], puede alcanzar una eficiencia de 29% y una temperatura de hasta 750°C contra 20% de eficiencia y temperaturas de 400°C reportados por SPL y LFR [1]. Hoy en día diversos trabajos apuntan al estudio de la eficiencia para hornos

solares y la obtención de la máxima temperatura según sea la aplicación. Desde plantas fundidoras de metales, hasta hornos para la cocción de alimentos o destilación de líquidos.



Fig. 2.1. Concentrador solar de disco parabólico

En [34] se compararon tres prototipos de cocina solar utilizando diferentes materiales para reflejar la radiación solar, alcanzando a elevar la temperatura del agua a 74.5 °C al utilizar cinta Myllar y papel aluminio como materiales reflejantes. El disco del concentrador mide 62 cm de diámetro por 5.5 cm de profundidad, con un punto focal a 44 cm de distancia. En [38] se consiguió una temperatura máxima de 212 °C en una prueba sin carga, con un disco fabricado con aluminio reflejante y un diámetro de 140 cm por 70 cm de profundidad, a una distancia de 28 cm al punto focal. La irradiancia promedio fue de $838 \frac{W}{m^2}$. En [36] se logró una temperatura de 220 °C, con un disco de 120 cm de diámetro y 10 cm de profundidad a una distancia de 90 cm del punto focal. La irradiancia reportada fue de $550 \frac{W}{m^2}$. En [39], después de realizar un diseño conceptual, se concluye que una temperatura superior a 400 °C se requiere de un disco parabólico construido de espejo de 120 cm de diámetro por 9 cm de profundidad y una distancia de 100 cm del punto focal. Se pueden alcanzar temperaturas de operación más elevadas con métodos para mejorar las características ópticas e incrementando la relación de concentración [40]. Modificando el tipo de concentrador a uno de tipo tazón, se logró calentar aceite a una temperatura máxima de 450 °C [41].

Sistema de seguimiento de solar

Buscando mejorar la eficiencia de los paneles solares para justificar el costo de la producción de estos surgen los Seguidores solares (SS) que, integrados al dispositivo captador de energía, lo dirige según la posición del Sol, recuperando así la mayor energía posible [42]. El primer seguidor solar, que consistía en un sistema mecánico, fue inventado por C. Fisterer en 1962, que a pesar de que las ganancias de energía fueron insignificantes, años de pruebas e investigación mejoraron el sistema, emergiendo así diferentes tecnologías enfocadas a los sistemas de SS [43], logrando un incremento de hasta 45% con respecto los sistemas convencionales que permanecían fijos [11]. Dichos sistemas de SS se pueden integrar a los colectores antes mencionados y conseguir el aumento de la eficiencia al mantener el colector direccionado hacia la fuente de radiación. Los SS se pueden clasificar según sean los Grados de Libertad (GL) que permita realizar el seguimiento: un solo eje (1GL) y de doble eje (2GL).

El sistema 2GL es una forma más eficiente de seguimiento, ya que tiene dos direcciones de movimiento permitiendo orientarse hacia Sol de manera más efectiva [42], por lo que han ganado relevancia para su estudio. Sin embargo, no logra mejorar más del 4% la eficiencia del sistema por lo que es más económicamente viable un seguidor de un solo eje [11].

Por el método que utilizan los SS se pueden clasificar en tres tipos, pasivos, activos y cronológicos [44], tal como se muestra en la Fig. 2.2.

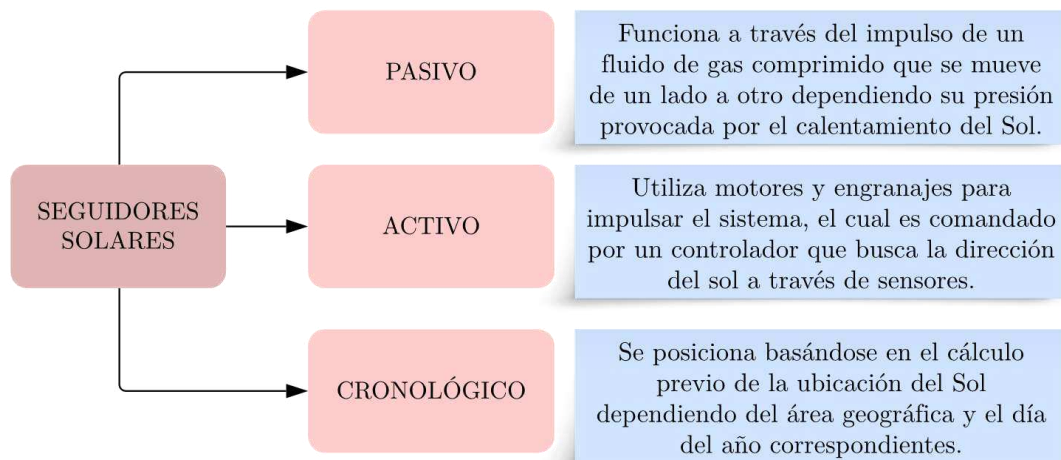


Fig. 2.2. Clasificación de seguidores solares y métodos de seguimiento solar.

La alta eficiencia en la salida del sistema y el costo total se pueden reducir mediante el uso de los Seguidores Activos [11]. El controlador en el Seguidor Activo busca la dirección del Sol a partir de distintos métodos de ubicación del Sol, tales como: El seguimiento del Sol con una cámara, sin embargo, no es muy común. Otro método es el seguimiento en tiempo real que utiliza los ángulos azimutal y cenital junto con una combinación de sensores para rastrear el Sol. Los sensores más comunes de estos es la resistencia LDR (*light-dependent resistor*) que funcionan según el principio de cambio en la resistencia según la intensidad de la luz que le incide. Este método es de los más utilizados [42].

Adicional, con el objetivo de mejorar los sistemas de colección solares y SS se han integrado o diseñado sistemas complementarios como: limpiadores y aspersores, para mejorar las características ópticas ; Motores esféricos, para tener más grados de libertad [45] o sistemas híbridos con enfriamiento a través del viento para aumentar la eficiencia de sistemas fotovoltaico [46].

Al mismo tiempo, para mejorar los sistemas activos se utilizan distintos métodos de control, como lo son de lazo abierto, cerrado y la combinación de ambos y algoritmos especializados para dichos controles, en los que destacan control *On-Off* [47], controles basados en lógica difusa (FLC) [48] y control PID [49], entre otros, como se muestra en la Fig. 2.3.

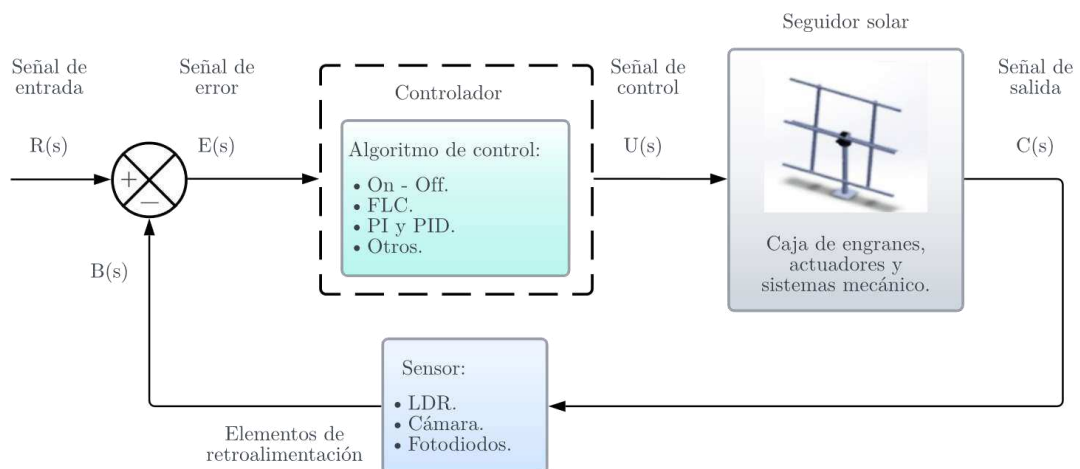


Fig. 2.3. Diagrama de métodos más comunes de control en lazo cerrado.

Estos controladores y algoritmos son programados y/o diseñados en software como Matlab [50], Simulink [51], LabVIEW [52] cuando la unidad de control es una PC. Sin embargo, también se utilizan distintas unidades programables en las que destacan Raspberry Pi® [23], Arduino® y NodeMCU [47], [53]. La Tabla 2.1 concentra y resume lo antes mencionado, basado en la investigación de [54].

Tabla 2.1. Algoritmos, métodos y herramientas más utilizadas para SS.

Estrategia de control	Algoritmo de control	Método de localización	Unidad de control
Lazo Cerrado	On-Off	Arreglos de LDR	Arduino®
Lazo Abierto	FLC	Cámara	Raspberry Pi®
Lazo Híbrido	PID	Cronológico	NodeMCU
	PI		Microcontrolador

La mayoría de los trabajos no reportan la precisión y aún queda abierto mucho campo para la optimización de los SS teniendo en cuenta los requisitos técnicos del sistema considerando su ángulo de aceptación (captando más radiación a menor movimiento) y la relación costo-beneficio; reduciendo los costos y el mantenimiento, así como técnicas que faciliten la construcción y e implementación obteniendo una mayor precisión de los SS [54].

Dentro de todas estas mejoras se abre un campo emergente, pero creciendo con gran rapidez y con una amplia gama de aplicaciones en varios campos, considerada por muchos líderes tecnológicos como la red del futuro (NoF) [55]: IoT. El Internet de las Cosas (IoT) ha derivado la atención con su visión de extender el uso de Internet e incorporar los objetos cotidianos [56]. IoT establece la plataforma donde se asocian los componentes con una red de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) y crea la provisión para integrar fuentes de energía renovable [2]. Permite a los usuarios controlar, comunicarse y monitorear diferentes tipos de objetos gracias a sus modos de comunicación [57] (Ver Fig. 2.4)



Fig. 2.4 Comunicación prevista por IoT.

Así mismo, dota de características específicas a quien lo integra, haciendo de las cosas más simples, rápidas y fáciles de operar [22], inclusive a largas distancias. Dichas características corresponden al modelo de comunicación, que se resumen en la Fig. 2.5, y son tales como:

1) La intercomunicación: Al permitir el intercambio de información de forma rápida y en tiempo real entre sistemas. En un sistema de manufactura inteligente, permite la detección temprana de errores en lugar de esperar hasta el final. Como resultado, se pueden tomar medidas oportunas para evitar la fabricación ineficiente y el desperdicio de energía que esto conlleva [58].

2) Comunicación con medios externos: Al tener la posibilidad de conectarse a la red con otros medios, estos podrían sincronizarse con estaciones meteorológicas que los llevaría a un uso más adecuado de los recursos disponibles y como consecuencia al ahorro energético.

3) Comunicación con sistemas similares: Al poder comparar información entre sistemas similares, el estudio y el proceso de aprendizaje para estos sistemas se acelera [23].

4) Comunicación directa: Al permitirle al usuario tener control e información directa en un dispositivo móvil le permite tener observabilidad y fiabilidad [19], además de una rápida respuesta de mitigación ante una posible falla o condición insegura se puede lograr. Esta

comunicación directa puede ofrecer una visión más consciente al usuario de la producción o desperdicio energético del sistema [17].



Fig. 2.5. Capacidades y características de IoT.

Integración de IoT a colectores solares

Diversos trabajos han incorporado esta herramienta a concentradores solares de distintos tipos, para distintas disciplinas y aplicaciones. La Tabla 2.2 resume y ordena la literatura encontrada de las aplicaciones más recientes de IoT a sistemas de colectores solares. Se puede observar que son muy pocas las aplicaciones para los SDP, siendo estos los sistemas que reportan mayor eficiencia dentro de los colectores solares [1]. De igual forma se muestran las características más destacables, que los autores exponen con respecto a la incorporación de IoT a su sistema. La característica IoT que más destaca es el monitoreo remoto en tiempo real de las variables de interés, seguido de la recolección de datos en un histórico y la capacidad de controlar remotamente los actuadores. Otras características son el control para el límite de consumo, testeo remoto y captura de información, y detección de fallas. Sin embargo, ninguno de los trabajos presenta si estas características son un aporte real y cuantificado de la eficiencia del sistema, o contrario a esto, si la energía utilizada para la integración de sistemas IoT a este tipo de sistemas solares la reducen.

Tabla 2.2. Aplicaciones más recientes de IoT a sistemas de colectores solares.

AÑO	REF.	APLICACIÓN	SISTEMA	CARACTERÍSTICAS IOT DESTACABLES
2020	[47]	Desalinización del agua	SDP	Monitoreo remoto de la temperatura. Histórico de la temperatura para posterior análisis.
2020	[59]	Smart grid, solar-powered smart home	FV	Sugiere que IoT beneficia al ahorro del costo energético de la vivienda: <ul style="list-style-type: none"> · Monitoreo para el pronóstico de consumo. · Control remoto de límite de consumo.
2020	[60]	Generación de electricidad y seguidor solar	FV	Facilita la detección de fallas en tiempo real. Permite la comparación de eficiencia del mismo sistema con o sin SS.
2020	[23]	Educativo	SDP	Monitoreo de la temperatura. Procesamiento y análisis de datos.
2017	[53]	Calentamiento de agua	CCP	Monitoreo de temperatura. Control remoto de actuadores.
2017	[28]	Cultivo de champiñones	FV	Monitoreo del estado de la celda y la humedad. Notificaciones desde el servidor. Exportar histórico de datos.
2017	[61]	Calentamiento de Invernadero solar	Colector solar de pared	Recolección de información.

Dichos trabajos presentan distintos métodos y herramientas para la integración de IoT. Algunos de los componentes más utilizados se muestran en la Fig. 2.6.

[47] y [28] utilizan un módulo NodeMCU para subir los datos a la web, a través de Blynk, un servidor de internet, ambos únicamente para monitorear la variable de interés, dicha variable es obtenida a través de Arduino® y un convertidor ADC, respectivamente. Ambos trabajos presentan limitaciones ya que el NodeMCU debe conectarse a un módem.

[60] utiliza un módulo NodeMCU interconectado con una tarjeta Arduino Uno encargada del control del SS. El módulo recibe las señales de tres LDR orientados estratégicamente en distintas direcciones y guarda la información en la nube, en una hoja de datos, a través de ThingSpeak para monitorizar y supervisar la generación eléctrica de un PV montado al SS.

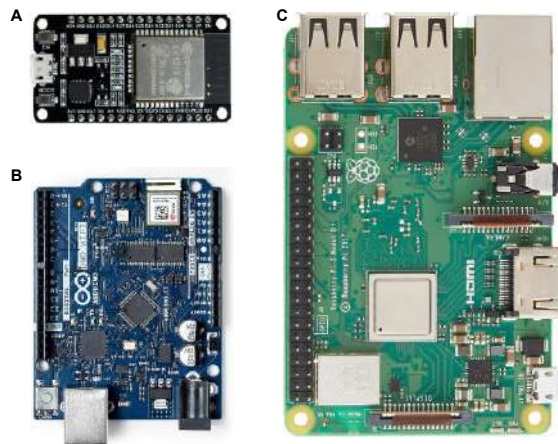


Fig. 2.6. Componentes y módulos más utilizados para aplicaciones IoT.

A) NodeMCU, B) Arduino® con WiFi, C) Raspberry Pi®.

[53] utiliza como unidad de control una Raspberry Pi®, ampliando las posibilidades de conexión. Adicional utiliza una tarjeta Arduino y un microcontrolador PIC para hacer la adquisición de la lectura de los sensores, para posteriormente procesar los datos y subirlos a la nube por medio de NodeRed, plataforma de IoT, programado en la Raspberry. Reporta la utilidad de IoT como una herramienta de análisis y monitoreo de los parámetros medidos.

Previos trabajos presentados adoptan una estructura IoT para sistemas colectores de energía solar, pero distintos a un SDP, y no poseen SS, a diferencia de [23], quien utiliza únicamente una Raspberry Pi® como unidad de control para un SDP con propósito educativo. Captura la información de la posición del Sol a través de los LDR para posteriormente retroalimentar el Raspberry Pi® que controla los motores a través de un puente H para establecer la dirección deseada. Reporta la utilidad de IoT como una herramienta con propósito demostrativo: de verificación, análisis y prueba de los parámetros. Concluye con los resultados presentados que el sistema logró una eficiencia de 60% durante el mediodía, sin embargo, no acreditado a IoT.

La Tabla 2.3 presenta los componentes y módulos más comunes que se utilizaron para la incorporación del sistema a IoT y algunas comparaciones de estos.

Tabla 2.3. Componentes utilizados para aplicaciones IoT.

CPU	DESTACABLE	INCONVENIENTE
Raspberry Pi® [60]	Funciones más avanzadas para el computo, control y conectividad. Procesador muy potente para controlar varios dispositivos. Mayor capacidad de almacenamiento. Distintas versiones, tamaños y capacidades ajustándose a los requisitos de la aplicación.	No posee convertidores de señal y requiere ADC externo o interconexión a microcontrolador. Más costoso. Consumo de energía superior para versiones más robustas.
Arduino® [47], [28]	Fácil de programar y se puede conseguir en presentaciones con WiFi integrado. Incluye ADC.	Costo y consumo medio. Poca capacidad de memoria. Menos capacidad de cómputo para tareas más complejas.
NodeMCU [47], [28]	El menor costo y consumo. Tamaño muy reducido. Incluye ADC nativo. Más salidas análogas. Varias formas de conectividad inalámbrica.	Poca capacidad de memoria. Menos capacidad de cómputo para tareas más complejas.

De acuerdo con la revisión del estado del arte, el incremento [22] o posible decremento de la eficiencia [28] que aporta una estructura IoT no está cuantificada, sin embargo, como ya se ha mencionado antes, esta debe ser considerada cuando se trata de sistemas de utilización de energía.

Aplicación de colectores solares como hornos

Dentro de las aplicaciones de colectores solares encontramos los hornos solares para cocción de alimentos. Al igual pueden ser utilizados para la pasteurización y esterilización de éstos. Estos se pueden categorizar según sea su tipo de estructura, el método de cocción y tipo de almacenamiento térmico [62] como se muestra la Fig. 2.7.

Por su tipo de estructura se conocen los hornos de tipo caja, los de panel o cama plana, y los concentradores. Sus componentes principales son: colector solar, horno, reflector, mecanismo de inclinación y la estructura [12]. Dentro de los concentradores se encuentran los SDP y los parabólicos de tubo. En el caso de los SDP el horno u olla se coloca en el punto focal de modo que toda la radiación solar le sea reflejada.

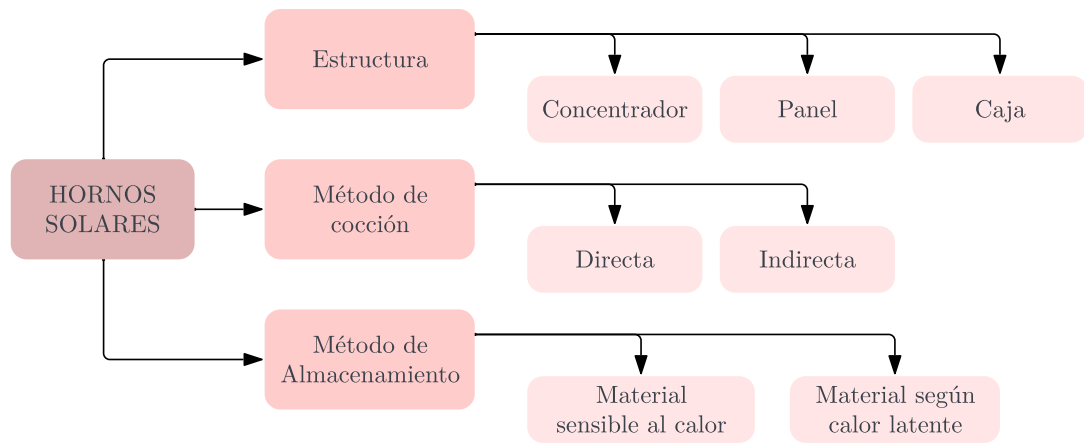


Fig. 2.7 Clasificación general de los hornos solares [62].

En [63] se diseñó y se construyó un horno solar portátil para ser ensamblado en tan solo 2 minutos y con un peso de tan sólo 5 kg. El horno logró producir 175 W; capaz de cocinar un alimento en 2 horas para 2 personas.

En [14] se analiza un horno solar de bajo costo que puede ser fabricado con cartón cubierto de papel aluminio reflejante, doblado de tal forma que el Sol converja a una caja sellada con bolsa plástica. Dicho horno reporta alcanzar temperaturas superiores de 135°C y que permite la pasteurización de los alimentos y el agua. Reporta de 60 a 120 minutos para la cocción de arroz.

En [15] se utiliza un espejo parabólico para reflejar los rayos del Sol hacia el horno y calentar una bandeja rectangular dónde se coloca el pan. Reporta menos de 50 minutos para su cocción. Un tiempo muy aceptable para reemplazar los hornos convencionales que tardan aproximadamente 30 minutos a una temperatura de 250 °C.

En [64] con la intención de no estar bajo la incidencia del Sol durante el tiempo de cocción de los alimentos, se desarrolló un horno solar directo para cocinar al interior de un recinto usando un calentador plano conectado a un SDP exterior. Reporta una temperatura máxima alcanzada de 109°C. Logrando cocinar fideos en 45 minutos.

En [36], se desarrolló un dispositivo con una olla especial que era calentada con un SDP para después ser retirada al interior y mantener el calor gracias a una capa externa hecha de sales $NaNO_3/KNO_3$ (60:40), intentando resolver la limitación de los hornos solares para mantener su temperatura constante. Reportan temperaturas constantes de hasta 170 °C y la cocción de arroz en tan sólo 20 minutos.

Los hornos solares conservan los alimentos nutritivos, saludables, seguros y con mejor sabor [12]. Ofrecen un método alternativo, saludable y económico para las familias que puedan estar expuestas a sustancias tóxicas peligrosas por el uso de otros métodos de cocción [13]. Adicional, alcanzan resultados aceptables en los tiempos de cocción sustituyendo los métodos convencionales [15]. Sin embargo, se encuentran algunas limitantes y necesidades por atender: A pesar de que hay mucha investigación al respecto muy pocos dispositivos están comercializados; su rendimiento depende de la intensidad de luz solar y por el tiempo que toma la cocción de algunos alimentos puede exponer al usuario significativamente a la radiación solar; a la fecha no es posible regular la temperatura adecuadamente [12]. Al ser dispositivos que reflejan la luz solar a un punto focal, puede ser peligroso para los niños y el espacio requerido para operar está más disponible en zonas rurales [14].

Incorporar IoT a un horno solar, permitiría la revisión periódica de la temperatura y el tiempo de cocción; mantener el horno a una distancia considerable, fuera del alcance los niños pero sin perder la controlabilidad, notificar al usuario en caso de fallas, daños o cambios no deseados de las variables de interés; intercambiar datos usuario-máquina con facilidad, de modo que puedan ir aprendiendo (ambos) de la relación temperatura-tiempo de cocción de los alimentos, integrando las pérdidas por los imprevistos climáticos y prediciendo posibles escenarios.

Por lo tanto. Añadir una estructura IoT al sistema general aporta al sistema múltiples beneficios: Ofrece al usuario un uso consciente de su consumo, traducido a un uso más eficaz de las energías renovables [17]. Los sistemas se vuelven estables, más seguros y visibles por su característica de funcionar de forma independiente y comunicarse de forma inalámbrica a un dispositivo móvil o computadora [19]. Ayudan a resolver problemas importantes de imprevisibilidad, ya que se puede vigilar el sistema y los sensores en tiempo real y detectar

fallas oportunamente [21], además de identificar posibles pérdidas del sistema debido a la incertidumbre del cambio del clima y sus efectos, el error en la estimación de la irradiación y la suciedad [2]. Las características ofrecidas por IoT le dan la posibilidad de evolucionar, ya que optimiza el rendimiento de los recursos y aumenta su rentabilidad, aumentando así la eficiencia y la precisión del sistema, mejorando las ganancias comerciales y minimizar la intervención humana [22]. En consecuencia, IoT se puede utilizar para un mayor desarrollo de la eficiencia energética, incrementar la utilización de energías sustentables y disminuir el efecto natural del uso de energía [16].

Resumiendo lo anterior, una estructura IoT puede aportar a un sistema visibilidad, seguridad, controlabilidad, previsibilidad, rentabilidad, comunicación a distancia, fiabilidad y ahorro energético, a un sistema de hornos solar con SDP con SS, abonando en la precisión, desempeño y eficiencia del sistema completo.

2.2. Fundamentación teórica

Introducción

Este apartado abarca desde los conceptos básicos de la energía solar, sus componentes y comportamiento en la transferencia de calor y la eficiencia de un sistema, hasta el modelo matemático de un sistema térmico como es el caso de un horno solar con SDP y su función de transferencia.

Física de la energía

Para poder estudiar la energía es importante comenzar con algunas definiciones básicas que nos permitirán adentrarnos a este estudio:

Energía solar

El origen de la energía solar está en las sucesivas reacciones nucleares que se producen en el interior del Sol. Dicha energía se libera en forma de radiación, que se propaga por el espacio por medio de ondas electromagnéticas, sin embargo, parte de la energía se dispersa en el

camino, disminuyendo su energía y potencia. Se llama Irradiancia a la potencia de la radiación por unidad de superficie $\frac{W}{m^2}$; irradiación a la energía por unidad de superficie $\frac{J}{m^2}$ o $\frac{kWh}{m^2}$ [65]

La temperatura a la que se encuentra el Sol es de unos 15 millones de grados centígrados en el núcleo y $5500\text{ }^\circ\text{C}$ en la superficie. La potencia de radiación que emite es de $3.86 \times 10^{26}\text{ W}$. Una irradiancia de $6.35 \times 10^7 \frac{W}{m^2}$. Debido a la distancia entre el Sol y la Tierra, sólo nos llega $1367 \frac{W}{m^2}$. Es decir, cada hora llega a la Tierra en cada metro cuadrado más de un kilovatio hora de energía (la misma que consume una estufa eléctrica de 1300 W durante una hora) [66].

Como la vida restante del Sol se estima en unos 5000 millones de años, podemos considerar a nuestro astro con una fuente infinita de energía.

Reflexión, absorción y difusión de la radiación solar

La absorción, reflexión y difusión hacen que la irradiancia que llega a la Tierra emitida por el Sol de $1367 \frac{Wh}{m^2}$, disminuya apreciablemente al llegar a la superficie terrestre [65].

La reflexión se debe al comportamiento de la atmósfera como una especie de espejo en el que “rebotan” los rayos de luz del Sol. Este fenómeno depende de la inclinación con la que lleguen los rayos a la atmósfera. Los rayos del Sol entre más cerca a la perpendicularidad incidan, mejor “penetran” en la atmósfera, mientras que si entran más inclinados “rebotan” (o se reflejan) parcialmente. Por lo tanto, también, según la situación geográfica de cada lugar, será mayor o menor la reflexión. En verano se acerca más a esta perpendicularidad que en invierno.

La absorción se debe a que en la atmósfera existen multitud de partículas o moléculas que absorben parte de la energía solar. Pueden ser gases, vapor de agua, las moléculas de oxígeno y nitrógeno, el ozono, entre otros. Estas moléculas lo que hacen es retener parte de la radiación solar y consumirla en fenómenos físicos y químicos. Cada uno de estos elementos absorbe mayoritariamente un tipo radiación.

La difusión se debe al cambio de dirección de la radiación provocado por moléculas del aire, los aerosoles, el polvo, gotitas de agua, entre otros. La difusión se da en mayor medida en las zonas de gran nivel de contaminación como pueden ser grandes ciudades, complejos industriales, entre otros [67].

Radiación solar directa y difusa

La radiación solar se puede dividir en dos componentes, de acuerdo con [68]:

- Radiación solar directa. Es aquella que llega directamente del Sol atravesando la atmósfera. Para medir la radiación directa es necesario un dispositivo seguidor, es decir, un dispositivo que vaya variando su orientación con el movimiento del Sol de manera que reciba la luz directamente en cada momento.
- Radiación solar difusa. Es aquella que proviene de la bóveda terrestre producto de la absorción y la difusión que sufre la radiación directa en su paso por la atmósfera. Para medir la radiación difusa se utiliza otro tipo de captador que recoge toda la radiación que le llega a excepción de la directa del Sol.

Aproximadamente 47% de la radiación solar que absorbe nuestra atmósfera llega a la superficie terrestre: 31% directa y 16% difusa. La radiación directa llega directamente del Sol y la difusa de la bóveda terrestre.

Hay que tener en cuenta que en días claros la radiación predominante será la directa; en días nublados será la difusa. La radiación global es la suma de la radiación directa y la difusa, de acuerdo con [29]:

$$\text{Radiación global} = \text{radiación directa} + \text{radiación difusa} \quad (2.1)$$

La componente directa de la radiación se puede medir también a partir de la radiación global y la difusa. La diferencia entre las dos será la radiación directa.

Radiación directa normal y horizontal. La radiación es mayor cuando llega de forma perpendicular (90°), por lo tanto, es importante el ángulo con que llegue al captador. Se

consideran dos componentes [68]: Componente directa horizontal, que correspondería a la proyección del rayo del Sol sobre el plano horizontal, y componente directa normal, que sería la línea que forma el rayo con el captador. Ambas componentes están relacionadas con el ángulo que forma el rayo al incidir en el captador.

Consideraciones para la eficiencia

La obtención de calor a partir de instalaciones solares térmicas ya sea para su uso directo o para calefacción, se logra gracias a la capacidad de transformación de la energía. La energía de radiación proveniente del Sol se transforma en energía térmica y de este modo se transfiere al fluido a calentar [67].

Las pérdidas energéticas y energía total

En cualquier instalación solar térmica existen pérdidas energéticas. Estas pérdidas se producen en cada uno de los componentes de la instalación, aunque se aislen con materiales adecuados. Esta energía no aprovechada no desaparece (“la energía ni se crea ni se destruye; sólo se transforma”), sino que se convierte en energía térmica que se dispersa en el medio ambiente. El balance de energía total entonces corresponde a la ecuación (2.2), de acuerdo con [69]:

$$Q_{ACS} = E_{Solar} - Q_{perdido} \quad (2.2)$$

Donde Q_{ACS} es la energía acumulada como energía térmica en el fluido, E_{Solar} es la energía obtenida del Sol y $Q_{perdido}$ es la energía térmica disipada al medio ambiente.

Rendimiento de un captador solar

Se define rendimiento de un captador solar como el cociente entre la energía térmica aportada al fluido y la energía solar que llega al captador, todo ello en el mismo periodo de tiempo [68].

$$\text{Rendimiento captador} = \frac{\text{energía térmica aportada al fluido}}{\text{energía solar que llega al captador}} \quad (2.3)$$

La diferencia entre la energía solar que llega al captador y la que se logra aportar al fluido son las pérdidas energéticas que se producen en el captador.

Pérdidas energéticas

Las pérdidas que se producen en un captador solar pueden ser de tipo [67]:

- ópticas: según la reflexividad del material.
- conductivas: según el contacto con otros componentes que puedan disipar o absorber el calor recibido.
- radiantes: al aumentar la temperatura del absorbedor éste empieza a emitir radiación. Para disminuir este tipo de pérdidas el material del absorbedor debe tener una emisividad baja.
- convectivas/conductivas: Las pérdidas que se producen por contacto entre el aire exterior y el absorbedor, y por el movimiento del aire alrededor y dentro del captador, son las pérdidas conductivas/convectivas. Estas pérdidas aumentan con la diferencia de temperatura entre el aire confinado y el aire exterior.

Para un captador solar determinado el principal parámetro que afecta a las pérdidas y a su rendimiento es la diferencia de temperatura entre el absorbedor y el aire exterior.

Potencia en el SDP

La potencia en el plano de apertura del SDP, $Q_{SDP} [J]$, dependen de la radiación solar directa $E_b [W/m^2]$, el área de apertura del SDP $A_{ap} [m^2]$, el ángulo θ , la eficiencia óptica η_{opt} , la velocidad del viento y la temperatura, entre otros factores. No obstante, para este estudio Q_{SDP} puede calcularse mediante la ecuación (2.4), de acuerdo con [6]:

$$Q_{SDP} = E_b \cdot \cos \theta \cdot A_{ap} \cdot \eta_{opt} \quad (2.4)$$

No hay que olvidar la componente de tiempo que es proporcional, según sea el periodo de muestreo. De modo que la ecuación quedaría así:

$$Q_{SDP} = E_b \cdot \cos \theta \cdot A_{ap} \cdot \eta_{opt} \cdot t \quad (2.5)$$

El área de apertura es fácil de ser calculado, en cambio la eficiencia óptica toma valores que son más complejos de calcular, que está en función de la eficiencia óptica del material reflectante η_{Mopt} , la constante de superficie no reflectante k_{ref} , y el área total de la superficie de reflexión que está dada por la doble integral como se muestra en la ecuación [35]:

$$\eta_{opt} = \eta_{Mopt} \cdot \left(\int_{y2}^{y1} \int_{x1(y)}^{x2(y)} \left| \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \right| dx dy - k_{ref} \right) \quad (2.6)$$

Potencia en el fluido de trabajo

La potencia o energía generada en el flujo de trabajo Q_u se puede calcular a partir de:

$$Q_u = \dot{m} C_p \Delta T \quad (2.7)$$

Donde, $\dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right]$ es el flujo máximo, $C_p \left[\frac{J}{kgK} \right]$ es el calor específico del fluido y $\Delta T [K]$ es la diferencia de temperatura de entrada y de salida.

Potencia en el material

También se puede calcular la potencia o energía generada en el material. En este caso no existe un flujo o variación de la masa en el tiempo, por lo que solo se considera la magnitud de la masa. Q_u se puede calcular a partir de:

$$Q_u = mC_p\Delta T \quad (2.8)$$

Donde, m [kg] es la masa constante del material, C_p [$\frac{J}{kgK}$] es el calor específico del material y ΔT [K] es la diferencia de temperaturas inicial y final del material.

Eficiencia energética de un SDP

La eficiencia energética para SDP se podría entonces describir según (2.3), con la razón entre las ecuaciones (2.8) y (2.5):

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{SDP}} \quad (2.9)$$

Otras consideraciones

Cálculo de las Horas Solar Pico y producción mensual

Para todos los sistemas de energía solar es importante considerar las horas solar pico (*HSP*) las cuales corresponden al rango de horas por días equivalente a un nivel de radiación constante de 1000 W/m^2 [70]. Es decir, el área bajo la curva equivalente a un rectángulo de 1000 u^2 . Para obtener *HSP* de un día se considera la siguiente ecuación [71]:

$$HSP = \frac{1}{1000} \sum_i^n Rad_i \quad (2.10)$$

Multiplicando *HSP* por la radiación solar promedio se puede conocer la producción mensual estimada de energía (*SEP*) según la Ecuación (2.11) [71]:

$$SEP = HSP \times \frac{1}{n} \sum_i^n Rad_i \quad (2.11)$$

donde n es el número de datos de la radiación solar Rad_i .

Cálculo del Poder Calorífico en BTU

Calcular el poder calorífico de tu horno solar en términos de BTU (British Thermal Units) es esencial para evaluar su eficiencia: Conociendo el valor en BTU podemos determinar la escalabilidad del diseño.

El poder calorífico [kW] de un horno solar se puede medir por la cantidad de calor que es capaz de generar. La fórmula para calcular el poder calorífico sería:

$$Poder\ Calorifico = E_b \times A_{ap} \times \eta \quad (2.12)$$

Donde E_b [W/m^2] es la radiación solar directa, A_{ap} [m^2] es el área de apertura del SDP, η es la eficiencia del sistema.

Para conocer la cantidad de BTU/h generadas, es necesario hacer la conversión sabiendo que 1 kW equivale aproximadamente a 3412 BTU por hora.

Capítulo 3. Metodología

En esta sección, se describe el método, los materiales y las herramientas a utilizar con el fin de verificar la hipótesis propuesta. Se presenta de forma cronológica y ordenada cada una de las etapas del proyecto y sus implicaciones.

Se desarrolló una metodología integral para incorporar tecnología IoT en un sistema de SDP con SS, con el fin de mejorar la eficiencia. La metodología abarca la identificación de parámetros relevantes para el estudio del comportamiento dinámico y la eficiencia del sistema, seguida del diseño, construcción e instrumentación de un prototipo experimental, en conjunto del diseño de una estructura IoT para la gestión de los parámetros desde la nube, y de una aplicación web multiplataforma para el monitoreo y control remoto. Se implementaron algoritmos para la recolección y procesamiento de datos, el cálculo de la eficiencia del colector solar y la predicción de la temperatura en el punto focal. Finalmente, se integró la arquitectura IoT en el prototipo instrumentado, y se realizó el análisis estadístico para evaluar la eficiencia del sistema. Esta metodología se muestra en la Fig. 3.1.

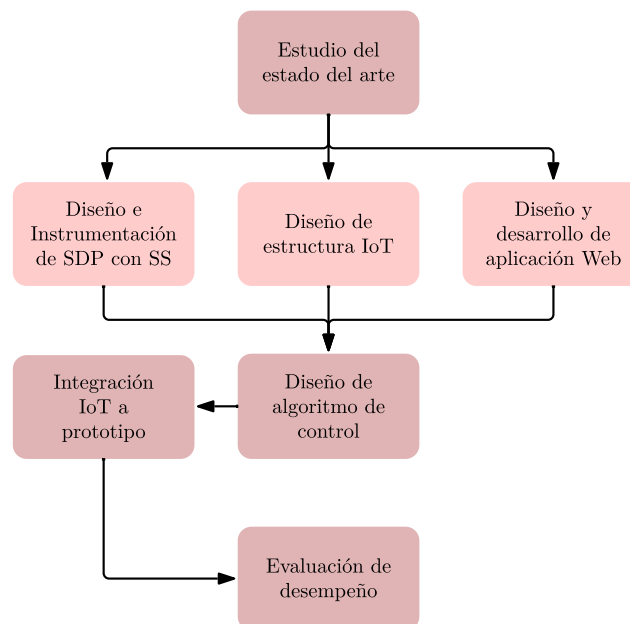


Fig. 3.1. Diagrama del proceso metodológico.

3.1. Identificación de parámetros

En la primera etapa, se recopilaron y analizaron estudios, artículos científicos, informes técnicos y cualquier otra fuente relevante que haya abordado aspectos relacionados con los hornos solares de concentradores de disco parabólico. El objetivo principal fue lograr una comprensión del conocimiento actual sobre este tipo de hornos solares, incluyendo su diseño, funcionamiento, eficiencia energética, aplicaciones y limitaciones. A través del estudio del estado del arte, se identificaron las necesidades o áreas de investigación insuficientemente abordadas, lo que ayudó a definir los objetivos, la hipótesis y el diseño experimental de la investigación posterior. Además de familiarizarse con los métodos y enfoques utilizados por otros investigadores, lo cual proporcionó una base sólida para el diseño y la ejecución de la investigación.

Este primer apartado es complemento del Capítulo 2 y especifica el proceso que se siguió para obtener la información en dicho capítulo. Así mismo figuras y tablas se mencionan aquí, pero se exponen en el Capítulo 2.

El primer paso constó en la identificación de los trabajos de investigación ya existentes que abonen al estudio de la tecnología mencionada, tanto para los colectores solares, en específico los de disco parabólico, como las tecnologías emergentes IoT.

El método utilizado fue una búsqueda esquemática. Se utilizaron los repositorios de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para identificar toda la literatura existente a nivel local y los buscadores Scopus y Google Académico en lo que refiere a nivel global.

Se realizó una búsqueda con las palabras claves referentes a los sistemas de colectores solares y que estuvieran asociados al internet de las cosas o al monitoreo por internet: “Parabolic dish solar collector” y “IoT” o “Internet of Things” o “monitoring”. Adicional, se buscó literatura que asociara dichas palabras claves con la eficiencia: “efficiency analisis” o “efficiency”. Al ser muy poca la coincidencia en la búsqueda se amplió el criterio a todos los sistemas de colector solar: Panel Fotovoltaico (PF), Colector de Cama Plana (CCP), Colector Solar de Pared (CSP), Colectores Lineales (CL), entre otros (Ver Fig. 3.2).



Fig. 3.2. Colectores solares: a) CSP, b) CCP, c) CL y d) PF

La Tabla 2.2 resume, ordena y compara la literatura encontrada según los criterios de búsqueda mencionados. Se puede observar que son muy pocas las aplicaciones para los SDP, siendo estos los sistemas que reportan mayor eficiencia dentro de los colectores solares [1].

De los documentos encontrados, se analizaron para verificar si las palabras clave de búsqueda correspondía con la importancia y relevancia del documento. Al encontrar que en algunos casos no tenía relevancia, sino que solo eran conceptos mencionados, se rechazaron. También se rechazaron documentos con más de 5 años de antigüedad, con la finalidad de ofrecer información reciente.

Para la literatura restante, se utilizó la relación que tenía las plataformas IoT con la eficiencia del sistema propuesto como criterio de aceptación (CA1). Se analizaron dichos artículos para verificar el impacto directo a la eficiencia que puede tener la incorporación de un sistema a una plataforma IoT, y posteriormente, analizar los impactos indirectos a la eficiencia por las características que ofrecen dicha plataforma (CA2). Dichos resultados se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados de la búsqueda y artículos aceptados.

TIPO	FUENTE	CRITERIO DE BÚSQUEDA	ACEPTADO/ ENCONTRADO		REF.
			(CA1)	(CA2)	
Local	RI-UAQ	concentrador de disco parabolico	0/7	0/7	-
	RI-UAQ	concentrador de disco parabolico iot	0/2	0/2	-
	RI-UNAM	concentrador de disco parabolico	0/3	0/3	-
	RI-UNAM	concentrador de disco parabolico internet	0/0	0/0	-
Global	Scopus	"Parabolic dish solar collector"	0/57	1/57	[72]
	Scopus	"solar collector" internet	1/27	6/27	[58] [72]*, [47]*, [59], [60]*, [53]*, [61]
	Scopus	"Parabolic dish solar collector" IoT Internet of Things online monitoring	0/0	0/0	-
	Google académico	"parabolic dish" "solar collector" "IoT"	0/54	3/54	([72], [23], [28])*
	Google académico	"parabolic dish" "solar collector" "IoT" "efficiency analysis"	0/3	0/3	-
Local	RI-UAQ	concentrador de disco parabolico	0/7	0/7	-

* Fuente de cuartil 4 o procedente de conferencias.

Por último, de acuerdo con la búsqueda de literatura, se realizaron tablas comparativas que permitieran hacer un análisis de la aplicabilidad de estructuras IoT a sistemas de colectores solares junto con el reporte de los autores de las características más relevantes para el mejoramiento del sistema. También se adjuntaron los inconvenientes reportados.

A partir de este estudio del arte se identificaron los problemas existentes en colectores solares con SS, y en específico el SDP, se estableció la hipótesis a partir de las preguntas de investigación: ¿Qué relación tienen las características IoT con la eficiencia del sistema? ¿Cuánto mejora dicha eficiencia? Y, ¿qué características mejoran la eficiencia y cuáles no? Adicional, se identificaron los parámetros importantes para el desarrollo de esta tesis.

De la literatura revisada se obtuvieron las variables y parámetros relevantes en los sistemas de hornos solares para SDP con SS. Para el análisis de la eficiencia del horno se considera la radiación del Sol recibida sobre el disco del SDP, con respecto la temperatura alcanzada en el punto focal de la parábola. De igual forma se considera la temperatura máxima del líquido o producto calentado, así como otros parámetros secundarios expresados en la ecuación (2.9). Adicional a esto se incluyen otros parámetros importantes para el estudio, monitoreo y el diseño de la aplicación web de modo que se puedan controlar y operar a distancia. La Tabla 3.2 presenta las posibles variables a ser consideradas y el instrumento de medición.

Tabla 3.2. Variables y método de medición.

Variable	Nomenclatura propuesta	Sensor	¿Para qué?	Ubicación del sensor
Radiación solar	R	Piranómetro	Medir la radiación solar incidente sobre el SDP	SDP
Temp. del colector	T_c	Termopar tipo k	Medición de temp. en el punto focal por radiación solar.	SDP
Temp. de salida y entrada de líquido	T_{yf}, T_{uf}	Sensor de temp. a prueba de agua	Medición de la temp. del líquido y cálculo de la eficiencia	Directo al líquido
Temp. y humedad	T_a, H_a	Sensor de temperatura y humedad	Medición de la humedad relativa y temp. ambiente	Ambiente
Posición del Sol	$P(x, y, z)$	LDR de intemperie	Ubicar posición del Sol y orientar SDP a través del SS	SS
Velocidad de viento	W	Sensor velocidad de viento	Revisar condiciones ambientales para el correcto funcionamiento.	SS
Voltaje y corriente de CPU	V_{cpu}, I_{cpu}	Sensor de corriente alterna	Consumo de energía eléctrica	CPU
Voltaje y corriente de actuadores	V_x, I_x, V_y, I_y	Sensor de Voltaje 0 a 25V	Consumo de energía eléctrica	Actuadores

3.2. Diseño, construcción e instrumentación de prototipo.

Esta sección aborda la creación de un prototipo a escala, como modelo de estudio y experimentación, el cual incorpora componentes IoT y sensores meteorológicos, sentando las bases para el desarrollo posterior de una aplicación web de monitoreo y control remoto, así como la integración de un sistema de predicción. Dicho prototipo se basa en el diagrama de la Fig. 3.3 y se divide en tres subsistemas principales:

Seguidor Solar (SS) que está compuesto por el sensor de posición solar, el controlador, los actuadores y la estructura del seguidor, encargados de orientar el SDP hacia el Sol mediante dos grados de libertad (acimut y cenit).

Sistema de sensado que está compuesto por sensores de radiación, temperatura y humedad ambiental, velocidad de viento y temperatura en el foco, junto con un microcontrolador que recopila los datos relevantes para el cálculo de la eficiencia del sistema.

Sistema de comunicación que se encarga de la interacción entre los microcontroladores y la transmisión inalámbrica de datos a un centro de control externo para su almacenamiento, procesamiento y visualización.

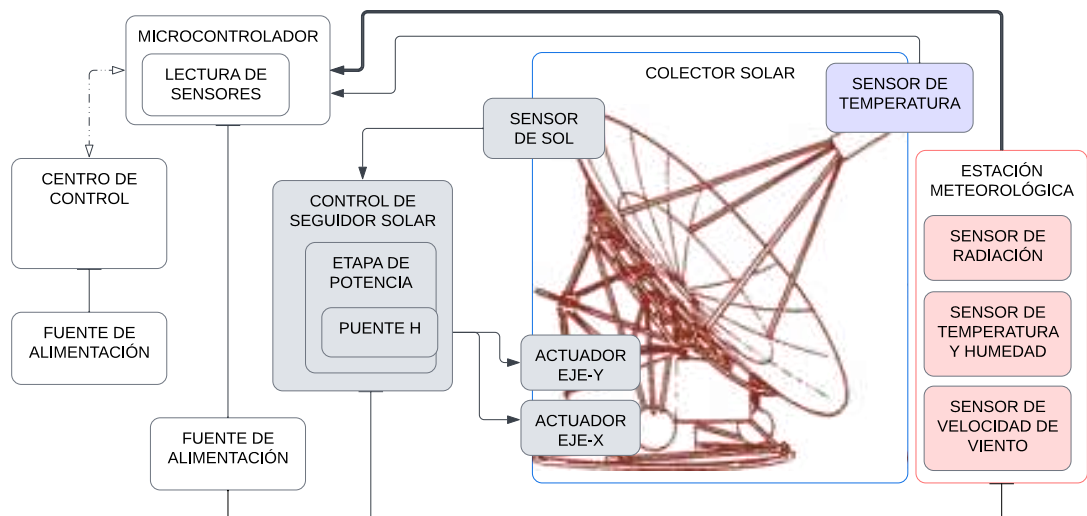


Fig. 3.3. Diagrama conceptual del diseño del prototipo.

Diseño y construcción de prototipo

Para la construcción del prototipo, se utilizaron materiales accesibles y comerciales, adaptándolos de manera creativa para lograr un prototipo funcional. La estructura del seguidor solar permite la rotación en dos ejes, optimizando la captación solar. La Tabla 3.3 detalla los materiales y métodos empleados en la construcción.

Tabla 3.3. Materiales utilizados en la construcción de la estructura del seguidor solar.

Componente	Material	Método
Base	Base de silla de escritorio	Se acortó el eje principal y se adaptó un engrane para giro acimutal. Se soldaron componentes donde se fijaría el marco principal.
Marco Principal	Tubos de acero, unicanales galvanizados y componentes Condulet de aluminio y galvanizados	Se rectificó el diámetro interior de los Condulet para hacer pasar los tubos de acero permitiendo una estructura ajustable. Se soldaron componentes adicionales para sujetar la estructura del foco puntual.

El marco principal del seguidor es adaptable a distintos tipos de colectores, como discos parabólicos, camas planas o paneles solares, y de diversas dimensiones. Las Fig. 3.4 y Fig. 3.5 muestran el diseño 3D realizado en SolidWorks y el conjunto resultante del marco principal y la base, respectivamente.

Para garantizar la estabilidad y precisión del ensamblaje, se utilizaron componentes de sujeción y bloqueo especialmente seleccionados. Entre ellos, se incluyeron abrazaderas y tornillos de presión que, al apretarse, ejercen una fuerza de sujeción sobre los tubulares, evitando cualquier movimiento relativo. También se emplearon tuercas de acción rápida para permitir ajustes rápidos y eficientes sin la necesidad de herramientas adicionales. Los sujetadores del espejo, equipados con tornillos de ajuste, permiten un posicionamiento preciso de los espejos al incrementar la presión al girarlos. Algunos ejemplos se presentan en la Fig. 3.6.

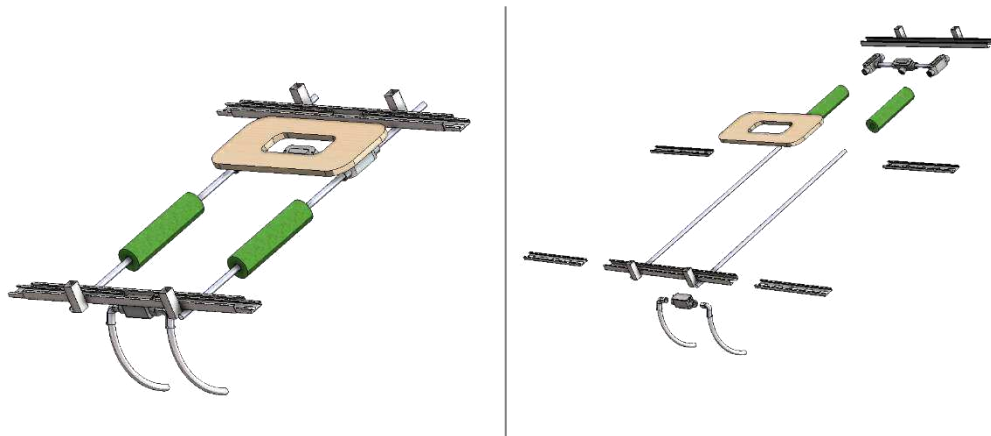


Fig. 3.4. Marco Principal, armado y explosionado, respectivamente.



Fig. 3.5. Marco y base del SS.

Para lograr el giro de este a oeste (acimutal) y el torque necesario para mover la estructura, se diseñó, calculó, fabricó e instaló el engrane adecuado.

Instrumentación

La instrumentación del prototipo involucra la selección y el uso de componentes eléctricos y electrónicos para el subsistema de SS, detallados en la Tabla 3.4.



Fig. 3.6. Prototipo experimental.

Tabla 3.4. Componentes eléctricos y electrónicos para seguidor solar.

Tipo	Instrumento	Objetivo
Actuadores	Motor lineal y motor radial	Encargados de posicionar el colector según la localización del Sol.
μ C	Controlador seguidor solar	Control ON-OFF para los motores a partir de la información del sensor de posición del sol (control de lazo cerrado)
Limit Switch	4 interruptores de límite	Se conectan estratégicamente al final y al inicio de carrera de cada uno de los motores para establecer los límites mecánicos del movimiento.

El controlador comercial se muestra en la Fig. 3.7 el controlador comercial utilizado, el cual está equipado con una etapa de potencia y un microcontrolador que controlan el movimiento de los actuadores a partir de la señal de retroalimentación del sensor de posición solar, hasta los límites físicos establecidos por los Limit Switch. Las especificaciones de los actuadores empleados se proporcionan en la Tabla 3.5.






Fig. 3.7. Controlador seguidor solar.

Tabla 3.5. Motores y características principales.

Tipo	Modelo	Características
Motor lineal con motoreductor	Genérico	Voltaje: 12[VDC] Torque sin carga: 80 [kg.cm] Velocidad: 10[mm/s] Carrera: 250[mm]
Motor radial con motoreductor	Haitronic JGY370	Voltaje: 12[VDC] Torque sin carga: 28 [kg.cm] Velocidad: 2[rpm]

Para el subsistema de sensores, se utilizaron los instrumentos (sensores) que se muestran en la Tabla 3.6, así como su caracterización. Otros componentes electrónicos como el sensor de viento y una fotorresistencia para detección de día y noche fueron utilizados sin mayor relevancia para la experimentación.

Tabla 3.6. Variables, sensores y caracterización

	Radiación solar	Temperatura del colector	Temperatura ambiental y Humedad relativa
Nomenclatura	R	T_c	T_a, H_a
Unidades	$[W/m^2]$	$[^{\circ}C]$	$[\%]$
Instrumento	Piranómetro 	Sensor de temp.: Termopar y Max6675 	Sensor de temp. y humedad: DHT22 
Voltaje	7 - 30 [VDC]	5 [VDC]	3 - 6 [VDC]
Rango	0 - 1800 $[W/m^2]$	200 - 1300 $[^{\circ}C]$	40 - 80 $[^{\circ}C]$; 0 - 100 $[\%]$
Precisión	± 5 $[\%]$	-	± 0.5 $[^{\circ}C]$; ± 2 $[\%]$
Resolución	1 $[W/m^2]$	0.25 $[^{\circ}C]$	0.1 $[^{\circ}C]$; 0.1 $[\%]$
Tiempo de respuesta	≤ 10 [s]	-	2 [s]
Protocolo	ADC, 0-5 [VDC]	SPI	Single-bus (bidireccional)
Tipo de señal	Digital	Digital	Digital

Las variables de interés son traducidas a través del protocolo correspondiente, como se muestra en la Fig. 3.8, por un microcontrolador ESP32 de 30 pines con entradas analógicas y digitales, que facilita la recolección de datos de los sensores. Posteriormente los datos son procesados por una Raspberry Pi. Las funcionalidades IoT de ambos componentes facilitan la comunicación de los datos.

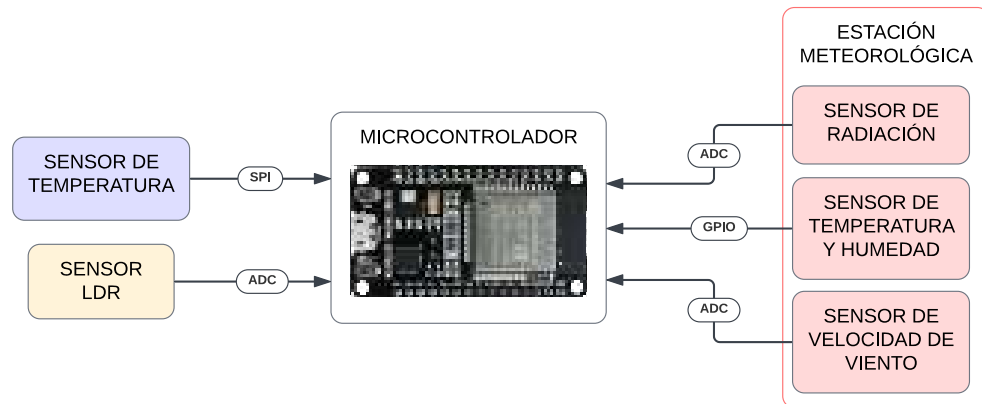


Fig. 3.8. Diagrama de configuración del sistema de captura de datos.

El prototipo es un paso adelante en la meta de optimizar el SDP con SS, alineándose con el objetivo de integrar tecnología IoT y análisis predictivo para la eficiencia energética. Prepara el terreno para el desarrollo de una aplicación web, estructura IoT, y algoritmos de cálculo de eficiencia, culminando en la evaluación del sistema de monitoreo con capacidades predictivas.



Fig. 3.9. Prototipo experimental del horno solar.

3.4. Diseño de estructura IoT

Para lograr que la información recopilada por los sensores sea monitoreada, analizada y gestionada, se diseñó una estructura IoT. Esta estructura complementa la configuración mecánica y eléctrica detallada en la sección 3.2. La Fig. 3.10 ilustra el esquema general de la configuración IoT, dividida en tres capas principales: la capa de captura y control, la capa de comunicación, y la capa de nube y aplicación.

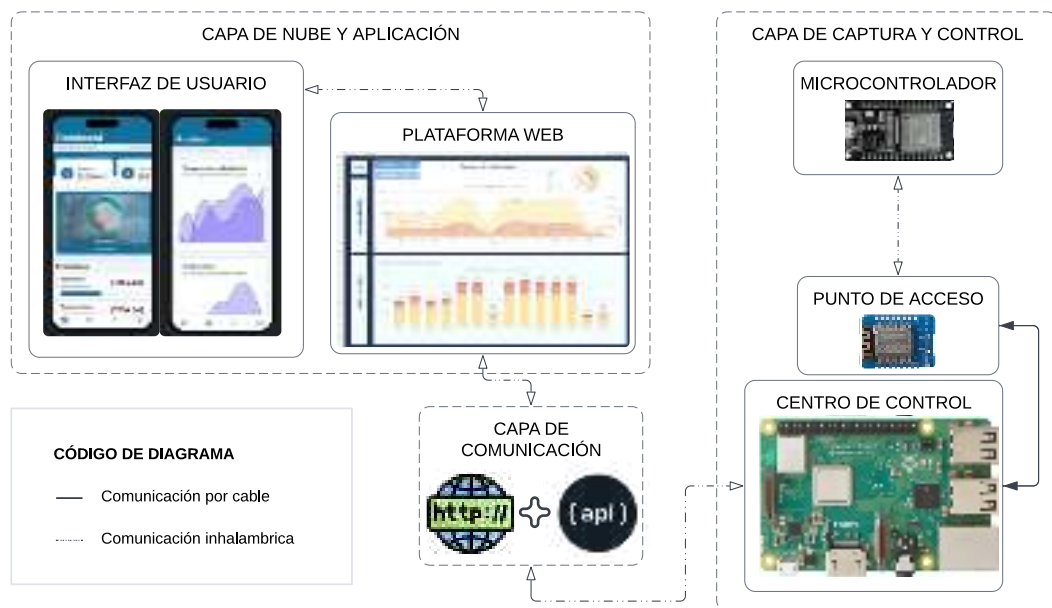


Fig. 3.10. Diagrama general de arquitectura IoT.

Capa de captura y control

En esta capa, el microcontrolador ESP32[®], programado en Arduino mediante Visual Studio Code, actúa como el cerebro del sistema. Cada 5 minutos, recopila datos de los sensores y los transmite vía Wi-Fi a través de una red Mesh al D1 Mini ESP8266, que sirve como punto de acceso. Este, a su vez, envía la información al centro de control, una Raspberry Pi[®] programada en Python con Thonny, que verifica la integridad de los datos y la conexión a internet. Si hay conexión, transmite los datos a la nube; de lo contrario, los almacena

localmente. Las características más relevantes de estos componentes se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Componentes y características principales.

Función y componente	Características principales	Propósito	Lenguaje
µC ESP32	<ul style="list-style-type: none"> - Wi-Fi y Bluetooth integrados - Procesador de doble núcleo - ADC y DAC - Interfaces GPIO 	Encargado de la captura y procesamiento de los datos de los sensores, y la comunicación con el punto de acceso Wi-Fi.	Arduino (Visual Studio Code)
Punto de Acceso D1 Mini ESP8266	<ul style="list-style-type: none"> - Wi-Fi integrado - Procesador de un solo núcleo - Interfaces GPIO - Compatible con Arduino 	Actúa como punto de acceso de comunicación para transmitir los datos desde el microcontrolador al centro de control.	Arduino (Visual Studio Code)
Centro de Control Raspberry Pi	<ul style="list-style-type: none"> - Procesador de cuatro núcleos - Conectividad Wi-Fi y Ethernet - Puertos USB - GPIO 	Procesa y almacena los datos recibidos, y gestiona la comunicación con la nube y la aplicación web.	Python (Thonny)

El diagrama de la Fig. 3.11 detalla los pines utilizados en el microcontrolador mencionado, encargado de la recolección de los datos de los sensores.

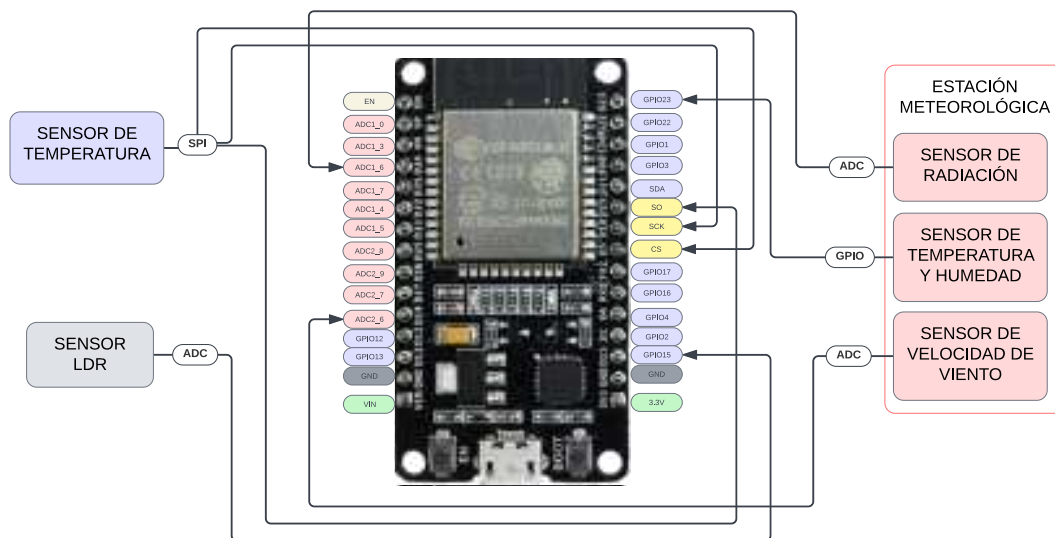


Fig. 3.11. Diagrama de conexión del módulo ESP32.

Capa de comunicación

En la capa de comunicación, la Raspberry Pi[®] se encarga de la transmisión de los datos hacia la nube. Esta transmisión se realiza en formato JSON utilizando el protocolo HTTP. La Raspberry Pi[®] envía una solicitud POST a una URL webhook específica de IFTTT, que está enlazada a una API generada por Sheety. Esta API facilita la integración con Google Sheets, permitiendo la actualización y consulta de datos en la hoja de cálculo de manera automatizada, tal como se muestra en la Fig. 3.12.

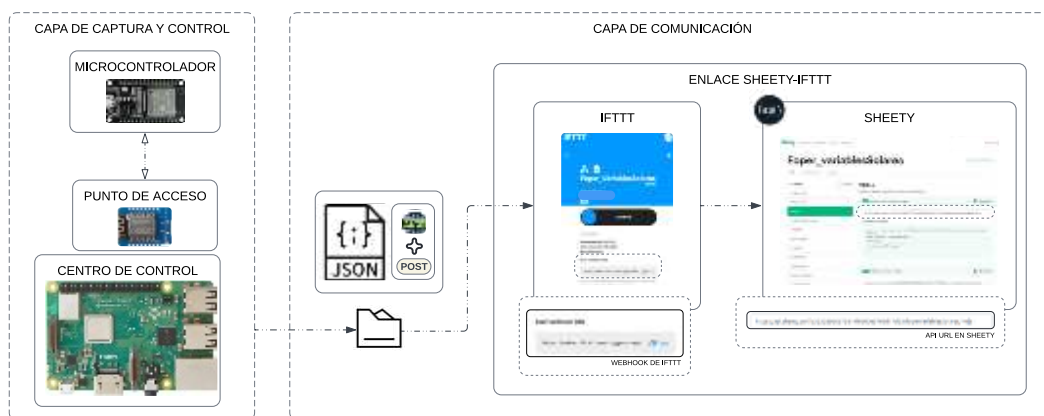


Fig. 3.12. Diagrama de capa de comunicación.

Capa de nube y aplicación

El documento de Google Sheet funge como base de datos y dashboard interactivo que facilita la visualización en la nube de los parámetros medidos. A la par, la aplicación móvil desarrollada en FlutterFlow permite al usuario acceder a los datos sensados, así como a datos de pronóstico de clima desde la comodidad de su móvil. La interacción con las APIs se realiza mediante solicitudes GET en formato JSON. Se realizan solicitudes específicas a la API de Sheety para acceder a los parámetros almacenados en la base de datos de Google Sheets; y para obtener información del pronóstico meteorológico se emplea una API específica proporcionada por SolCast. En ambos casos, es esencial que el usuario esté registrado y disponga de una URL personalizada generada por cada aplicación, la cual es su punto de acceso para hacer solicitudes. Además, se puede utilizar un token de autenticación y proteger la información. El proceso descrito se muestra en el diagrama de la Fig. 3.13.

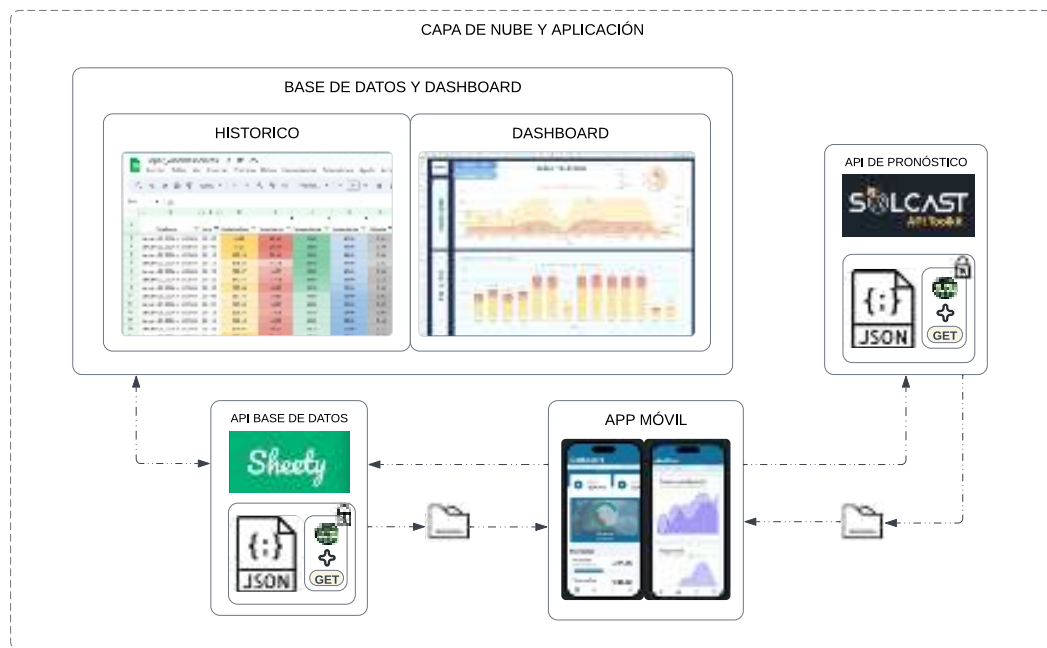


Fig. 3.13. Diagrama de capa de nube y aplicación.

El resumen de las plataformas y programas utilizados en esta etapa metodológica se presenta en la Tabla 3.8, así como algunas especificaciones y propósitos.

Cabe mencionar que todas las plataformas anteriores tienen una versión gratuita, previa suscripción, que permitió el desarrollo del proyecto, sin embargo, para poder obtener ciertas características se hicieron pagos mensuales como es el caso de IFTTT, Sheety y FlutterFlow.

Este diseño de estructura IoT permite la gestión remota de los datos recopilados, facilitando el monitoreo y visualización, así como el análisis y la toma de decisiones basadas en información actualizada.

Tabla 3.8. Plataformas y Programas Utilizados en la Capa de Nube y Aplicación

Plataforma/ Programa	Especificaciones	Propósito
Google Sheets	- Hoja de cálculo en la nube - Integración con APIs	Utilizada como plataforma para la base de datos y para generar un dashboard para la visualización de datos.
IFTTT	- Plataforma de automatización - Conecta diferentes servicios web	Utilizada para automatizar la transferencia de datos entre el centro de control y Google Sheets.
Sheety	- API que convierte hojas de cálculo en Google Sheets en APIs RESTful	Utilizada para acceder y manipular los datos en Google Sheets a través de llamadas API.
FlutterFlow	- Plataforma de desarrollo de aplicaciones móviles sin código	Utilizada para diseñar la aplicación móvil que permite al usuario acceder a los datos y a la información de pronósticos.
SolCast API	- API de pronóstico solar	Utilizada para acceder a la información de pronósticos solares para la aplicación móvil.

3.5. Desarrollo de aplicación web

El desarrollo de la aplicación web y móvil se llevó a cabo con el objetivo de proporcionar una interfaz intuitiva y eficiente para el monitoreo y visualización de los datos, así como el análisis del comportamiento de sistema. Esta etapa se dividió en dos componentes principales: la aplicación móvil multiplataforma y la base de datos en Google Sheets con un dashboard interactivo.

Aplicación móvil

Se desarrolló una aplicación móvil utilizando FlutterFlow; un programa multiplataforma de desarrollo de aplicaciones móviles *no-code* y que funciona tanto en dispositivos Android como iOS.

La aplicación realiza llamadas API para conectarse con Sheety, lo que permite acceder y manipular los datos almacenados en Google Sheets. Además, puede obtener pronósticos meteorológicos y solares al integrarse con la API de SolCast (en desarrollo). Posee un activador de eventos que se dispara cada vez que se cumple el tiempo de muestreo para actualizar las variables en la aplicación.

La aplicación cuenta con un menú de navegación en la barra inferior que permite a los usuarios moverse fácilmente entre las diferentes páginas:

- La página principal presenta un dashboard que incluye la ubicación del dispositivo, la fecha del último muestreo y las variables críticas como la radiación, la temperatura en el punto focal, y la temperatura y humedad ambientales. Además, se muestran gráficos que representan la eficiencia en relación con la temperatura en el punto focal y los promedios acumulados de las variables y la eficiencia. Ver Fig. 3.14, inciso a.
- La página de gráficos ilustra las relaciones entre las variables críticas, como la temperatura en el punto focal y la radiación, así como la evolución de la radiación y la temperatura del punto focal a lo largo del día. Ver Fig. 3.14, inciso b.
- Adicional, integra páginas reservadas para futuros propósitos: Una página que integrará la API de SolCast para presentar pronósticos relevantes, y otra página de

notificaciones para alertar al usuario sobre eventos importantes del sistema. Ver Fig. 3.14, inciso c y d, respectivamente.



Fig. 3.14. Aplicación móvil y sus páginas:

a) Dashboard principal, b) Gráficos, c) Pronóstico y d) Notificaciones

Base de datos

Se utilizó Google Sheets como plataforma para la base de datos y el dashboard interactivo. Los datos se organizan de manera ordenada con su respectivo *timestamp* y se aplican formatos condicionales y códigos de colores para diferenciar las variables. La base de datos permite llevar un histórico de las mediciones según la fecha y hora, y ordenar y filtrar los valores, como se muestra en la Fig. 3.15.

1	TimeStamp	Hora	Radiacion Solar	TempColector	TempAmbiental	HumAmbiental	Eficiencia
2	January 22, 2024 at 10:00AM	10:00	69.89	42.50	23.40	47.00	0.31
3	January 22, 2024 at 10:05AM	10:05	85.27	24.50	23.80	45.00	0.49
4	January 22, 2024 at 10:10AM	10:10	169.23	71.50	23.40	44.00	0.65
5	January 22, 2024 at 10:15AM	10:15	576.26	271.75	23.40	44.00	0.81
6	January 22, 2024 at 10:20AM	10:20	529.67	195.75	26.20	45.00	0.33
7	January 22, 2024 at 10:25AM	10:25	540.66	157.75	29.80	39.00	0.16
8	January 22, 2024 at 10:30AM	10:30	387.69	103.00	33.30	35.00	0.33
92	January 23, 2024 at 10:00AM	10:00	597.36	162.50	43.90	26.00	0.01
93	January 23, 2024 at 10:05AM	10:05	597.80	158.25	44.80	25.00	0.02
94	January 23, 2024 at 10:10AM	10:10	529.67	172.75	45.30	24.00	0.06
95	January 23, 2024 at 10:15AM	10:15	541.10	130.50	46.20	22.00	0.18
96	January 23, 2024 at 10:20AM	10:20	574.07	103.00	46.30	20.00	0.11
97	January 23, 2024 at 10:25AM	10:25	263.30	94.50	47.10	20.00	0.08
98	January 23, 2024 at 10:30AM	10:30	184.62	66.25	46.20	20.00	0.36
212	January 24, 2024 at 09:58AM	10:00	534.07	138.00	43.90	21.00	0.11
213	January 24, 2024 at 10:03AM	10:05	491.43	120.00	45.30	20.00	0.09
214	January 24, 2024 at 10:08AM	10:10	572.75	119.25	46.20	18.00	0.00

Fig. 3.15. Histórico de datos con filtro activado.

Se diseñó un dashboard atractivo e intuitivo en Google Sheets, utilizando tablas dinámicas y consultas *query* para presentar los datos. El dashboard se divide en 3 zonas, como se muestra en la Fig. 3.16: a) por día, b) por mes, y c) por periodo de tiempo. El usuario puede mostrar los datos por día, mes y por periodo de tiempo, y aplicar un filtro para acotar los datos a un rango continuo de horas. Cuando no existe especificación alguna, muestra el último día y mes registrados, y para la zona de periodo muestra la totalidad de los datos, en su máxima amplitud de horas para las tres zonas. Cada zona posee un apartado de acumulados y estadísticas relevantes, así como gráficos que indican el promedio de la eficiencia.



Fig. 3.16. Dashboard en Google Sheets.

3.6. Diseño de algoritmo

Esta sección se centra en el desarrollo de dos algoritmos principales, según su función:

1. **Recolección y procesamiento de datos:** Implementación de un algoritmo embebido para la recolección de las variables de interés obtenidas a través de los sensores del sistema además del cálculo de la eficiencia del colector solar.
2. **Predicción:** Desarrollo de un algoritmo de predicción de la temperatura en el punto focal para anticipar el comportamiento futuro del sistema en base a datos históricos y pronósticos meteorológicos.

Recolección y procesamiento de datos

Se desarrolló un algoritmo para la recolección, procesamiento y transmisión de datos críticos del sistema, así como para el cálculo de la eficiencia del colector solar. Dicho algoritmo se embebió en la el ESP32. El pseudocódigo se presenta a continuación:

```
Inicio
  Configurar Sensores y Periféricos
  Configurar Conexión Wi-Fi
  Sincronizar RTC con NTP
  Si es de noche, entrar en modo de sueño profundo
  En Bucle:
    Si es tiempo de muestreo:
      Leer datos de sensores (Temperatura, Humedad, Radiación)
      Calcular eficiencia del colector solar
      Imprimir y enviar datos
    Fin Si
  Manejar comunicación cliente-servidor para enviar datos
  Esperar por comandos "READY" para iniciar envío de datos
  Fin Bucle
Fin
```

El algoritmo comienza con la configuración inicial de los sensores de temperatura, humedad y radiación solar, junto con el termopar para medir la temperatura en el punto focal. También se establece la conexión Wi-Fi y se sincroniza la hora del sistema utilizando un servidor NTP. El sistema entra en modo de sueño profundo durante la noche para reducir el consumo de energía y se reactiva durante el día.

De manera periódica, según el tiempo de muestreo establecido, el ESP32 lee los datos de los sensores y calcula la eficiencia del colector solar, basándose en la relación entre la energía

absorbida por el colector y la energía incidente. Los datos se almacenan temporalmente en modo de estructura de clase para facilitar el manejo de cada variable. Las variables medidas, así como la eficiencia calculada se concatenan y formatean, junto con su *timestamp*, en una cadena para posteriormente ser transmitida a la Raspberry, que previamente mandó una señal de *ready*. Un mecanismo de manejo de errores y reconexión garantiza la comunicación.

La Raspberry recibe los datos. En caso de tener una conexión a internet sube los datos a la nube; de lo contrario, los guarda localmente. Estas 2 variaciones especifican si la arquitectura IoT está activada o desactivada. Al estar activada el usuario tiene acceso automático al monitoreo completo del sistema en la hoja de cálculo y el dashboard; al estar desactivada, no se tiene acceso y los datos tienen que ser extraídos manualmente.

Cálculo de la eficiencia

Para el cálculo de la eficiencia se consideró la ecuación (2.9), considerando la relación de potencia generada en el material (2.8) con respecto la potencia incidente en el disco (2.5). No se consideró la eficiencia óptica η_{opt} , ya que permanecería constante en el periodo del experimento y se estimó en su máxima eficiencia. Así mismo, el ángulo θ se estimó en 0° por permanecer el disco, teóricamente, perpendicular al sol. La Tabla 3.9 muestra los datos constantes para el cálculo de las respectivas potencias en un tiempo de muestreo establecido de 5 minutos, es decir 300 seg.

El tiempo de muestreo de 5 minutos fue elegido para capturar las fluctuaciones rápidas en la irradiación solar por las condiciones meteorológicas cambiantes, permitiendo una respuesta ágil a la intermitencia de las nubes. Este intervalo facilita la recolección de un mayor número de datos, proporcionando una alta resolución para análisis detallados y para la identificación de patrones y anomalías específicas en el rendimiento del sistema.

Los valores constantes para calcular Q_{SDP} corresponden a las características físicas del disco parabólico. La eficiencia óptica fue estimada en 1, por tratarse de un espejo. Los valores constantes para calcular Q_u corresponden a las características del recipiente cónico de acero inoxidable que se utilizó durante la experimentación. Véase Fig. 3.20

Tabla 3.9. Valores constantes para cálculo de la energía.

Q_{SDP}		Q_u	
Constante	Valor	Constante	Valor
η_{opt}	1	m	0.75 [kg]
θ	90 [°]	C_p	500 [$\frac{J}{kgK}$]
A_{ap}	0.54 [m^2]		
t	300 [s]		

La implementación de este algoritmo permite una recolección estructurada y organizada de los datos, así como un cálculo sencillo de la eficiencia del sistema, facilitando el análisis de datos y la optimización del rendimiento del sistema.

Predicción de temperatura en foco puntual

Para predecir la temperatura en el punto focal del colector solar, se implementaron dos modelos de regresión: Regresión Lineal Múltiple (RLM) y Máquinas de Vectores de Soporte para Regresión (SVR), en Google Colab.

El proceso metodológico para la implementación de dichos modelos siguió estos pasos de preparación de los datos:

1. **Recolección de datos:** Se recopilaron datos históricos del sistema de seguimiento solar, incluyendo la temperatura en el punto focal (variable dependiente), la radiación solar, la temperatura ambiente y la humedad relativa (variables independientes).
2. **Análisis exploratorio de datos:** Se realizó un análisis exploratorio para entender la distribución y la relación entre las variables. Se identificaron posibles correlaciones y se visualizaron mediante gráficos de dispersión y matrices de correlación. También se identificaron datos atípicos.
3. **Preparación de datos:** Se hizo una limpieza de los datos atípicos y se aplicó un filtrado de datos basado en el rango de horas y valores de temperatura seleccionados.

para centrar el estudio en las condiciones más representativas y críticas para el rendimiento del sistema. Esta técnica de filtrado es fundamental, ya que no solo limita el análisis a las condiciones específicas, sino que también elimina valores atípicos que distorsionan los resultados del análisis [73]

Se consideraron las horas solar pico (*HSP*) siguiendo la Ecuación (2.10) y tomando en cuenta sitio de instalación.

La temperatura se acotó a todos aquellos valores superiores a 100°C , ya que la comida cocinada generalmente requiere esta temperatura[12].

Con esto se recopiló una base de datos con 865 muestras las cuales consideran las siguientes variables: 'Radiacion Solar', 'TempColector', 'TempAmbiental', 'HumAmbiental', 'Eficiencia', 'Mes', 'Dia', 'Hora', 'Min'. Posteriormente se diseñaron los modelos de predicción.

Regresión lineal múltiple

El modelo RLM es muy utilizado para encontrar una función que modele el comportamiento de la variable dependiente (y) con muchas variables independientes (x_1, x_2, \dots, x_n) [74]. En nuestro caso, la temperatura en el foco es la dependiente y fue relacionada a las demás variables. Esta función ajusta los datos a través de una línea que se muestra en la Ecuación (3.1):

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n \quad (3.1)$$

donde $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ y β_n son los parámetros de la función a las variables independientes.

Máquinas de vectores para regresión

Las SVR es un algoritmo implementado para la estimación de valores discretos de acuerdo con las máquinas de soporte vectorial [75]. Trabaja construyendo un modelo que intenta predecir la variable de respuesta dentro de un margen de error especificado, utilizando un enfoque de optimización que puede manejar tanto relaciones lineales como no lineales mediante el uso de funciones kernel, para transformar los datos a un espacio de mayor

dimensión y poder crear una regresión más adecuada. Para esto, se deben configurar considerando el parámetro de capacidad C , el cual representa equilibrio entre la maximización del margen y la minimización del error de entrenamiento. Si este valor no es el adecuado, puede que la predicción se vea baja. Si representa un valor alto o muy bajo, es posible que el modelo no aprenda y solo memorice, lo que hace que caiga en un sobreajuste. Además de este, también se configura el valor sigma σ que se refiere al parámetro de ancho de banda de la función de kernel radial.

Algoritmo genético

Para encontrar una aproximación y reducir el error de predicción sin sobreajuste, se consideró acoplar una etapa de optimización con algoritmo genético (AG). Esta etapa ayudará a encontrar el valor adecuado para C con $\sigma = 0.001$. De manera general, AG está basado en la teoría de la evolución de Charles Darwin. Este detalla que existe una población inicial Pob , que para efectos de este trabajo son 20 individuos los cuales serán asignados como padres p . Luego, estos son evaluados a través de la función objetivo, que será la de minimización del error. Una vez evaluados, los padres son seleccionados para cruzamiento, donde se generarán los hijos h . Estos h son mutados y evaluados en la función objetivo. Luego son comparados con p para crear la nueva generación, continuando de esta manera hasta cumplir con el criterio de parada.

El pseudocódigo del GA se muestra a continuación:

```
1. INICIO
2.   1. Inicialización de la población inicial (Pob) de manera aleatoria.
3.   2. Definir criterio de parada y número de generaciones (G).
4.   3. Inicializar contador de generaciones (t = 0).
5.   MIENTRAS (t < G):
6.     Incrementar contador de generaciones (t = t + 1).
7.     Calcular la aptitud de cada individuo de Pob en la función objetivo.
8.     Selección de nuevos padres (p) para la reproducción.
9.     Cruzamiento de los padres (p) para generar hijos (h).
10.    Mutación de los hijos (h).
11.    Evaluar la aptitud de los hijos (h).
12.    Comparar la aptitud de padres (p) y hijos (h).
13.    Seleccionar los mejores individuos para la siguiente generación (t+1).
14.  FIN MIENTRAS
15.  4. Mostrar resultados o la mejor solución encontrada.
16. FIN
```

Métricas de evaluación

El rendimiento de los algoritmos de predicción se evaluó a partir de métricas como el coeficiente de determinación R^2 , el cual indica que un valor cercano a 0 demuestra que la regresión no explica ninguna varianza en los datos.

3.7. Integración del sistema

En esta etapa, se llevó a cabo la integración completa del sistema SDP con SS con la tecnología IoT. El proceso abarcó desde el diseño de la investigación hasta el análisis y síntesis de los datos recolectados.

Como se muestra en la Fig. 3.17, el diagrama general ilustra la integración del sistema integrado a la estructura IoT.

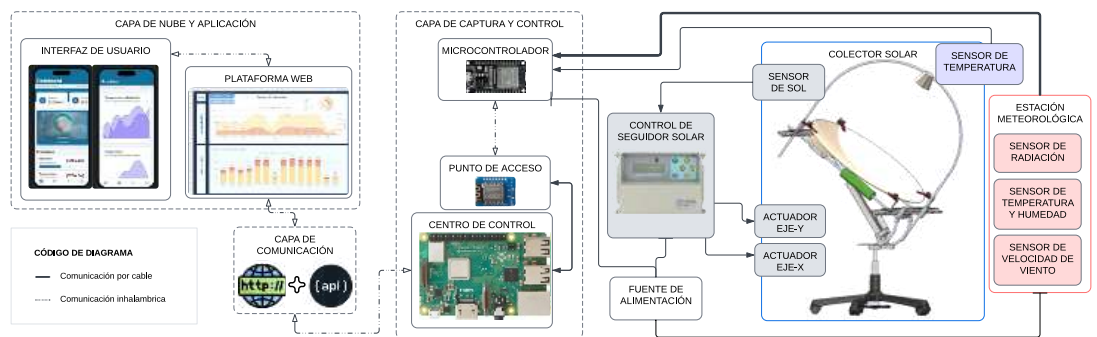


Fig. 3.17. Diagrama general de SDP con SS integrando IoT.

Diseño de la investigación

Se definió un diseño experimental para evaluar la hipótesis de que una estructura IoT mejora la eficiencia del horno solar de SDP con SS. Se identificaron la variable dependiente (eficiencia) y las variables independientes (temperatura, humedad y radiación), y se estableció un cuasi-experimento para observar el efecto de la presencia y ausencia de la tecnología IoT en la eficiencia del sistema, como se ilustra en la Fig. 3.18.

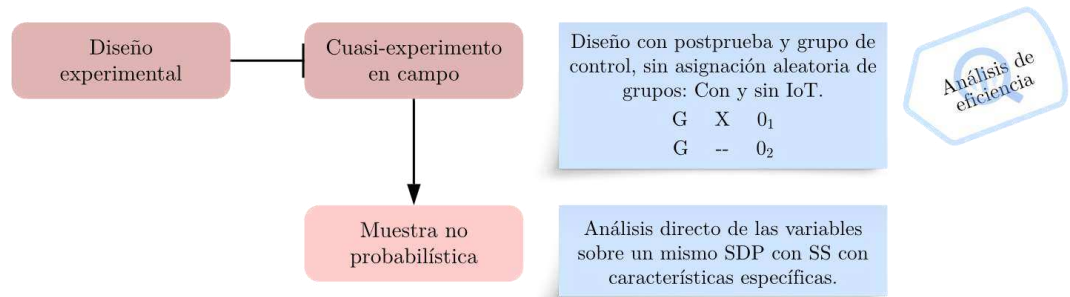


Fig. 3.18. Diagrama de tipo de investigación.

Esta mejoría se supone por las características que ofrece una estructura IoT, como se muestra en la comparativa de la Fig. 3.19, donde se nota predominancia en la mejoría.

Característica	Sin IoT	Con IoT
Eficiencia	−	+
Temperatura en punto focal	−	+
Radiación incidente	−	+
Consumo eléctrico	−	+
Previsión climática	×	✓
Gestión de energía calorífica	×	✓
Monitoreo en tiempo real	×	✓

Fig. 3.19. Supuesto de cuadro comparativo.

Integración de arquitectura IoT

Se instaló el módulo ESP32 en el prototipo del SDP con SS y se puso en marcha el algoritmo desarrollado en la etapa anterior. Para la correcta instalación del prototipo, se alineó la base hacia el sur y se calibró la posición del sensor de sol para asegurar que el punto focal estuviera bien alineado. Las variables sensadas fueron observadas en tiempo real en la app

móvil y almacenadas históricamente en la hoja de cálculo de la nube. La Fig. 3.20 muestra el prototipo de SDP con SS con la integración completa de la arquitectura IoT.



Fig. 3.20. Prototipo de SDP con SS con la integración de la arquitectura IoT.

Pruebas piloto y monitoreo de variables

Se realizaron pruebas piloto para validar el funcionamiento del sistema integrado y se monitorearon las variables críticas en tiempo real. Se ajustaron los instrumentos y sensores según fuera necesario para asegurar mediciones precisas. Para la validación de los instrumentos, se utilizaron instrumentos profesionales para comparar y validar los valores obtenidos por los sensores del prototipo, como se muestra en la Fig. 3.21.



Fig. 3.21. Pruebas de validación de los instrumentos.

Obtención y preparación de los datos

Los datos recolectados por los sensores se obtuvieron y prepararon para el análisis. El muestreo se realizó cada 5 minutos durante un período de 21 días, considerando únicamente las horas en las que el sensor LDR detectaba presencia de luz. Los primeros 3 días en funcionamiento se calibró el sensor de posición solar haciendo pequeños ajustes en su ubicación y la posición y orientación del SS. Los siguientes 2 días se utilizaron para la observación y garantizar la alineación de los componentes y funcionamiento de los sensores, así como su validación. 2 días presentaron inconsistencias por variaciones en el suministro eléctrico, por los que fueron descartados, y los restantes 14 días recolectaron la información para el experimento, dividiéndose en dos bloques de 7 días: El primer bloque mantuvo activa la arquitectura IoT; mientras que el segundo se desconectó la IoT y se guardaron los datos localmente.

Los algoritmos implementados para la recolección y procesamiento de datos, así como para la predicción de la temperatura en el punto focal, funcionaron correctamente, permitiendo una recolección eficiente y precisa de datos, sin embargo, se presentaron algunos datos atípicos.

La integración completa del sistema con la tecnología IoT se llevó a cabo con éxito, y las pruebas piloto confirmaron el correcto funcionamiento del sistema integrado, sin embargo, se presentaron algunos casos de conexión interrumpida provocado por reinicios en la Raspberry a causa de falta de corriente eléctrica.

Análisis y síntesis de datos

Una vez obtenidos los datos se hizo un preprocesamiento que abarcó especificar el tipo de dato como Fecha o Número, además de separar los días de las horas y redondearlas a múltiplos de 5. Los datos del dataset arreglado se compararon con datos teóricos obtenidos desde una plataforma de datos meteorológicos de SolCast. Esto, con la ayuda del Dashboard interactivo y herramientas propias de la hoja de cálculo de Google Sheets. Se identificaron valores y comportamientos atípicos en la distribución de los datos: como cuando la eficiencia era superior al máximo valor posible o cuando no existía correspondencia entre la radiación medida y la temperatura alcanzada en el foco puntual. Se realizó la limpieza de estos datos, facilitando el análisis posterior, así como el diseño de los modelos de predicción en Google Colab.

Capítulo 4. Experimentación y resultados

Se instaló el prototipo de SDP con SS en un sitio con al menos 5 horas de incidencia solar diaria y se dejó operando continuamente durante dos bloques de 7 días, después de haber hecho los ajustes de calibración necesarios. Esto en el mes de febrero. Para el primer bloque de días se mantuvo el sistema IoT monitoreando y activo, mientras que para el segundo bloque se desactivó. Durante este período, se recopilaron datos críticos como la temperatura en el punto focal, la radiación solar, la temperatura ambiente y la humedad relativa y se calculó la eficiencia.



Fig. 4.1. Prototipo en experimentación.

Como resultado general se obtuvieron los valores acumulados mostrados en la Fig. 4.2, observando que la eficiencia promedio del sistema, de 50.5%, está muy por encima de lo reportado en el estado del arte, de 29% [1].

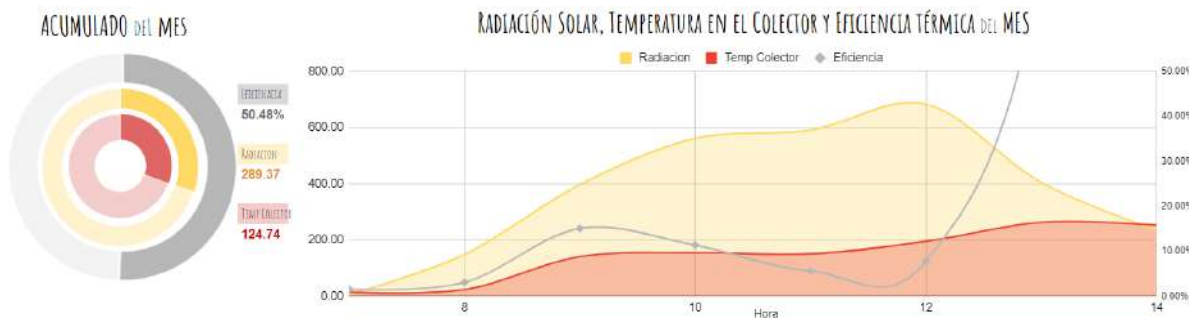


Fig. 4.2. Acumulados del mes.

Datos y comportamientos atípicos se presentaron cercanos a las 14 hrs, tal como se muestra en la Fig. 4.3, que representa un día soleado, aleatorio.

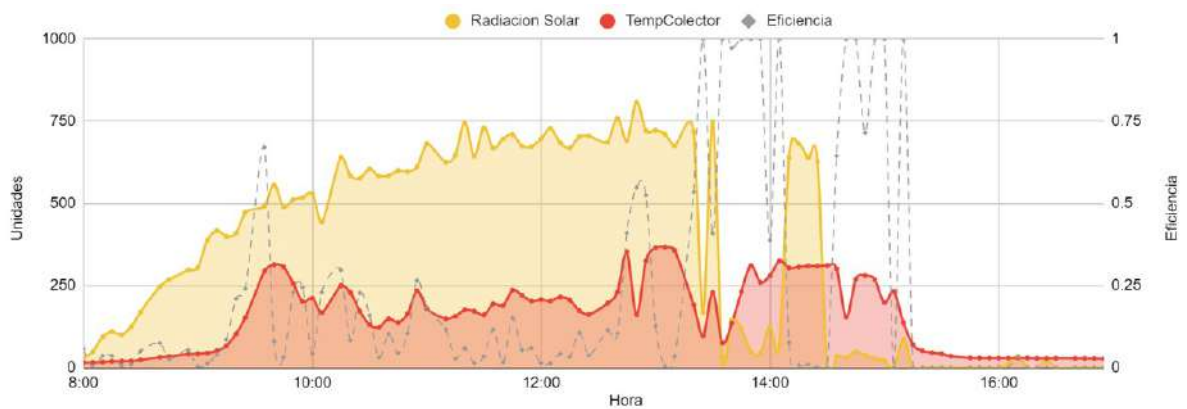


Fig. 4.3. Radiación, temperatura en el foco y eficiencia en relación con la hora del día.

Al comparar la distribución de los datos reales obtenidos con datos teóricos estimados por SolCast, en el mismo periodo de muestreo, se observa que en un horario cercano a las 14:00 hasta las 18:00, la dispersión de los datos es atípica, tal como se muestra en la Fig. 4.4. Esto es debido a las sombras u obstrucción del sensor de radiación por algún objeto de la zona donde se instaló el prototipo, provocando valores bajos o nulos de la radiación.

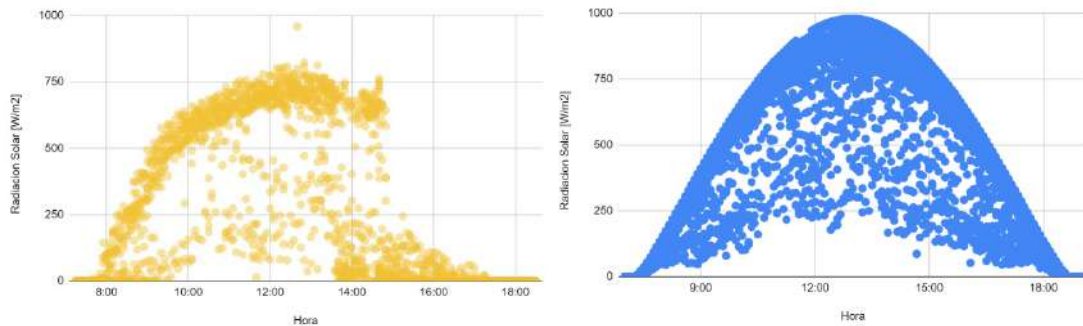


Fig. 4.4. Comparación de distribución de radiación. Datos reales vs teóricos de SolCast.

Adicionalmente, algunos datos atípicos son atribuidos a la falta de conexión o errores de hardware en la electrónica provocando espacios grandes en la diferencia de los valores de las variables, afectando el cálculo de la eficiencia determinado en un espacio de tiempo de 5 min. Se puede notar datos atípicos cuando la eficiencia es superior al máximo valor posible de 1, es decir, el 100% de eficiencia. Ante esta evidencia los datos fueron eliminados, como se muestra la comparación de la Fig. 4.5, antes y después de ser eliminados.

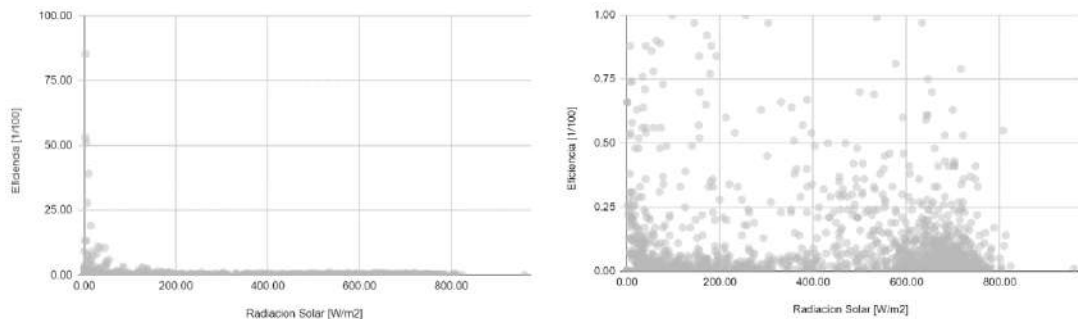


Fig. 4.5. Comparativa de eficiencia vs radiación. Antes y después de limpieza de datos.

Como resultado de la limpieza de los datos, se observa en la Fig. 4.6 la distribución de los valores de las variables principales junto con la variable dependiente, la eficiencia. Se nota un cambio representativo en la eficiencia, mucho más cercano a la realidad.

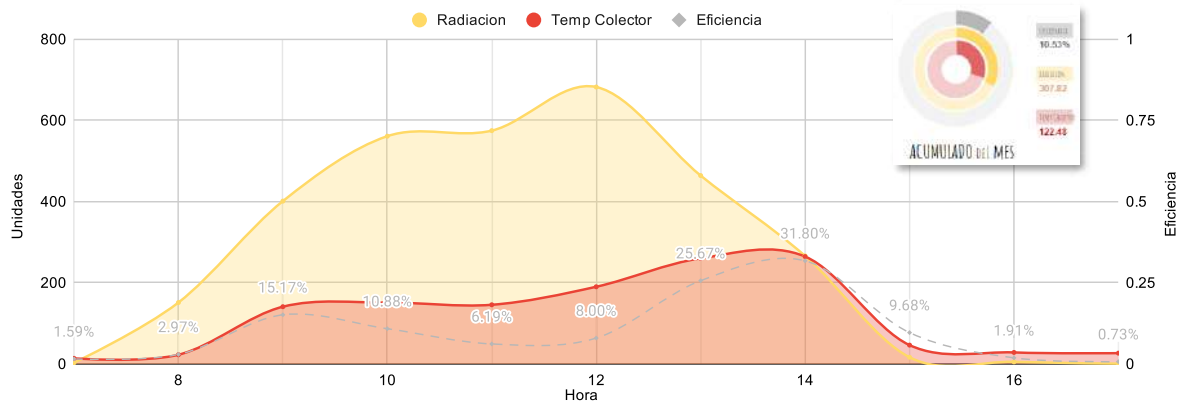


Fig. 4.6. Radiación, temperatura en el foco y eficiencia, acumulados por hora en el mes de febrero de 2024.

Resultados de la eficiencia

Este resultado permitió acotar los horarios según la presencia de radiación, en un horario de 7 a 15 hrs, para la comparación y evaluación del impacto de la integración de la tecnología IoT. Tal como se muestra en la Fig. 4.7.

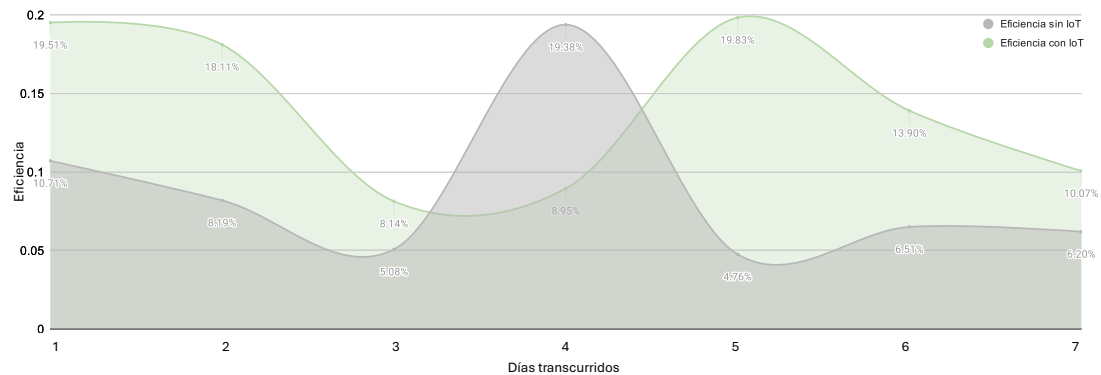


Fig. 4.7. Comparativa de eficiencia del sistema con y sin IoT.

La eficiencia promedio resultó mayor, en un 5.07%, cuando el sistema integra la tecnología IoT: 14.04% de eficiencia en comparación a 8.97% al sistema sin IoT. Dando paso a la aceptación de la hipótesis.

Las Fig. 4.8 y Fig. 4.9 muestran la respuesta del sistema en dichos intervalos de experimentación. Se puede observar cómo la temperatura en el punto focal es superior en el periodo de IoT a pesar de que existe similitud en el valor de la radiación para algunos casos.

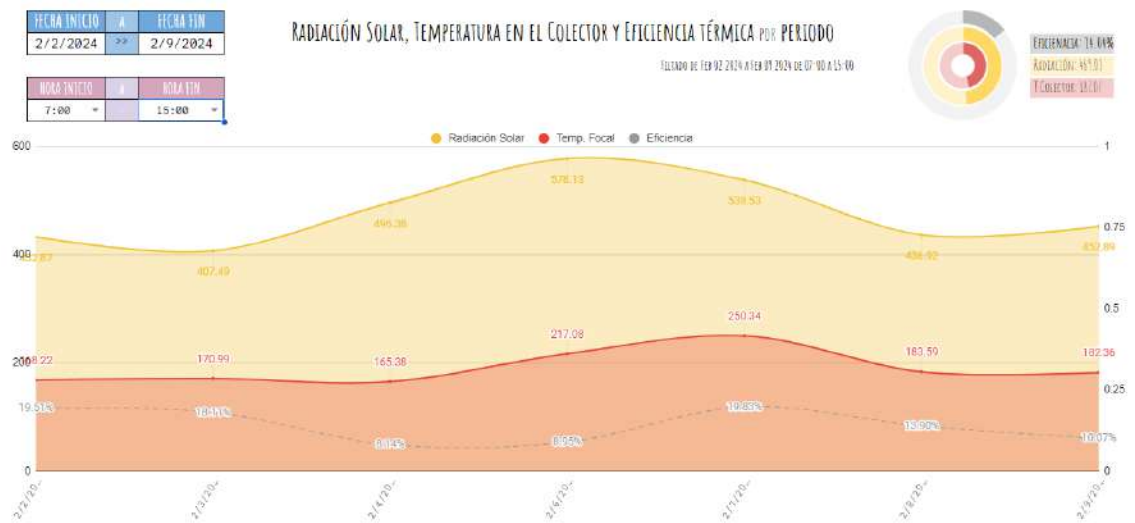


Fig. 4.8. Respuesta del sistema con IoT, visto en el Dashboard.

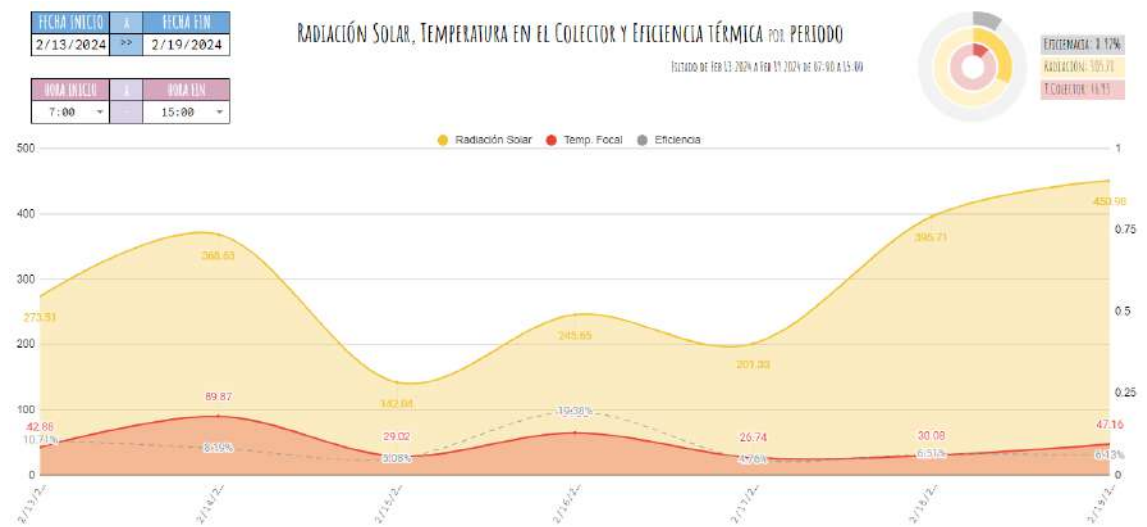


Fig. 4.9. Respuesta del sistema sin IoT, visto en el Dashboard.

Resultados de la predicción

El interés principal para la predicción, son los valores comunes de temperatura para cocción y sus horarios. Por lo que se determinó un rango específico que corresponde a las Horas Solar Pico del sistema, que es de 3hrs según lo calculado por el área bajo la curva o la ecuación (2.10), correspondiente al grueso de datos (ver Fig. 4.6): De 10:30 a 13:30 hrs; así como los datos cuyo valor de temperatura en el foco puntual es superior a los 100°C, estimados para la

cocción de alimentos, y corresponde a una radiación superior a los $450W/m^2$, según se observa en la Fig. 4.10. Datos fuera de ese rango fueron filtrados, pero no eliminados, de la base de datos para propósitos de desarrollo del modelo para la predicción de la temperatura en el foco puntual y estimación de la eficiencia.

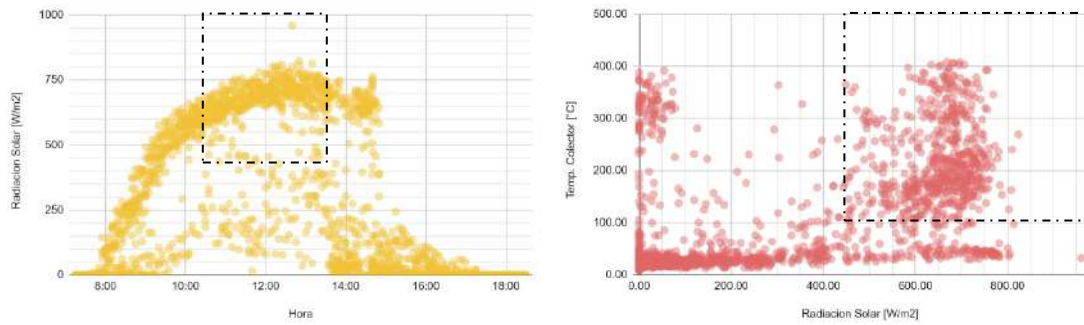


Fig. 4.10. Acotamiento de valores según interés del estudio.

Consecuentemente, la Fig. 4.11 representa la muestra, así como la relación entre la temperatura del colector y la radiación solar resultantes del filtrado de los datos.

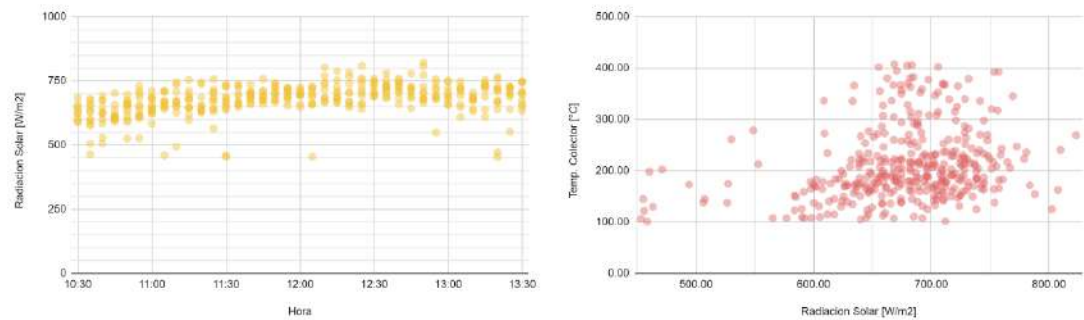


Fig. 4.11. Representación de datos después de ser filtrados.

En este punto, se configuraron los algoritmos de predicción con RLM y SVR. Para ambos casos, se dividieron el total de los datos del dataset, con el 80% para entrenamiento y 20% para prueba [76]. El entorno de ejecución seleccionado fue a través de lenguaje Python v3.9.12 con la Sklearn en su versión 1.0.2. Para el modelo de SVR, se configuró con diferentes valores para C . Inicialmente, se realizó una prueba con un valor de 100, donde se obtuvo un $R^2 = 0.49$. Posteriormente, se realizó una prueba usando la instrucción de *gridsearch* para estimar

los parámetros de ajuste adecuados, considerando los valores $C = [10, 100, 1000, 2500, 5000]$, $\sigma = [0.1, 0.01, 0.001, 0.0001]$ y con los kernel lineal y de función de radio base (RBF). Este paso resultó en que el mejor valor fue $C = 2500$ y el segundo mejor fue $C = 1000$ con valores σ de 0.0001 y 0.001, respectivamente. La Tabla 3.1 muestra una comparativa de los resultados obtenidos con diferentes configuraciones.

Tabla 4.1. Resultados de algoritmos de predicción

Modelo	Kernel	C	σ	R^2
RLM	-	-	-	0.5189
SVR-2500	RBF	2500	0.0001	0.6790
SVR-1000	RBF	1000	0.001	0.6376

De forma gráfica, se puede observar en la Fig. 4.12 la predicción de la temperatura del foco con los mejores modelos obtenidos de la Tabla 3.1. Se observa que existe mayor dispersión de los datos con el modelo RLM en comparación con SVR-RBF. Este último modelo demuestra una predicción moderada, sin embargo, es posible que mejore si el dataset sigue incrementando. Además, con este resultado, se pudo determinar el espacio de búsqueda de la solución para el GA para encontrar una solución entre 1000 y 5000.

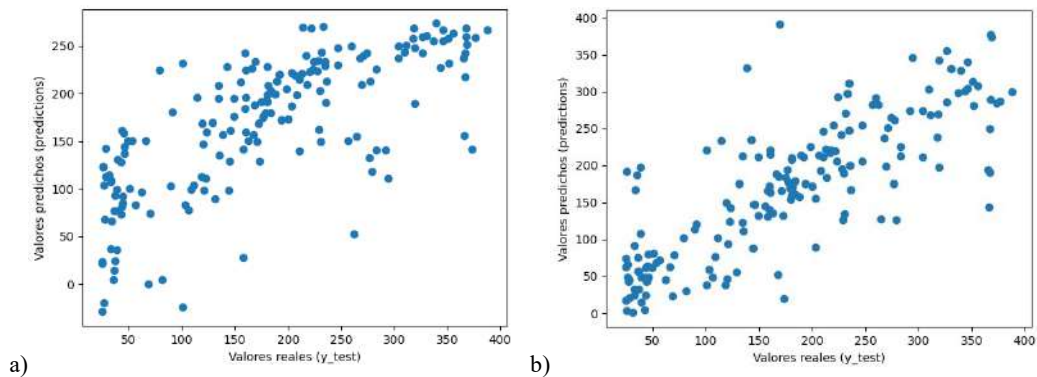


Fig. 4.12. Comparativa de dispersión entre modelos: a) RLM, b) SVR-2500 :[$C = 2500$; $\sigma = 0.0001$]

Optimización del modelo SVR con algoritmo genético

Una vez identificado el espacio de búsqueda, se realiza la identificación del parámetro que mejor se ajuste para C del modelo SVR. Para esto, se consideró el GA para evaluar los mejores resultados de 20 individuos en 100 generaciones para una función objetivo que se muestra en la Ecuación (4.1):

$$f(x) = 1 - R^2 \quad (4.1)$$

El espacio de solución se estableció entre un rango para C de 1000 a 5000. La convergencia de la solución del algoritmo se muestra en la Fig. 4.13, donde la mejor solución para C en el SVR con $\sigma = 0.0001$ y kernel RBF fue de 2277 y que arroja un error de 0.3522. Esta solución converge desde la generación 22 y en adelante se pueden considerar clones.

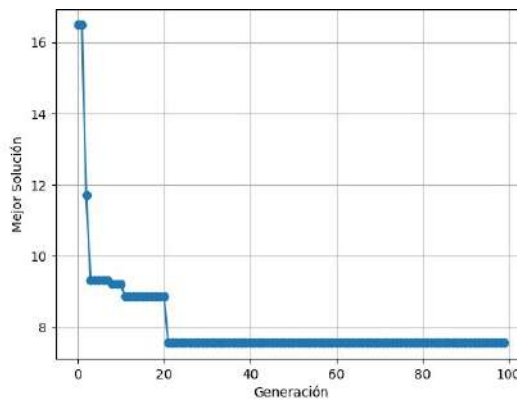


Fig. 4.13. Convergencia de algoritmo genético.

La dispersión obtenida con este modelo SVR-GA se muestra en la Fig. 4.14. Es casi idéntica al modelo SVR-2500, ya que la solución del GA estuvo cercana al valor C de este último modelo.

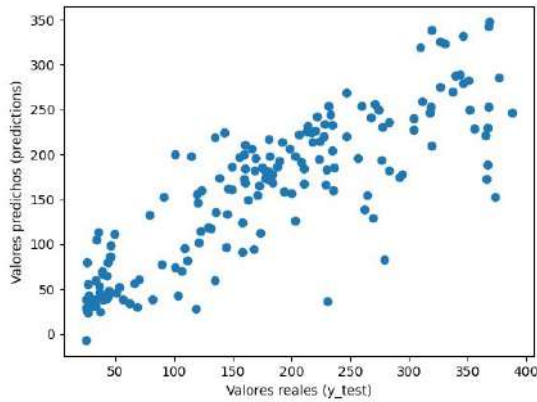


Fig. 4.14. SVR-GA : [C = 2277; $\sigma = 0.0001$]

La Tabla 4.2 muestra el resultado de R^2 para el modelo optimizado, que, aunque moderado, demuestra un mejor rendimiento que los demás y ligeramente menor al SVR-2500. Con esto, se puede observar, que el espacio de solución adecuado está alrededor de $C = 2500$. Además, se hizo la prueba cambiando el valor σ por 0.001 y 0.0001, siendo este último el de mejor rendimiento con un error de 35%.

Tabla 4.2. Resultados de algoritmos de predicción con kernel RBF con $C = 2277$.

Modelo	σ	R^2
SVR-GA	0.001	0.6434
SVR-GA2	0.0001	0.6753

Otros resultados de interés

El punto focal logra alcanzar una temperatura promedio de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una radiación promedio de $680\text{ W}/\text{m}^2$. La máxima temperatura registrada fue de $408\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una radiación de $669\text{ W}/\text{m}^2$, ocurrido durante el periodo de pruebas, el 25 de enero de 2024 a las 11:05 hrs. Como se muestra en la Fig. 4.15.

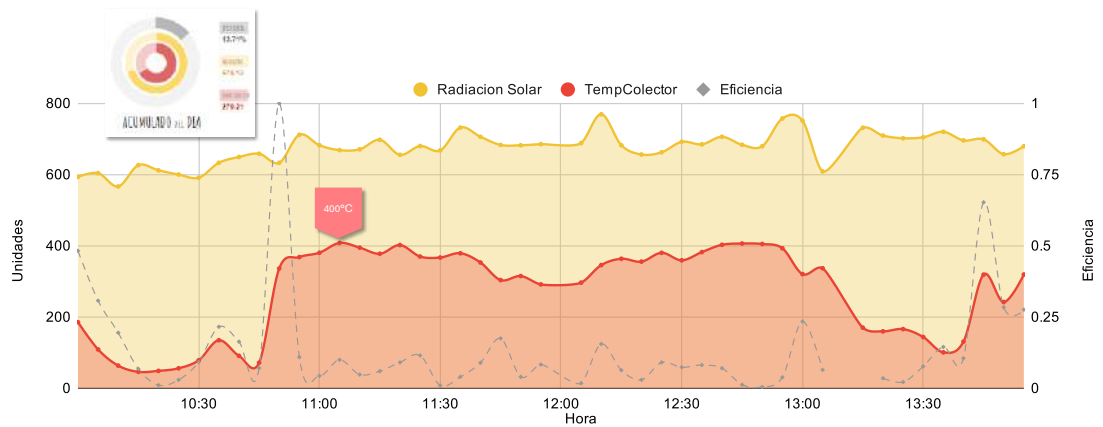


Fig. 4.15. Máxima temperatura alcanzada. 25 de enero de 2024.

El mejor desempeño del horno, con una eficiencia promedio de 19%, durante el periodo de experimentación y las HSP, ocurrió el 2 de febrero de 2024, con la IoT activada. Tal como se muestra en la Fig. 4.16.

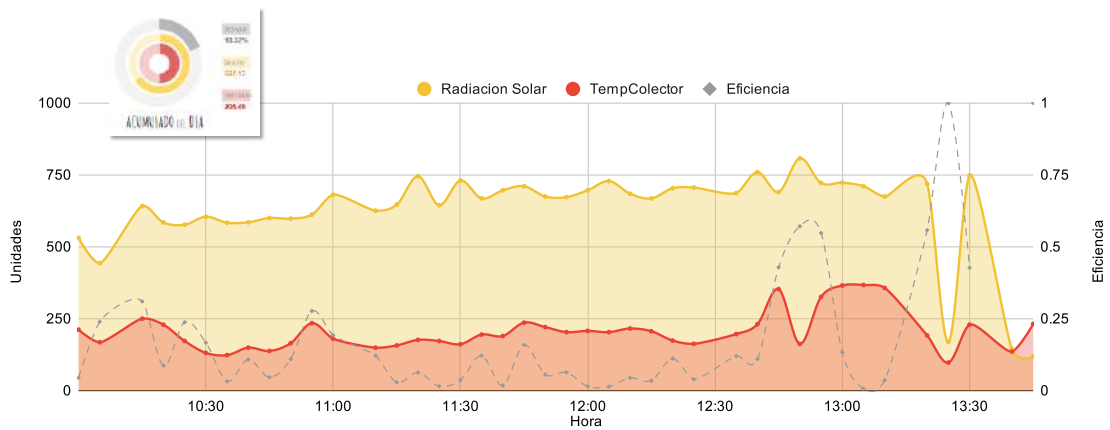


Fig. 4.16. Mejor desempeño. 2 de febrero de 2024.

Considerando la Ecuación (2.12) y los datos de las Horas Solar Pico, de 10:30 a 13:30 hrs, mostrados en Tabla 4.3, el poder calorífico resultante es de 134 BTU/h; equivalente a 22,877 cal/h.

Tabla 4.3. Datos para cálculo de poder calorífico durante las HSP.

Hrs.	Radiación [W/m^2]	Eficiencia [%]	<i>BTU/h</i>	<i>cal/h</i>
10:30 - 11:30	575.05	0.06	62.59	15,784.48
11:30 - 12:30	682.49	0.08	96.00	24,208.04
12:30 - 13:30	464.32	0.26	209.59	52,853.75

En modo de comparativa, en [77] se podría inferir que, en las mejores condiciones, su horno solar tiene un poder calorífico de 701.13 BTU/h , sin embargo, se calculan a distintas condiciones, como se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Condiciones particulares para el cálculo de BTU/h .

	Radiación [W/m^2]	Área [m^2]	Eficiencia [%]	<i>BTU/h</i>
Prototipo propio	570	0.54	13	134.1
Horno Solar de [77]	800	0.58	44	701.13

Ajustando a las mismas condiciones de radiación de 800 W/m^2 , y con la mejor eficiencia registrada de 25% se obtiene que el prototipo podría alcanzar, teóricamente, 366.75 BTU/h . Un 52% con relación al horno comparado.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Conclusiones

La integración de la tecnología IoT en el sistema de SDP con SS ha mejorado significativamente la eficiencia de conversión del horno solar en 5.07%. Por lo que se podría concluir que se acepta la hipótesis. Esta mejora de la eficiencia, se asume a la interacción que permite la IoT con el usuario para prevenir perturbaciones en el foco puntual, así como para corregir posible desorientación del seguidor solar o falta de calibración en la posición del sensor de sol. Como área de mejora se propone instalar el dispositivo en un lugar completamente libre de obstrucciones del sol, obtener un mayor número de datos y modificar el algoritmo de modo que pueda aleatorizar el uso y el no uso de la IoT, o si los recursos lo permiten, la construcción de otro horno solar para la experimentación bajo las mismas condiciones, con y sin IoT.

El algoritmo de predicción no mejora por sí mismo la eficiencia de conversión del sistema, sino que permite observar el comportamiento del colector a futuro, conociendo los valores de la temperatura en el colector, según sea el pronóstico de la radiación y obtener el mejor horario para aprovechar el recurso solar especialmente en la cocción de alimentos, permitiendo al usuario una mejor gestión de la energía, que se traduce en un uso más eficiente de la tecnología y el mejoramiento de la eficiencia productiva.

Durante el entrenamiento de los algoritmos de predicción, se realizaron diferentes configuraciones con los diferentes modelos. El algoritmo SVR-GA mejoró ligeramente sobre los demás modelos a excepción del modelo SVR-2500. Sin embargo, el GA ayudó a comprobar que la mejor solución es cercana a $C = 2500$. Es importante mencionar que se realizó también una configuración SVR con el valor obtenido con GA de C usando un kernel lineal, sin embargo, el rendimiento fue menor que RLM. Además, se puede observar que las predicciones son moderadamente mayores al 50%, por lo que, como área de mejora, se espera que en el futuro se puedan considerar mayor número de registros en el dataset, de al menos, de un año.

La fusión de la tecnología de horno solar con IoT y un enfoque en la predicción representa una revolución significativa tanto para la industria alimenticia como para el desarrollo de energías más limpias y sustentables. Esta implementación permitiría mayor control sobre la temperatura, esencial para ajustar el proceso de cocción a las necesidades específicas de diversos alimentos, asegurando resultados óptimos en términos de horneado, asado o cocción lenta, abriendo brecha a hornos con capacidad de controlar su temperatura que, a la fecha, no existe. Además, facilita la planificación eficaz del tiempo de cocción, optimizando la organización de la producción culinaria basada en la disponibilidad de máxima eficiencia del horno solar.

La eficiencia operativa y productiva también se ven afectadas positivamente. Desde una perspectiva de eficiencia energética y reducción de costos, los SDP con IoT e IA minimizan el uso de combustibles fósiles o electricidad, además que, por el monitoreo continuo de las condiciones operativas del horno, facilita la toma de decisiones para mantener el rendimiento óptimo con el menor recurso posible, reduciendo significativamente los costos operativos en la preparación de alimentos. Esta optimización con métodos de regresión para el uso del horno solar no solo aprovecha al máximo la energía solar disponible, sino que también contribuye a la reducción de la huella de carbono, disminuyendo la dependencia de fuentes de energía no renovables y contaminantes.

5.2. Trabajos futuros

Los resultados obtenidos tienen implicaciones significativas para el desarrollo de sistemas de energía solar más eficientes y controlables. La incorporación de tecnología IoT en conjunto de técnicas de Machine Learning abre nuevas posibilidades para la optimización de estos sistemas.

Se propone el diseño de un controlador seguidor solar, que a través de una estructura IoT conectada a una API de pronóstico solar, que arroja información sobre el ángulo azimutal y cenital, retroalimente el sistema, en un lazo de control cerrado y sea capaz de corregir el error en la posición y dirección del colector solar hacia el Sol, inclusive en días nublados, que desubican al actual controlador.

Se busca integrar una API de pronóstico meteorológico que permitirá prescindir de instrumentos costosos como el piranómetro para conocer la medida de la radiación, además de dotar al usuario de información meteorológica importante sin necesidad de contar con una estación.

Con una muestra representativa de un año se tendrían mejores resultados en la predicción de la temperatura en el foco puntual. Del mismo modo se podrían generar perfiles para la cocción de alimentos a través de técnicas de Machine Learning, de modo que se pueda predecir los días y horarios que mejor se ajusten a la cocción de ciertos alimentos, optimizando el uso de la energía solar.

Se pretende desarrollar un sistema de notificaciones para tener un monitoreo más controlado, de modo que pueda informar al usuario sobre los eventos sucedidos: Activación y desactivación del seguidor solar a la primera y última hora con luz solar; récord de temperatura alcanzada; finalización de un proceso de cocción; alarma por vientos fuertes; irregularidad o inconsistencias entre las variables, para advertir de alguna obstrucción o posible falla; conexión y desconexión del servidor.

Se propone profundizar en la evaluación cuantitativa de la eficiencia operativa, observando la relación entre la energía térmica generada (output útil) y la energía solar captada más el consumo eléctrico del sistema de seguimiento y la electrónica para la IoT (input total). Así como la eficiencia productiva del sistema considerando la cantidad de calor generado por unidad de tiempo durante las horas de máxima radiación.

El horno construido arroja valores de eficiencia inferiores a los del estado del arte de hasta 29%, por lo que es importante analizar las posibles pérdidas térmicas existentes. Ya sea por el sitio en el que se instaló y/o los componentes y sus materiales de fabricación.

Se está iterando el diseño del prototipo de manera que pueda ser un producto funcional y comercial, con la posibilidad de tener mayor control sobre la temperatura. Dicho diseño representará un modelo de utilidad como desarrollo tecnológico y una posible patente que se está evaluando.

Bibliografía

- [1]M. T. Islam, N. Huda, A. B. Abdullah, and R. Saidur, “A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 987–1018, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.097.
- [2]A. H. Siddique, S. Tasnim, F. Shahriyar, M. Hasan, and K. Rashid, “Renewable energy sector in bangladesh: The current scenario, challenges and the role of iot in building a smart distribution grid,” *Energies*, vol. 14, no. 16. MDPI AG, Aug. 02, 2021. doi: 10.3390/en14165083.
- [3]B. Li and N. Haneklaus, “The role of renewable energy, fossil fuel consumption, urbanization and economic growth on CO2 emissions in China,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 783–791, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.09.194.
- [4]J. Sun, Q. Liu, and H. Hong, “Numerical study of parabolic-trough direct steam generation loop in recirculation mode: characteristics, performance and general operation strategy,” *Energy Convers Manag*, vol. 96, pp. 287–302, 2015.
- [5]Ignacio Mártil de la Plaza, *Energía solar: De la utopía a la esperanza (Análisis y crítica)*, vol. 1. 2020, 2020.
- [6]Zhihang Zhao, Mohammad T Arif, and Amanullah M T Oo, “Solar thermal energy with molten-salt storage for residential heating application,” *Energy Procedia*, vol. 110, 2017, Accessed: Nov. 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217301649>
- [7]L. A. White, *The energy theory of cultural development*. 1954.
- [8]S. Izquierdo, C. Montañs, C. Dopazo, and N. Fueyo, “Analysis of CSP plants for the definition of energy policies: The influence on electricity cost of solar multiples, capacity factors and energy storage,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 10, pp. 6215–6221, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.ENPOL.2010.06.009.

- [9] M. Z. Malik *et al.*, “A review on design parameters and specifications of parabolic solar dish Stirling systems and their applications,” *Energy Reports*, vol. 8. Elsevier Ltd, pp. 4128–4154, Nov. 01, 2022. doi: 10.1016/j.egy.2022.03.031.
- [10] K. Lovegrove *et al.*, “Paraboloidal dish solar concentrators for multi-megawatt power generation,” in *ISES Solar World Congress, Göteborg, Sweden.*, 2003, pp. 16–19.
- [11] H. M. Fahad, A. Islam, M. Islam, M. F. Hasan, W. F. Brishty, and M. M. Rahman, “Comparative analysis of dual and single axis solar tracking system considering cloud cover,” *International Conference on Energy and Power Engineering: Power for Progress, ICEPE 2019*, Mar. 2019, doi: 10.1109/CEPE.2019.8726646.
- [12] C. Battocchio *et al.*, “Solar Cookers and Dryers: Environmental Sustainability and Nutraceutical Content in Food Processing,” *Foods*, vol. 10, no. 10, p. 2326, Sep. 2021, doi: 10.3390/FOODS10102326.
- [13] F. Barzegar, M. Kamankesh, and A. Mohammadi, “Heterocyclic aromatic amines in cooked food: A review on formation, health risk-toxicology and their analytical techniques,” *Food Chem*, vol. 280, pp. 240–254, May 2019, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2018.12.058.
- [14] M. T.- Exchange and undefined 2016, “Solar Cooking: Any place on our menu?,” *CEDRO*, 2016, Accessed: Nov. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.cedro-undp.org/Library/Assets/Gallery/Publications/Solar%20Cooking%20Any%20place%20on%20our%20menu.pdf>
- [15] B. Y. Mekonnen and A. Y. Kebede, “Development and performance evaluation of a solar baking oven,” *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, vol. 308 LNICST, pp. 610–622, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-43690-2_46/COVER.
- [16] N. H. Motlagh, M. Mohammadrezaei, J. Hunt, and B. Zakeri, “Internet of Things (IoT) and the Energy Sector,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 2, p. 494, Jan. 2020, doi: 10.3390/EN13020494.

- [17] S. M. Patil, M. Vijayalashmi, and R. Tapaskar, "IoT based solar energy monitoring system," *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, ICECDS 2017*, pp. 1574–1579, Jun. 2017, doi: 10.1109/ICECDS.2017.8389711.
- [18] M. Rahaman, "Design, analysis and control of solar heating system with seasonal thermal energy storage," Memorial University of Newfoundland, 2020.
- [19] R. Parveen, A. Mohammed, and K. Ravinder, "IoT based solar tracking system for efficient power generation," *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 2018, Accessed: Nov. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.ijrar.org/papers/IJRAR1944279.pdf>
- [20] R. I. S. Pereira, S. C. S. Jucá, P. C. M. Carvalho, and C. P. Souza, "IoT Network and Sensor Signal Conditioning for Meteorological Data and Photovoltaic Module Temperature Monitoring," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 06, pp. 937–944, 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8896816.
- [21] R. I. S. Pereira, S. C. S. Juca, P. C. M. Carvalho, and C. P. Souza, "IoT Network and Sensor Signal Conditioning for Meteorological Data and Photovoltaic Module Temperature Monitoring," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 6, pp. 937–944, Jun. 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8896816.
- [22] S. K. Ramu, G. C. R. Irudayaraj, and R. Elango, "An IoT-Based Smart Monitoring Scheme for Solar PV Applications," in *Electrical and Electronic Devices, Circuits, and Materials: Technological Challenges and Solutions*, wiley, 2021, pp. 211–233. doi: 10.1002/9781119755104.ch12.
- [23] A. A. Rahimoon, D. M. Soomro, M. N. Abdullah, I. A. Soho, S. A. Soomro, and S. N. Ali, "Development of an Educational Solar Tracking Parabolic Dish Using Raspberry Pi," in *In 2019 IEEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, 2019, pp. 1–5.
- [24] W. Ajbar, J. A. H. Pérez, A. P. Bahena, A. Huicochea, and D. Juárez-Romero, "Inteligencia artificial aplicada a colectores solares para el calentamiento de agua de

- uso doméstico,” *Inventio*, vol. 18, no. 45, pp. 1–10, Jul. 2022, doi: 10.30973/INVENTIO/2022.18.45/1.
- [25] M. Marcos, D. Cabaleiro, S. Hamze, L. Fedele, and S Bobbo, “NePCM based on silver dispersions in poly (ethylene glycol) as a stable solution for thermal storage,” *Nanomaterials*, 2019, Accessed: Apr. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/1/19>
- [26] M. Vakili and S. A. Salehi, “A review of recent developments in the application of machine learning in solar thermal collector modelling,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 2, pp. 2406–2439, Jan. 2023, doi: 10.1007/S11356-022-24044-Y.
- [27] N. Parveen, S. Zaidi, and M Danish, “Development of SVR-based model and comparative analysis with MLR and ANN models for predicting the sorption capacity of Cr (VI),” *Elsevier*, 2017, Accessed: Apr. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582017300733>
- [28] O. Chieochan, A. Saokaew, and E. Boonchieng, “Internet of things (IOT) for smart solar energy_ A case study of the smart farm at Maejo University,” in *In 2017 international conference on control, automation and information sciences (ICCAIS)*, 2017, pp. 262–267.
- [29] R. E. González, “Diseño y construcción de un evaporador solar para la obtención de miel de agave,” 2018. Accessed: Nov. 17, 2022. [Online]. Available: https://repositorioinstitucionaluacm.mx/jspui/bitstream/123456789/1343/3/Roberto%20Espinosa_MIE_Dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20evaporador%20solar%20para%20la%20obtenci%C3%B3n%20de%20miel%20de%20agave.pdf
- [30] P. Friedlingstein *et al.*, “Global Carbon Budget 2020,” *Earth Syst Sci Data*, vol. 12, no. 4, pp. 3269–3340, Dec. 2020, doi: 10.5194/ESSD-12-3269-2020.

- [31] G. Pirasteh, R. Saidur, S. M. A. Rahman, and N. A. Rahim, “A review on development of solar drying applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 133–148, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2013.11.052.
- [32] B. Zou, J. Dong, Y. Yao, and Y. Jiang, “A detailed study on the optical performance of parabolic trough solar collectors with Monte Carlo Ray Tracing method based on theoretical analysis,” *Solar Energy*, vol. 147, pp. 189–201, May 2017, doi: 10.1016/J.SOLENER.2017.01.055.
- [33] R. K. Megalingam and V. V. Gedela, “Solar powered automated water pumping system for eco-friendly irrigation,” *Proceedings of the International Conference on Inventive Computing and Informatics, ICICI 2017*, pp. 623–626, May 2018, doi: 10.1109/ICICI.2017.8365208.
- [34] S. M. M. Ahmed, M. R. Al-Amin, S. Ahammed, F. Ahmed, A. M. Saleque, and M. Abdur Rahman, “Design, construction and testing of parabolic solar cooker for rural households and refugee camp,” *Solar Energy*, vol. 205, pp. 230–240, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.SOLENER.2020.05.007.
- [35] R. A. Lozada Vilca, I. J. Arocutipá Escobar, W. F. Ancco Flores, V. Coaquira Ticona, L. D. Mamani Quispe, and R. Mendoza Condori, “Diseño, construcción y evaluación de un concentrador solar de disco parabólico tipo Scheffler para la calefacción de viviendas del Altiplano,” *Universidad Nacional de Juliaca*, 2019, Accessed: Nov. 01, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.unaj.edu.pe:8080/handle/UNAJ/55>
- [36] A. G. Bhave and C. K. Kale, “Development of a thermal storage type solar cooker for high temperature cooking using solar salt,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 208, p. 110394, May 2020, doi: 10.1016/j.solmat.2020.110394.
- [37] J. G. Backes, A. D’Amico, N. Pauliks, S. Guarino, M. Traverso, and V. lo Brano, “Life Cycle Sustainability Assessment of a dish-Stirling Concentrating Solar Power Plant in the Mediterranean area,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101444, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.SETA.2021.101444.

- [38] B. A. Mekonnen, K. W. Liyew, and M. T. Tigabu, “Solar cooking in Ethiopia: Experimental testing and performance evaluation of SK14 solar cooker,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 22, p. 100766, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.CSITE.2020.100766.
- [39] W. Clemente and C Martinez, “Diseño conceptual de concentrador solar de disco parabólico para generar energía térmica de alta temperatura,” *El reventón energético*, 2021, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8362708.pdf>
- [40] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Alternative designs of parabolic trough solar collectors,” *Prog Energy Combust Sci*, vol. 71, pp. 81–117, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.PECS.2018.11.001.
- [41] M. Cagnoli *et al.*, “Design methodology for a prototype helical receiver adopted in the MOSAIC solar bowl system,” *Solar Energy*, vol. 208, pp. 905–916, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.SOLENER.2020.08.012.
- [42] D. v. Nithin Kumar and M. R. Stalin John, “A Review on Solar Tracking Methods,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Sep. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/912/4/042045.
- [43] E. K. Mpodi, Z. Tjiparuro, and O. Matsebe, “Review of dual axis solar tracking and development of its functional model,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2019, pp. 580–588. doi: 10.1016/j.promfg.2019.05.082.
- [44] R. Dhanabal, V. Bharathi, R. Ranjitha, A. Ponni, S. Deepthi, and P. Mageshkannan, “Comparison of efficiencies of solar tracker systems with static panel single-axis tracking system and dual-axis tracking system with fixed mount,” *Int J Eng Technol*, vol. 5, no. 2, pp. 1925–1932, 2013.
- [45] Y. Oner, E. Cetin, H. K. Ozturk, and A. Yilanci, “Design of a new three-degree of freedom spherical motor for photovoltaic-tracking systems,” *Renew Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2751–2756, Dec. 2009, doi: 10.1016/J.RENENE.2009.04.025.

- [46] M. Rahimi, M. Banybayat, Y. Tagheie, and P. Valeh-E-Sheyda, “An insight on advantage of hybrid sun-wind-tracking over sun-tracking PV system,” *Energy Convers Manag*, vol. 105, pp. 294–302, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2015.07.086.
- [47] N. M. Mokhtar *et al.*, “Smart temperature monitoring system for parabolic solar thermal collector integrated with membrane distillation system,” in *4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2020, pp. 144–148. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263122.
- [48] J. Canada-Bago, J. A. Fernandez-Prieto, M. A. Gadeo-Martos, and P. Perez-Higueras, “Knowledge-Based Sensors for Controlling A High-Concentration Photovoltaic Tracker,” *Sensors*, vol. 20, no. 5, p. 1315, Feb. 2020, doi: 10.3390/S20051315.
- [49] Q. Xie, Y. Xiao, X. Wang, D. Liu, and Z. Shen, “Heliostat cluster control for the solar tower power plant based on leader-follower strategy,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 135031–135039, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940618.
- [50] N. AL-Rousan, N. A. Mat Isa, and M. K. Mat Desa, “Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 32, no. 7, pp. 459–469, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JKSUES.2020.04.004.
- [51] A. Díaz, S. Keshtkar, J. A. Moreno, and E. Hernandez, “Design and control strategy of a low-cost parallel robot for precise solar tracking,” *Mechanisms and Machine Science*, vol. 67, pp. 342–350, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-00232-9_36/COVER.
- [52] H. Kang, T. Hong, and M. Lee, “A new approach for developing a hybrid sun-tracking method of the intelligent photovoltaic blinds considering the weather condition using data mining technique,” *Energy Build*, vol. 209, p. 109708, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.109708.
- [53] M. William *et al.*, “Monitoring System for Solar Thermal Station with IoT and M2M,” in *2017 IEEE 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII)*, 2017, pp. 1–6.

- [54] R. F. Fuentes-Morales *et al.*, “Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review,” *Solar Energy*, vol. 212, pp. 203–219, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.10.071.
- [55] L. Farhan, S. T. Shukur, A. E. Alissa, M. Alrweg, U. Raza, and R. Kharel, “A survey on the challenges and opportunities of the Internet of Things _IoT,” in *2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*, 2017, pp. 1–5.
- [56] G. Bedi, G. K. Venayagamoorthy, R. Singh, R. R. Brooks, and K. C. Wang, “Review of Internet of Things (IoT) in Electric Power and Energy Systems,” *IEEE Internet Things J*, vol. 5, no. 2, pp. 847–870, Apr. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2802704.
- [57] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, and M. Mustaqim, “Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends and Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23022–23040, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970118.
- [58] P. Khobragade, P. Ghutke, V. P. Kalbande, and N. Purohit, “Advancement in Internet of Things (IoT) Based Solar Collector for Thermal Energy Storage System Devices: A Review,” in *2nd International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control, PARC 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/PARC52418.2022.9726651.
- [59] E. Ahmadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-Ivatloo, and A. Anvari-Moghaddam, “Stochastic operation of a solar-powered smart home: Capturing thermal load uncertainties,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 12, Jun. 2020, doi: 10.3390/su12125089.
- [60] K. C. Diggavi, M. Thula, and B. Pakkiraiah, “Solar Tracking System Using IoT,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 626, pp. 569–578, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-2256-7_51/COVER.
- [61] J. Li, L. Li, H. Wang, K. P. Ferentinos, M. Li, and N. Sigrimis, “Proactive energy management of solar greenhouses with risk assessment to enhance smart specialisation

- in China,” *Biosyst Eng*, vol. 158, pp. 10–22, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.03.007.
- [62] M. Aramesh *et al.*, “A review of recent advances in solar cooking technology,” *Renew Energy*, vol. 140, pp. 419–435, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.03.021.
- [63] J. M. Arenas, “Design, development and testing of a portable parabolic solar kitchen,” *Renew Energy*, vol. 32, no. 2, pp. 257–266, Feb. 2007, doi: 10.1016/J.RENENE.2006.01.013.
- [64] O. S.-S. Energy and undefined 2021, “Development of a solar cooking system suitable for indoor cooking and its exergy and enviroeconomic analyses,” *Elsevier*, Accessed: Nov. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21001080>
- [65] M. K. H. Rabaia *et al.*, “Environmental impacts of solar energy systems: A review,” *Science of The Total Environment*, vol. 754, p. 141989, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.141989.
- [66] T. Lehtola and A. Zahedi, “Solar energy and wind power supply supported by storage technology: A review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 35, pp. 25–31, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.SETA.2019.05.013.
- [67] O. G. Valladares and I. P. Figueroa, *Aplicaciones termicas de la energia solar en los sectores residencial, servicio e industrial*. 2017. Accessed: Nov. 17, 2022. [Online]. Available: <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/1315>
- [68] M. A. Laborde and R. Williams, “Energía solar,” *Buenos Aires: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales*, 2016.
- [69] D. A. Sánchez and H. Z. Castaño, “Libro interactivo sobre energía solar y sus aplicaciones,” 2011, Accessed: Nov. 17, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.utp.edu.co/handle/11059/2369>

- [70] M. Pérez Martínez, I. C. Morales Rodríguez, and E. Castro, “La hora solar pico equivalente: Definición e interpretación,” *Ingeniería Energética*, vol. 38, no. 2, pp. 124–131, 2017.
- [71] J. M. Álvarez-Alvarado, J. G. Ríos-Moreno, E. J. Ventura-Ramos, G. Ronquillo-Lomeli, and M. Trejo-Perea, “An alternative methodology to evaluate sites using climatology criteria for hosting wind, solar, and hybrid plants,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1772911.
- [72] Y. Amirgaliyev, M. Kunelbayev, and T. Sundetov, “Calculation of the Energy of a Two-Circuit Solar System with Thermosiphon Circulation Based on the Internet of Things,” *Green Energy and Technology*, pp. 321–333, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-96429-0_15/COVER.
- [73] J. Kleissl, *Solar energy forecasting and resource assessment*. Academic Press, 2013.
- [74] M. Piekutowska *et al.*, “The Application of Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network Models for Yield Prediction of Very Early Potato Cultivars before Harvest,” *Agronomy*, vol. 11, no. 5, p. 885, Apr. 2021, doi: 10.3390/AGRONOMY11050885.
- [75] M. Safari, A. H. Rabiee, and J. Joudaki, “Developing a Support Vector Regression (SVR) Model for Prediction of Main and Lateral Bending Angles in Laser Tube Bending Process,” *Materials*, vol. 16, no. 8, p. 3251, Apr. 2023, doi: 10.3390/MA16083251.
- [76] C. Le, H. D. Jeong, I. Damjanovic, and S. Bukkapatnam, “Pareto Principle in Scoping-Phase Cost Estimating: A Multiobjective Optimization Approach for Selecting and Applying Optimal Major Work Items,” *J Constr Eng Manag*, vol. 148, no. 8, p. 04022076, Jun. 2022, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002349.
- [77] A. O. Onokwai, U. C. Okonkwo, C. O. Osueke, C. E. Okafor, T. M. A. Olayanju, and S. O. Dahunsi, “Design, modelling, energy and exergy analysis of a parabolic cooker,”

Renew Energy, vol. 142, pp. 497–510, Nov. 2019, doi:
10.1016/J.RENENE.2019.04.028.

Anexos

A. Reconocimiento FOPER 2022



Otorgan el presente

RECONOCIMIENTO

a

ARANA RUIZ DIEGO

Por su participación como

RESPONSABLE DE PROYECTO

FOPER 2022

"Fondo de Proyectos Especiales de Rectoría"

Santiago de Querétaro, Qro., julio de 2023.

Dra. M. Teresa de Jesús García Gasca
RECTORA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO


Lic. Verónica Núñez Perusquía
TITULAR DE LA DIRECCIÓN DE ATENCIÓN
A LA COMUNIDAD UNIVERSITARIA



SOMOS UAQ[®]
SERVIR CONSTRUIR TRANSFORMAR



B. Aprobación de FOPER 2023



FONDO DE PROYECTOS ESPECIALES DE RECTORÍA - FOPER

Estimado(a) Alumno(a): DIEGO ARANA RUIZ.

Nos complace informarle que de acuerdo al puntaje otorgado por los evaluadores asignados FOPER, su proyecto ha sido **APROBADO**.

Por lo tanto, le solicitamos estar al pendiente de la publicación de resultados en la página oficial de la U.A.Q. para la firma de convenio y manuales, las fechas para el registro de los documentos en el sistema FOPER y para mayor información de las siguientes etapas del proceso.

Confiamos totalmente en su compromiso, dedicación y culminación exitosa de su proyecto.

¡ENHORABUENA!

Atentamente

Fondo de Proyectos Especiales de Rectoría (FOPER)
Dirección de Atención a la Comunidad Universitaria

Fecha de registro | 09/11/2023.

* Mensaje generado automáticamente por la Dirección de Innovación y Tecnologías de la Información.
* Favor de no responder al mismo.

© DITI - UAQ 2023 Universidad Autónoma de Querétaro.

C. Constancia IXV Coloquio de Ingeniería



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INVESTIGACIÓN



Se otorga la presente
CONSTANCIA a:

DIEGO ARANA RUIZ

Por su participación en el
XVI Coloquio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Autónoma de Querétaro
con su presentación en Póster:

Aplicación y alcance de las IoT para
Concentradores Solares de Disco
Parabólico. Revisión y aportes.

Noviembre de 2022
Facultad de Ingeniería

Dr. Manuel Toledano Ayala
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Jefe de la División de Investigación y Posgrado
FACULTAD DE INGENIERÍA