



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-JURIQUILLA

**SISTEMA IOT PARA EL
MONITOREO DE
COLECTORES SOLARES PLANOS**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero en Energías Renovables

P R E S E N T A

Hernández Ruíz Francisco Javier

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Pérez Rábago Carlos Alberto

Temixco, Mor., a 6 de Junio de 2022



OF/IER/LIER/050/2022
ASUNTO: Notificación de jurado y
fecha para examen profesional.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente.

Por medio de la presente le informo que el día lunes 6 de junio de 2022, a las 11:00 h, en el Instituto de Energías Renovables, el **C. FRANCISCO JAVIER HERNÁNDEZ RUÍZ**, con número de cuenta 313096657 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

“Sistema IOT para el monitoreo de colectores solares planos”

Debido a que el alumno ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTA: DRA. HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES
VOCAL: DR. RICARDO ARTURO PÉREZ ENCISO
SECRETARIO: DR. CARLOS ALBERTO PÉREZ RÁBAGO
SUPLENTE: DR. DAVID RIVEROS ROSAS
SUPLENTE: DRA. NADIA MARÍA SALGADO HERRERA

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 30 de mayo de 2022



Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL´mfp

Agradecimientos

A todas las personas que me apoyaron e hicieron posible que este trabajo se realice con éxito y al proyecto PE110520 de PAPIME titulado: "Desarrollo de prácticas de solar térmica y materias afines."

Acrónimos

AC	<i>Alternating Current</i>
AM	<i>Air Mass</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CPC	<i>Compound Parabolic Poncentrador</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Arrays</i>
GND	<i>Ground</i>
HSP	<i>Hora Solar Pico</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IER	<i>Instituto de Eneías Renovables</i>
IOT	<i>Internet Of Things</i>
ISO	<i>Internacional Organization for Standardization</i>
LCD	<i>Liquid Cristal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MCU	<i>Multipoint Control Unit</i>
MQTT	<i>Message Queue Telemetry Transport</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
SC	<i>Short Circuit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SSE	<i>Surface meteorology and Solar Energy</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
UNAM	<i>Universidad Nacional Autónoma de México</i>
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

Nomenclatura

Latitud	$\phi[^{\circ}]$	Radiación extraterrestre diaria promedio mensual	$\overline{H}_o[\frac{Wh}{m^2}]$
Ángulo de declinación	$\delta[^{\circ}]$	Radiación horaria	$I[\frac{Wh}{m^2}]$
Ángulo azimutal	$\gamma_s[^{\circ}]$	Radiación horaria promedio mensual	$\overline{I}[\frac{Wh}{m^2}]$
Ángulo cenital	$\theta_z[^{\circ}]$	Radiación extraterrestre horaria	$I_o[\frac{Wh}{m^2}]$
Ángulo de anoche y amanecer	$\omega_c[^{\circ}]$	Radiación extraterrestre horaria promedio mensual	$\overline{I}_o[\frac{Wh}{m^2}]$
Ángulo horario	$\omega[^{\circ}]$	Radiación horaria difusa	$I_d[\frac{Wh}{m^2}]$
Hora definida por dos ángulos horarios	$\omega_2 - \omega_1[^{\circ}]$	Radiación horaria promedio mensual en superficie inclinada	$\overline{I}_T[\frac{Wh}{m^2}]$
Ángulo azimutal en superficie inclinada	$\gamma[^{\circ}]$	Índice de claridad promedio mensual	\overline{K}
Ángulo entre vector solar y vector normal en superficie inclinada	$\theta[^{\circ}]$	Índice de claridad promedio mensual en superficie inclinada	\overline{K}_T
Ángulo de inclinación	$\beta[^{\circ}]$	Índice de claridad horario promedio mensual en superficie inclinada	$\overline{K}_{T,h}$
Vector solar en sistema (x',y',z')	\hat{s}'	Razón entre radiaciones horaria y diaria	r_t
Vector solar a mediodía en sistema (x',y',z')	\hat{s}_m'	Razón entre radiaciones difusas horaria y diaria	r_d
Vector solar en sistema (x,y,z)	\hat{s}	Razón entre irradiancias directas en superficie horizontal e inclinada	R_b
Vector normal	\hat{n}	Razón horaria entre las radiaciones horarias en superficie horizontal e inclinada (promedio mensual)	\overline{R}_h
Irradiancia	$G[W/m^2]$	Albedo	ρ_g
Irradiancia directa	$G_b[W/m^2]$	Carga horaria promediomensual	$L_i [Wh]$
Irradiancia directa en superficie inclinada	$G_{b,T}[W/m^2]$	Eficiencia horaria promedio mensual	η_i
Radiación diaria	$H[Wh/m^2]$	Área del colector	$A_c[m^2]$
Radiación diaria promedio mensual	$\overline{H}[Wh/m^2]$	Nivel crítico	X_c
Radiación extraterrestre diaria	$H_o[Wh/m^2]$	Parámetro diferenciador en utilidad	X_m
Radiación diaria difusa	$H_d[Wh/m^2]$	Utilidad	Φ

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Propuesta de investigación	2
1.3. Objetivo	3
1.3.1. Objetivos específicos	3
1.4. Justificación	3
1.5. Metodología	4
1.6. Organización de la tesis	4
2. Antecedentes	6
2.1. Internet de las cosas (IOT)	6
2.2. Estado del arte	6
2.2.1. Dispositivos en el mercado	9
3. Energía solar	11
3.1. Geometría solar para superficies inclinadas	11
3.2. Irradiación extraterrestre diaria	15
3.3. Índice de claridad	15
3.4. Estimación de radiación horaria a partir de la radiación diaria	16
3.5. Razón de radiación entre una superficie horizontal y una inclinada	17
3.5.1. Razón en radiación directa	17
3.5.2. Razón en radiación horaria promedio mensual	17
3.6. Componente difusa y directa de radiación mensual	17
3.7. Utilidad	18
3.8. Radiación en superficies inclinadas	19
3.8.1. Contribuciones radiativas	19
3.9. Conversión termosolar	20
3.9.1. Balance térmico en dispositivos termosolares	20
3.9.2. Eficiencia de los colectores solares	21
3.9.3. Clasificación de los dispositivos termosolares de baja temperatura	22
3.9.4. Normatividad para los colectores termosolares	23
3.10. Medición del recurso solar a través de una celda fotovoltaica	23
3.10.1. Influencia del espectro solar sobre una celda fotovoltaica	24
3.10.2. Influencia del ángulo solar de incidencia	26
3.11. Predicción en rendimiento mensual en sistemas fotovoltaicos	27
3.12. Comentario de capítulo	29
4. Desarrollo e implementación	30
4.1. Control lógico y sensores	30
4.1.1. Sensores	30
4.2. Calibración de panel solar para medir irradiancia	32
4.2.1. Prueba del espectro solar	34
4.2.2. Prueba del ángulo de incidencia	37

4.3.	Calibración del caudalímetro	39
4.4.	Análisis del consumo energético y dimensionamiento fotovoltaico	40
4.5.	Programación en el microcontrolador	44
4.6.	Circuito	45
4.6.1.	Circuito de alimentación	46
4.6.2.	Esquema completo del circuito	47
4.7.	Servidor y aplicación web	49
4.7.1.	Aplicación web	49
4.8.	Metodología para obtención de eficiencia en colector	51
4.9.	Comentario de capítulo	51
5.	Resultados y discusiones	52
5.1.	Instalación y montaje del sistema de monitoreo	52
5.2.	Calibración de sensor de caudal	55
5.3.	Calibración de panel fotovoltaico (sensor de irradiancia)	55
5.3.1.	Influencia del espectro solar	56
5.3.2.	Influencia del ángulo de incidencia	57
5.3.3.	Cálculo de errores	58
5.4.	Evaluación de consumo y autonomía	62
5.5.	Eficiencia en el colector de prueba	63
5.6.	Aplicación del servidor	64
6.	Conclusiones	71
7.	Bibliografía	73
A.	Apéndice	78
A.1.	Circuito	79
A.2.	errores	80
A.3.	Errores seccionados	81
A.4.	Datasheet de componentes	82

1. Introducción

La participación de las energías renovables dentro de la matriz energética mundial es cada vez mayor. A nivel mundial, de los 167297.55 TWh de energía primaria utilizada en el 2019, el 14 % correspondió a energía renovable (23969.43 TWh) aumentando 914.81 MWh (4 %) respecto al 2018 [27]. Destaca la energía solar, cuya capacidad instalada llegó a los 1.20 TW en 2019 [29], [57].

Uno de las ramas de la energía solar más extendidas es la energía solar térmica de baja temperatura, no es casualidad que cada vez es más común encontrar algún sistema fototérmico en las azoteas de los hogares, esto a consecuencia del abaratamiento de estas tecnologías en los últimos años, permitiendo el acceso a una inversión rentable para muchas familias y negocios; aunado a que estos sistemas requieren una relativa fácil instalación y mantenimiento, además que su principal aplicación es el calentamiento de agua para uso sanitario, una necesidad que siempre se busca cubrir [47].

Todos estos factores han dado como resultado que para finales del 2019, a nivel mundial, se encontraban instalados y operando 479 GW de colectores solares (correspondientes a 684 millones de metros cuadrados y un total de 1400.4 PJ producidos en ese año), esta cifra es ligeramente inferior con respecto al 2018 donde se encontraban instalados 483GW; los factores en esta reducción son diversos, pues algunos mercados como China han reducido su demanda; de hecho, al tener una participación de aproximadamente el 75 % de todos los colectores nuevos instalados por año, el mercado chino impacta significativamente en estas cifras. A pesar de ello, la tendencia en la última década sigue siendo incrementar la capacidad instalada, pues en muchos otros países el mercado continúa creciendo. En México el mercado se mantuvo estable [57]. Las tecnologías que conforman la energía termosolar de baja temperatura son las siguientes [57]:

- Captadores de tubos al vacío: Conforman aproximadamente el 70 % de la capacidad mundial instalada.
- Captadores solares planos: Que incluyen los colectores planos protegidos, los cuales conforman el 23 % de la capacidad mundial instalada, y los colectores planos desprotegidos que conforman aproximadamente el 6 %.
- Captadores parabólicos compuestos: Representan menos del 0.8 % de la capacidad mundial instalada.
- El porcentaje restante de aproximadamente 0.2 % corresponde a calentadores de aire.

En nuestro país la energía solar (térmica y fotovoltaica) representa 0.64 % (40.32 PJ) de la producción total de energía primaria. Hasta el 2018 la capacidad instalada era de 3.034 GW (4,333,742 de m^2), de los cuales 993.1 MW (32.73 %) son colectores planos descubiertos, 1,129.7 MW(37.23 %) son colectores planos cubiertos y 904.1 MW(29.79 %) son de tubos al vacíos, los 6.6 MW(0.21 %) restantes correspondientes a calentadores de aire. El principal destino de estas tecnologías son el sector resi-

dencial y comercial, encaminadas principalmente al calentamiento de agua, contribuyendo con 7.88 y 5.17 petajoules de energía final respectivamente en cada sector. En el caso del sector industrial, la termosolar de baja temperatura contribuyó con 0.75 petajoules [57], [11].

Para seguir incentivando la instalación de sistemas termosolares, existen distintos frentes de investigación e innovación tecnológica que contribuyan a su difusión. Desde luego que el estudio de materiales, diseño, optimización de sistemas termosolares, simulación de colectores y transferencia de calor forman parte de las principales líneas de investigación del quehacer científico para este tipo de tecnologías [45]. Por otra parte, debido a la variedad de aplicaciones (como calentamiento de agua para uso sanitario, piscinas, climatización de espacios o secado solar), la gestión inteligente de estas instalaciones se vuelve una práctica importante para evitar pérdidas de energía, así como para reducir el consumo de gas y electricidad [4].

Al igual que en otros sistema de generación de energía, es posible administrarlos de manera más eficaz mediante la recopilación y análisis de información sobre el estado de la generación de energía continua. De esta manera los datos acumulados brindarían la ventaja de predecir la generación y consumo de energía futura, o también de proporcionar nuevas estrategias para el mantenimiento óptimo y preventivo del sistema. Una gestión inteligente también puede otorgarnos otras ventajas como el monitoreo y la detección de fallas en tiempo real. [5].

1.1. Planteamiento del problema

Como ya se ha resaltado, los sistemas solares térmicos no están exentos de la necesidad creciente del monitoreo y almacenamiento de datos sobre la generación, sin embargo, la instrumentación local y remota no es frecuentemente posible para el instalador. A pesar de ello, existen algunos dispositivos electrónicos que pueden asumir el papel de sistema de monitoreo y operación [26].

Una alternativa para los sistemas de instrumentación remota son las tecnologías IOT (*Internet Of Things* o internet de las cosas), las cuales son capaces de ejecutar las tareas de cualquier sistema embebido pero con la ventaja de establecer conexiones a Internet y brindar las herramientas que esto conlleva, como por ejemplo enviar y recibir información de algún ordenador que también se encuentre conectado a Internet. Esta alternativa puede adaptarse para lograr un sistema completo de monitoreo remoto de bajo costo y de bajo consumo de energía.

1.2. Propuesta de investigación

Debido a lo expuesto anteriormente, en este trabajo se propone el desarrollo e implementación de un prototipo funcional de sistema IOT con el fin de monitorear de maneja remota la operación de un colector solar plano, además de permitir el almace-

namiento y consulta de los datos históricos y de tiempo real desde cualquier dispositivo conectado a internet.

1.3. Objetivo

Desarrollar e implementar un prototipo funcional de sistema IOT para el monitoreo de un colector solar plano (de baja temperatura).

1.3.1. Objetivos específicos

1. Identificar los parámetros más importantes a ser medidos en un sistema termosolar de baja temperatura.
2. Diseñar un sistema de adquisición de datos conectado de forma inalámbrica.
3. Identificar los distintos protocolos de comunicación involucrados y seleccionar los más adecuados para este trabajo.
4. Diseñar un sistema de alimentación autónomo para el sistema IOT.
5. Medir la irradiancia solar a través de una celda fotovoltaica de baja potencia.
6. Crear una aplicación web, que permita la visualización gráfica de los datos en tiempo real e histórico a través de un móvil u ordenador.
7. Montar los instrumentos de medición y comunicación en un almacén que permita su protección y fácil implementación a las tuberías del colector.

1.4. Justificación

Este trabajo tiene la intención de proporcionar aprendizaje en el área de la geometría y el recurso solar, en instrumentación y en los servidores web. Debido a la autonomía energética que se busca mantener en la instrumentación del proyecto IOT, se realizará un dimensionamiento fotovoltaico pero explorando una evaluación analítica del rendimiento del sistema fotovoltaico a largo plazo, con lo cual se estudiarán los parámetros necesarios para la estimación del recurso solar. El desarrollo del control e instrumentación del sistema IOT se llevará a cabo con la intención de adquirir mayor conocimiento en el área de la electrónica y de los microcontroladores, no solo a nivel programación, si no también a nivel comunicación y protocolos de red. Por otra parte, se busca desarrollar una aplicación web con el fin de mejorar las habilidades en nuevos lenguajes de programación y poner a prueba la lógica de programación que ya se a adquirido con anterioridad a este trabajo.

1.5. Metodología

Para realizar el proyecto, se comienza por identificar los requerimientos de instrumentación para establecer el conjunto de sensores a utilizar.

Una vez tomadas las decisiones sobre los componentes fundamentales del sistema IOT, se procederá a la experimentación correspondiente de los sensores para su implementación o calibración.

Como tercer paso se diseñará el sistema de autonomía energética de acuerdo a la instrumentación seleccionada y a la carga energética que representan, por lo que será necesario realizar pruebas de consumo; una vez diseñada esta parte, se creará el circuito completo (instrumentación, microcontrolador y sistema de alimentación) para poder soldar cada componente en una placa PCB (placa de circuito impreso por sus siglas en inglés). Paralelamente se desarrollará la programación destinada al microcontrolador y a la aplicación web, junto con la creación de la base de datos y el servidor.

Como siguiente punto a seguir se instala el colector solar plano de prueba y el circuito totalmente armado, distribuyendo los sensores a lo largo de las tuberías o donde más convenga su uso. Por último se deja operar todo el sistema IOT por algunos días, almacenando y recopilando datos, para finalmente mostrar los resultados y obtener conclusiones sobre el rendimiento tanto del microcontrolador y su circuito, además de su visualización en la aplicación web.

Hay que resaltar que durante un par de días, se incorporará una bomba solar para mantener un flujo continuo de agua en el colector, esto con el objetivo de ampliar la variedad de datos y poner a prueba el caudalímetro. Anterior a estos días, los flujos se mantendrán pequeños y aleatorios simplemente con la intención de probar el código en el microcontrolador cuando se encontrara en modo *sleep*.

1.6. Organización de la tesis

Este trabajo coloca los antecedentes dentro del capítulo 2, para presentar una definición de lo que implica un sistema IOT.

Seguido de un capítulo completamente destinado a aspectos relacionados con la energía solar, principalmente a los parámetros que definirán al modelo radiativo que se utiliza como método para la estimación del recurso solar (en una superficie inclinada), aunque también se abordan temas relacionados a los colectores solares como su eficiencia y su balance térmico. En este mismo capítulo se aborda la teoría que se utilizará a momento de llevar a cabo la metodología de calibración para nuestro panel solar como sensor de irradiancia solar.

Posteriormente, en la capítulo numero 4, se muestra el montaje y experimentación a detalle de la metodología empleada para la calibración de los sensores. También se muestra el dimensionamiento fotovoltaico para la autonomía de del sistema IOT junto con con la instrumentación implementada para el control de la carga y suministro

de energía al microcontrolador, para posteriormente mostrar el circuito completo de toda la electrónica empleada. Después, se presenta la descripción y características de la aplicación web que se desarrolla para este trabajo, donde se describen las características y componentes de la aplicación. Finalmente se muestra el montaje de la instalación del colector solar para su operación y prueba de eficiencia.

Por último, en el capítulo 5 muestra los resultados obtenidos en la experimentación, implementación del equipo y los resultados de la aplicación web conseguida, realizando sus respectivas observaciones y análisis, así como inconvenientes presentados, para posteriormente proceder con las conclusiones del trabajo.

2. Antecedentes

2.1. Internet de las cosas (IOT)

Con los continuos avances en tecnología, el internet de las cosas (IOT por sus siglas en ingles) está llegando al punto de florecer como una red informática global ubicua donde todos y todo estará conectado a internet [33, 41].

Si bien, no existe una definición universal para el concepto de 'internet de las cosas', el término IOT es atribuido a Kevin Ashton (1999)[17], quien lo definió como la interconexión de objetos físicos del mundo real con la Internet[24]; aunque anteriormente a 1999 ya habían existido objetos que se conectaron a Internet como el caso de una máquina de bebidas en 1982 que informaba acerca de la temperatura en su interior[17].

Somayya Madakam(2015) resalta al IOT como una red abierta e integral de objetos inteligentes que tienen la capacidad de autoorganizarse, compartir información, datos y recursos, reaccionando y actuando ante situaciones y cambios en el entorno [37], [58].

En lo personal, me gusta expresar al IOT como el conjunto de un sistema embebido (aplicado a una cosa u objeto) con conexión a internet, comunicación inalámbrica y una aplicación (web o móvil) que permite operarlo y gestionarlo. Especialmente porque es una definición bastante coloquial pero muy descriptiva de lo que engloban los proyectos IOT y productos que se catalogan bajo esta categoría; además porque esta definición explica perfectamente este trabajo.

2.2. Estado del arte

Comenzaremos abordando la estructura o arquitectura de una sistema IOT con el fin de identificar cada uno de los componentes que lo conforman y así aplicarlo a nuestras necesidades. Actualmente se han propuesto varias arquitecturas para los sistemas IOT, la mayoría proponen cinco capas como la que se muestra en la figura 2.1, propuesta por [49].



Figura 2.1: Arquitectura básica de un sistema IOT

La propuesta de las capas de la arquitectura es la siguiente:

1. **Percepción:** Todas las aplicaciones de IOT deben poseer uno o más sensores para recopilar datos del entorno. Los sensores son componentes esenciales de los objetos inteligentes. Están limitados por factores como la alimentación eléctrica, la batería y la facilidad de implementación. Por otro lado los actuadores, son aquellos dispositivos mecánicos que pueden ejecutar una acción física como por ejemplo interruptores, turbinas o incluso ciertos dispositivos que puedan emitir señales electromagnéticas [21].
2. **Preprocesamiento:** Es llevado a cabo por alguna unidad de procesamiento que controle al objeto inteligente, se trata de la recopilación, cálculo y codificación de las mediciones hechas por los sensores. Todas estas funciones son llevadas a cabo por algún procesador (independientemente de su capacidad, tamaño o presentación). Aunque su presentación varía, los microcontroladores son la modalidad más extendida, ya que es un sistema autosuficiente con periféricos, memoria y un procesador diseñado para realizar tareas pequeñas y específicas. También podemos encontrar a los DSP (procesadores de señal digital por sus siglas en inglés), que son procesadores diseñados para aplicaciones que requieren altas tasas de cálculo. Por otro lado los FPGA (arreglo de compuertas programables en campo por sus siglas en inglés) es un dispositivo que contiene una red de puertas lógicas que pueden reconfigurarse rápidamente, lo que facilita la creación rápida de prototipos de sistemas embebidos.

En general, es difícil realizar un trabajo solo a partir del uso de un microprocesador pues requieren componentes adicionales para trabajar con ellos y por lo tanto encuentran sus aplicaciones cuando las tareas no son específicas y por lo tanto requieren muchos recursos, son complejos y costosos en comparación con los

microcontroladores, que son más simples y menos costoso. Los DSP se utilizan cuando es necesario implementar ciertos algoritmos en el hardware, por ejemplo, para el procesamiento de señales, lo que permite mayores velocidades de procesamiento al disminuir la carga del procesador. Los FPGA son hardware reconfigurable, muy costoso, que generalmente se utilizan en la etapa de diseño de nuevos productos, y cuando se requiere una reconfiguración en tiempo real, lo cual es un requisito inusual en la mayoría de las aplicaciones [51].

3. Comunicación: Esta parte se refiere a forma de establecer comunicación inalámbrica de los objetos IOT con otros ordenadores y servidores. Pueden comunicarse inalámbricamente a través de distintas tecnologías de radiofrecuencia como el Bluetooth, RFID (identificador de radiofrecuencia, por sus siglas en inglés) y zigbee (tecnología de radiofrecuencia que utiliza la banda de radio de 2,4 GHz), pero dependiendo de la tecnología que se emplee, la conectividad a Internet se debe tratar por separado o consecuentemente, ya que algunas tecnologías solo se comunican entre dispositivos del mismo tipo pero no establecen comunicación con un enrutador de Internet. Muchos dispositivos IOT utilizan el Wifi para usar el protocolo TCP/IP (protocolo de internet) [56] y conectarse a internet directamente de un punto de acceso, a pesar de que exige gran cantidad de energía y memoria. Hablar de los protocolos de comunicación y red como el TCP/IP suele ser extenso y complejo, ya que involucran sus propias capas, sin embargo resalta su capa de aplicación que generalmente se basa en HTTP, aunque hay otras alternativas que se han desarrollado para entornos de IOT, como MQTT (transporte de telemetría de cola de mensajes, por sus siglas en inglés) quien ha cobrado una gran relevancia para este entorno ya que es capaz de mantener la comunicación con varios dispositivos sin crear mucho tráfico. Entre los principales asuntos que el IOT aún debe tratar son el direccionamiento e identificación, comunicación de alta velocidad, bajo consumo energético y enrutamiento con bajo requerimiento de memoria [49, 25].
4. Middleware: Para aplicaciones tan heterogéneas, la solución es tener una plataforma de middleware, que abstraerá los detalles de las cosas para las aplicaciones. Su fin es actuar como un puente de software entre las cosas y el aplicaciones. En lo sistemas IOT, los middleware son principalmente los software que permiten la creación de servidores y bases de datos [10]. Este tipo de software son ejecutados por la computadora que actué de servidor.
5. Aplicación: Se refiere a la parte del software que es programada por los desarrolladores y se encarga de gestionar las acciones que llevarán a cabo los actuadores o también para consultar los datos almacenados o la información que ya se encuentre analizada. La aplicación en la parte que interactúa con los usuarios a través de computadores o *smart phones*.

2.2.1. Dispositivos en el mercado

Growatt Wifi-F es un dispositivo de monitoreo de estado para sistemas fotovoltaicos que se instala en el inversor (de la misma marca), ver figura 2.2. Su función principal es el envío de información técnica a un servidor (shine server) por medio de Wifi. A través de este dispositivo podemos conocer la potencia a la que se encuentra operando el conjunto fotovoltaico, la producción de energía eléctrica, temperatura en el inversor, factor de potencia, resistencia de aislamiento, alarmas activadas, etc. [2]



Figura 2.2: Dispositivo Growatt Wifi [1]

Para el usuario, la consulta y visualización de datos se da mediante de una aplicación móvil, la cual se vincula al dispositivo Growatt Wifi-F. Con la aplicación se suele consultar la potencia instantánea y los datos históricos sobre la producción de energía eléctrica de un día, mes o año en específico.

Las características de este dispositivo son las siguientes:

Parámetro	Growatt Wifi-F
Protocolo estándar inalámbrico	802.11 b/g/n
Rango de frecuencia	2.4G~2.5G
Dimensiones	135/79/29 mm
Peso	63 g

Parámetros de Hardware	
Interface de datos	USB
Voltaje de operación	5V (+-5%)
Comunicación con el servidor	WiFi router (protocolo TCP/IP)
Rango de comunicación	100m
Intervalo de Trasnferencia de datos	5 minutos
URL del servidor	http://server-cn.growatt.com/
Corriente de operación	1A

Cuadro 2.1: Ficha técnica de Growatt Wifi-F [2]

Otro producto IOT que encontramos en el mercado son los focos LED wifi, que se encuentran ampliamente comercializados y fabricados por distintas compañías, como por ejemplo el de la marca Steren, el cual requiere un consumo de 10 W para su operación. Para utilizar todas las funciones que este producto ofrece, el foco se vincula

a una aplicación para smartphone (*Steren Home*), desde la cual podemos controlar el apagado y encendido del foco, la intensidad de la luz emitida, el color de la luz y programar un horario de uso (ver figura 2.3) [15].

Un tercer producto que podemos destacar es el enchufe inteligente de la marca *Magic Hue*, al igual que los focos LED wifi, existen varias versiones de este producto de acuerdo a la empresa que lo oferta. A través de la aplicación móvil *Magic Home* este enchufe inteligente es útil para apagar, encender y temporalizar dispositivos conectados al toma corriente como por ejemplo ventiladores, lámparas, televisores, etc. Además es posible vincular uno o varios enchufes a un mismo celular. Este producto tiene la capacidad de controlar dispositivos que trabajen con potencias máximas de hasta 1.2kW y cuando no tiene una carga conectada consume menos de 0.3 W.[40]



Figura 2.3: a) Foco LED wifi. [15] b) Enchufe inteligente wifi.[8]

Todos los productos IOT mencionados anteriormente cumplen con algunas características técnicas en común, como por ejemplo, un mismo rango de frecuencia y un mismo protocolo de comunicación; en este caso todos los dispositivos usan el canal de 2.4 GHz aunque pueden llegar a utilizar la frecuencia 5 GHz, también cumplen con el protocolo estándar IEEE 802.11 b/g/n, y por consiguiente cumplen varios niveles del protocolo TCP/IP, otorgándoles la capacidad de mantener una comunicación con otros dispositivos y servidores mediante enrutadores y la red de Internet. Es por ello que un producto de esta naturaleza está estrechamente relacionado con alguna aplicación, ya sea web o nativa de smart phone, con la que el usuario es capaz de interactuar. Así mismo, podemos apreciar que todos estos productos se alinean con la arquitectura presentada en el estado de arte y que nos sirven de modelo para enfocar sus capacidades en un sistema de monitoreo para un colector solar.

3. Energía solar

En este capítulo revisaremos los conceptos necesarios para desarrollar partes fundamentales de este trabajo. Se comienza con la geometría solar, enfocándonos en superficies inclinadas, que nos resultará útil para presentar las ecuaciones que definen el índice de claridad, la estimación de la radiación solar horaria, las relaciones entre la radiación difusa, directa y global, la utilidad y el modelo radiativo empleado; a su vez, estas definiciones nos permitirán seguir un método que evalúa el rendimiento mensual de nuestro sistema de alimentación fotovoltaico autónomo, destinado a solventar las necesidades energéticas del microcontrolador y sensores seleccionados. También, los ángulos solares presentados nos ayudarán a trabajar con las ecuaciones que se usarán en los experimentos de corrección para nuestra celda solar habilitada como sensor de irradiancia solar.

Por otro lado, se abordará el concepto de eficiencia y tipos de colectores solares, pues se aprovechará el sistema IOT para obtener la curva de eficiencia del dispositivo termosolar ocupado.

3.1. Geometría solar para superficies inclinadas

Como sabemos, la radiación generada en el interior del Sol está compuesta básicamente por radiación gama y rayos X. Sin embargo, la radiación que recibe la Tierra proviene de la fotosfera del Sol, compuesta principalmente por radiación UV, visible e infrarroja a una potencia promedio de 1360 W/m^2 . [3]

Puesto que la irradiancia que recibe algún segmento de superficie en la Tierra depende del área que proyecta esa superficie contra la dirección de los rayos incidentes [31], a continuación describiremos las ecuaciones que definen los ángulos de la trayectoria aparente del sol en el cielo, donde nos enfocaremos especialmente a las que están relacionadas con superficies inclinadas, como los colectores solares y paneles solares, que son nuestro objeto de estudio.

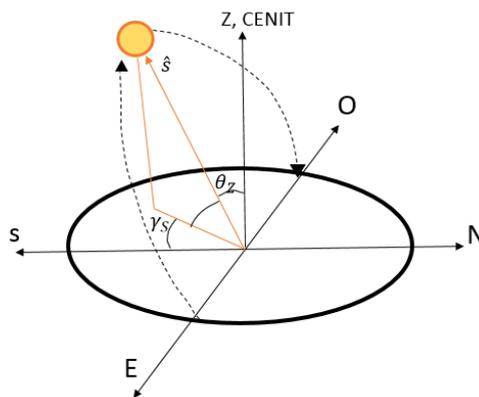


Figura 3.1: Geometría solar en el plano horizontal.

Es bien sabido que la trayectoria del sol puede describirse mediante dos ángulos coordenados, el azimutal (γ_s) y el cenital (θ_z). Pero para definir estos dos ángulos es necesario establecer dos sistemas de referencia tal y como se aprecian en la figura 3.2, donde se observa como el sistema de referencia (x,y,z) se encuentra rotado por el ángulo de la latitud (ϕ). Una perspectiva distinta del sistema de (x,y,z) se tiene en la figura 3.1

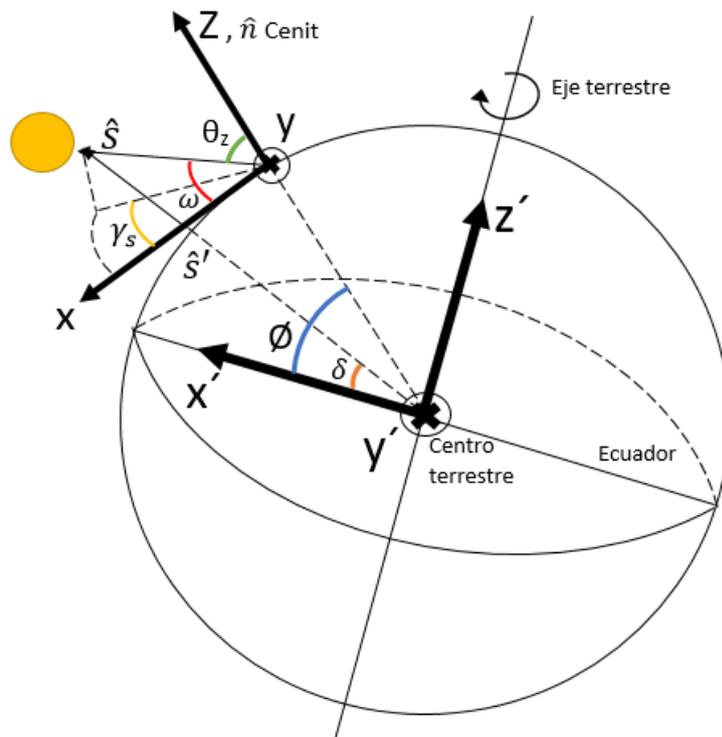


Figura 3.2: Sistemas de referencia (x,y,z) , (x',y',z') y ángulos solares. [32]

El sistema formado por (x', y', z') utiliza el eje polar de la Tierra y la línea ecuatorial, mientras que el sistema (x, y, z) utiliza un plano sobre la superficie de la Tierra, estableciendo el eje z mediante la vertical cenital y el eje x con orientación Norte-Sur; ambos sistemas tienen una componente en paralelo (y') y (y), que es la dirección Este-Oeste.[32]

Utilizando el sistema (x', y', z') , podemos obtener el ángulo cenital, θ_z , mediante la multiplicación entre el vector solar al mediodía (\hat{s}_m') y una matriz de rotación con el ángulo horario (ω). El resultado es el vector solar (\hat{s}'), con el cual se lleva a cabo un producto punto con el vector normal (\hat{n}) a la superficie, obteniéndose el coseno de θ_z

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\delta \sin\phi \quad (3.1)$$

Donde ϕ es la latitud y δ es a declinación.

En el caso del ángulo azimutal, γ_s , se utiliza el sistema (x, y, z) , con el cual se define el vector solar (\hat{s}) en términos del ángulo cenital y azimutal, donde se busca igualar su componente $(0,y,0)$ con $(0,y',0)$ del sistema (x', y', z') , con el fin de llegar a

una expresión del seno del ángulo azimutal. Por otro lado, para llegar a la expresión del coseno del ángulo azimutal, se multiplica el vector \hat{s}' con una matriz de rotación del ángulo de latitud menos 90° ($\phi - 90^\circ$). Con ambas expresiones se obtiene un cociente que es la tangente del ángulo azimutal. [13], [54]

$$\gamma_s = \arctan \left(\frac{\sin\omega \cos\delta}{\sin\phi \cos\omega \cos\delta - \cos\phi \sin\delta} \right) \quad (3.2)$$

Recordando que es necesario verificar el cuadrante en que se encuentra el ángulo azimutal a través de un par de criterios, pues puede ser necesario sumar o restar 180° .

A continuación, observamos en la figura 3.3 lo ángulos involucrados en una superficies inclinada.

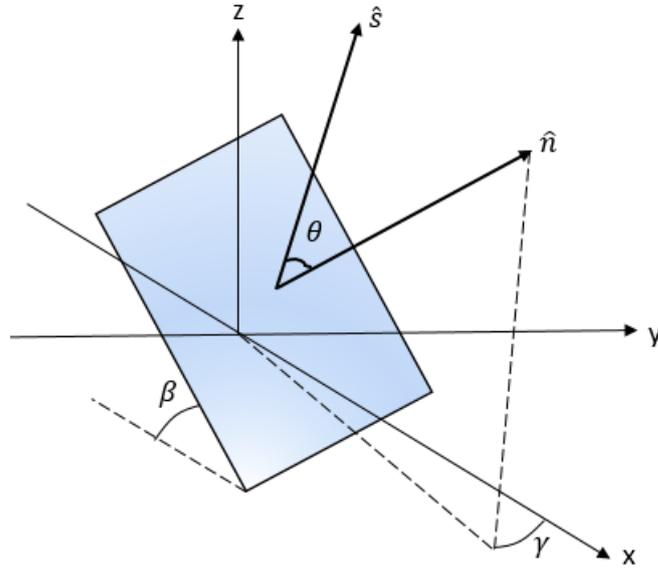


Figura 3.3: Sistemas de referencia (x,y,z) , (x',y',z') y ángulos solares.

Donde β es el ángulo de inclinación respecto a la superficie horizontal; \hat{n} es el vector normal a la superficie inclinada; γ es su ángulo azimutal, es decir, su desviación respecto al sur y θ es el ángulo entre el vector solar y el vector normal. Definiendo el vector normal y el vector azimutal de la superficie inclinada, tenemos las siguientes expresiones

$$\hat{n} = (\sin\beta \cos\gamma, -\sin\beta \sin\gamma, \cos\beta) \quad (3.3)$$

$$\hat{s} = (\sin\phi \cos\omega \cos\delta - \cos\phi \sin\delta, -\sin\omega \cos\delta, \cos\phi \cos\omega \cos\delta + \sin\phi \sin\delta) \quad (3.4)$$

La expresión del vector solar, \hat{s} , proviene de la multiplicación del vector solar (\hat{s}') con la matriz de rotación $\phi - 90^\circ$ que se utiliza para encontrar la expresión del coseno

del ángulo azimutal. Ambas ecuaciones son multiplicadas mediante producto punto, dando como resultado la expresión del ángulo θ

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin\beta \cos\gamma \sin\phi \cos\omega \cos\delta - \sin\beta \cos\gamma \cos\phi \sin\delta \\ &+ \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \cos\delta + \cos\beta \cos\phi \cos\omega \cos\delta \\ &+ \cos\beta \sin\phi \cos\delta \end{aligned} \quad (3.5)$$

La ecuación (3.5) aplicada a un colector con orientación hacia el sur (En nuestro caso al estar en hemisferio Norte), es decir con un ángulo azimutal igual a cero, $\gamma = 0^\circ$, llegamos a la siguiente expresión luego de algunas simplificaciones

$$\cos\theta = \sin\delta \sin(\phi - \beta) + \cos\delta \cos(\phi - \beta) \cos\omega \quad (3.6)$$

Así, obtenemos una ecuación similar a la definición del ángulo cenital para superficies horizontales, mostrada en la ecuación (3.1), pues bastaría igualar β a cero para obtener la misma expresión. Así mismo, si el ángulo β lo igualamos al ángulo de latitud ϕ , obtendríamos $\cos\theta = \cos\delta \cos\omega$ lo que nos indica que un colector inclinado β tiene el comportamiento de una superficie horizontal a una latitud $(\phi - \beta)$, por ello generalmente orientamos los sistemas solares fijos a la latitud del sitio para que se comporten como si estuviesen en el Ecuador y se tenga la mayor captación de la energía solar a lo largo del año. Por otra parte es importante considerar que el ángulo horario (w) esta en función del tiempo solar (E) como se muestra en la ecuación (3.7)

$$w = 15^\circ (E - 12) \quad (3.7)$$

También es importante mencionar que para un colector inclinado el amanecer y anochecer puede diferir con uno colocado horizontalmente, pues el sol puede incidir por detrás del colector a ciertas horas del día. Para conocer el ángulo de anochecer (ω_c) utilizamos la ecuación (3.6) y utilizamos un ángulo $\theta = 0^\circ$, por lo que obtenemos

$$\cos\omega_c = -\tan\delta \tan(\phi - \beta) \quad (3.8)$$

Aunque no precisamente el anochecer llega a ocurrir a lo mostrado en la ecuación (3.8), como en algunos periodos de invierno, pues puede ocurrir que aún no caiga la noche y el sol esté incidiendo por la parte posterior de la superficie inclinada. Por lo tanto para saber cuál es el ángulo de anochecer, podemos comparar el ángulo ω para una superficie horizontal y una inclinada.

$$\omega_c = \min \{ |\cos^{-1} [-\tan\delta \tan\phi]|, |\cos^{-1} [-\tan\delta \tan(\phi - \beta)]| \} \quad (3.9)$$

3.2. Irradiación extraterrestre diaria

Es importante conocer la radiación extraterrestre, ya que es útil para el cálculo de otras radiaciones y relaciones fundamentales para el diseño y evaluación de sistemas solares, ya sean fotovoltaicos o fototérmicos; la ecuación (3.10) nos sirve para conocer la irradiación extraterrestre de un día específico o la irradiación extraterrestre diaria promedio mensual seleccionando un día característico (H_o). [28]

$$H_o = \frac{24 \times 3600 \times G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \times \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (3.10)$$

Donde G_{sc} es la constante de radiación solar (1360 W/m^2) y n es el número de día.

También es posible obtener la radiación extraterrestre diaria por medio de curvas graficadas en función de la latitud, ya que la ecuación anterior solo es útil para latitudes entre 60° y -60° . Es importante mencionar que el cálculo de la irradiación es referida a una superficie horizontal. [13]

La versión horaria (I_o) de la ecuación (3.10) se expresa mediante la siguiente ecuación. [28]

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \times \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi (\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (3.11)$$

3.3. Índice de claridad

El índice de claridad promedio mensual (\overline{K}_T) se define como la razón entre la radiación diaria promedio mensual en una superficie horizontal (\overline{H}) y la radiación extraterrestre diaria promedio mensual (\overline{H}_o), ecuación (3.12). [19]

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_o} \quad (3.12)$$

Los equivalentes de la anterior ecuación pero con radiaciones diarias u horarias, nos entregan el índice de claridad diaria ($K_{T,d}$) y horaria ($K_{T,h}$) respectivamente.

Este índice nos brinda información para relacionar la fracción de radiación difusa promedio mensual con la radiación promedio mensual, además, gracias a los trabajos de Liu y Jordan (1960) se puede obtener la fracción de los días u horas que presentan cierto valor de $K_{T,d}$ o $K_{T,h}$ a través de curvas acumulativas de frecuencia. [13], [9]

El caso especial del índice de claridad horario promedio mensual puede ser encontrado por la siguiente expresión.

$$\overline{K}_{T,h} = \frac{\overline{I}}{\overline{I}_o} = \frac{r_t \overline{H}}{r_d \overline{H}_o} = \frac{r_t \overline{K}_T}{r_d} \quad (3.13)$$

\overline{I} es la radiación horaria promedio mensual en una superficie horizontal e \overline{I}_o es la radiación extraterrestre horaria promedio mensual. Los valores de los coeficientes r_t y r_d son tratados en la siguiente sección.

3.4. Estimación de radiación horaria a partir de la radiación diaria

Para generar estimaciones de radiación solar horaria a partir de datos de radiación diaria promedio mensual existen gráficos generalizados que relacionan la radiación horaria (I) y la radiación diaria (H), y que se encuentran en función de la duración del día y de las horas transcurridas desde el mediodía solar, es decir, del ángulo del amanecer (ω_c) y del ángulo horario (ω). La expresión (3.14) nos muestra esta razón entre radiaciones (r_t). [13]

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos\omega) \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180} \cos\omega_s} \quad (3.14)$$

Donde

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (3.15)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (3.16)$$

También existen curvas generalizadas en función de los mismo parámetros pero ahora relacionando la radiación difusa horaria (I_d) y la radiación difusa diaria (H_d), asumiendo que I_d/H_d es igual a I_o/H_o . Estas curvas, de la razón entre radiaciones difusas (r_d), están descritas por la igualdad (3.17). [13]

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180} \cos\omega_s} \quad (3.17)$$

Tanto (3.14) como (3.17) deben ser aplicadas para horas medias.

3.5. Razón de radiación entre una superficie horizontal y una inclinada

Existe un factor geométrico para conseguir la fracción de radiación incidente en un superficie inclinada respecto a una horizontal y está determinado simplemente por la razón entre la radiación global sobre la superficie inclinada y la radiación global sobre la superficie horizontal [19].

3.5.1. Razón en radiación directa

Este factor geométrico depende de cómo se esté tratando la dirección de la radiación. En el caso de la radiación directa, es correcto tratarla como anisotrópica por lo que se vuelve algo sencillo su cálculo, tal y como lo muestra la ecuación (3.18). También podemos usar esta expresión si decidimos tratar a la radiación global como anisotrópica, pero esto no es realmente conveniente [30, 50]. La razón de radiación directa (R_b) esta dada por el cociente entre la radiación directa en una superficie inclinada ($G_{b,T}$) y la radiación directa (G_b):

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos\theta}{G_{b,n} \cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (3.18)$$

$G_{b,n}$ es la radiación directa medida a una superficie normal al vector solar (\hat{s}).

3.5.2. Razón en radiación horaria promedio mensual

Mencionamos el caso especial en el que necesitamos esta razón para una radiación horaria promedio mensual en un superficie inclinada (\bar{R}_h), ya que nos será útil en el en la ecuación (3.24) y en la evaluación fotovoltaica [13]. Definida por la razón entre la radiación horaria promedio mensual en una superficie inclinada (\bar{I}_T) y la radiación horaria promedio mensual (\bar{I}).

$$\bar{R}_h = \frac{\bar{I}_T}{\bar{I}} = \frac{\bar{I}_T}{r_t \bar{H}} \quad (3.19)$$

3.6. Componente difusa y directa de radiación mensual

Conocer la fracción de la radiación que es difusa es una parte fundamental para el cálculo de la irradiación total incidente para superficies horizontales o inclinadas. Existe una relación entre el índice de claridad \bar{K}_T y la razón de radiación difusa (\bar{H}_d) con la radiación global en una superficie horizontal (\bar{H}); esta relación puede

ser graficada en función del índice de claridad; la respectiva función es descrita en la ecuación (3.20) y (3.21), dependiendo del ángulo ω_s promedio del mes.[23], [30]

Para $\omega_s \leq 81,4^\circ$ y $0.3 \leq K_T \leq 0.8$

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1,391 - 3,560\overline{K}_T + 4,189\overline{K}_T^2 - 2,137\overline{K}_T^3 \quad (3.20)$$

Para $\omega_s > 81,4^\circ$ y $0.3 \leq K_T \leq 0.8$

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1,311 - 3,022\overline{K}_T + 3,427\overline{K}_T^2 - 1,821\overline{K}_T^3 \quad (3.21)$$

También existen estas relaciones en función de los índices de claridad diario y horario para sus respectivas radiaciones. No obstante, al igual que para la sección 3.4, no son procesos exactos debido a la intermitencia que pueda ocurrir en la fracción de días con un bajo índice K_T . [13]

3.7. Utilidad

La utilidad, se suele usar para predecir el rendimiento a largo plazo de instalaciones solares. Antes de introducir el concepto de utilidad es necesario definir qué es el nivel crítico de radiación; el nivel crítico es la radiación mínima a la que la instalación solar produce una cantidad de energía igual a las pérdidas o a la carga, según sea el caso.[20]

Entonces podemos definir a la utilidad, Φ , como la fracción de la radiación total que se recibe a una intensidad superior al nivel crítico. Por lo tanto si conocemos esta fracción podemos obtener el total de energía útil[42]. Cuando el objeto de estudio es el almacenamiento, el nivel crítico corresponde a la carga del sistema fotovoltaico, pues solo será útil la energía excedente una vez que se satisfaga la demanda.

Encontrar la utilidad de un determinado sistema requiere de gráficos acumulativos de la razón I_T/\overline{I}_T trazados con base a datos de por lo menos 30 días, posteriormente se integra y se obtiene el gráfico de Φ en función de la razón del nivel crítico, X_c , que es la razón entre la energía del nivel crítico de radiación y la energía entregada por la instalación solar (ver ecuación (3.25)); es un proceso laborioso y no siempre se dispone de los datos necesarios [42]. Sin embargo, existe un método generalizado de Liu y Jordan (1963) en el que se determina Φ en función del índice de claridad y la inclinación del sistema, además como las curvas de Φ son prácticamente indiferentes de la hora del día, también resulta casi indiferente utilizar datos de radiación diaria u horaria (Whillier, 1953). Liu y Jordan descubrieron que la forma de las curvas Φ no dependía en gran medida de la reflectancia del suelo o de los factores de forma de la radiación difusa, en consecuencia, fue posible construir un conjunto de curvas para un valor fijo de \overline{K}_T . [13]

Clark et al. (1983) presenta un algoritmo que representa estas curvas generalizadas, utilizando la siguiente expresión [13], [6]

$$\Phi = \begin{cases} 0 & \text{Si } X_c \geq X_m \\ \left(1 - \frac{X_c}{X_m}\right)^2 & \text{Si } X_m = 2 \\ \left| |g| - \left[g^2 + (1 + 2g) \left(1 - \frac{X_c}{X_m}\right)^2 \right]^{1/2} \right| & \text{Cualquier otro} \end{cases} \quad (3.22)$$

Donde

$$g = \frac{X_m - 1}{2 - X_m} \quad (3.23)$$

$$X_m = 1.85 + 0,169 \frac{\bar{R}_h}{\bar{K}_{T,h}^2} - 0,0696 \frac{\cos\beta}{\bar{K}_{T,h}^2} - 0,981 \frac{\bar{K}_{T,h}}{\cos^2\delta} \quad (3.24)$$

$$X_c = \frac{\bar{L}_i}{A_{pv} \cdot \bar{\eta}_i \cdot I_{T,i}} \quad (3.25)$$

Donde X_c es el nivel crítico de radiación, L_i [Wh] es la carga de energía demandada en un determinada hora, A_{pv} [m^2] es el área del dimensionamiento fotovoltaico, η es la eficiencia horaria del panel solar, $I_{T,i}$ [Wh/m^2] es la radiación horaria de la superficie inclinada (En este caso del dimensionamiento fotovoltaico), X_m es un parámetro que mide la razón de la radiación horaria máxima recibida en una superficie inclinada y la radiación promedio horaria en una superficie inclinada, mientras que g es un parámetro definido por el método de Clark et al. (1983) para obtener la utilidad.

3.8. Radiación en superficies inclinadas

Ya que la irradiancia que incide sobre un colector solar fijo difiere a la irradiancia global horizontal y a la irradiancia directa normal, debemos corregir los datos de irradiancia para una correcta estimación.

Si bien, ya se ha mencionado que la ecuación (3.18) nos entrega la relación de radiación directa entre una superficie horizontal y una inclinada, aún nos falta tratar las demás contribuciones radiativas para tener un modelo radiativo completo. Es necesario abordar cada contribución por separado ya que algunas pueden estar en función de la nubosidad y la claridad atmosférica.

3.8.1. Contribuciones radiativas

Existen diversos modelos para el cálculo de la radiación incidente en una superficie inclinada (\bar{I}_T), y cada uno se distingue por la dirección que le otorga a cada una de

las distintas contribuciones radiativas. En realidad la principal diferencia entre modelos radica en la radiación difusa, ya que se le puede atribuir un comportamiento anisotrópico ó isotrópico, por lo que ciertos modelos pueden volverse muy complejos; sin embargo, el que se utiliza en este caso es relativamente simple pero la literatura lo recomienda si el colector o sistema fotovoltaico (o térmico) tiene un ángulo azimutal menor a 15° [13]. Nuestro modelo de radiación se presenta en la expresión (3.26), se caracteriza por una sola radiación difusa (isotrópica), una radiación directa (anisotrópica) y una radiación reflejada del suelo (isotrópica); este modelo parte de Liu Jordan (1963). [16], [30], [13]

$$\bar{I}_T = (\bar{H} r_t - \bar{H}_d r_d) R_b + \bar{H}_d r_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \bar{H} \rho_g r_t \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (3.26)$$

El término ρ_g es el albedo. La expresión (3.26) es útil para conocer la radiación horaria promedio mensual en una superficie inclinada. El primer término se refiere a la radiación directa, por lo que es posible utilizar la ecuación (3.18). El segundo término se refiere a la radiación difusa, mientras que el tercera a la radiación por albedo, ambos términos solo utilizan el coeficiente de estimación horaria y su dirección no es importante.

Sabiendo que $\bar{H} = \bar{H}_o \bar{K}_T$ y dividiendo la ecuación (3.26) por \bar{H} obtenemos la expresión (3.27), la cual tiene la ventaja de tener la irradiación difusa por la irradiación global por lo que es posible calcular esta razón por medio de (3.20) y (3.21). [13]

$$\bar{I}_T = \bar{K}_T \cdot \bar{H}_o \left[\left(r_t - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} r_d \right) R_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} r_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g \cdot r_t \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \right] \quad (3.27)$$

3.9. Conversión termosolar

3.9.1. Balance térmico en dispositivos termosolares

A través de un modelo simple podemos establecer un balance energético general para dispositivos de conversión termosolares. En este balance un colector solar representa el volumen de control, en el cual, la energía que entra es igual a la energía que sale; así, la energía entrante es igual a la energía solar incidente en el colector y la energía que sale es igual a la energía útil más todas las pérdidas. El balance expresado en término de potencia queda la siguiente manera:

$$\dot{Q}_u = A_c G (\tau\alpha) - A_c U_L (T_p - T_{amb}) \quad (3.28)$$

Donde \dot{Q}_u es la potencia neta en [W], $A_c [m^2]$ es el área del colector, T_p es la temperatura promedio del colector y T_{amb} es la temperatura ambiente. A la derecha, el primer término se refiere a la potencia de la irradiancia solar global por unidad de

superficie, G [W], influenciada por los factores ópticos, τ y α (transmisividad y absorptividad); como segundo término a la derecha tenemos la potencia producida por las pérdidas por transferencia de calor, con U_L siendo un coeficiente global de pérdidas tanto convectivas como radiativas por unidad de área [$W/(K \cdot m^2)$].

3.9.2. Eficiencia de los colectores solares

Podemos definir la eficiencia de un colector solar como el cociente entre la potencia de la energía solar que recibe y la energía útil que se puede obtener, la cual corresponde a la energía transferida al fluido térmico, esto se interpreta como [7]

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G} = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c G} \quad (3.29)$$

Donde Q_u es la potencia transferida al fluido en , A_c es el área del colector y G es la irradiancia sobre el colector por unidad de superficie.

La ecuación (3.29) también puede expresarse en función de la temperatura del fluido cuando entra y sale del colector. Donde \dot{m} es el flujo másico, en [Kg/s], que fluye a través del colector; C_p es el calor específico del fluido expresado en [J/kgK]; $T_{f,o}$ es la temperatura del fluido a la salida del colector y $T_{f,i}$ es la temperatura de fluido a la entrada del colector.

Apoyándonos de la expresión (3.28) y del concepto de eficiencia en el colector, η , definido en la ecuación (3.29), encontramos la siguiente equivalencia [52]

$$\eta = F \left[(\tau\alpha)_p - \frac{U_c}{G} (T_{fp} - T_{amb}) \right] \quad (3.30)$$

Evidentemente, es muy complicado conocer la temperatura promedio del dispositivo termosolar (T_{fp}), por lo que en la expresión (3.30) se simplifica este término, sustituyendo la temperatura promedio del colector por la temperatura promedio del fluido; sin embargo, esta simplificación requiere un factor de compensación para evitar que la equivalencia llegue a ser incorrecta, por lo anterior, F es el factor compensador de eficiencia que expresa la existencia de una resistencia térmica entre el fluido y el material que compone la placa absorbadora del fluido, a su vez, se considera la misma resistencia térmica entre la placa absorbadora y el ambiente.

La igualdad (3.30) suele utilizarse para capturar el rendimiento de un colector solar y trazar una relación lineal; otra forma de ver esta ecuación es utilizando dos simples parámetros de la siguiente forma

$$\eta = a + b \left(\frac{\Delta T}{G} \right) \quad (3.31)$$

Donde a y b son parámetros a determinar y ΔT es la diferencia de temperatura del agua a la entrada y salida del colector. Mediante la medición de variables físicas en

estado estacionario se obtiene la eficiencia con (3.29) y el cociente $(T_{fp}-T_{amb})/G$, posteriormente se consiguen los coeficientes por regresión lineal, siendo el parámetro b la pendiente de la recta y a su ordenada al origen.

3.9.3. Clasificación de los dispositivos termosolares de baja temperatura

La clasificación de los dispositivos termosolares de baja temperatura se compone por los conocidos colectores solares, su clasificación es la siguiente:

1. Captador solar plano: Se trata de colectores cuya superficie plana es negra absorbente selectiva y contiene tubos en contacto a sus superficie por donde circula el fluido de calentamiento; son dispositivos sin concentración. Existen dos modalidades:
 - Descubierta: Alcanzan temperaturas menores a los 40°C , son de menor rendimiento pero su son de bajo costo y requieren de poco mantenimiento, generalmente están fabricados de polietileno de color negro para evitar que las pérdidas sean excesivas pero que permitan el calentamiento deseado. [22]
 - Protegido: Son una de las tecnologías más conocidas, se caracterizan por poseer una cubierta transparente para evitar para evitar pérdidas convectivas y aumentar el efecto invernadero en su interior, además su base están cubiertos por poliuretano para evitar pérdidas conductivas con la superficie en la que se instalan por lo que adquieren una forma distintiva de caja[22]. Estos dispositivos son capaces de alcanzar los 90°C al mediodía.
2. Captadores de tubos de vacío: También cuenta con dos modalidades, ambas sin concentración:
 - Flujo directo: Al igual que los colectores solares planos, contienen una superficie absorbente selectiva con tubos adyacentes por los que circula el agua pero con la característica de que cada uno de estos tubos se ubican dentro de un segundo tubo transparente que permite dos ventajas, la primera es de que permiten un efecto invernadero y la segunda es que dan a posibilidad de encontrarse al vacío que en consecuencia evita las pérdidas térmicas no radiativas, por lo que estos dispositivos son de mayor eficiencia que los colectores planos, por ello también son de las tecnologías predominantes en el sector residencial y comercial. [43]
 - Pipe Heat: Consiste en un tubo cerrado en el cual se introduce un fluido de propiedades específicas. Cuando el Sol incide sobre el absorbente adosado al tubo, el fluido se evapora y absorbe calor (calor latente). Como gas asciende sobre el líquido hasta lo alto del tubo donde se sitúa el foco frío. Ahí se condensa y cede su calor. [46] , [22]
3. Captador parabólico compuesto (CPC) : Visualmente son parecidos a los colectores planos cubiertos, pero los tubos por donde circula el agua presentan un

receptor parabólico por lo que la concentración solar es mayor a 1, esto aumenta la temperatura en el fluido de calentamiento además de la cubierta transparente y las aislaciones térmicas [48]. Su concentración máxima se ve limitada por el ángulo de los rayos que no inciden en el foco de la parábola del CPC, aunque en la práctica suelen llegar a una concentración de 5 ya que sus dimensiones se hacen muy grandes.

3.9.4. Normatividad para los colectores termosolares

A nivel internacional la principal referencia es la norma ISO 9806:2013 “Solar Energy-Solar Thermal Collectors-Test Methods”; y en México, la norma vigente es la NMX-ES-001-NORMEX-2005 “Energía Solar-Rendimiento Térmico y Funcionalidad de Colectores Solares para Calentamiento de Agua-Métodos de Prueba y Etiquetado” [22]; el objetivo de la norma mexicana es establecer los métodos de prueba para determinar el rendimiento térmico y las características de funcionalidad de los colectores solares que utilizan como fluido de trabajo agua, comercializados en los Estados Unidos Mexicanos.[39]

Los métodos descritos en la norma mexicana se enfocan a pruebas de presión hidrostática, determinación constante en el tiempo, ángulo de incidencia, entre otras; en este caso solo nos centraremos en la prueba de rendimiento térmico, la cual se encuentra en la sección 9.6 de su publicación en el diario oficial de la federación.

Dentro del apartado 9.6.4, se especifica la eficiencia en condiciones estables que corresponde a las ecuaciones (3.29) y (3.30), previamente mencionada. Por ello es importante conocer la constante de tiempo del colector solar para saber los intervalos de tiempo apropiados y el tiempo de respuesta del colector, cuya prueba también se describe en la sección 9.6. La representación gráfica de la eficiencia térmica debe estar en función de $(T_{fi} - T_{amb})/G$ para obtener una línea recta o casi recta [12]. En dispositivos termosolares con concentración, la irradiancia se multiplica por el coeficiente de concentración.

3.10. Medición del recurso solar a través de una celda fotovoltaica

En ocasiones, para evaluar y diseñar instalaciones solares se utiliza información estándar proveniente de estaciones solarimétricas cercanas y colocadas en sitios que garanticen confiabilidad y seguridad de operación (normalmente operadas por instituciones gubernamentales o educativas); a través estas fuentes de información, se pueden utilizar modelos matemáticos que extrapolan las mediciones desde las estaciones solarimétricas y posteriormente calcular la radiación incidente en el colector o superficie inclinada. Una base de datos frecuentemente consultada es la del sitio web de la NASA en su programa *Surface meteorology and Solar Energy (SSE)*, basada en un mínimo de 10 años de información tanto satelital como de mediciones en Tierra; además de ser de libre acceso. [22]

Actualmente estimar la irradiancia solar local por medio de estas fuentes de información es considerablemente buena, sin embargo, sería ideal contar con dispositivos de medición en el sitio que se busca evaluar o del colector que se busca monitorear, pero como sabemos, esto podría llegar a ser poco práctico y costoso. Por ello, en este trabajo se buscará medir el recurso solar a través de una celda fotovoltaica y utilizarlo como sensor de medición irradiancia solar.

Para ello, conectaremos una carga resistiva muy pequeña (menor a 1 ohm) a nuestra celda solar y mediremos la corriente eléctrica que se obtiene. La señal de tensión medida será proporcional a la irradiancia ya que podría asumirse que estamos trabajando en cortocircuito al mantener una carga tan pequeña[18].

3.10.1. Influencia del espectro solar sobre una celda fotovoltaica

La distribución espectral de la radiación solar varía durante el día, por ejemplo, al amanecer y atardecer el espectro solar tiende a conformarse por luz visible con longitudes de onda larga (asociadas al color rojo); mientras que al mediodía predomina la luz visible con longitudes de onda más cortas (asociadas al color azul) [34]; debido a lo anterior, y aunado a que los dispositivos fotovoltaicos no responden de la misma manera a cada longitud de onda que conforma el espectro solar, conviene tratar esta variable si buscamos utilizar una celda solar como sensor de irradiancia solar.

La figura 3.4 ejemplifica la forma del espectro solar a diferentes masas de aire absoluta (AM_a por sus siglas en inglés), así como la respuesta espectral normalizada de algunos dispositivos fotovoltaicos. Por ejemplo, en la celda de c-si, si incidiéramos radiación a cada longitud de onda, una por una, a la misma potencia, notaríamos que la celda entrega la mayor potencia alrededor de los 990 nm, así podríamos tomar como referencia esta respuesta y poder normalizar la potencia entregada a cada longitud de onda incidente.

Si bien, es difícil conocer la respuesta espectral exacta de una celda solar al igual que conocer el espectro solar a una determinada hora y localidad, la organización ASTM (*American Society for Testing and Materials*) y King et.al (1997) presentan un método estandarizado para compensar la sensibilidad espectral de un dispositivo fotovoltaico que pretende ser utilizado como sensor [36, 53].

Este método parte de la ecuación (3.32), la cual compara la respuesta normalizada de un piranómetro y una celda solar a un determinado espectro solar contra las respuestas de ambos dispositivos a un espectro solar correspondiente a un AM_a de 1.5.

$$M = \frac{\int_a^b E(\lambda) R_t(\lambda) d\lambda}{\int_c^d E(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_c^d E_o(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda}{\int_a^b E_o(\lambda) R_t(\lambda) d\lambda} \quad (3.32)$$

De la ecuación anterior, M es el coeficiente de corrección, $E(\lambda)$ es el espectro solar de la irradiancia durante la prueba de calibración; $E_o(\lambda)$ es el espectro solar de la irradiancia a un AM_a igual a 1.5; $R_t(\lambda)$ es la respuesta espectral del dispositivo a

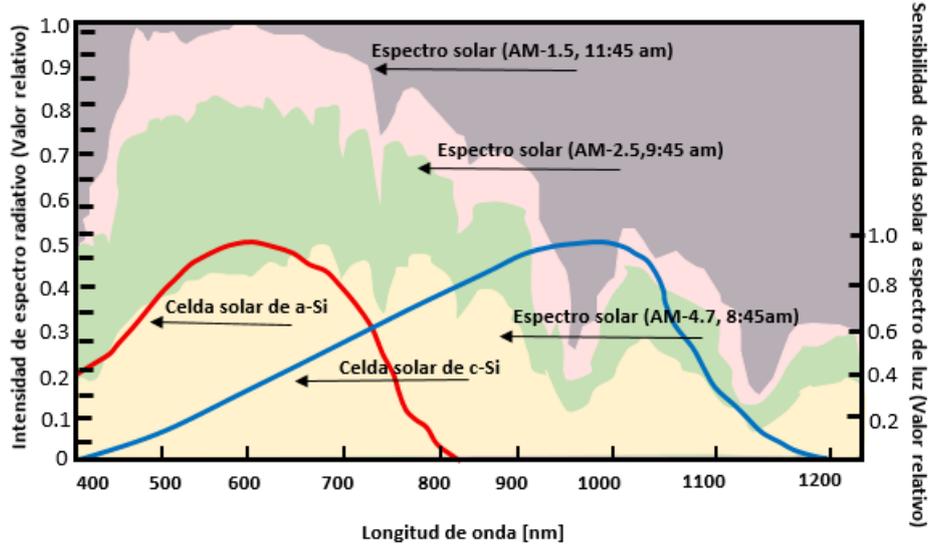


Figura 3.4: Comparación del espectro solar a diferentes horas del día y respuesta relativa de distintos dispositivos fotovoltaicos.

calibrar; $R_r(\lambda)$ es la respuesta espectral del piranómetro de referencia; a,b son los límites de integración que cubre el rango de radiación donde la celda solar tiene respuesta, mientras que c y d son los límites donde el piranómetro responde.

La expresión (3.32) requiere valores en función de la longitud de onda, por lo que se vuelve poco práctica. En su lugar, el método de ASTM, propone una segunda ecuación que facilita el cálculo del parámetro M, mediante una función denominada *Air Mass Function* ($f_1(AM_a)$) que, como su nombre lo indica, es una función cuya variable independiente es la masa absoluta de aire (AM_a). Ambas expresiones aprovechan la relación que tiene el espectro solar con la masa de aire atmosférica que atraviesa la luz solar a una determinada hora. La función $f_1(AM_a)$ se expresa de la siguiente forma [35]

$$M \approx \frac{I_{sc_t}}{E^*} \cdot \frac{E_o^*}{I_{sc_{to}}} = f_1(AM_a) \quad (3.33)$$

Donde E_o es la irradiancia total obtenida por piranómetro, bajo condición de incidencia normal y $AM_a=1.5$; E^* es la irradiancia total obtenida por piranómetro durante prueba de calibración, bajo la condición de incidencia normal; $I_{sc_{to}}$ es la corriente en corto circuito del dispositivo a calibrar bajo condiciones de incidencia normal y $AM_a=1.5$; I_{sc_t} es la corriente de corto circuito durante prueba de calibración, bajo condición de incidencia normal.

De esta forma, mediante la expresión (3.33), obtenemos una curva normalizada que nos muestra el comportamiento de $f_1(AM_a)$ en función de la masa absoluta de aire, donde a cada masa de aire absoluta corresponde un único espectro solar, que también corresponde a un único coeficiente de corrección por influencia espectral.

Para conocer el valor de AM_a podemos recurrir a las ecuaciones (3.34), (3.35) y (3.36), donde se requiere el cálculo del ángulo cenital y se compensa la altitud del lugar de

calibración [35].

$$AM_o = \frac{P}{P_o} \cdot AM \quad (3.34)$$

$$AM = [\cos(\theta_z) + 0,5057 \cdot (96,080 - \theta_z)^{-1,634}]^{-1} \quad (3.35)$$

$$\frac{P}{P_o} \approx e^{-0,0001184 \cdot h} \quad (3.36)$$

Donde h es la altitud del sitio medición y P/P_o no es más que un factor de corrección, determinada por la relación de presión atmosférica a nivel local con respecto a la presión atmosférica a nivel del mar.

3.10.2. Influencia del ángulo solar de incidencia

Debido a la rugosidad, forma y reflectancia que puede tener una celda solar, el ángulo en que incide la luz solar puede provocar diferencias entre los dispositivos fotovoltaicos. Específicamente, estas diferencias suceden con la radiación directa, pues es la mayor contribución radiativa y su dirección es siempre conocida. A pesar de que en la radiación difusa también influye el ángulo en que incide sobre una superficie es difícil determinar la contribución de la radiación difusa en cada una de las posibles direcciones, además de que esto dependería del albedo y objetos de alrededor; por lo que es más práctico considerar la radiación difusa como isotrópica y uniforme en cada todas direcciones, así solo nos enfocamos con la radiación directa.

La influencia provocada por el ángulo de incidencia tratada en este apartado no debe confundirse con el factor coseno.

King et.al (1997) propone un método para corregir la influencia que tiene el ángulo de incidencia, primero es necesario usar una regresión multilínea y utilizar el modelo de la ecuación (3.37), este modelo requiere de un mismo nivel de irradiancia en las mediciones, así como una distribución del espectro solar en estado estacionario. También es necesario hacer la respectiva corrección espectral a la medición en corto circuito. Para conocer la componente difusa nos apoyamos de la ecuación (3.38) [35, 36].

$$\frac{I_{sc}}{f_1(AM_a)} = C_1 \cdot \frac{G_b}{G} + C_2 \left(\frac{G_d}{G} \right) \quad (3.37)$$

$$G_d = G_T - G_{b,T} \cdot \cos(\theta) \quad (3.38)$$

El ángulo de incidencia, θ , puede ser calculada mediante la ecuación (3.5). G_d es la irradiancia difusa, G_T es la irradiancia global en la superficie inclinada, $G_{b,T}$ es la irradiancia directa en superficie inclinada y C_1 y C_2 son coeficientes de ajuste para la regresión multilínea.

Con los coeficientes obtenidos de (3.38) (C_1 y C_2), podemos obtener una curva para corregir la influencia por el ángulo de incidencia, esto mediante la función $f_2(\theta)$, definida por

$$f_2(\theta) = \frac{I_{sc}(AM_o = 1,5) - C_2 \cdot \frac{G_{b,T}}{G_T(G_T=1000)}}{C_1 \cdot \frac{G_{b,T}}{G_T(G_T=1000)} \cdot \cos(\theta)} \quad (3.39)$$

Como ya se ha señalado, en $f_2(\theta)$ solo influye la irradiancia directa, mientras la irradiancia difusa se mantiene prácticamente constante.

3.11. Predicción en rendimiento mensual en sistemas fotovoltaicos

Los métodos de diseño para de sistemas PV son muy variados, en nuestro caso presentamos dos distintos, por un lado usamos el método propuesto por Duffie and Beckman para evaluar el mes crítico y por otro lado nos apoyamos de una simulación hecha por el software PVsyst en su versión de prueba. Ambos sirven para predecir el rendimiento del sistema fotovoltaico a largo plazo.

Primero presentamos el método mostrado en Diffie and Beckman, basado en Siegel et al. (1981), Evans (1981) y Clark et al. (1984). Para este método se requiere establecer el sitio geográfico, estimar un perfil de carga horaria promedio mensual, tener un perfil de temperatura horaria promedio mensual, disponer de datos de radiación diaria promedio mensual para una superficie horizontal, un prediseño como el recién mostrado y suponer que se está operando en el punto óptimo de potencia (al igual que todos los métodos analíticos).

Para este cálculo se busca obtener la energía eléctrica horaria producida por el sistema fotovoltaico, por lo que la energía total producida en un día es la suma de las horarias. La producción de este día característico del mes funciona para obtener la energía diaria promedio mensual. Para este trabajo se elije como día característico el 21 de Diciembre ya que resulta ser el día menos favorable del mes (y del año) en cuanto a irradiancia solar.

La energía horaria promedio entregada por el sistema se rige por la siguiente ecuación:

$$\bar{E}_i = \bar{\eta}_i \cdot n \cdot A \cdot \bar{I}_T \quad (3.40)$$

Donde \bar{E}_i es la energía horaria promedio entregada; $\bar{\eta}_i$ es la eficiencia promedio horaria del panel solar a utilizar; n es el número de paneles solares; A es el área de un solo panel solar e \bar{I}_T es la irradiación horaria promedio a una superficie con una inclinación igual a la del arreglo fotovoltaico.

Para conseguir la irradiación horaria promedio mensual se utiliza la ecuación (3.27), en consecuencia requerimos calcular otros parámetros. Primero se debe conseguir la

irradiación extraterrestre diaria promedio mensual de la ecuación 3.10 y así obtener el índice de claridad promedio mensual. Una vez conocido el índice de claridad es posible estimar la fracción de la componente difusa a través de la ecuación 3.20 ó 3.21 según lo determine el ángulos de amanecer ω_s .

Posteriormente, y para cada intervalo de hora, debemos obtener los coeficientes r_t y r_d de las ecuaciones 3.14 y 3.17, para poder trabajar con irradiaciones horarias a partir de la radiación diaria; así como calcular la razón de radiación directa mediante 3.18.

La eficiencia horario η_i , en realidad solo es fundamental si queremos ser muy exactos, pues en los cálculos posteriores solo basta con usar la eficiencia nominal del panel para todas las horas. Sabiendo esto, ahora resulta sencillo encontrar la energía producida en cada hora, \bar{E}_i , recordando que el área y el número de paneles provienen del prediseño. Ahora bien, necesitamos buscar la utilidad horaria, para ello calculamos el coeficiente de nivel crítico (ec. 3.25) y luego ocupamos las ecuaciones 3.22 a 3.24. Este último paso nos permite encontrar la fracción de la energía producida que se destina a la carga, $\bar{E}_{L,i}$, y la fracción que resulta en excedente, $\bar{E}_{exc,i}$.

$$\bar{E}_{L,i} = \bar{E}_i \Phi \quad (3.41)$$

$$\bar{E}_{exc,i} = \bar{E}_i (1 - \Phi) \quad (3.42)$$

La suma de las energías horarias a la carga y las energías excedentes horarias nos entregan la energía diaria a la carga promedio mensual (\bar{E}_L) y la energía diaria excedente promedio mensual (\bar{E}_{exc}) respectivamente.

Hasta ahora estos cálculos solo aplican para las horas con luz solar, en las cuales se produce toda la energía eléctrica posible, y nos han sido útiles para distinguir si el sistema es capaz de suplir la demanda de la carga en esas horas, pero ahora también nos interesa saber si la energía excedente es suficiente para almacenarse en las baterías y proveer de energía en las horas sin luz.

Un primer parámetro a considerar es la expresión (3.43). Que es la relación entre la energía suministrada a la carga (\bar{L}), en horas con luz solar, y la energía que demanda la carga en todo el día \bar{L} , ambas magnitudes en valores diario promedio mensual.

$$f_o = \frac{\bar{E}_L}{\bar{L}} \quad (3.43)$$

La ecuación (3.43) todavía no considera algún almacenamiento y no puede ser mayor a 1, ya que no hay suministro por la noche. Solo puede tener valor igual a 1 si la carga demanda energía exclusivamente en horas diurnas y el dimensionamiento provee la suficiente energía.

En consecuencia, si consideramos almacenamiento, la energía suministrada tenderá a 1; a la fracción de energía diaria promedio mensual suplida considerando almacenamiento le denominaremos f , mientras que a la diferencia entre f_o y f le denominaremos Δf .

Debido a la capacidad de almacenamiento que se puede suplir a la carga y a que f no puede adquirir un valor mayor a uno, podemos conocer el máximo valor (Δf_{max}) que Δf podría alcanzar:

$$\Delta f_{max} = \min \left[(1 - f_o), \frac{\eta_D B_c}{\bar{L}} \right] \quad (3.44)$$

Donde η_D es la profundidad de descarga de la batería y B_c es la capacidad de almacenamiento en Wh. También es conveniente definir el coeficiente d_o , que sirve para conocer cuando energía hay disponible para ser almacenada (\bar{E}_{exc}) en función de la energía que demanda la carga.

$$d_o = \frac{\bar{E}_{exc}}{\bar{L}} \quad (3.45)$$

Con los límites establecidos, ahora podemos conocer el valor de Δf mediante una relación empírica de Clark et al. (1984):

$$\Delta f = \frac{d_o + \Delta f_{max} - [(d_o + \Delta f_{max})^2 - 4 P d_o \Delta f_{max}]^{1/2}}{2 P} \quad (3.46)$$

Dónde

$$P = 1,315 - 0,1059 \frac{f_o \bar{L}}{B_c} - \frac{0,1847}{\bar{K}_T} \quad (3.47)$$

Lo que se busca con (3.46) y (3.47), es encontrar un Δf lo más realista posible, considerando la estadística que involucra utilizar el índice de claridad. Lo más conveniente es que Δf sea similar a Δf_{max} y que en consecuencia Δf más f_o sea 1. Cuando dimensionamos el sistema pensando en tener respaldo de baterías por algunos días, generalmente Δf_{max} es determinada por $(1-f_o)$ y Δf alcanza un valor cercano a Δf_{max} .

3.12. Comentario de capítulo

Este capítulo entrega información útil para la estimación de radiación solar en un superficie, la cual resulta importante en el diseño y dimensionamiento de instalaciones solares fotovoltaicas pues la mayoría de software comercial como *Pvsyst* o *Helioscope* llevan a cabo cálculos numéricos para estimar el rendimiento y producción de energía eléctrica que podría entregar un determinado sistema fotovoltaico (ya sea autónomo o conectado a la red), por ello resulta beneficioso estudiar una base teórica que sea similar a los procesos de estos programas y que pueda calcularse manualmente, tratando de evitar que los programas de computadora se vuelvan una simple caja negra.

4. Desarrollo e implementación

En este capítulo se describe a detalle la ejecución de las tareas que se han establecido en la metodología del capítulo 1. Se muestran los sensores, microcontrolador y componentes electrónicos habilitados. También se presenta la experimentación realizada para calibrar los sensores para poder integrarse al microcontrolador, cuya alimentación es autónoma, por lo que también se describe su dimensionamiento fotovoltaico y el control de carga que requirió para suministrar adecuadamente la energía almacenada en las baterías. Por otro lado este capítulo se complementa con la revisión de los requerimientos de software para la construcción y programación de la aplicación web.

4.1. Control lógico y sensores

Como control lógico se seleccionó la placa NodeMCU, ya que cuenta con el chip ESP8266 con 16 pines digitales y su módulo Wifi. Además de que es posible programarla mediante la IDE de Arduino. Las características técnicas de este microcontrolador pueden observarse en el apéndice. Ver la figura 4.1.

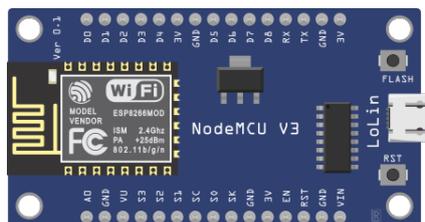


Figura 4.1: Placa nodeMCU.

4.1.1. Sensores

En cuanto a los sensores se debe cubrir la medición de nuestras variables de interés en un entorno expuesto a condiciones ambientales: irradiancia solar, temperatura ambiente, temperatura y caudal de agua con temperaturas de hasta 100°C. Las características técnicas generales de los sensores seleccionados también aparecen en el apéndice.

Sensor de temperatura

Para la medición de temperatura se decidió utilizar el DS18B20 (figura 4.2), pues solo ocupan un pin digital (más de un DS18B20 puede utilizar el mismo pin), y sus respectivos pines de alimentación (3 V y GND - 0 V), esto gracias a su comunicación 1-Wire. Se optó solo usar el DS18B20 tanto para la medición temperatura ambiente

como para temperatura del agua en el colector, ya que cuentan con protección para trabajar en ambas condiciones.

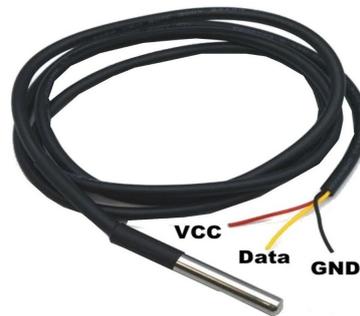


Figura 4.2: Sensor DS18B20.

Sensor de flujo de agua

Para conocer el caudal de agua se utilizó un caudalímetro del tipo YF-S201 (figura 4.3). Este dispositivo tiene como principio de funcionamiento al efecto Hall, que emite un pulso eléctrico con cada giro, en cual puede ser leído por el microcontrolador. Mantiene una relación lineal entre volumen de agua y cantidad de pulsos emitidos, manteniendo un constante de calibración (recomendable) de 7.5, pero también se recomienda llevar a cabo una calibración, pues no es un instrumento de precisión [44].



Figura 4.3: Caudalímetro YF-S201 [44].

Sensor de irradiación y corriente eléctrica

Ya que para utilizar un panel solar como sensor de irradiancia solar requiere de mantener un funcionamiento en el cercano corto circuito, debemos tener una carga resistiva muy pequeña conecta al panel para lograr esta condición y así medir la corriente que se produce, aprovechando la relación prácticamente lineal que se crea entre nivel de irradiación solar y corriente eléctrica.

El panel fotovoltaico seleccionado es de la marca Steren, cuyo voltaje a circuito abierto es de 5V y su corriente de corto circuito es de 160 mA; es de tipo policristalino y sus dimensiones se aprecian en la figura 4.4.

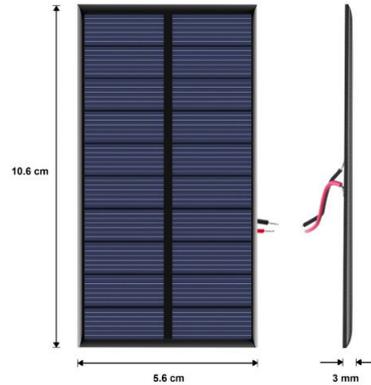


Figura 4.4: Panel solar Steren 0.8 W [14].

La medición de la corriente y la carga resistiva se simplifica al utilizar un INA219, ya que su modulo contiene una resistencia de 0.1 ohm que le sirve para medir voltaje y corriente en un circuito y a la vez nos es útil para usarla como carga del panel solar. El INA219 tiene una resolución de 12 bits y con ello podemos medir hasta 4 mV y 0.7 mA en un rango de 0 a 3 A. Ver figura 4.5.

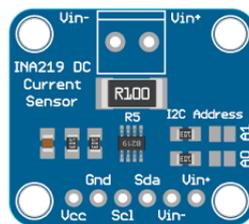


Figura 4.5: Módulo INA219.

4.2. Calibración de panel solar para medir irradiancia

Para esta calibración se realizó una comparación directa entre las lecturas proporcionadas por un piranómetro y la corriente de cortocircuito de un panel solar de 0.8W.

Para calibrar nuestro panel solar se formó un circuito compuesto por el nodeMCU y un módulo INA219 para medir la corriente entregada por la celda fotovoltaica. Como se utilizó de un piranómetro para comparar la corriente en corto circuito, se utilizó un multímetro para medir el voltaje entregado por este dispositivo; la constante de medición del piranómetro de acuerdo al fabricante es de $10.2\mu V \cdot m^2 / W$.



Figura 4.6: Medición horizontal. Orientación sur. 1 Piranómetro, 2 Gabinete del circuito y sensor de radiación.

Tal y como se muestra en la figura 4.6, ambos dispositivos fueron colocados con una orientación sur, de tal forma que se llevaban a cabo mediciones cada 10 minutos a lo largo del día (comenzando y finalizando con una radiación que incidiera equitativamente sobre los dispositivos, ya sea muy temprano al amanecer o al atardecer); las mediciones se hicieron con una frecuencia de 0.5 Hz, en un intervalo de 2 minutos a menos de que la nubosidad o el nivel de radiación no presentaran cambios significativos dentro de ese intervalo, esto para evitar una mayor dispersión de los datos recopilados, como herramienta para determinar si la radiación era fluctuante se utilizó el criterio propio mediante la lectura del multímetro, pues si se observaba que el voltaje presentaba variaciones constantes no se consideraba una buena medición, en general, el registro del voltaje en las cada una de las mediciones no presentaban cambios dentro de los intervalos de 2 minutos.

Para corroborar las lecturas por parte del multímetro, en todos los eventos de medición se fotografió el valor mostrado por el multímetro y en caso de lecturas fluctuantes menores a los 0.2 mV, se tomó captura de cada uno de los cambios y se realizó una media ponderada para determinar el nivel de radiación medido.

Las mediciones para en este experimento se realizaron por cinco días, en los cuales también se registraron irradiaciones con cielo nublado pero que mantenían una irradiación constante, pues se buscaba evitar pocas fluctuaciones ya que la resolución de la medición mediante el piranómetro es de 0.102 V/W, esto a consecuencia de que no se contaba con instrumentación de alta precisión para medir el voltaje en el pi-

ranómetro y que enviara lecturas de datos a la computadora en tiempo real, lo que provocaba que no hubiera una lectura a pares entre la celda solar y el piranómetro. Estas mediciones serían complementadas con los datos adquiridos en los siguientes experimentos.

4.2.1. Prueba del espectro solar

Como se mencionó en el capítulo 3 sobre energía solar, en esta calibración se buscó una función para compensar un posible error causado por la variación del espectro solar a lo largo del día.

Para lograrlo fue necesario emplear un sistema de seguimiento solar con el fin de evitar la intervención de otras variables como el ángulo de incidencia o un nivel de irradiancia no uniforme y constante sobre los dispositivos; de esta forma la única variable sería el cambio del espectro solar a lo largo del día. En este experimento solo se registraron mediciones con cielo limpio.

Las lecturas se realizaron cada 10 minutos a lo largo del día en intervalos de 30 segundos. De igual forma las mediciones se vieron limitadas por la puesta y salida del sol en el sitio, así como de la presencia de obstáculos y edificaciones cercanas.

La instrumentación empleada en esta prueba y la adquisición de datos fue exactamente la misma que se empleó para las mediciones en una superficie horizontal.

Dentro de los días destinados a este experimento, uno se llevó a cabo dentro de las instalaciones del IER-UNAM, aprovechando el heliotropo de la plataforma solar, ver figura 4.7. Para asegurar un correcto seguimiento, y que la irradiación incidente fuese de manera normal a la superficie de los dispositivos, la prueba fue asistida por un gnomon colocado a un costado de los instrumentos de tal forma que al posicionar el heliótropo no nos mostrara sombra alguna. Cabe resaltar que el uso de gnomon fue indispensable, ya que el seguimiento se tuvo que hacer de forma manual debido a problemas técnicos entre el seguidor y el ordenador con sistema SCADA correspondiente.

En el montaje, que se aprecia en la figura 4.7, se observa al módulo solar con su respectiva carcasa (conteniendo el respectivo circuito de medición), al piranómetro y al gnomon.

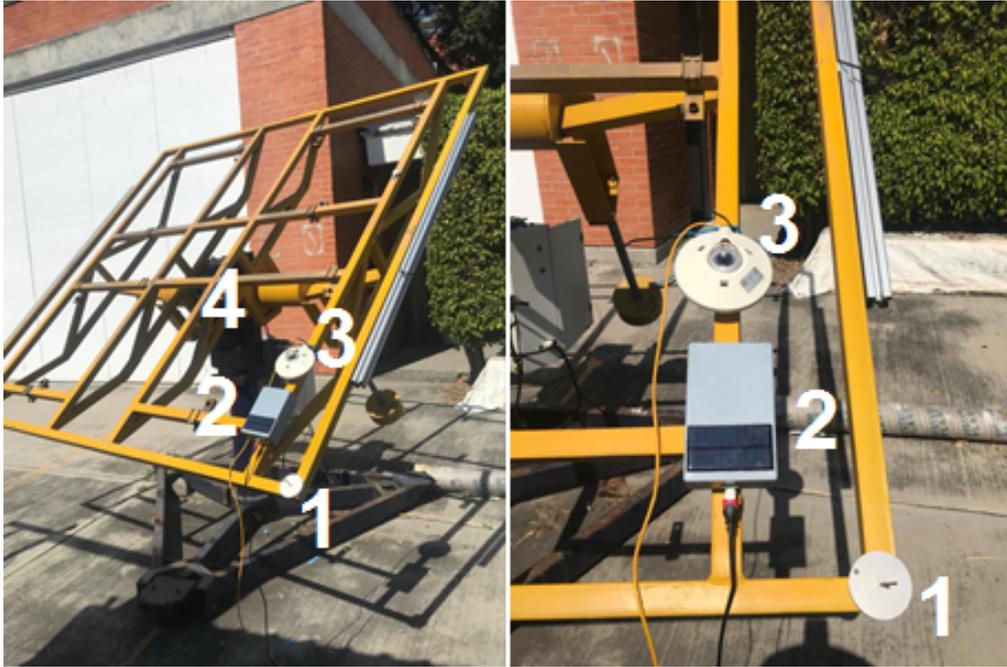


Figura 4.7: Montaje de la instrumentación en el heliótropa. 1 gnomon, 2 gabinete de instrumentación con sensor de radiación, 3 piranómetro, 4 heliótropa.

La razón de haber utilizado un solo día la estructura del heliótropa, es debido a que los edificios suponían un obstáculo importante pasando las 16:00 horas; además de las pocas condiciones existentes para permanecer mucho tiempo en las instalaciones de institución a consecuencia de la pandemia.

En sustitución de la experimentación con el heliótropa, se continuó la prueba improvisando un seguimiento manual, en este caso, el gnomon mantiene un papel fundamental para el seguimiento del sol.

A continuación, en la figura 4.8 se muestra el montaje de la instrumentación.

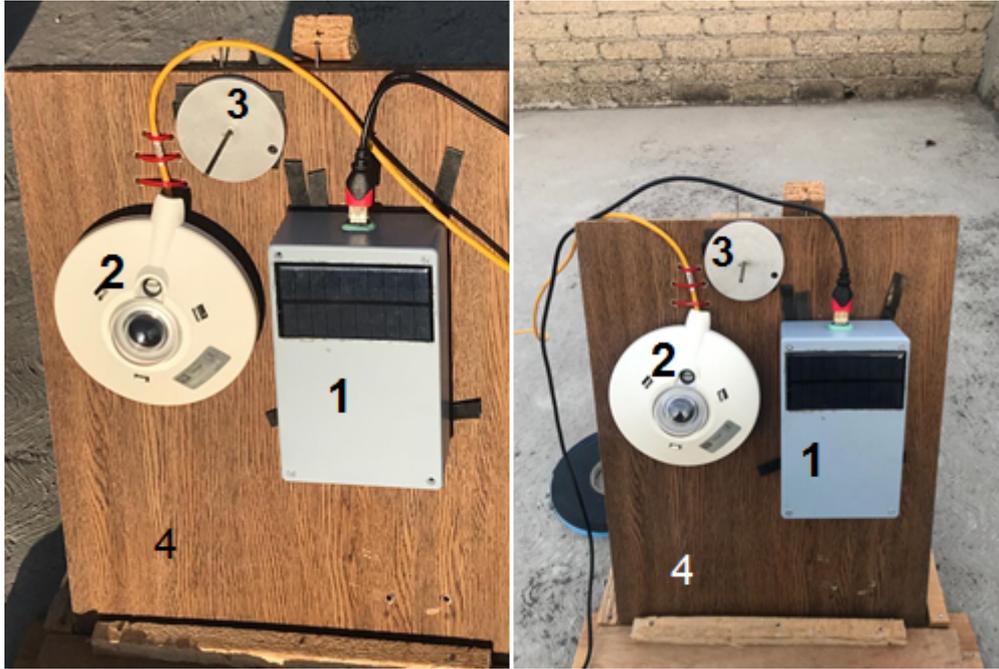


Figura 4.8: Experimento con seguimiento manual. 1 Gabinete con sensor de irradiancia, 2 Piranómetro, 3 Gnomon, 4 Seguidor manual.

Para seguir en movimiento aparente del sol en el cielo, es necesario dos grados de libertad, en este caso la superficie donde se encuentran los dispositivos es madera cuya parte posterior cuenta con dos columnas de clavos a distintas alturas con los cuales un par de columnas de madera sirven de soporte, de esta forma se controla la inclinación de la superficie para coincidir con la altura solar al momento de la medición. En cuanto al seguimiento del ángulo azimut, simplemente se giraba la estructura cada vez que se requiriera obtener lecturas, teniendo como referencia la sombra del gnomon.

Esta modalidad del experimento también se realizaba cada 10 minutos y utilizando la misma instrumentación y la misma forma de adquisición de datos anteriormente mencionada.

Como se ha mencionado en otros párrafos, en la figura 4.9 a), se muestra claramente un sombramiento no uniforme a pesar de estar en la parte superior del heliótopo y que en el momento de la fotografía la hora indicaba las 9:30 horas, por lo que un importante intervalo del día ya había transcurrido. El inciso b) de la misma figura evidencia el correcto seguimiento solar a lo largo del día, pues no se muestra ninguna sombra alrededor del gnomon.

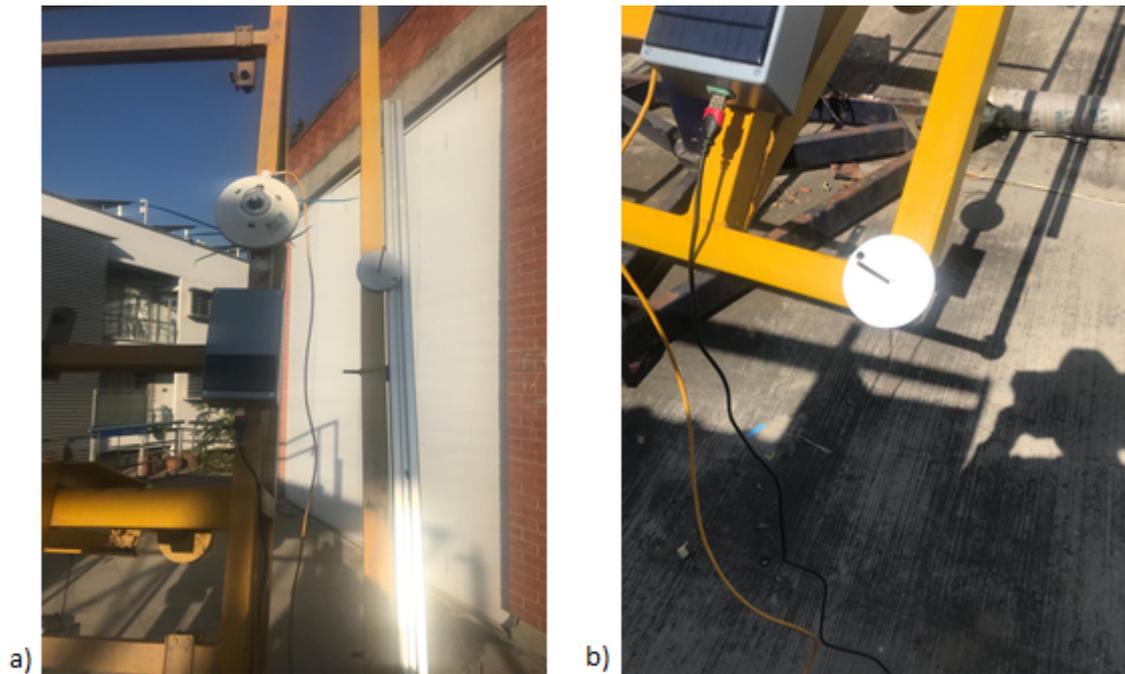


Figura 4.9: a) Sombra provocada por obstáculos en la plataforma solar del IER. b) Gnomon indicando incidencia solar normal a su superficie

4.2.2. Prueba del ángulo de incidencia

Un segundo factor de corrección se buscó en el ángulo de incidencia de la irradiación en el panel fotovoltaico, es importante resaltar que esta prueba no se refiere a un error provocado por el factor coseno si no a la diferencia que pudiera obtenerse respecto a un piranómetro a distintos ángulos de incidencia de los rayos solares, diferencias provocadas por la reflectancia y la rugosidad de la superficie fotovoltaica.

En este caso, se buscaba mantener una irradiación y un espectro solar constante, dejando como única variable el ángulo de incidencia, es evidente que este ángulo es con respecto a la irradiación directa, dejando de lado a la irradiación difusa.

Esta prueba se llevó a cabo un día, en el cual solo se realizaron tres muestras y solo pudo realizarse en las instalaciones del IER con el heliotropo, como se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.10: Experimento con control manual en heliótropo. 1 Inclinómetro, 2 Gabinete con sensor de irradiancia, 3 Piranómetro, 4 Gnomon

En la figura 4.10 se aprecia el montaje de este ensayo, el cual es similar al experimento anterior. De igual forma, el gnomon es utilizado para orientarnos respecto a la posición del sol e incidir los rayos solares de manera normal a la superficie. A partir de esta posición, se comenzó a variar el ángulo de incidencia en pasos de 10° hasta llegar a 60° (límite mecánica del heliótropo, aunque en una muestra se consiguió llegar a los 70°), en cada uno de los pasos se realizaron mediciones en el piranómetro y la celda a calibrar. Debido a fallos mecánicos en el heliótropo, fue necesario modificar la pendiente de la superficie de manera manual, apoyándose de un inclinómetro para establecer los 10° de diferencia entre mediciones.

Debido a que se buscaba mantener como única variable el ángulo de incidencia, esta práctica debió ejecutarse lo más rápido posible para evitar que otras variables sufrieran cambios; cada muestra, que incluye 7 mediciones, requirió de aproximadamente 30 minutos en completarse.

Esta metodología requirió de la medición de la irradiación directa; para ello se utilizó de la estación meteorológica del IER y con la ayuda de un código escrito en python se hizo un *scraping web* de la página de la estación, es así como se recopilaban los datos del sitio cada 10 segundos (tiempo que tarda la página en actualizarse) y se mandaban a documento en Excel para ser almacenados, este código se ejecutaba a en paralelo a la experimentación en la plataforma solar.

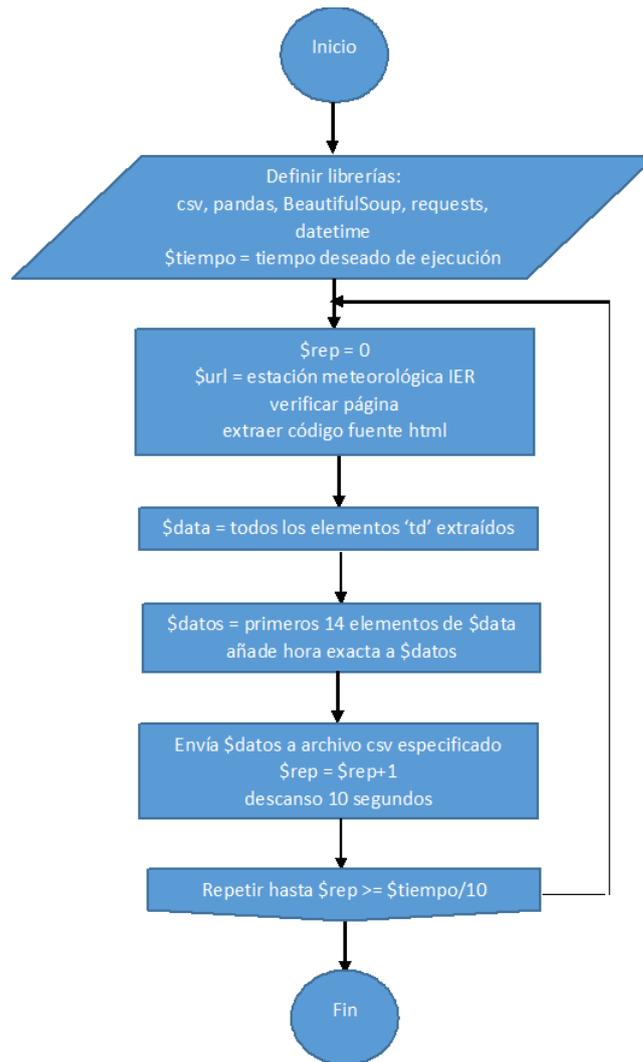


Figura 4.11: Diagrama de flujo empleado para *scraping web*

4.3. Calibración del caudalímetro

Anteriormente se mencionó que este sensor de flujo de agua posee una contante de calibración recomendada por el fabricante, igual a $7.5 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{Hz})$. Sin embargo, el fabricante también menciona que es oportuno hacer una calibración propia del dispositivo.

Para resolver este paso, se habilitó equipo de la institución, aprovechando el equipo refrigerante del horno solar de la plataforma de experimentación, pues posee un flujómetro confiable y muestra sus lecturas a través de una pantalla LCD ubicada en el mismo equipo.

El procedimiento propuesto fue sencillo, primero se ensambló el caudalímetro YF-S201 a una manguera conectada a una toma de agua; posteriormente el sensor se incorporó al circuito de agua del equipo calibrador, de tal forma que ambos dispositivos mantuvieran el mismo caudal, posteriormente se hizo la correspondiente compa-

ración entre mediciones. Para evitar el desperdicio de agua, a la salida del flujómetro se colocaron cubetas.

La adquisición de datos se hizo por puerto USB y la IDE de Arduino, por lo que fue necesario usar una placa de Arduino uno, y mediante un sencillo código se llevaron a cabo las lecturas proporcionadas por el caudalímetro. La alimentación del YF-S201 también fue proporcionada por la misma placa.

El control del flujo de agua fue manual, pues al conectar la manguera a la toma de agua y equipo de medición, la única manera de influir en el caudal era girando la válvula de paso, además de esperar que la presión fuese constante. Por esta misma razón, no se pudieron llevar a cabo mediciones por debajo de los 2 L/min, pues tanto el flujómetro como el YF-S201 mostraban caudales muy intermitentes. Un esquema general del sistema montado se muestra en la figura 4.12.



Figura 4.12: Esquema del sistema montado para calibración del caudalímetro. 1 Sistema de enfriamiento del horno solar, 2 Sensor YF-S201 a calibrar, 3 Arduino, 4 Ordenador, 5 Grifo de toma de agua, 6 Salida del agua.

4.4. Análisis del consumo energético y dimensionamiento fotovoltaico

Para volver autónomo al sistema IOT, primero estableceremos un perfil de cargas, estimando el consumo de un día promedio con base a las características del cuadro 4.1 y a las mediciones del consumo del microcontrolador y los sensores trabajando en conjunto.

Modo	Corriente [mA]	Voltaje [V]	Tiempo [min/día]	Energía [Wh]
Normal	240	5	138	2.76
Sleep	30	5	1242	3.10
Contínuo	240	5	60	1.20
Total				7.06

Cuadro 4.1: Consumo energético estimado

Para ello, se establecieron tres modalidades, pues se pretende que por cada 10 minutos que transcurren, el sistema IOT destina un minuto para entrar en modo normal, en este lapso se realizan mediciones en el colector y los datos son enviados al servidor local, es por ello, que el consumo de energía es elevado; mientras que 9 minutos son destinados para entrar en modo *Sleep*, durante esta modalidad el sistema IOT no hace mediciones ni envía algún dato al servidor, simplemente se mantiene alerta por si existe un flujo de agua distinto a cero, si el caudal no es cero el sistema IOT volverá en modo normal hasta que el flujo cese, si no es el caso y el flujo se mantiene cero entonces el sistema se mantendrá en *Sleep* hasta que transcurran los 9 minutos y se vuelva a repetir el ciclo, esta modalidad de mantenerse alerta nos es útil porque nos interesa saber la cantidad de agua caliente que se extrae del colector, de esta forma evitamos que el consumo de energía sea excesivo.

La tercera forma de operación es el modo continuo, es un caso especial del modo normal, pues se consideró que existirán partes del día donde será necesario mantener el modo normal de forma continua. En este caso se pensó en establecer una hora completa del día destinada a esta modalidad, por lo que este intervalo de tiempo será el de mayor exigencia energética. Este patrón de consumo es importante porque determinará la estructura del código que tendrá el microcontrolador, el diagrama de flujo de este código se muestra en la siguiente sección en la figura ??.

La distribución horaria de cada modo de operación del sistema IOT se encuentra a continuación

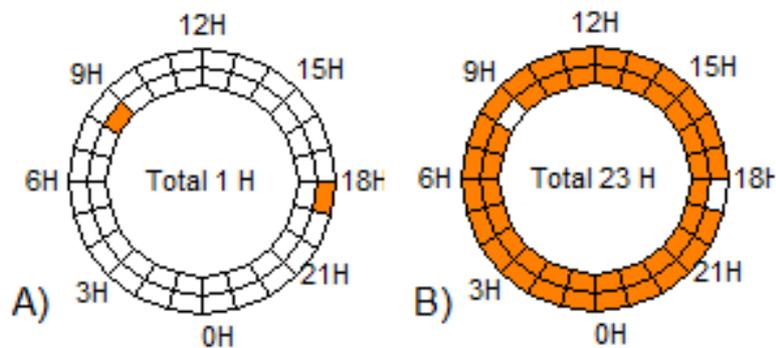


Figura 4.13: Distribución horaria del consumo. A)Horario estimado de consumo en modo continuo, B)Horario para el modo *sleep* y normal.

Con un consumo establecido ahora podemos hacer un prediseño sencillo que nos será útil más adelante para evaluar a largo el rendimiento de sistema fotovoltaico. Los resultados del prediseño se aprecian en la tabla 4.2.

Parámetro	Valor	
Energía requerida	7.06 [Wh/día]	
Irradiación a superficie horizontal	4.911 [kWh/m ² /día]	
Horas Solar Pico (HSP)	4.911 [h/día]	
Margen de seguridad	0.20	
Pot. requerida nominal	1.79 [W]	
	Autonomía	
Días autonomía	2.00	
Profundidad de descarga	0.70	
Voltaje Batería	3.70 [V]	
Capacidad Batería	5.45 [Wh]	1.47 [Ah]

Cuadro 4.2: Calculo de prediseño de dimensionamiento fotovoltaico autónomo

Utilizando los parámetros del prediseño, la evaluación del sistema mediante el método analítico muestra que la potencia y el almacenamiento son apenas suficientes para cubrir las necesidades mensuales de diciembre; sin embargo, utilizando el método simulado se encuentra que la demanda no se cubre en todos los meses (especialmente en meses de verano), por lo que se optó por aumentar la potencia a 4W ya que el software no cuenta con módulos con una potencia nominal menor a los 2W y el aumento mínimo de potencia debe ser de este valor. Lo anterior también obligó a modificar los valores para la evaluación analítica.

Aclarando lo anterior, los resultados de la evaluación del sistema fotovoltaico mediante el método analítico se presentan en la siguiente tabla, correspondiente al mes de diciembre y en Cuernavaca. Recordando que se sigue el método presentado en la sección 3.11, donde buscamos obtener la energía horaria entregada por nuestro dimensionamiento mediante la ecuación (3.40), además de obtener la fracción que es destinada a la carga y la que puede ser almacenada mediante las expresiones (3.41) y (3.42)

Hora	Carga[Wh]	T[°C]	I_T [MJ/m ²]	E_i [Wh]	Xc	Φ	$E_{exc,i}$ [Wh]	$E_{L,i}$ [Wh]
06-07	0.255	15.00	0.14					
07-08	0.255	16.00	0.79	0.76	0.33	0.69	0.53	0.23
08-09	0.727	17.50	1.55	1.46	0.49	0.53	0.78	0.68
09-10	0.255	19.00	2.28	2.11	0.12	0.88	1.86	0.25
10-11	0.255	20.50	2.86	2.62	0.09	0.90	2.37	0.25
11-12	0.255	22.00	3.18	2.89	0.08	0.91	2.64	0.25
12-13	0.255	23.00	3.18	2.88	0.08	0.91	2.63	0.25
13-14	0.255	24.00	2.86	2.59	0.09	0.90	2.33	0.25
14-15	0.255	25.00	2.28	2.07	0.12	0.87	1.82	0.25
15-16	0.255	25.00	1.55	1.42	0.17	0.82	1.17	0.24
16-17	0.255	24.00	0.79	0.74	0.34	0.68	0.51	0.23
17-18	0.255	23.00	0.14					
18-19	0.255	22.00	0.00					
19-20	0.255	21.00	0.00					
20-21	0.255	20.50	0.00					
21-22	0.727	20.00	0.00					
22-06	2.400	17.50	0.00					
Total	7.065			19.59			16.67	2.92

Cuadro 4.3: Evaluación analítica de Diciembre (sin almacenamiento).

El complemento de los anteriores resultados son los valores de la siguiente tabla, recordando que estos últimos toman en cuenta la contribución por almacenamiento.

Contribución de batería	
f_o	0.413
d_o	2.359
Δf_{max}	min(0.587 , 1.843)
Δf	0.588
Frac. suplida por el sist. FV	1.001
Energía entregada diaria [Wh]	7.068

Cuadro 4.4: Resultados considerando almacenamiento

Con un f_o de 0.413 y un Δf de 0.588, se consigue un dimensionamiento que cubre completamente la demanda de la carga, aunque de los 16.67 Wh que podemos almacenar, solo se aprovechan 4.178 wh. Si bien, la cantidad de energía que no se aprovecha es alta, vale la pena asegurar, en lo posible, la alimentación en una aplicación tan pequeña.

El valor de Δf_{max} (1.843) supera a valor de d_o , 2.359, lo que significa que las baterías no están sobreestimadas. Sin embargo, para evaluar la verdadera autonomía del sistema, se harán mediciones del consumo en condiciones reales, los resultados de estas pruebas se mostrarán en el siguiente capítulo y se comparará con el dimensionamiento recién presentado.

En contraparte, usando 4W de potencia nominal, los resultados de la evaluación numérica mediante PVsyst se muestran en la figura 4.14, en la cual prácticamente en todos los meses se tiene una fracción solar de 1, por lo que esta configuración brinda buena confianza en cubrir por completo las necesidades energéticas del sistema IOT.

	GlobHor kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
January	133.3	159.7	0.478	0.243	0.000	0.217	0.217	1.000
February	143.5	162.0	0.480	0.274	0.000	0.196	0.196	1.000
March	180.2	187.4	0.565	0.336	0.000	0.217	0.217	1.000
April	179.5	172.4	0.505	0.283	0.000	0.210	0.210	1.000
May	179.2	162.2	0.466	0.237	0.000	0.217	0.217	1.000
June	157.9	138.8	0.380	0.166	0.000	0.210	0.210	1.000
July	163.1	144.6	0.397	0.159	0.000	0.217	0.217	1.000
August	158.2	147.3	0.406	0.182	0.005	0.212	0.217	0.977
September	135.6	133.4	0.366	0.155	0.000	0.210	0.210	1.000
October	139.5	149.7	0.427	0.188	0.000	0.217	0.217	1.000
November	132.9	155.5	0.453	0.234	0.003	0.207	0.210	0.984
December	124.5	150.9	0.447	0.217	0.000	0.217	0.217	1.000
Year	1827.3	1863.9	5.369	2.675	0.008	2.547	2.555	0.997

Figura 4.14: Simulación PVsystem

En el caso de esta evaluación, la energía no aprovechada asciende a 7.20 Wh (217 Wh al mes). Las diferencias radican principalmente por las distintivas metodologías y a las características de los paneles que emplea PVsyst.

4.5. Programación en el microcontrolador

En la siguiente figura 4.15 se muestra el diagrama de flujo del código en el microcontrolador, como se mencionó antes, su estructura está principalmente determinado por las modalidades de consumo y de la habilitación de los sensores para su lectura, pues el caudalímetro requiere una interrupción de las tareas en el microcontrolador para poder utilizarlo, en consecuencia, este sensor de caudal requiere mantener contadores independientes.

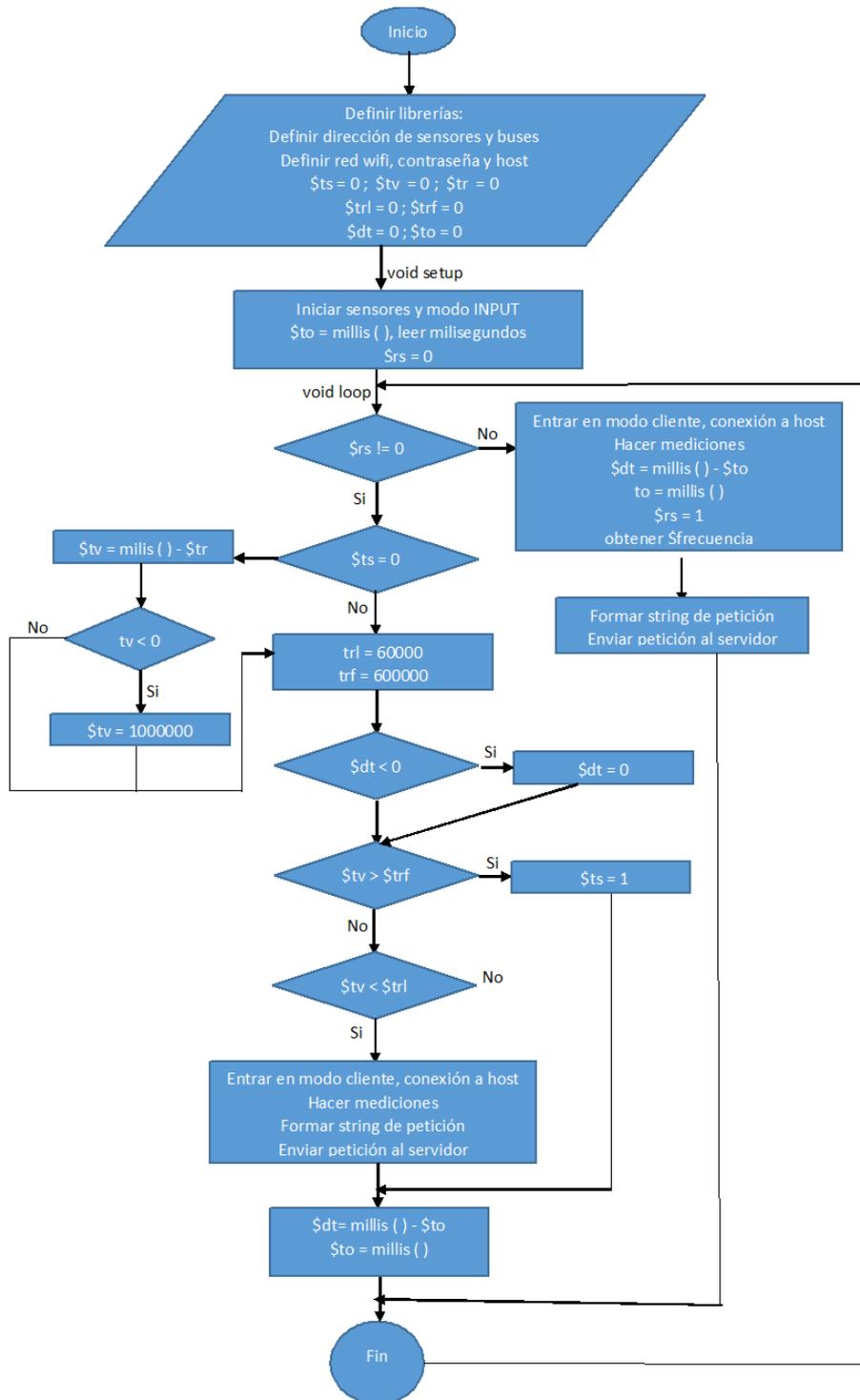


Figura 4.15: Diagrama de flujo del código en microcontrolador

4.6. Circuito

Ya que requerimos que toda la instrumentación dentro de un contenedor que proteja de los factores ambientales, debemos montar, tanto el microcontrolador, sensores,

baterías y demás módulos, en una placa PCB que tenga las dimensiones adecuadas. Primeros trataremos la parte del circuito que comprende la alimentación del sistema y posteriormente se complementará con los demás componentes donde se exhibirán las conexiones de todo circuito completo.

4.6.1. Circuito de alimentación

Conociendo las características generales de potencia de entrada y de las necesidades de almacenamiento, se opta por utilizar dos paneles fotovoltaicos, cada uno con un voltaje a circuito abierto de 7V, una corriente en cortocircuito de 330mA y 141.65 cm^2 de superficie.

En tanto que el conjunto de baterías son un par del tipo ion-Litio 18650, las cuales tiene una capacidad de 2200 mAh cada una, mientras que su voltaje nominal es de 3.7 V. Estas baterías requieren un controlador para ir regulando el voltaje a la hora de cargar por lo que se seleccionó un módulo tp4056 que cumple esta tarea. Por ello se conectaron las dos baterías en paralelo para que un solo módulo pueda cargarlas al mismo tiempo.

Al módulo tp4056 también se le conecta la carga a la salida. A la entrada se conecta la fuente, misma que alimenta al tp4056, las baterías y la carga, por lo que este mismo cargador también administra la energía que se provee a la carga. En ausencia de la fuente, suministra la energía de las baterías a la carga.

Ya que el módulo tp4056 requiere 5V a la entrada y que los paneles proveen 7V se requirió de un *buck* (reductor) para reducir el voltaje. Se optó un reductor en lugar de un regulador para evitar significativas pérdidas de conversión, ya que el voltaje en los paneles es exponencial a la radiación y la mayor parte del tiempo permanecerán por arriba de lo 5V por lo que es conveniente no disipar ese excedente sino reducirlo. El reductor ha utilizar es de la marca SGE_{mx}.

Por otro lado, nuestra carga (nodeMCU) requiere un suministro de 5V. Si bien, a la salida de del tp4056 podemos alcanzar ese voltaje, este no siempre se mantiene, pues depende del nivel de carga al que se encuentren las baterías, además cuando los paneles no puedan proveer energía en las noches, las baterías se encargarán de ello, pero su voltaje va de los 4.2V a los 3.68V cuando se descargan por completo. Por estas razones se decidió implementar en el circuito un *boost* (elevador) para que se entregue los 5V que requiere el microcontrolador. El modulo elevador a utilizar es Modulo BOOST convertidor DC-DC con voltaje de entrada de 0.9V-5V y una máxima corriente de 600mA.

El esquema del circuito de alimentación se muestra en la figura [4.16](#)

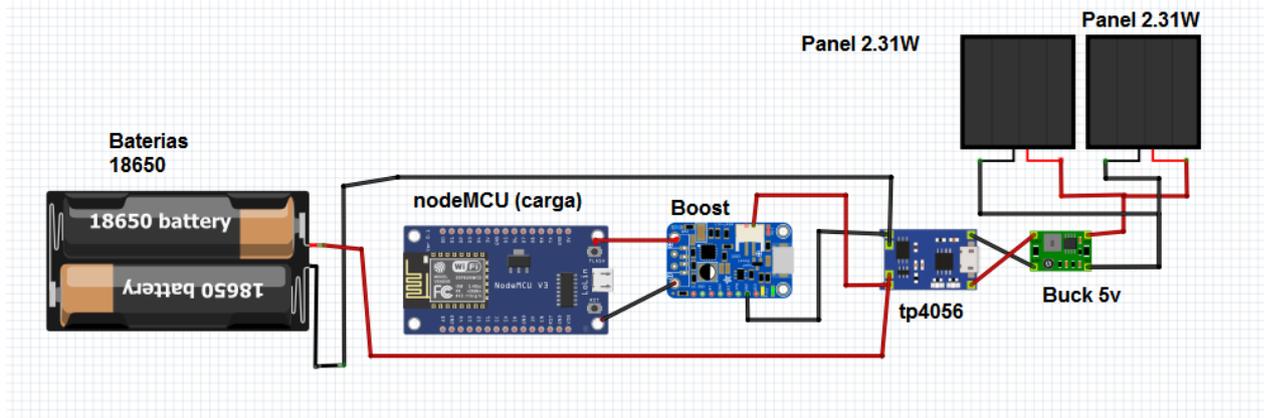


Figura 4.16: Circuito de alimentación.

4.6.2. Esquema completo del circuito

Ahora que contamos con todos los elementos, se estableció el circuito completo. La figura 4.17 muestra la presentación esquemática del circuito, donde apreciamos al nodeMCU conectado a los sensores y al *boost* conectado a sus respectivos puertos de v y GND, conectando al microcontrolador con el circuito de alimentación. Cabe resaltar que se utilizó un segundo módulo INA219 para monitorear la carga y descarga de las baterías, mientras que el primer INA219 es exclusivamente para medir la corriente en el sensor de irradiancia solar.

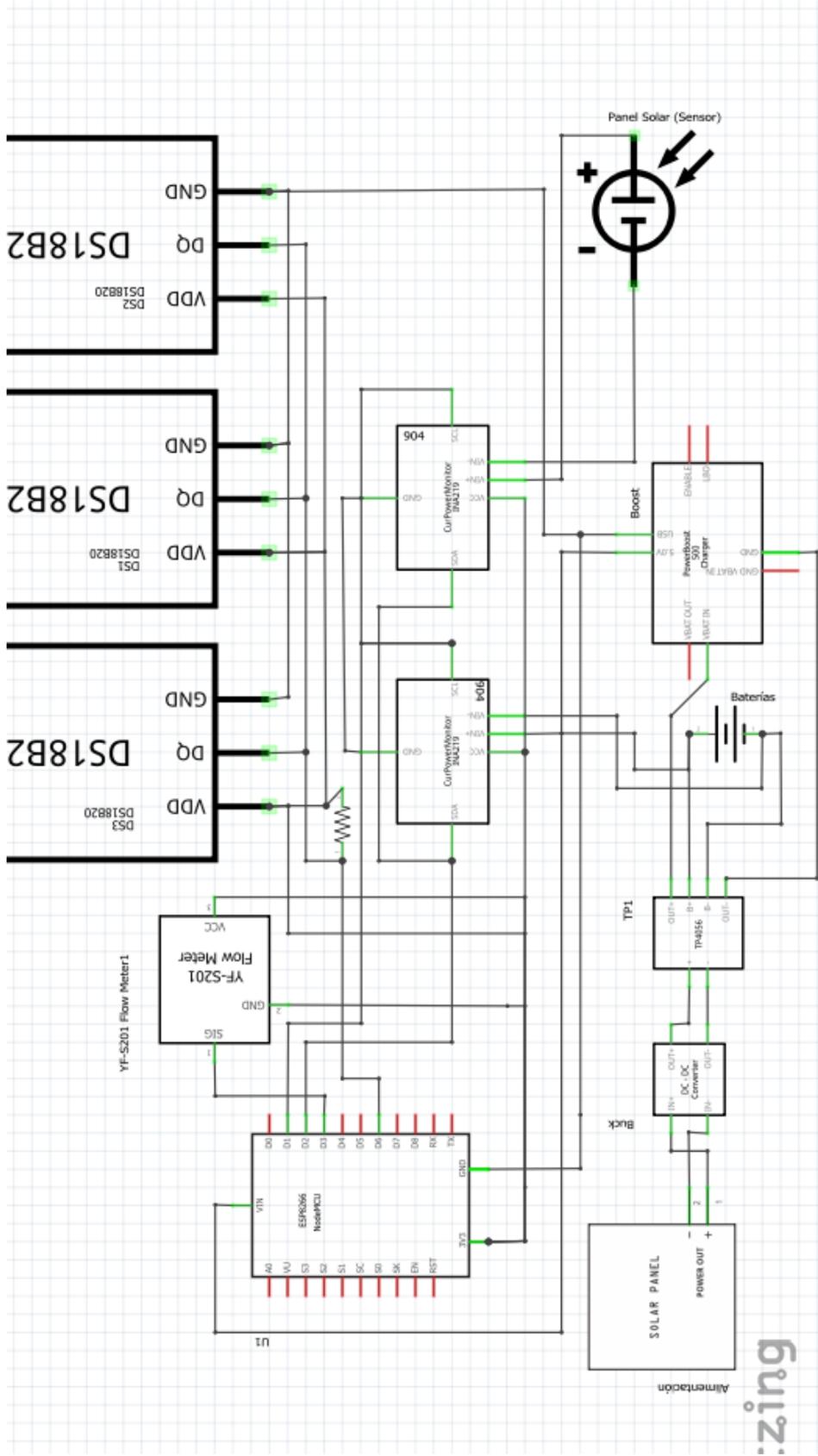


Figura 4.17: Circuito

4.7. Servidor y aplicación web

El nodeMCU es capaz de trabajar y ejecutar los debidos protocolos para conectarse a Internet, sin embargo, aún falta abordar el protocolo que enlazará al microcontrolador con el servidor. Esta parte del sistema es la comunicación que se encarga de transferir información entre clientes y servidores en la web.

En la red de Internet se utilizan los conceptos cliente y servidor para referirse a los tipos de usuarios que existen, siendo el servidor, un ordenador que provee recursos o servicios como almacenar aplicaciones, administrar bases de datos y gestionar peticiones; mientras que los demandantes, llamados clientes, son ordenadores que realizan peticiones a los servidores para realizar distintas tareas como enviar datos, pedir información, etc. Por lo tanto, un servidor debe estar en ejecución para atender en todo momento las demandas de los clientes [38].

El principal de estos protocolos de comunicación es el HTTP, aunque también existen otros como el MQTT que están destinados al IOT a gran escala ya que brindan ciertas ventajas pero que no son necesarias en este trabajo. El nodeMCU puede configurarse en modo cliente, y mediante el código en su microcontrolador puede hacer peticiones y en consecuencia enviar los datos de las mediciones a la base de datos del servidor. Las peticiones se envían a través de una URL como en los navegadores.

Para este trabajo se decidió crear un servidor de tipo local. Existen varias formas de crear un servidor local, en nuestro caso se usó el Software XAMPP, pues no solo sirve para abrir un servidor local, si no también para crear una base de datos de *mysql*. Existen servicios gratuitos y de paga que funcionan como servidores de tipo real y ofrecen distintas capacidades de almacenamiento de datos; igualmente existen plataformas de servidores para aplicaciones IOT que pero muchas veces se ven limitadas a ciertas tareas y tratamientos de datos. Una plataforma muy conocida es *Thingspeak*, cuya versión gratuita permite un máximo de 3 millones de datos anuales y envío de datos cada 15 segundos; mientras la versión de paga ronda los 80 dólares anuales [55].

4.7.1. Aplicación web

Para la gestión, consulta y visualización de los datos almacenados, se optó por un código basado en php para el backend (parte del código que se encarga de realizar arquitecturas y tareas lógicas de una aplicación web.). Por otra parte, para el *Frontend* (parte del código que se encarga de la parte visual de la aplicación web) se basó en el uso de HTML, CSS y Javascript. A manera general se utilizó el *Software Codeigniter* como *Framework* (modelo de trabajo que sirve para organizar el código en distintas secciones funcionales), esto con el fin de tener un mejor control de la aplicación y mejorar el rendimiento. La ventaja de utilizar un *Framework* de estas características es que podemos cambiar rápidamente de página dentro de la misma aplicación web, pues es posible mantener el mismo código para la mayor parte de las páginas que se decidan crear, la única diferencia son los códigos de la sección principal de la página.

Este *Framework* de trabajo se divide en tres principales secciones: *View*, *Controller* y *Model*.

Desde la parte del *View* se dedicará a mostrar los datos ya procesados y listos para ser graficados, en esta sección también se escribe el código de la apariencia visual de la aplicación, además.

La sección del *Model* nos ayuda para vincular y capturar los datos que deseamos analizar y que se encuentran almacenados en la base de datos, es en esta sección donde se lleva a cabo todo el análisis estadístico y todos los cálculos requeridos, esta sección debe dejar los resultados listos para ser mostrados al usuario que use la aplicación, el *Model* depende de las variables que el usuario ingrese desde el *View* para llevar a cabo sus tareas programadas.

Por último, la sección *Controller* se encarga de comunicar las variables y los datos entre el *View* y el *Model*, así como organizar las partes de código que serán mostradas en cada una de las páginas del *View* y asociar a la aplicación web una base de datos.

Para mejorar el rendimiento de la aplicación web, se decidió utilizar AJAX para la selección de datos por parte del *Model*; así, se vuelve interactiva la aplicación web, pues tiene la capacidad de extraer información del servidor sin necesidad de recargar o actualizar todo el contenido de la página.

Ya aclaradas las secciones anteriores, a continuación se presenta un esquema que representa la relación y comunicación entre cada uno de los principales actores que integran nuestro sistema IOT, destacando quienes actúan como clientes y quién como servidor local.

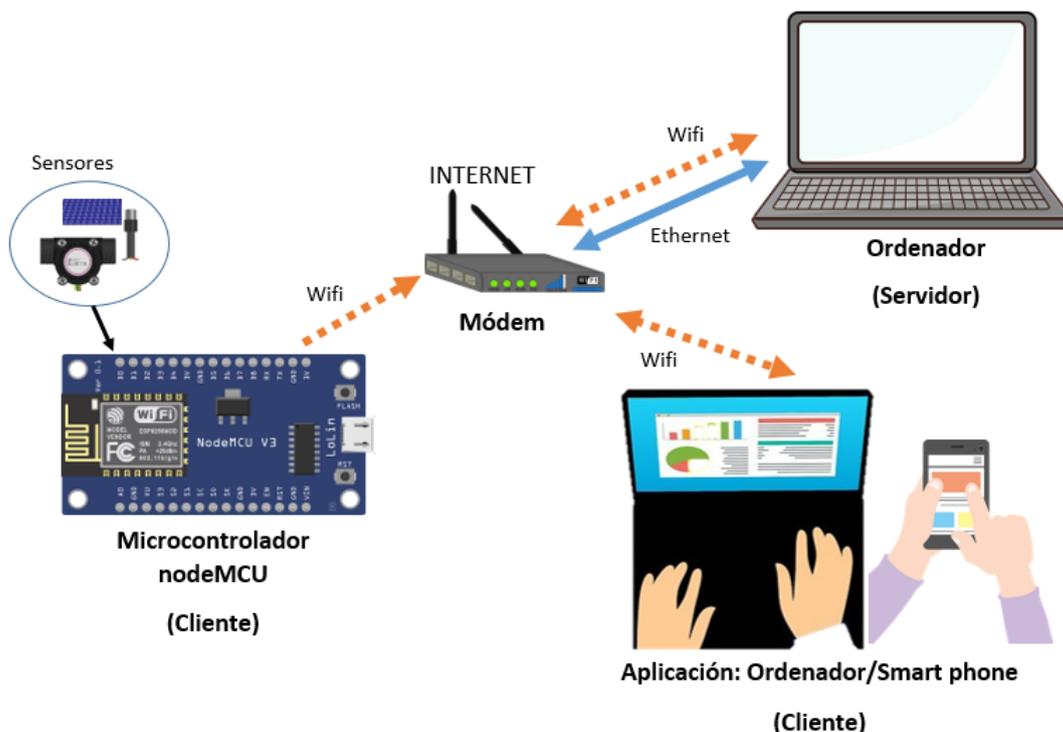


Figura 4.18: Comunicación entre los componentes del sistema IOT diseñado.

4.8. Metodología para obtención de eficiencia en colector

Conseguir la curva de eficiencia de nuestro captador solar es una de las actividades que nuestra instrumentación puede llevar a cabo. Para ello se buscó apegarse a los parámetros que se presentan en la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005 y obtener una expresión como la de la ecuación 3.31 a través de una regresión lineal.

Esta prueba se buscará realizar al mediodía y habilitando una bomba solar para mantener un flujo constante, además, comenzando las pruebas con agua a temperatura ambiente. No se emplearán más de 15 litros en estas pruebas y no serán desperdiciadas.

Para lograr obtener datos distantes al eje de las ordenadas, se calentará agua a más de 50°C esperando obtener condiciones para encontrar eficiencias menos favorables. Por el contrario, también se empleará agua con hielos para favorecer una alta eficiencia, de esta forma poder extender el dominio de los datos en el gráfico.

4.9. Comentario de capítulo

En este capítulo se aprende principalmente sobre protocolos de comunicación en redes de Internet y en dispositivos que utilizan radiofrecuencia como medio de comunicación, así como los respectivos sensores y unidades de control que interactúan con estos dispositivos. Por otro lado se explora la construcción de aplicaciones web, utilizando lenguajes de programación como php y javaScrip, que contribuyen a la práctica y habilidad en la lógica de programación.

5. Resultados y discusiones

En este capítulo se mostrará las características de la instalación y montaje del colector solar plano con la parte instrumental del sistema IOT. Posteriormente se presentarán los resultados de las pruebas de calibración y las respectivas funciones obtenidas de las regresiones con los datos capturados, con una especial discusión en los errores que muestra los resultados de la calibración del sensor de irradiancia; además se señalan los inconvenientes presentados con el uso del caudalímetro Yf-s201.

Por otro lado se discuten los resultados del consumo energético de la instrumentación y su comparación con el dimensionamiento fotovoltaico autónomo.

Finalmente se muestran los resultados y características que ofrece nuestra aplicación web programada, mostrando los principales gráficos y datos que podemos obtener a través de uso.

5.1. Instalación y montaje del sistema de monitoreo

En colector solar seleccionado para implementarle el sistema IOT de 0.2 m^2 de área de captación. Este colector es utilizado para prácticas y pruebas en el IER-UNAM, y fue elegido por su tamaño pequeño y adecuado para transportarse; cabe resaltar que no hubo acceso a instalar el sistema IOT en algún otro colector plano de mayores dimensiones. También se debe mencionar que no se contó con el tanque de almacenamiento de nuestro colector por lo que se operó como un colector de autocontenido.

La figura 5.1 muestra la instalación del colector solar de prueba. En la parte izquierda se encuentra el gabinete que contiene a todo el circuito de monitoreo y, como puede observarse, en su parte exterior se encuentra el panel solar (sensor de irradiancia solar); mientras que en la parte inferior izquierda vemos el par de paneles fotovoltaicos que proveen la energía al sistema de monitoreo (incluyendo las baterías y los sensores de temperatura, caudal y corriente eléctrica.). Por otro lado se observa un sensor de temperatura colocado a la salida superior del colector y a su lado el caudalímetro. Mientras que en la abertura inferior del colector se encuentra un segundo sensor de temperatura, la tubería de este sensor es la que se encuentra conectada al tinaco de la residencia. En cuanto al sensor de temperatura no es posible observarse en esta figura, pues se encuentra por debajo del colector (sin hacer contacto con el dispositivo termosolar o el suelo), esto con el fin de asegurar de que siempre se encuentre bajo sombra.



Figura 5.1: Instalación del colector solar y equipo de monitoreo. 1 Gabinete del circuito, 2 Paneles solares para alimentación, 3 Colector solar plano de baja temperatura, 4 Sensor de temperatura de agua a la salida del colector, 5 Sensor de temperatura de agua a la entrada del colector, 6 Caudalímetro, 7 Sensor de irradiancia, 8 Gnomon, 9 Inclinómetro.

Algunos inconvenientes que se presentaron fueron fugas de agua y la presencia de aire en las tuberías. Los primeros pudieron resolverse con silicona de sellado para tuberías y tras varias aplicaciones y pruebas lograron ser eliminadas; mientras que la purga del sistema simplemente se logró abriendo la llave de salida a su máxima abertura en repetidas ocasiones hasta tener la presencia de un flujo constante de agua.

Una observación importante es la presencia de material aislante (hule espuma) colocado en la superficie del colector que mantenía contacto con la estructura metálica de soporte.



Figura 5.2: Circuito real. 1 nodeMCU, 2 cable USB de emergencia, 3 INA219 para baterías, 4 INA219 para sensor de irradiancia solar, 5 *boost* 5v, 6 Cargador-controlador TP4056, 7 Baterías ION-Litio 18650, 8 *buck* 5v, 9 Puertos de entrada para sensores de temperatura, 10 Puerto de entrada para caudalímetro, 11 Block's de entrada para paneles de alimentación.

La figura 5.2 nos muestra el circuito montado en una placa PCB perforada. Lo que muestra esta figura es el contenido del gabinete que se muestra en la figura 5.1, resaltando que se colocó un cable USB a la placa NodeMCU con salida a una apertura en el gabinete, con el fin de subir o modificar el código escrito en el ESP8266 por si llegara a ocuparse; es verdad que podría retirarse el NodeMCU sin problema y así modificar el sketch escrito pero dejando este cable USB nos evitamos estar abriendo el gabinete y retirando componentes.

Los únicos cables que resaltan en la figura anterior corresponden a los sensores de corriente, pues uno mantiene lecturas sobre las baterías y otro al sensor de irradiancia; todas las demás conexiones entre componentes no son visibles y estas hechas por cables y soldadura por la parte inferior. A pesar de que el montaje del circuito se realizó sobre una placa genérica, si se diseñó una placa PCB y puede ser observada en el apéndice B.1, sin embargo por conveniencia no fue impresa y se trabajó de la forma antes mencionada.

5.2. Calibración de sensor de caudal

Ajuste	Función	R ²
Lineal	$C(x) = 0.1324x + 0.1708$	0.9998

Cuadro 5.1: Regresión lineal de calibración.

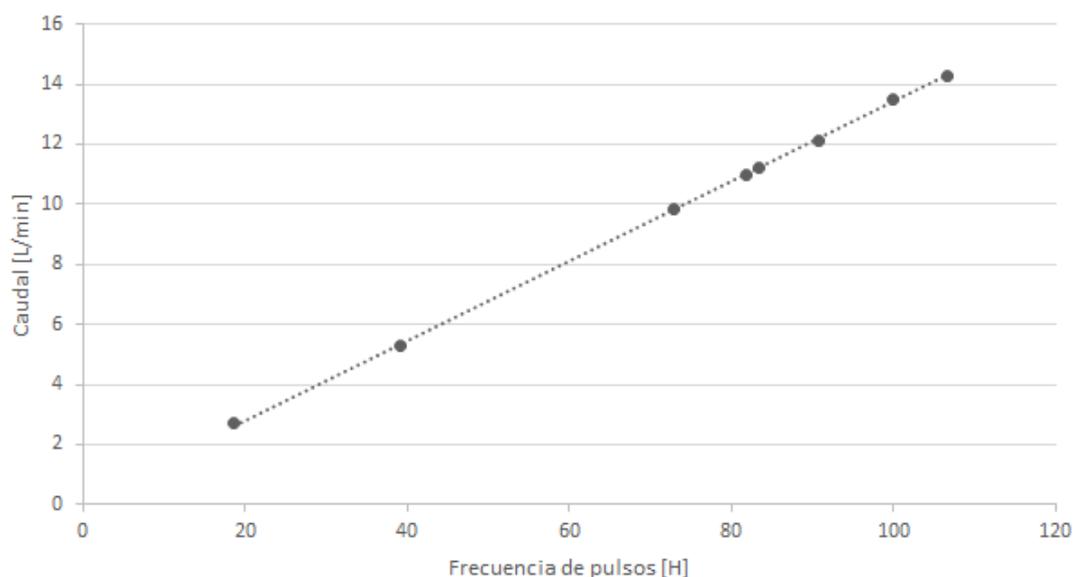


Figura 5.3: Relación corriente-irradiación

En esta calibración se ha obtenido un ajuste muy cercano al coeficiente de calibración recomendado. Se obtiene un coeficiente de correlación muy bueno, pero no fue posible completar la calibración para caudales pequeños menores a 2 L/min, ya que no era posible mantener un flujo constante proveniente del grifo y los datos obtenidos mostraban un comportamiento totalmente desviados. Algunos datos mayores a los 2 L/min se perdieron en dificultades técnicas del disco duro de la computadora de trabajo.

5.3. Calibración de panel fotovoltaico (sensor de irradiancia)

Las relación de las mediciones de la corriente en el sensor y en nivel de irradiación se muestran en el gráfico de la figura 5.4, la cual presenta un comportamiento bastante lineal, sin embargo se presentan tres tipos de ajustes en el cuadro 5.2. El polinomio de grado 4 presenta en mejor coeficiente de determinación.

Ajuste	Función	R ²
Lineal	$s(x) = 6.1116x + 13.2560$	0.9950
Polinomial grado 3	$s1(x) = 3E-05x^3 - 0,0120x^2 + 7,4248x - 18,7430$	0.9956
Polinomial grado 4	$s2(x) = 5E-07x^4 - 0,0002x^3 + 0,0124x^2 + 6,329x - 5,3627$	0.9957

Cuadro 5.2: Ajustes del gráfico de la figura 5.4

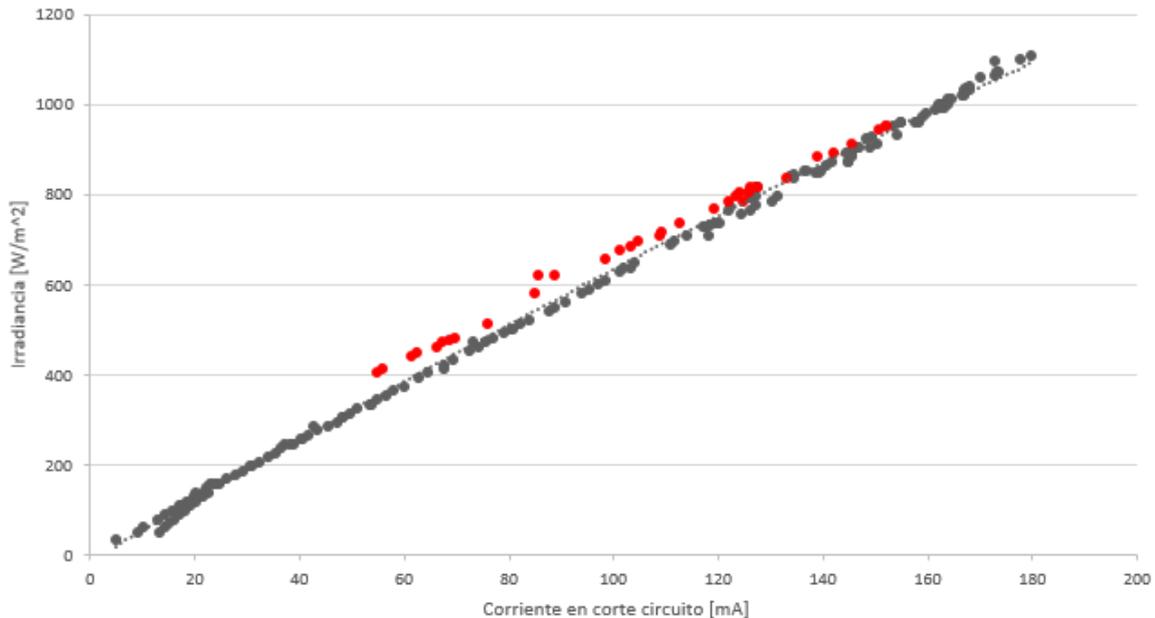


Figura 5.4: Relación corriente-irradiación

En el gráfico 5.4 se muestran todos los datos obtenidos durante los 5 días de medición, sin embargo, se resalta en color rojo una serie de datos que lucen desviados, estos puntos rojos corresponden a un único día de medición, mientras que los demás valores (obtenidos en los otros cuatro días de medición) mantienen una misma tendencia, esta observación es importante porque estos datos introducen la mayor cantidad de errores. Más adelante se aborda esta situación cuando se hable de los errores que entregan cada una de los ajustes realizados con las correcciones.

5.3.1. Influencia del espectro solar

En el experimento para medir la influencia del espectro solar se obtuvo el gráfico de la figura 5.5, en donde resulta conveniente dividir el gráfico en dos partes para obtener un par de funciones que se ajusten a los datos. Por conveniencia y criterio visual, se estableció que la división fuese de 0 a 16.7 y de 16.7 a 20 AM_a .

Cabe resaltar que la figura 5.5 existe una importante brecha de datos en el dominio de 9 a 15 AM_a , debido a que el cambio de masa-aire entre estos dos valores ocurre rápidamente, el tiempo que transcurre en este intervalo es de aproximadamente 40 minutos debido a la naturaleza del movimiento aparente del sol en el cielo, esto nos

lleva a que aparezcan fácilmente grandes intervalos con baja densidad de datos. En el caso de este trabajo debido a la nubosidad no fue posible realizar mediciones en este dominio y escasas mediciones en valores cercanos.

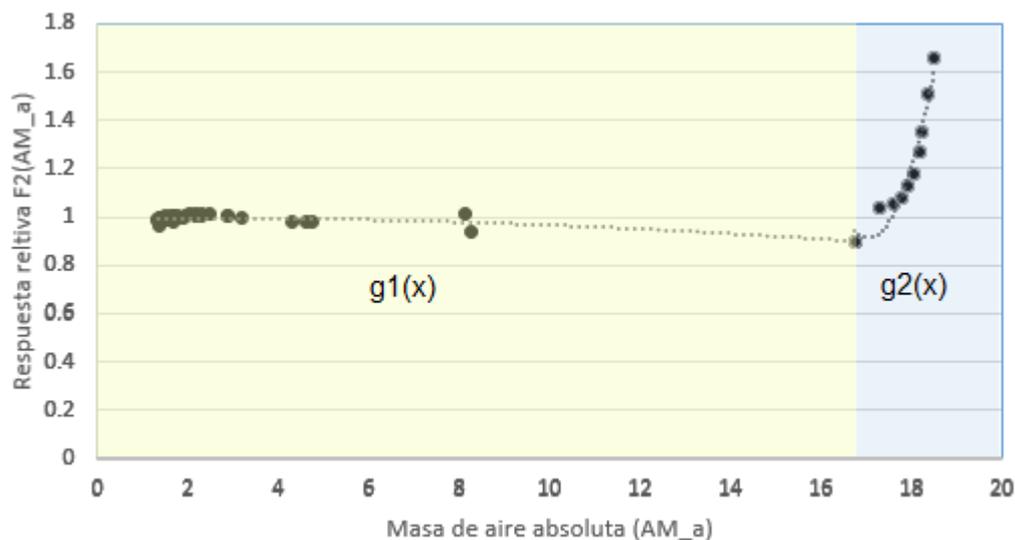


Figura 5.5: Influencia del espectro solar en función del AM_a

Las dos funciones del ajuste para el gráfico de 5.5 se muestran en el siguiente cuadro. Resaltando que el coeficiente de determinación en la función $g(x)_2$ es muy superior debido a la menor cantidad de datos.

AMa	Ajuste	Función	R^2
0-16.7	Polinomial Grado 2	$g_1(x) = -0,0004x^2 + 0,0014x + 0,9949$	0.5956
16.7-20	Polinomial Grado 2	$g_2(x) = 0,3255x^2 - 11,103x + 95,599$	0.9474

Cuadro 5.3: Regresiones realizadas para la prueba de influencia del espectro solar.

5.3.2. Influencia del ángulo de incidencia

En el segundo experimento, destinado a valorizar la influencia del ángulo de incidencia, se obtuvo la función del cuadro 5.4 cuyo coeficiente de determinación es bastante alto. El gráfico obtenido de la respectiva regresión se visualiza en la figura 5.6.

Como ya se ha mencionado antes, este experimento no busca evaluar la influencia del factor coseno, sino de conocer cómo afectan factores como la rugosidad, la reflectancia y la forma de la superficie del dispositivo fotovoltaico.

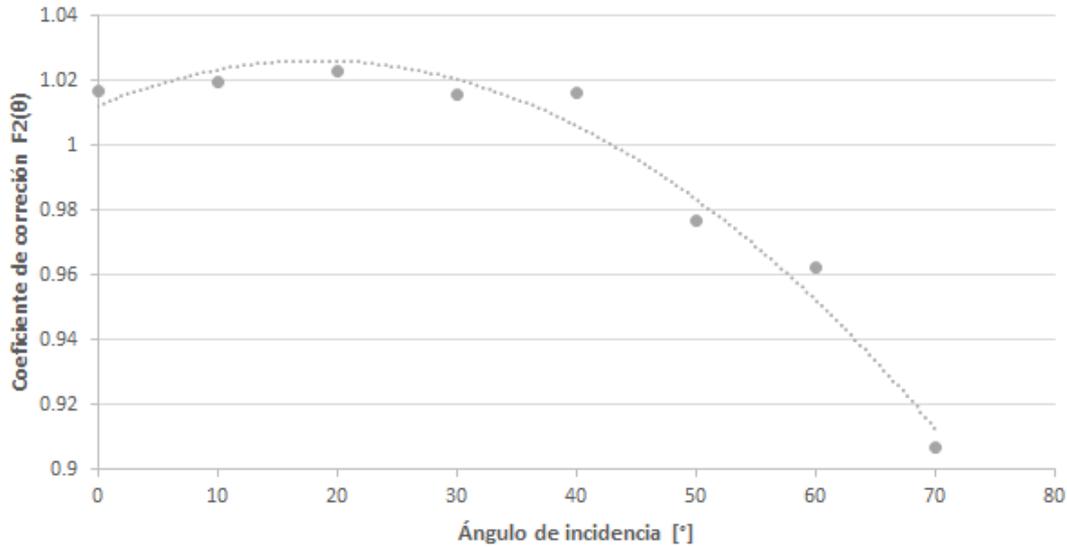


Figura 5.6: Resultados de influencia del ángulo de incidencia

Ajuste	Función	R ²
Polinomial Grado 2	$h(x) = -4E-05x^2 + 0,0015x + 1,0122$	0.9711

Cuadro 5.4: Influencia del ángulo de incidencia.

5.3.3. Cálculo de errores

Una vez obtenidas las distintas funciones, fue posible calcular la irradiación a partir las mediciones de corriente y por consiguiente obtener los errores relativos mediante la expresión (5.1).

$$e = \frac{|V_{real} - V_{calculado}|}{V_{real}} \quad (5.1)$$

Donde e es el error relativo, V_{real} es el valor de la irradiancia proporcionada por el piranómetro y asumido como el valor real, $V_{calculado}$ es el valor de irradiancia obtenido a partir de la celda solar y la función de ajuste.

En la figura 5.7 nos muestra los errores relativos que entregan los polinomios de grado 3 y 4 (incluyendo la corrección espectral y ángulo de incidencia) al evaluar un conjunto de 174 distintas mediciones de corriente proporcionadas por nuestro sensor de irradiancia; estos datos son los mismos que se utilizaron para la calibración de la figura 5.4 y utilizan como valores verdaderos los entregados por el piranómetro.

Volviendo a la imagen 5.7, se observa que para el polinomio de grado 4 a partir de los 650 W/m^2 los errores no bajan del 5% y tienden a aumentar hasta llegar al 20% en irradiaciones cercanas a los 1100 W/m^2 ; por otra parte, en el intervalo que va de los 200 a 650 W/m^2 , este mismo polinomio presenta buenas aproximaciones, a excepción de los valores aparentemente desviados y señalados de color rojo en la figura 5.4,

encontramos que todas las irradiaciones calculadas contienen un error menor al 5%; aunque la parte más interesante ocurre en irradiaciones menores a los 200 W/m^2 , pues de 35 valores solo 3 superan el 10% de error relativo pero también esperados debido a los valores de radiación tan bajos en comparación a la sensibilidad y resolución del equipo (9.8 W/m^2).

En contraparte, en la misma figura 5.7 nos muestra los errores entregados por parte del polinomio de grado 3, en general parece tener errores relativos bastante aceptables, pues valores mayores a 750 W/m^2 no superan el 7% y la mayoría incluso se encuentran por debajo del 5%.

El polinomio grado tres pareciera que se mantiene consistente y que resulta un gran ajuste, pues en valores menores a 200 W/m^2 solo hay dos que superan el 10% de error, sin embargo uno de ellos presenta un error relativo de 45%, es decir el más alto en todo el gráfico; si no fuese por ese error, por parte del polinomio grado 3 no habría error más grande a 14% y solo 4 superarían el 10% de los 174 que fueron evaluados y corregidos.

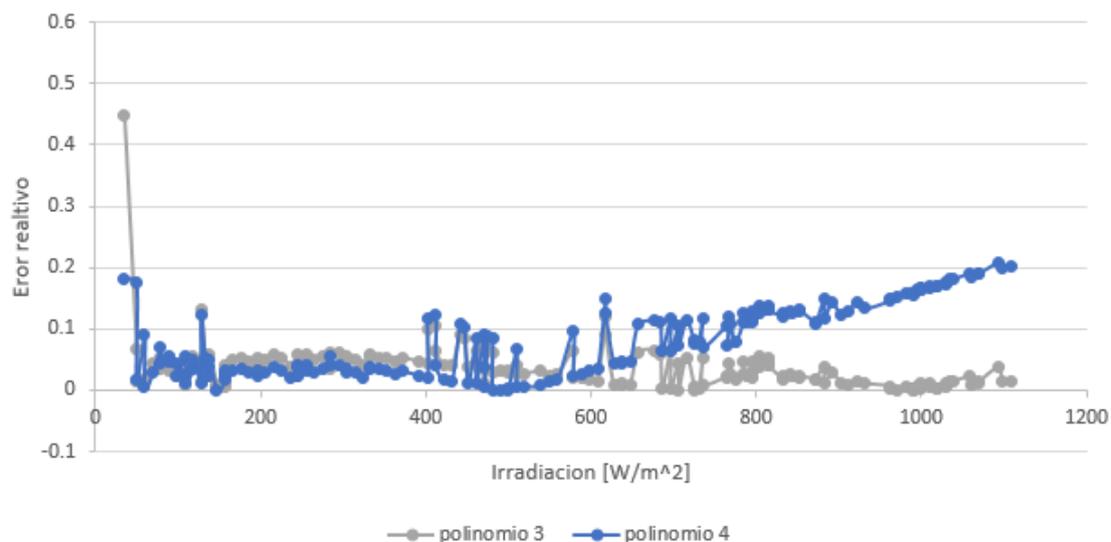


Figura 5.7: Error relativo utilizando polinomio de grado 3 y 4.

Las excepciones que presenta el polinomio de grado 4 en el intervalo de los 200 a los 650 W/m^2 , el polinomio grado 3 también los presenta pero con errores relativos menores, a tal grado que solo 3 valores superan el 10% de error; esto debido a que el polinomio 3 realmente es un mejor ajuste a los datos en comparación al de grado 4, tal y como se muestra en la figura 5.8 donde se aprecia que el polinomio grado 4 se encuentra más distantes de los puntos aparentemente desviados y comienza a alejarse en altos niveles de irradiancia.

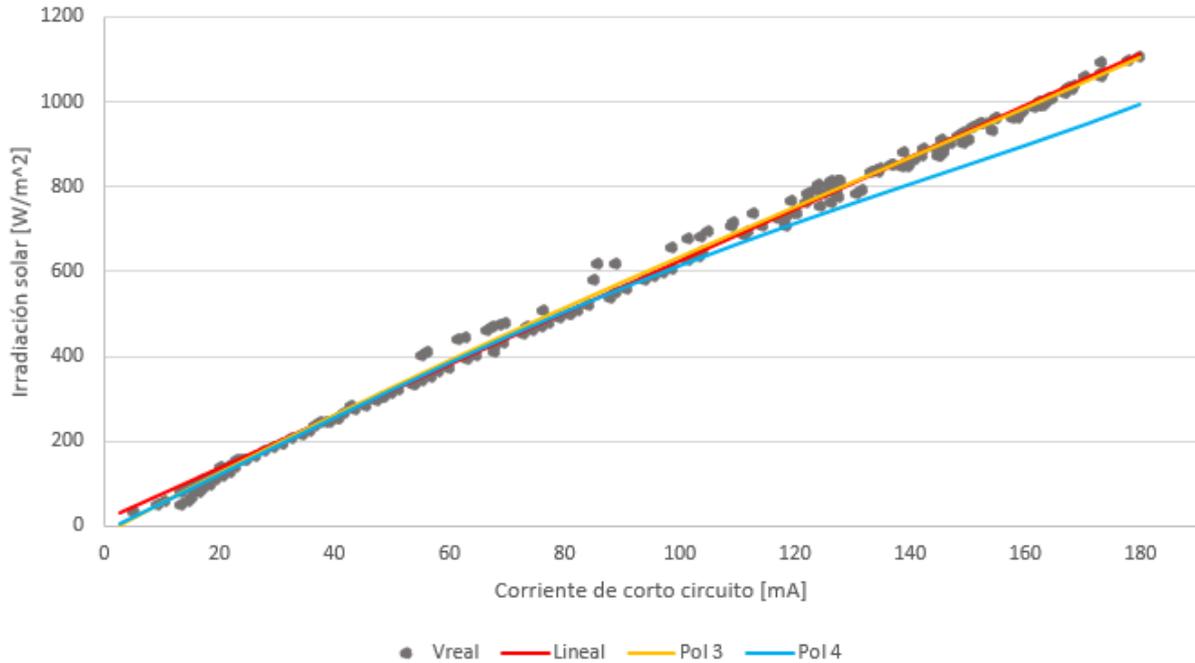


Figura 5.8: Comparación de las funciones de ajuste respecto a los valores reales de irradiación

Estas excepciones, al igual que otros valores de provocan la aparición de algunas crestas a lo largo del gráfico 5.7, claramente son errores asociados al conjunto de mediciones señalados de color rojo en el 5.4, pues nos hacen pensar que existió un error sistemático al momento de medir ya estos datos señalados pertenecen a un mismo día, mientras que en los demás días no se presentan estas desviaciones, sin embargo las tres regresiones hechas incluyen todos los datos de los cinco días de medición ya que no podemos afirmar e identificar el error que provocó esta particularidad.

Se descarta que estos grandes errores sean provocados por desgaste o suciedad, pues hubo mediciones en días posteriores en los que no se presentaron datos con esta aparente desviación. También se descartaría la idea de que la nubosidad provocara la aparición de las crestas, ya que en la mayoría de los días de medición se presentaron nubes en algún momento y al parecer no distorsionaron la tendencia de manera significativa o apreciable a simple vista. Una tercera idea, que también se desprecia, es que la nubosidad provocaría fluctuaciones en periodos de tiempo cortos, y debido a los tiempos de respuesta distintos entre los instrumentos, alguno de ellos guardaría muestras con distinto retraso y por tanto comenzaríamos a tener divergencias entre las mediciones al momento de comparar, este retraso se vería reflejado en la desviación estándar de este conjunto de medición, pero al revisar su desviación estándar, encontramos que no presentan desviaciones anormales al resto de los demás datos, de hecho hay otros conjuntos que poseen mayor desviación y que en el gráfico muestran errores menores. Por otro lado, un aumento de temperatura en las celdas solares afecta su rendimiento, disminuyendo su voltaje y aumentando ligeramente la corriente, aunque no es posible asegurar que existió una temperatura alta en la celda ya que no se mantuvo un monitoreo de esta variable y personalmente se percibieron días de

condiciones climatológicas muy similares.

En la misma figura 5.7, por debajo de los 150 W/m^2 también se tiene la presencia de crestas, pero en este caso no corresponderían al error sistemático señalado anteriormente, pues los datos de estas nuevas crestas difieren en el día de medición. En realidad, la cresta que causa más conflicto es la que aparece a los 127 W/m^2 , ya que es el único valor que sobresale a su alrededor superando el 10%, es un valor peculiar ya que si no se le aplicaran las correcciones su error sería menor al 3%. Si bien hay otros intervalos de irradiancia donde las correcciones afectan en vez de mejorar, este es un valor que deriva en un error muy grande.

También aparecen grandes errores en los valores más pequeños de irradiancia, sin embargo esto se le atribuye a que los niveles de irradiancia comienzan a ser tan pequeños que al calcular su valor se obtiene un error relativo grande si el ajuste se desvía tan solo un poco.

Por otro lado, resulta oportuno presentar los errores obtenidos con la regresión lineal (también con sus respectivos factores de corrección), esto se muestra en el gráfico de la figura 5.9. Este ajuste presenta los menores errores en irradiancias mayores a 400 W/m^2 a excepción de las crestas. El ajuste lineal resulta tener buenos resultados pero se vuelve inútil para irradiancias menores a 400 W/m^2 a tal grado de presentar errores del 52%. En general tiene un comportamiento muy similar al polinomio grado 3, como lo mostró el gráfico 5.8.

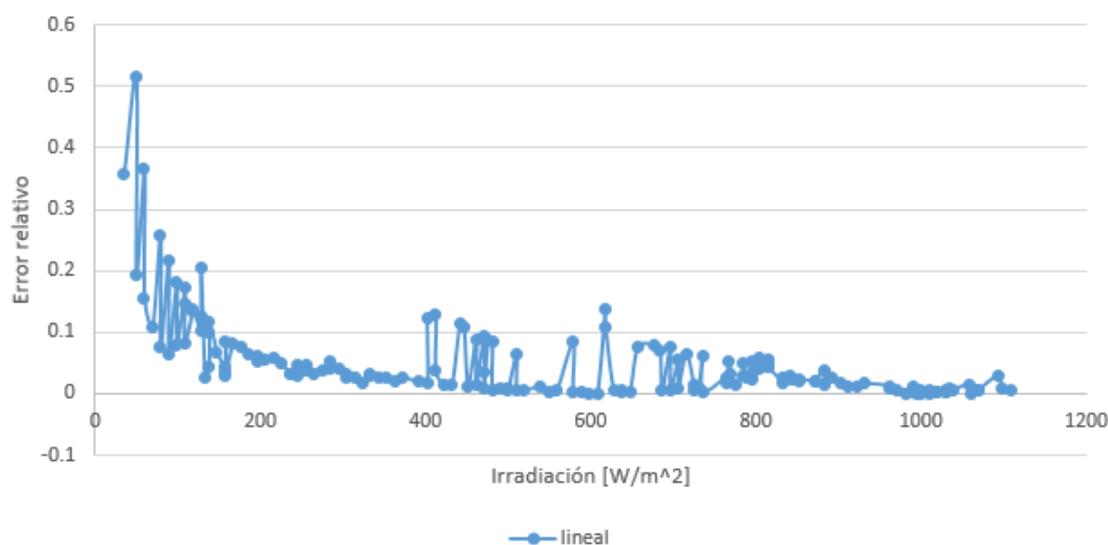


Figura 5.9: Error relativo utilizando regresión lineal.

Tanto en el gráfico de la figura 5.9 como de la figura 5.7 presentados utilizan los factores de corrección, pero cabe aclarar que se compararon con sus respectivos ajustes sin correcciones y en general sus resultados no son mejores. Estas comparaciones se presentan en el apéndice.

Por supuesto que también se intentó un ajuste de datos seccionando en tres dominios, posteriormente haciendo regresiones lineales independientes en cada sección.

Los intervalos de estos dominios van de 0 a 40 mA, de 40 a 150 mA y de 150 a 180 mA. Sin embargo los resultados no superaron al ajuste polinomial grado 3 y al polinomio grado 4 en bajas irradiaciones por lo que los errores relativos fueron altos. Los gráficos de estos resultados son mostrados en el apéndice. No obstante, se opta por el polinomio grado 3 (habilitando los ajustes de corrección) como el mejor ajuste a los datos de irradiación.

5.4. Evaluación de consumo y autonomía

Para para verificar el corrector dimensionamiento y autonomía del sistema IOT se llevó a cabo el monitoreo constante del voltaje y corriente de las baterías, mediciones realizadas por mismo sistema IOT como complemento del monitoreo de las temperaturas, flujo másico e irradiancia. Pero además se hizo una prueba de medición manual.

Este monitoreo se llevó a cabo manualmente a través del multímetro y los resultados de la corriente real se presentan en la figura 5.10 que corresponden al consumo dentro de un intervalo de 10 minutos, este tiempo es suficiente para observar un ciclo completo de la actividad realizada por sistema IOT.

Así, la figura 5.10 muestra cómo durante 1 minuto la corriente consumida oscila entre 120 mA y 30 mA, correspondiente al lapso de medición y envío de datos, cada pico mayor a los 100 mA representa una petición al servidor, de esta forma por cada una de estas cúspides se enviaron y midieron una vez las variables de interés, en el caso de esta figura se hicieron 8 peticiones.

Una vez que transcurre el minuto de medición, el microcontrolador se mantiene alerta durante 9 minutos. La figura 5.10 muestra cómo en esta región el consumo de corriente es constante, excepto al inicio donde el consumo es de 40 mA pero posteriormente baja a los 30 mA.

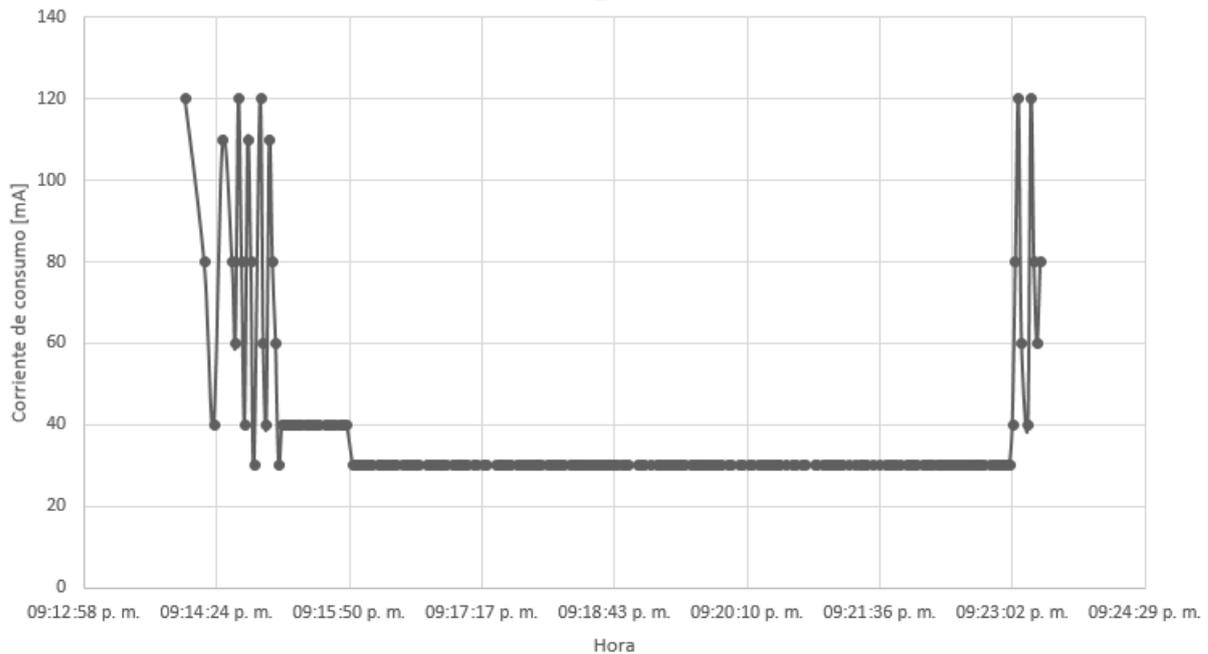


Figura 5.10: Consumo eléctrico real del sistema de monitoreo

Para efectos prácticos podemos decir que por cada 10 minutos el consumo es 120 mA durante un minuto y 30 mA por 9 minutos, esto contrasta con el consumo estimado en el cuadro 5.1, donde se propuso un consumo de 240 mA y 30 mA respectivamente. Como la capacidad de almacenamiento de las baterías es de 3.52 Ah y de acuerdo a los consumos reales tenemos un consumo horario de aproximadamente .039 Ah adicionado a la hora de medición continua con consumo de 0.12 Ah (propuesto en la figura 4.13) nos arroja una media ponderada de 0.041 Ah; por lo tanto tendríamos hasta 85.58 horas de autonomía al usar dos baterías en paralelo, en comparación a las 64 horas que se habían estimado. Con anteriores resultados podríamos decir que nuestro sistema IOT podría prescindir de una de sus baterías y lograría una autonomía cercana a los dos días (42.80 horas).

La figura 5.10 nos muestra un intervalo de solo 10 minutos ya que el comportamiento de la corriente era el mismo a lo largo del día. Para asegurarse de que los consumos fuesen los mismos, se midió la corriente en otros días de operación y se presentaba el mismo patrón.

5.5. Eficiencia en el colector de prueba

La obtención de la eficiencia en el colector se obtuvo por comunicación usb al ordenador y no por wifi, pues la frecuencia de almacenamiento de datos es mayor por esta vía. En la figura 5.11 apreciamos las eficiencias obtenidas, aunque se tiene un comportamiento bastante lineal, como se esperaba, sin embargo la exactitud de estos valores es incierta ya que los caudales obtenidos fueron menores a los 2 L/min, un

rango que se encuentra fuera del umbral de nuestra calibración, además de no estar en una zona de uso recomendada por el fabricante, obteniéndose una línea de tendencia que no se ajusta muy bien a los puntos y dando por resultado un coeficiente de correlación de 0.9. La poca fiabilidad en el sensor de caudal también queda exhibida en la figura 5.15 donde se obtiene una gráfica del caudal muy discreta.

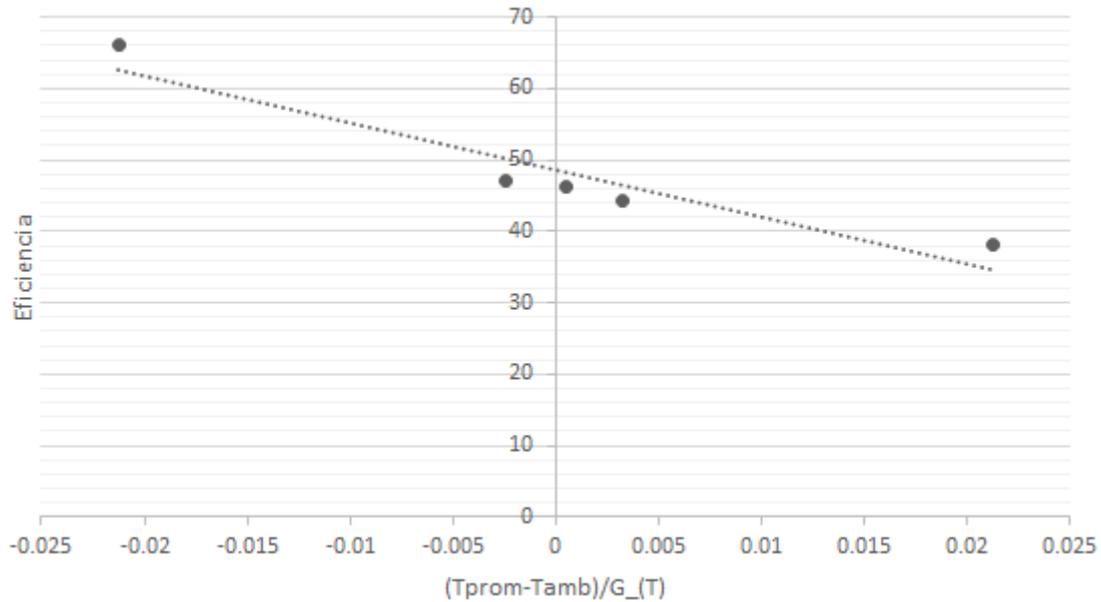


Figura 5.11: Eficiencia obtenida del colector

Ajuste	Función	R ²
Lineal	$f(x) = -661.29x + 48.63$	0.9043

Cuadro 5.5: Eficiencia del colector seleccionado.

5.6. Aplicación del servidor

Los resultados de la aplicación se muestran a continuación, comenzando por las opciones que se nos presentan. La figura 5.12 presenta el panel principal, que nos brinda la opción de seleccionar el monitoreo en tiempo real, el histórico diario y el histórico mensual.

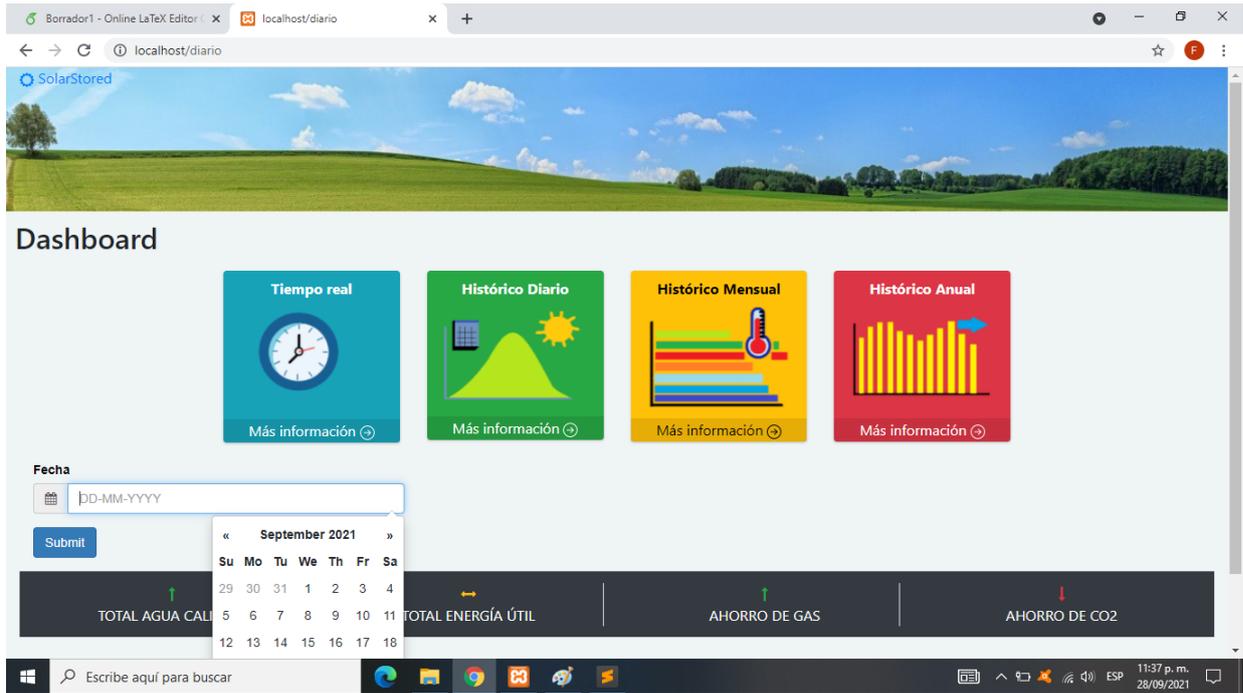


Figura 5.12: Muestra en tiempo real

La primera de nuestras opciones está en la figura 5.13, que entrega los datos de tiempo real, presentando el último valor de cada variable almacenada en la base de datos, se actualiza cada 10 segundos sin necesidad de refrescar el navegador.

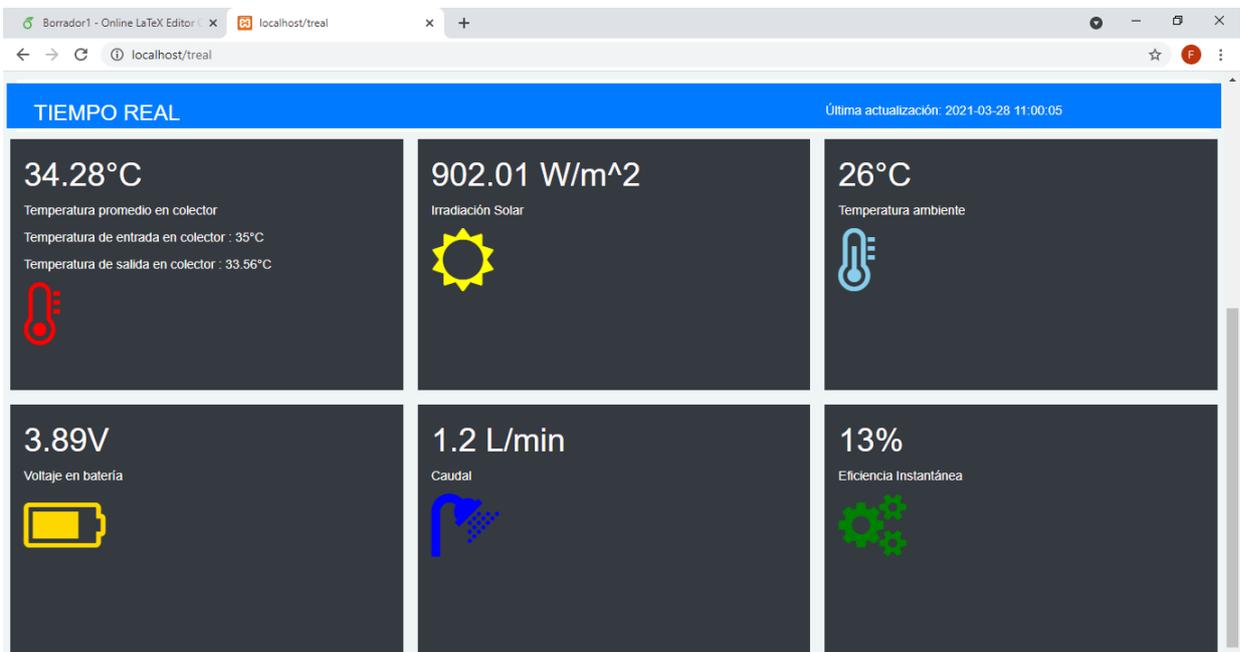


Figura 5.13: Muestra en tiempo real

Para visualizar el comportamiento de la temperatura promedio a lo largo de un día específico se debe cambiar de opción en el panel principal a histórico mensual, posteriormente se llena el formulario con la fecha deseada. La figura 5.14 presenta un ejemplo de esta opción, corresponde al día 9 de Febrero del 2021. En el ejemplo apreciamos un gráfico de la temperatura promedio en el colector, la irradiación solar, la temperatura ambiente y la cantidad de litro extraídos; para el caso especial para el 26 y 27 de Marzo, se grafica el flujo volumétrico en lugar de los litros extraídos.

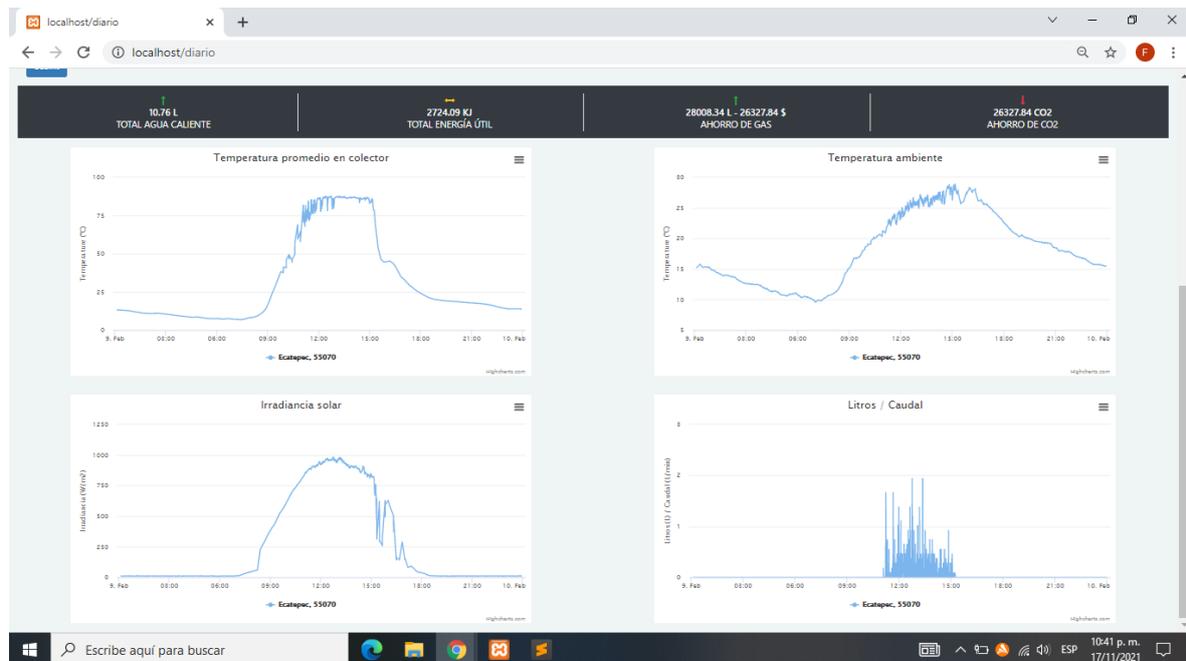


Figura 5.14: Muestra de datos de un día específico.

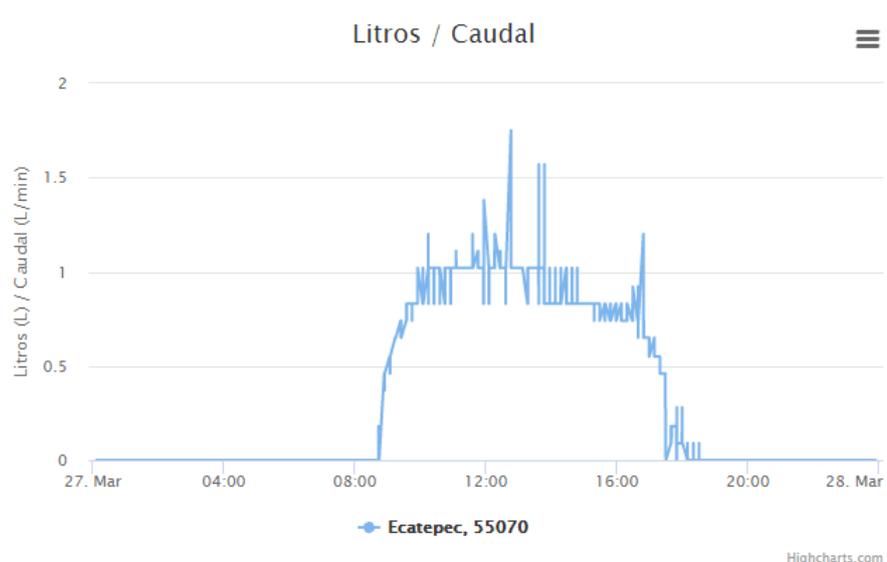


Figura 5.15: Muestra del caudal a lo largo del día (27 de Febrero).

La figura 5.15 nos muestra la baja exactitud del sensor de flujo a bajos caudales, el gráfico que se traza es bastante discreto, presentando entre las mediciones pasos de 0.1 L/min, bastante grandes para flujos tan pequeños.

Finalmente los registros históricos mensuales se pueden visualizar en la tercera opción del panel. También muestra un formulario que se completa seleccionando un mes específico y la aplicación entrega los valores promedios de cada intervalo de tiempo de todos los días que conforman al mes. En el caso de la figura 5.16 se presenta el mes de febrero, entregando la temperatura promedio mensual en el colector, así como la irradiancia, temperatura ambiente y la cantidad de agua extraída en cada día del mes. Debido a la cantidad de datos se procesa en esta opción, los gráficos tardan aproximadamente medio minuto en mostrarse.

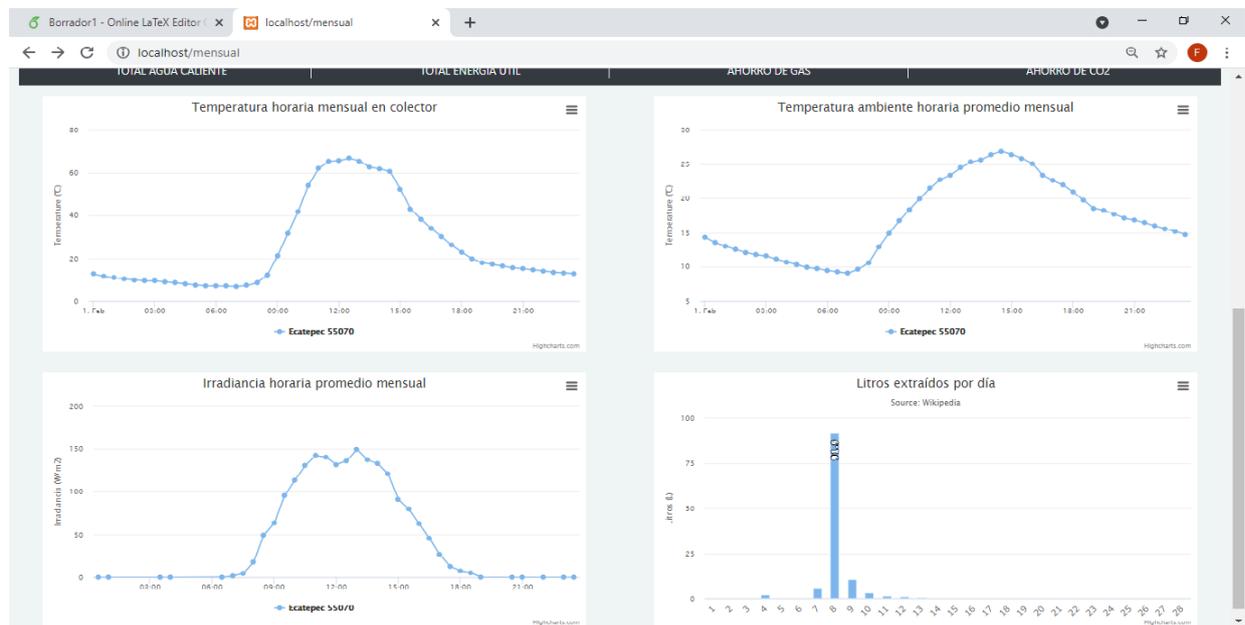


Figura 5.16: Muestra de datos promedio horaria mensual

La siguiente figura (5.17) muestra el diagrama de flujo del código que se ejecuta en una consulta de los datos de un día en específico, la rutina básica se divide en diferenciar si existió una bomba de agua o no se habilitó algún flujo, pues de ello depende la cantidad de calor extraído. De manera similar, la figura 5.18 nos muestra su rutina lógica para una consulta de datos mensual donde se promedian las variables horariamente y se suma la cantidad de litros de agua de un mes.

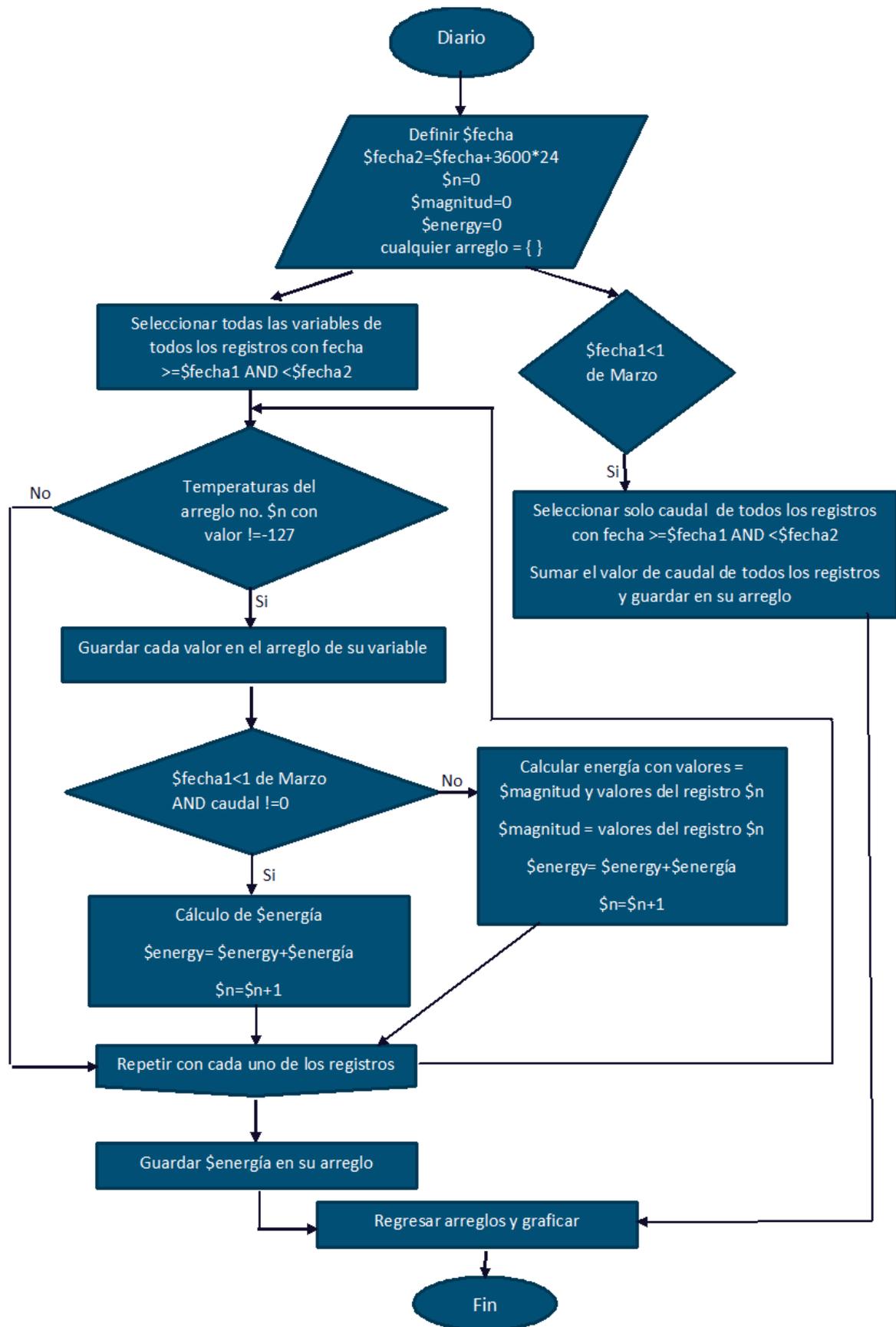


Figura 5.17: Diagrama de flujo de código para la sección de consulta diaria.

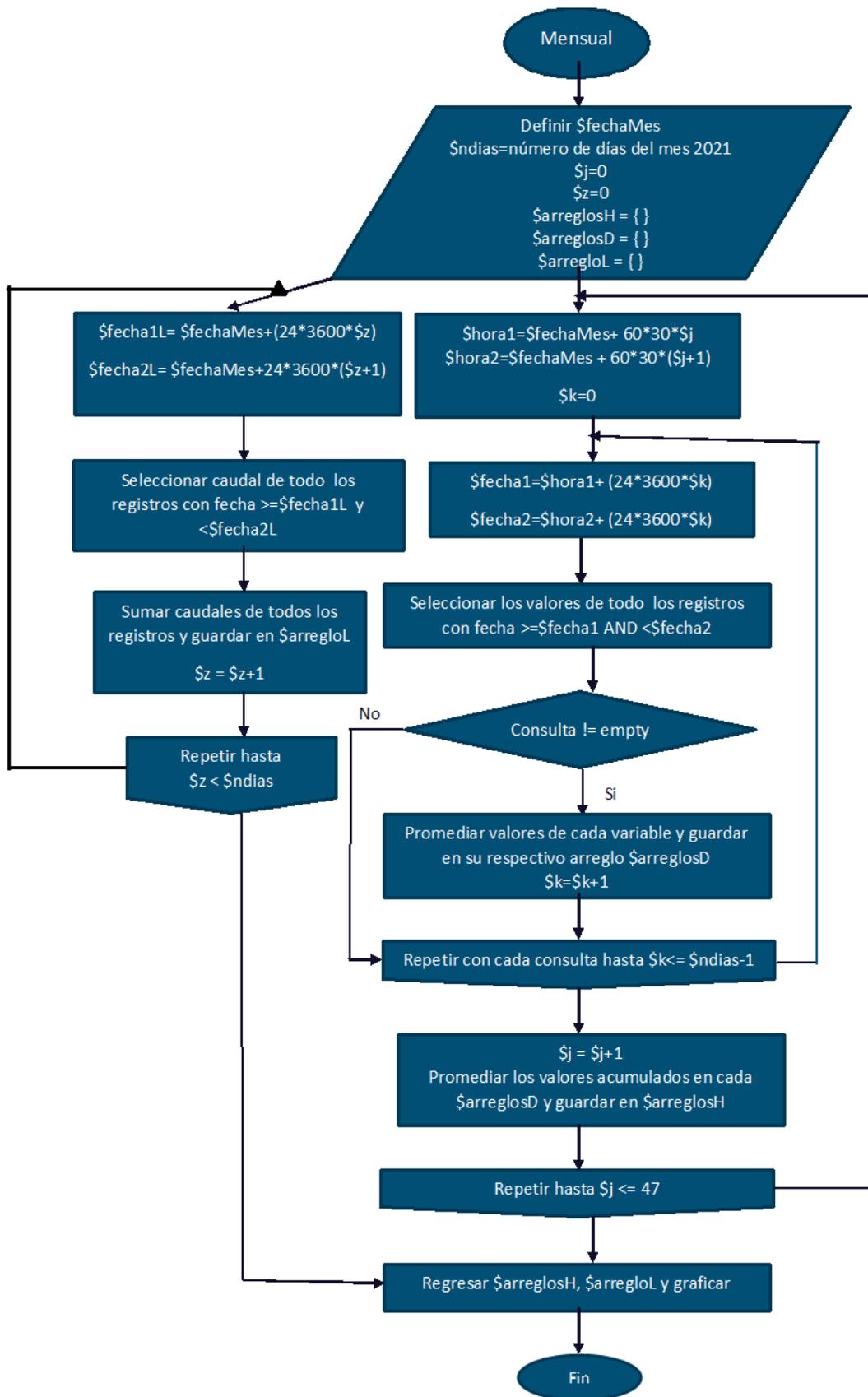


Figura 5.18: Diagrama de flujo de código para la sección de consulta mensual.

El diagrama de flujo de código de la petición para las consultas del tiempo real se muestra en la figura 5.19, donde únicamente la petición se encarga de consultar el último dato de cada variable almacenada en la base de datos.

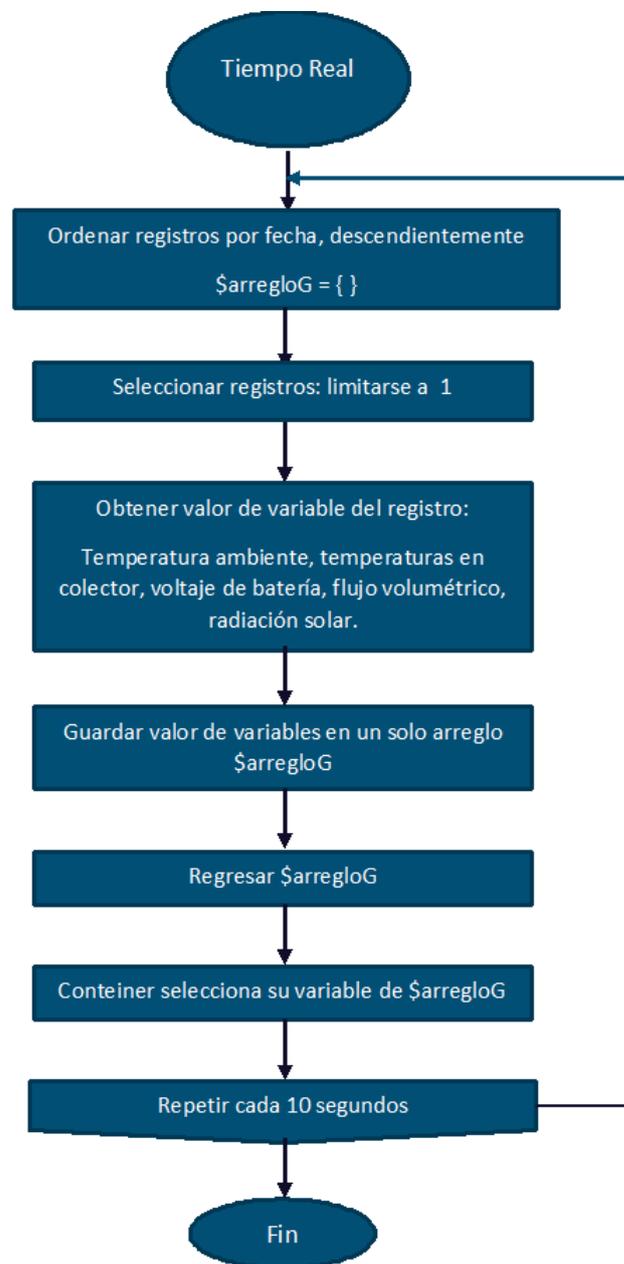


Figura 5.19: Diagrama de flujo de código para la sección de consulta en tiempo real.

6. Conclusiones

En sistema creado en este trabajo, en general, logró su objetivo de ser un prototipo funcional de monitoreo IOT, ya que fue capaz de medir las temperaturas del colector, temperatura ambiente, irradiación solar y caudal de agua, así como enviar los datos a un servidor vía Wifi, todo esto de manera continua en un lapso de por lo menos 2 semanas y de manera remota; estos datos recopilados son los más básicos y necesarios para cualquier análisis, pues a los usuarios de los colectores solares les sería útil únicamente la temperatura del agua en tiempo real, pero también sería muy importante saber su ahorro de gas y dinero, así como el CO_2 que no emiten, por lo resulta importante saber la cantidad de agua caliente utilizada; por otro lado, la medición de radiación para fines prácticos nos ayuda a saber si nuestro colector tiene un correcto funcionamiento o si su estado de operación coincide con el nivel de radiación que hay. Mientras que la parte software, el servidor cumplió con el objetivo de ejecutar las peticiones, tanto del microcontrolador para almacenar los datos como de los dispositivos que quieran acceder a ellos por medio de la aplicación web, esta última también logra su objetivo de dar una interfaz a los usuarios para conocer el estado de funcionamiento del colector en tiempo real, así como de visualizar el comportamiento del sistema termosolar a lo largo de un día o del comportamiento promedio del mes. Como trabajo futuro, quedaría la evaluación del sistema a lo largo de un año, pero esto queda fuera de los alcances de este trabajo.

La aplicación web programada para este trabajo realmente fue una buena herramienta, pero debido a la gran cantidad de datos, los cálculos promedios mensual llegan a ser un poco tardados, alrededor de 25 segundos. En caso de gestionar más dispositivos deberá ser necesario rentar un espacio de un servidor real y especializado, pues el principal inconveniente fue el mantener encendido un ordenador 24 horas al día para mantener el servidor local disponible.

Por otra parte, de acuerdo a los datos obtenidos en este trabajo, podemos concluir que el mejor ajuste de datos para la calibración del panel fotovoltaico es el polinomio de grado 3, pues al no poder asegurar que las crestas presentadas en la figura 5.7 se deban a un error sistemático, este polinomio es el que presenta los errores más bajas, especificando que ningún ajuste es útil para irradiaciones menores a $50 W/m^2$. El error de nuestro sensor se establece en 14 % para irradiaciones entre 50 y $200 W/m^2$, para niveles de irradiación entre $200 W/m^2$ y $650 W/m^2$ el error es de 12 %, mientras que para irradiaciones superiores a $200 W/m^2$ el error es de 7 %, por lo que para fines escolares sería un buen sensor de irradiación solar. En caso de ser necesario medir irradiancias menores a $50 W/m^2$ es conveniente usar el polinomio grado 4 pero los errores mínimos serán del 19 %.

Sin duda un trabajo futuro, que puede ser complementario, sería la adquisición de una mayor cantidad de mediciones y pruebas para el sensor de irradiancia solar. Dentro de la literatura se menciona que experimentación correspondiente puede conllevar años de medición, no solo para obtener una regresión que se ajuste a los datos, si no también para llevar a cabo las pruebas para obtener los ajustes que se exponen en

este trabajo. Además, resultaría adecuado diseñar de un seguidor solar destinado a la calibración de módulos fotovoltaicos como sensores, este seguidor tendría que contar con motores con el torque suficiente para soportar un piranómetro y un panel solar de baja potencia. Un seguidor para estos fines sería de pequeña escala, lo que permitiría su montaje en la azotea de algún edificio y se evitarían obstáculos de alrededor, a diferencia de los inconvenientes que se presentaron en este trabajo donde no se pudieron realizar mediciones cercanas al amanecer y al atardecer, además de que el heliótropo utilizado representaba un mecanismo poco práctico debido a su tamaño e inamovilidad.

Continuando con la parte de sensores, podemos decir que el sensor de flujo de agua no fue el adecuado para este trabajo pues su precisión para flujos menores a 2 L/min no brindan confianza, tal y como se muestra en la figura 5.15 donde se aprecian que las mediciones para flujos pequeños se da en valores discretos que aumentan la incertidumbre. La repercusión de este sensor se aprecia claramente en la curva de eficiencia que se obtuvo en la figura 5.11, donde el flujo volumétrico afecta fácilmente el calculo de la eficiencia pues se encuentran un poco distantes del ajuste lineal, obteniendo un coeficiente de correlación de 0.90. Aunque, para colector solares de mayor tamaño, este caudalímetro podría ser útil y suficiente.

También podemos decir que los sensores de temperatura no presentan grandes desventajas, pues todos mantienen un error de $\pm 5^\circ$, además en este caso los ds18b20 fueron prácticos y solo requirieron un solo Pin digital del nodeMCU para comunicarse. Para futuros trabajos recomendaríamos su uso ya que no se dañaron en ningún momento a la intemperie o sumergidos por mucho tiempo en agua con temperaturas de hasta 85°C .

En cuanto al dimensionamiento fotovoltaico, para la autonomía del sistema IOT, se logró mantener un abastecimiento adecuado. A pesar de que el prediseño nos indicaba una potencia de 1.5W, la evaluación en PVsystem nos indicaba que en algunos meses podría no abastecerse toda la demanda, esto es normal, pero en una aplicación de poca potencia vale la pena aumentar el número de paneles y tratar de asegurar la energía requerida, a pesar de que la energía no aprovechada aumenta. De igual forma, podemos decir que las baterías y su circuito fue acertado, ya que permitieron la operación nocturna y continua del sistema microcontrolador, así mismo, en un día normal y parcialmente nublado las baterías ya se encontraban cargadas completamente cerca del mediodía.

Finalmente, otras mejoras parten de un diseño distinto a nuestro circuito general, diseñando un *buck* (reductor) propio para los módulos fotovoltaicos de 2W, además diseñar un *boost* (elevador) para entregar los 5V que requiere el NodeMCU, a diferencia de los módulos existentes en los que se basó este trabajo pero que fueron las mejores opciones para este trabajo por su fácil implementación y muy pocas fallas de funcionamiento y rendimiento. En cuanto al microcontrolador, se podría reemplazar por un PIC y crear una librería para funcionar con el módulo wifi ESP-01 o utilizar otro módulo de radiofrecuencia. En general también se recomendaría implementar dispositivos de protección como por ejemplo optoacopladores tanto en el circuito de alimentación como en los sensores. Una carcasa contenedora propia también aportaría a este trabajo.

7. Bibliografía

- [1] Productos growatt, growatt wifi-f. growatt new energy. . URL <https://www.growatt.mx/show-10-595.html>.
- [2] Productos growatt, growatt wifi-f. growatt new energy. . URL <https://midsummerwholesale.co.uk/pdfs/shine-wifix-datasheet.pdf>.
- [3] María Inmaculada Bautista Carrascosa. Cálculo de la radiación solar extraterrrestre en función de la latitud y la declinación solar. 2016.
- [4] Iwona Bisaga, Nathan Puźniak-Holford, Ashley Grealish, Christopher Baker-Brian, and Priti Parikh. Scalable off-grid energy services enabled by iot: A case study of bbox smart solar. *Energy Policy*, 109:199–207, 2017.
- [5] Chang-Sic Choi, Jin-Doo Jeong, Il-Woo Lee, and Wan-Ki Park. Lora based renewable energy monitoring system with open iot platform. In *2018 international conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, pages 1–2. IEEE, 2018.
- [6] D.R. Clark, S.A. Klein, and W.A. Beckman. A method for estimating the performance of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 33(6):551–555, 1984. ISSN 0038-092X. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90010-0). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X84900100>.
- [7] Kemal Çomaklı, Uğur Çakır, Mehmet Kaya, and Kadir Bakirci. The relation of collector and storage tank size in solar heating systems. *Energy Conversion and Management*, 63:112–117, 2012.
- [8] Zengge Co.Limited. Enchufe inteligente. 2021. URL <https://www.amazon.com.mx/inteligente-Magic-Hue-temporizador-concentrador/dp/B07XNBVXXV>.
- [9] Mario Cúnsulo. Radiación solar global y difusa para distintos índices de claridad atmosférica. In *XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES)(La Plata, 2016)*, 2016.
- [10] Mauro AA da Cruz, Joel José PC Rodrigues, Jalal Al-Muhtadi, Valery V Korotaev, and Victor Hugo C de Albuquerque. A reference model for internet of things middleware. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2):871–883, 2018.
- [11] Secretaría de Energía. Balance nacional de energía 2019. 2020.
- [12] Diario Oficial de la Federación. Nmx-es-001-normex-2005 “energía solar —rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua— métodos de prueba y etiquetado”. 2020.
- [13] John A Duffie, William A Beckman, and Nathan Blair. *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons, 2020.

- [14] S.A. DE C.V. Electronica STEREN. Panel solar de 5 vcc y 160 ma. 2021. URL <https://www.steren.com.mx/panel-solar-de-5-vcc-y-160-ma.html>.
- [15] S.A. DE C.V. Electrónica STEREN. focos led wi-fi multicolor. 2021. URL <https://descargas.steren.com.mx/SHOME-120-3-instr.pdf>.
- [16] Efim G Evseev and Avraham I Kudish. The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south. *Solar Energy*, 83(3):377–388, 2009.
- [17] Muhamed Umar Farooq, Muhammad Waseem, Sadia Mazhar, Anjum Khairi, and Talha Kamal. A review on internet of things (iot). *International journal of computer applications*, 113(1):1–7, 2015.
- [18] Andrés Firman, L Zini, R Sanchez, and Luis H Vera. Desarrollo y calibración de dispositivos fotovoltaicos para determinar el recurso solar utilizable por sfer. 2014.
- [19] NL Forero, W Meza, MA Martínez, LM Caicedo, and G Gordillo. Estimación del valor medio mensual del índice de claridad atmosférico (k t) para bogotá, a partir de datos de radiación solar global. *Revista Colombiana de Física*, 40(1), 2008.
- [20] N Fraidenraich and OC Vilela. Performance of solar systems with non-linear behavior calculated by the utilizability method: application to pv solar pumps. *Solar Energy*, 69(2):131–137, 2000.
- [21] Cristian González García, Daniel Meana-Llorián, Juan Manuel Cueva Lovelle, et al. A review about smart objects, sensors, and actuators. *International Journal of Interactive Multimedia & Artificial Intelligence*, 4(3), 2017.
- [22] Octavio García Valladares and Isaac Pilatowsky Figueroa. Aplicaciones termicas de la energia solar en los sectores residencial, servicio e industrial. 2017.
- [23] Jaime Wright Gilmore. Estimación de los promedios diarios y mensuales de la radiación difusa sobre un plano horizontal en alajuela, costa rica. *Uniciencia*, 5(1):16, 1988.
- [24] Jorge E Gómez. El internet de las cosas oportunidades y desafíos. *Ingeniería e Innovación*, 5(1), 2017.
- [25] Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, and Marimuthu Palaniswami. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7):1645–1660, 2013.
- [26] Naser Hossein Motlagh, Mahsa Mohammadrezaei, Julian Hunt, and Behnam Zakeri. Internet of things (iot) and the energy sector. *Energies*, 13(2):494, 2020.
- [27] IEA. Global energy review 2019. *Paris*, 2020. URL <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>.
- [28] Muhammad Iqbal. *An introduction to solar radiation*. Elsevier, 2012.

- [29] IRENA. Estadísticas de capacidad renovable 2020. 2020. URL https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf.
- [30] Abdul Qayoom Jakhrani, Al-Khalid Othman, AR Rigit, Saleem Raza Samo, and S Kamboh. Estimation of incident solar radiation on tilted surface by different empirical models. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(12):1–6, 2012.
- [31] Gh A Kamali, I Moradi, and A Khalili. Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in karaj (iran). *Theoretical and applied climatology*, 84(4):235–241, 2006.
- [32] Akif Karafil, Harun Ozbay, Metin Kesler, and Huseyin Parmaksiz. Calculation of optimum fixed tilt angle of pv panels depending on solar angles and comparison of the results with experimental study conducted in summer in bilecik, turkey. In *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, pages 971–976. IEEE, 2015.
- [33] Rafiullah Khan, Sarmad Ullah Khan, Rifaqat Zaheer, and Shahid Khan. Future internet: the internet of things architecture, possible applications and key challenges. In *2012 10th international conference on frontiers of information technology*, pages 257–260. IEEE, 2012.
- [34] David L King and Daryl R Myers. Silicon-photodiode pyranometers: Operational characteristics, historical experiences, and new calibration procedures. In *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997*, pages 1285–1288. IEEE, 1997.
- [35] David L King, William E Boyson, and Barry R Hansen. Improved accuracy for low-cost solar irradiance sensors. Technical report, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States), 1997.
- [36] David L King, Jay A Kratochvil, and William E Boyson. Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors. In *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997*, pages 1113–1116. IEEE, 1997.
- [37] Somayya Madakam, Vihar Lake, Vihar Lake, Vihar Lake, et al. Internet of things (iot): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 3(05):164, 2015.
- [38] Emiliano Marini. El modelo cliente/servidor. *Recuperado el*, 5, 2012.
- [39] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Calentamiento solar de agua -normatividad-. 2014. URL <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/calentamiento-solar-de-agua-normatividad>.
- [40] S.A. DE C.V. Philips. Philips plug magic hue. 2021. URL https://elenchufeinteligente.es/wp-content/uploads/2020/12/user_manual_Philips_Hue_Smart_Plug.pdf.

- [41] Zhi-Hong Qian and Yi-jun Wang. Iot technology and application. *Acta Electronica Sinica*, 5:026, 2012.
- [42] Liliana Gladis Ruetsch, Alba Ivana Lema, María Isabel Pontin, and Jorge Mario Morsetto. Cálculo de la utilizabilidad para colectores solares planos orientados al norte e inclinados 45° . *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 2010.
- [43] MA Sabiha, R Saidur, Saad Mekhilef, and Omid Mahian. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51:1038–1054, 2015.
- [44] Naylamp Mechatronics SAC. Sensor de flujo de agua 1/2” yf-s201. 2021. URL <https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/108-sensor-de-flujo-de-agua-12-yf-s201.html>.
- [45] A Sakhrieh and A Al-Ghandoor. Experimental investigation of the performance of five types of solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 65:715–720, 2013.
- [46] Víctor Salguero Fernández. Valoración de colectores solares térmicos planos de vacío para la producción de frío. B.S. thesis, 2008.
- [47] Instituto Mexicano del Petróleo Secretaría de Energía. Reporte de inteligencia tecnológica: Energía termosolar. 2018.
- [48] Miguel Ángel Lozano Serrano. Colectores solares térmicos.
- [49] Pallavi Sethi and Smruti R Sarangi. Internet of things: architectures, protocols, and applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017, 2017.
- [50] KN Shukla, Saroj Rangnekar, and K Sudhakar. Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for bhopal, india. *Energy Reports*, 1:96–103, 2015.
- [51] Lieter Javier Silva-Díaz. Embedded systems: An alternative for cuban agroindustry automation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(3), 2019.
- [52] Frederick F Simon. Flat-plate solar-collector performance evaluation with a solar simulator as a basis for collector selection and performance prediction. *Solar energy*, 18(5):451–466, 1976.
- [53] ASTM Standard. E973, standard test method for determination of the spectral mismatch parameter between a photovoltaic device and a photovoltaic reference cell. *American Society for Testing and Materials: West Conshocken, PA*, 2002.
- [54] Steven Vajk Szokolay. Solar geometry. PLEA, 1996.
- [55] Thingspeak. License options interface. 2021. URL <https://thingspeak.com/prices>.
- [56] Mark Weiser. Scientific america. *The Computer for the 21st Century*. (Sept. 1991), pages 94–104, 1991.

- [57] Monika Spörk-Dür Werner Weiss. Solar heat worldwide: Global market development and trends in 2019. *IEA Solar Heating Cooling Programme*, 2020.
- [58] Ling-yuan Zeng. A security framework for internet of things based on 4g communication. In *Proceedings of 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology*, pages 1715–1718. IEEE, 2012.

A. Apéndice

A.1. Circuito

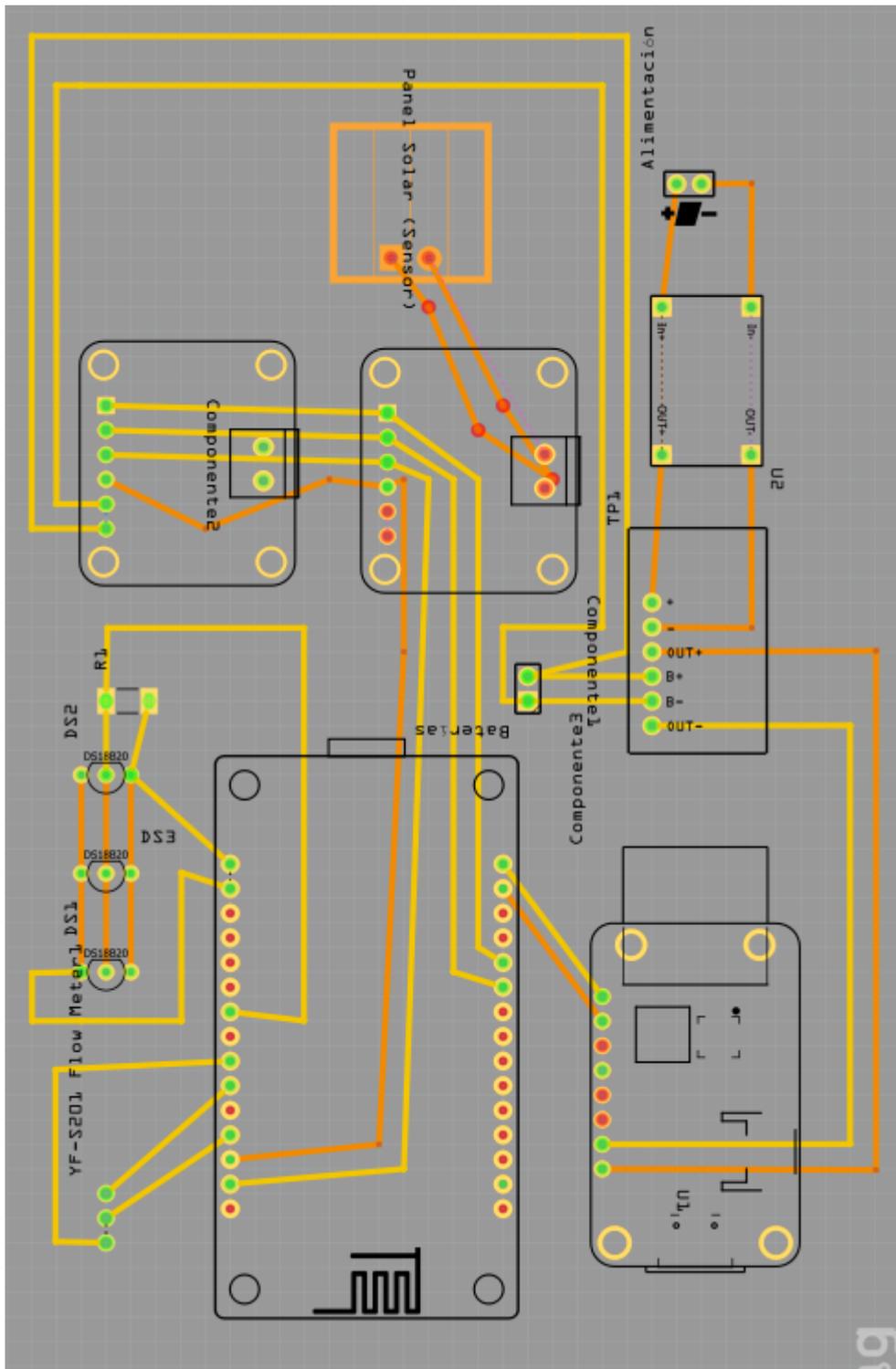


Figura A.1: Circuito

A.2. errores

En las siguientes figuras se muestran las comparaciones de errores entre las regresiones obtenidas y al aplicarles los factores de corrección en cada una. Donde CES es la corrección del espectro solar sobre la función, CAI es la corrección por el ángulo de incidencia y C doble es la aplicación de los dos factores de corrección (espectro solar y ángulo de incidencia). En la figura A.2 se destina la comparación para la regresión lineal, la figura A.3 se muestra los errores para el polinomio grado 3 y la figura A.4 para el polinomio grado 4.

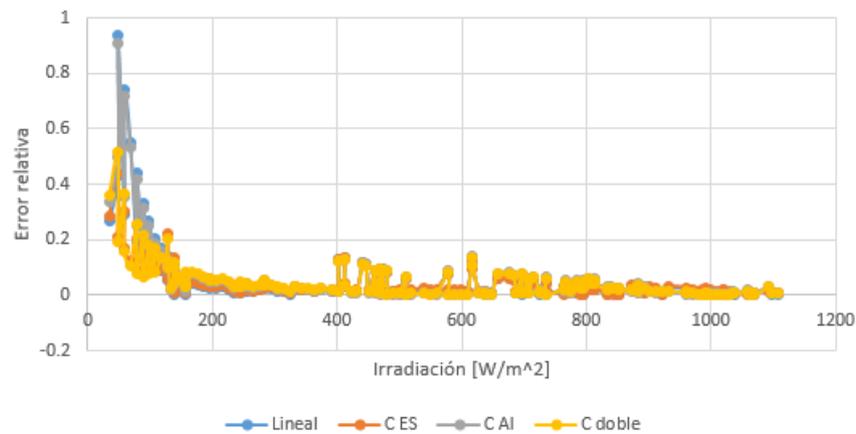


Figura A.2: Errores empleando solo regresión lineal y sus correcciones

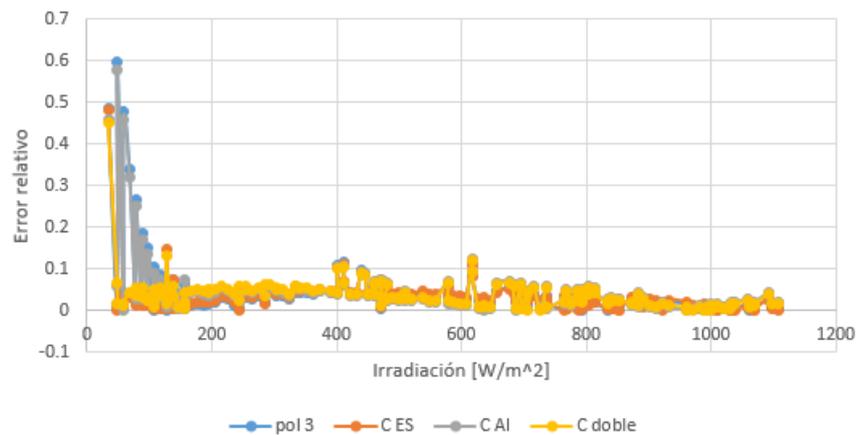


Figura A.3: Errores empleando solo el polinomio 3 y las correcciones

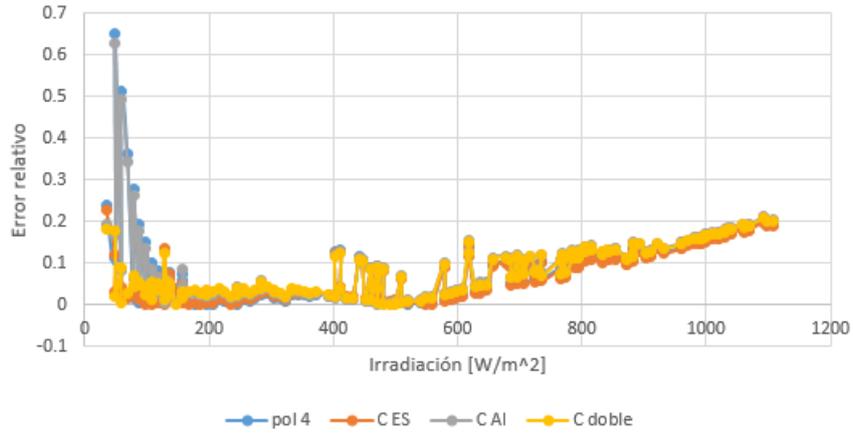


Figura A.4: Errores empleando solo el polinomio 4 y las correcciones

A.3. Errores seccionados

Se seccionó en tres partes y se calcularon los errores a través de tres regresiones lineales en sus respectivos dominios

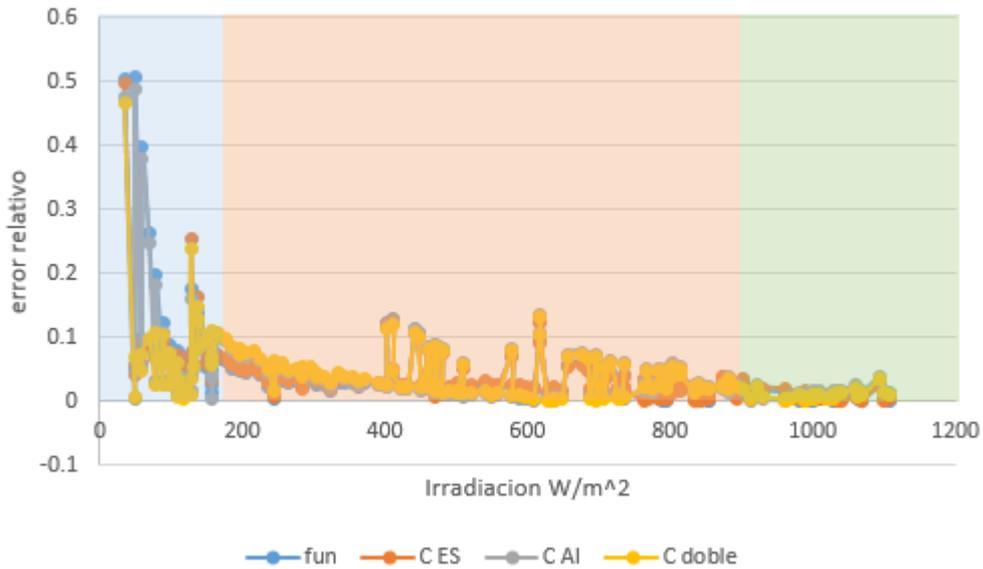


Figura A.5: Errores al utilizar solo regresiones lineales y seccionar el dominio en tres partes.

Dominio	Función	R^2
0-170	$f_1(x) = 6,7559x - 16,305$	0.832
170-900	$f_2(x) = 6,1049x + 17,396$	0.993
900-1360	$f_3(x) = 6,2871x - 22,451$	0.958

A.4. Datasheet de componentes

1. General Overview

1.1. Introduction

Espressif Systems' Smart Connectivity Platform (ESCP) is a set of high performance, high integration wireless SOCs, designed for space and power constrained mobile platform designers. It provides unsurpassed ability to embed WiFi capabilities within other systems, or to function as a standalone application, with the lowest cost, and minimal space requirement.

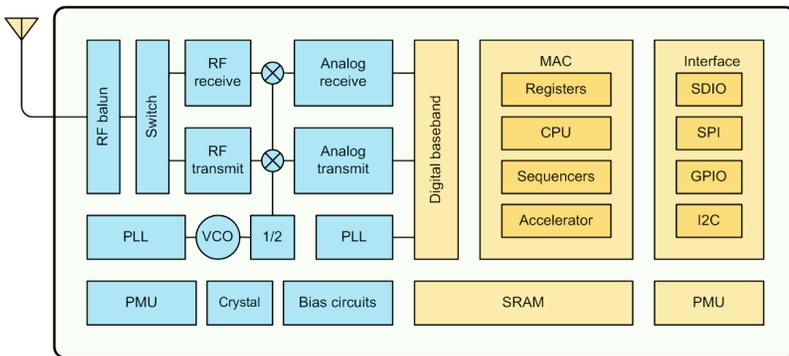


Figure 1 ESP8266EX Block Diagram

ESP8266EX offers a complete and self-contained WiFi networking solution; it can be used to host the application or to offload WiFi networking functions from another application processor.

When ESP8266EX hosts the application, it boots up directly from an external flash. It has integrated cache to improve the performance of the system in such applications.

Alternately, serving as a WiFi adapter, wireless internet access can be added to any micro controller-based design with simple connectivity (SPI/SDIO or I2C/UART interface).

ESP8266EX is among the most integrated WiFi chip in the industry; it integrates the antenna switches, RF balun, power amplifier, low noise receive amplifier, filters, power management modules, it requires minimal external circuitry, and the entire solution, including front-end module, is designed to occupy minimal PCB area.

ESP8266EX also integrates an enhanced version of Tensilica's L106 Diamond series 32-bit processor, with on-chip SRAM, besides the WiFi functionalities. ESP8266EX is often integrated with external sensors and other application specific devices through its GPIOs; sample codes for such applications are provided in the software development kit (SDK).

Espressif Systems' Smart Connectivity Platform (ESCP) demonstrates sophisticated system-level features include fast sleep/wake context switching for energy-efficient VoIP, adaptive radio biasing for low-power operation, advance signal processing, and spur cancellation and radio co-existence features for common cellular, Bluetooth, DDR, LVDS, LCD interference mitigation.

1.2. Features

- 802.11 b/g/n
- Integrated low power 32-bit MCU
- Integrated 10-bit ADC
- Integrated TCP/IP protocol stack
- Integrated TR switch, balun, LNA, power amplifier and matching network
- Integrated PLL, regulators, and power management units
- Supports antenna diversity
- WiFi 2.4 GHz, support WPA/WPA2
- Support STA/AP/STA+AP operation modes
- Support Smart Link Function for both Android and iOS devices
- SDIO 2.0, (H) SPI, UART, I2C, I2S, IR Remote Control, PWM, GPIO
- STBC, 1x1 MIMO, 2x1 MIMO
- A-MPDU & A-MSDU aggregation & 0.4s guard interval
- Deep sleep power <10uA, Power down leakage current < 5uA
- Wake up and transmit packets in < 2ms
- Standby power consumption of < 1.0mW (DTIM3)
- +20 dBm output power in 802.11b mode
- Operating temperature range -40C ~ 125C
- FCC, CE, TELEC, WiFi Alliance, and SRRC certified

1.3. Parameters

Table 1 Parameters

Categories	Items	Values
WiFi Parameters	Certificates	FCC/CE/TELEC/SRRC
	WiFi Protocols	802.11 b/g/n
	Frequency Range	2.4G-2.5G (2400M-2483.5M)
	Tx Power	802.11 b: +20 dBm
		802.11 g: +17 dBm
		802.11 n: +14 dBm
	Rx Sensitivity	802.11 b: -91 dbm (11 Mbps)
802.11 g: -75 dbm (54 Mbps)		
802.11 n: -72 dbm (MCS7)		
Types of Antenna	PCB Trace, External, IPEX Connector, Ceramic Chip	
Hardware Parameters	Peripheral Bus	UART/SDIO/SPI/I2C/I2S/IR Remote Control
		GPIO/PWM
	Operating Voltage	3.0~3.6V
	Operating Current	Average value: 80mA
	Operating Temperature Range	-40°~125°
	Ambient Temperature Range	Normal temperature
	Package Size	5x5mm
External Interface	N/A	
Software Parameters	WiFi mode	station/softAP/SoftAP+station
	Security	WPA/WPA2
	Encryption	WEP/TKIP/AES
	Firmware Upgrade	UART Download / OTA (via network)
	Ssoftware Development	Supports Cloud Server Development / SDK for custom firmware development
	Network Protocols	IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP

	User Configuration	AT Instruction Set, Cloud Server, Android/iOS App
--	--------------------	---

1.4. Ultra Low Power Technology

ESP8266EX has been designed for mobile, wearable electronics and Internet of Things applications with the aim of achieving the lowest power consumption with a combination of several proprietary techniques. The power saving architecture operates mainly in 3 modes: active mode, sleep mode and deep sleep mode.

By using advance power management techniques and logic to power-down functions not required and to control switching between sleep and active modes, ESP8266EX consumes about than 60uA in deep sleep mode (with RTC clock still running) and less than 1.0mA (DTIM=3) or less than 0.5mA (DTIM=10) to stay connected to the access point.

When in sleep mode, only the calibrated real-time clock and watchdog remains active. The real-time clock can be programmed to wake up the ESP8266EX at any required interval.

The ESP8266EX can be programmed to wake up when a specified condition is detected. This minimal wake-up time feature of the ESP8266EX can be utilized by mobile device SOCs, allowing them to remain in the low-power standby mode until WiFi is needed.

In order to satisfy the power demand of mobile and wearable electronics, ESP8266EX can be programmed to reduce the output power of the PA to fit various application profiles, by trading off range for power consumption.

1.5. Major Applications

Major fields of ESP8266EX applications to Internet-of-Things include:

- Home Appliances
- Home Automation
- Smart Plug and lights
- Mesh Network
- Industrial Wireless Control
- Baby Monitors
- IP Cameras
- Sensor Networks
- Wearable Electronics

MODEL: YF-S201

Description:

Water flow sensor consists of a plastic valve body, a water rotor, and a hall-effect sensor. When water flows through the rotor, rotor rolls. Its speed changes with different rate of flow. The hall-effect sensor outputs the corresponding pulse signal. This one is suitable to detect flow in water dispenser or coffee machine. We have a comprehensive line of water flow sensors in different diameters. Check them out to find the one that meets your need most.

Features:

- Compact, Easy to Install
- High Sealing Performance
- High Quality Hall Effect Sensor
- RoHS Compliant

Specifications:

- Working Voltage: DC 4.5V~24V
- Normal Voltage: DC 5V~18V
- Max. Working Current: 15mA (DC 5V)
- Load capacity: ≤ 10 mA (DC 5V)
- Flow Rate Range: 1~30L/min
- Load Capacity: ≤10mA (DC 5V)
- Operating Temperature: ≤80°C
- Liquid Temperature: ≤120°C
- Operating Humidity: 35%~90%RH
- Allowing Pressure: ≤1.75MPa
- Storage Temperature: -25~+ 80°C
- Storage Humidity: 25%~95%RH
- Electric strength 1250V/min
- Insulation resistance ≥ 100MΩ
- External threads: 1/2"
- Outer diameter: 20mm
- Intake diameter: 9mm
- Outlet diameter: 12mm



Application:

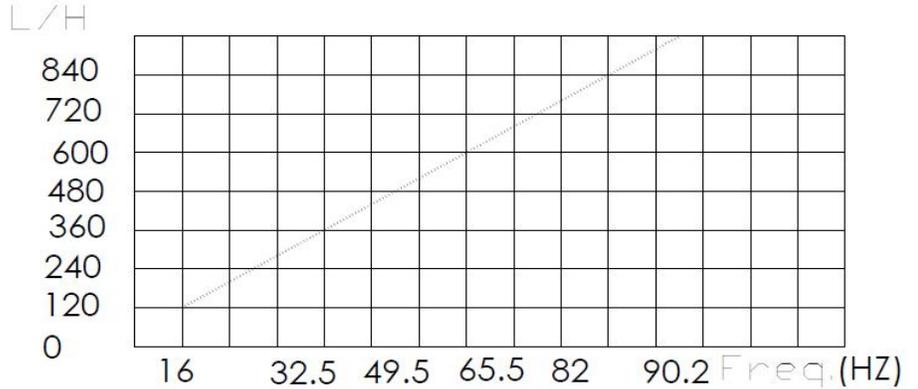
Water heaters, credit card machines, water vending machine, flow measurement device!

Cercuit:

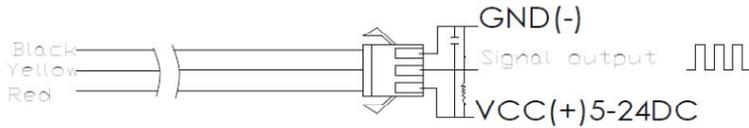
- Red: Positive
- Black: GND
- Yellow: Output signal

Flow Range: 100L/H-/1800H-L/H

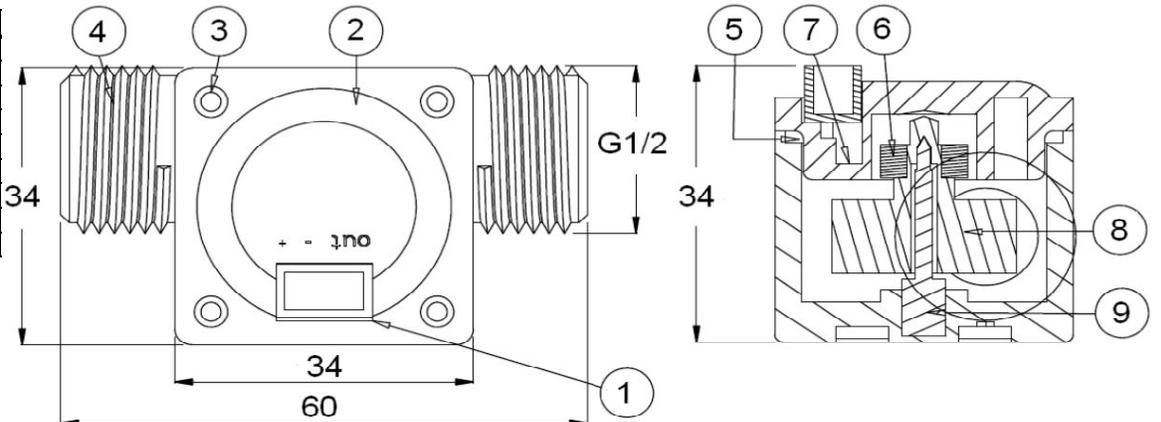
Flow (L/H)	Frezq.(Hz)	Erro range
120	16	±10 5%
240	32.5	
360	49.3	
480	65.5	
600	82	
720	90.2	



Connection method:



N°	Item	Material
1	Wire	PVC
2	Bonnet	PA
3	Screw	Zinc Plated
4	Valve Body	PA
5	Press Valve	
6	Magnet	
7	Hall	
8	Impeller	POM
9	Steel Sharft	SUS304



Closed

INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I²C Interface

1 Features

- Senses Bus Voltages from 0 to 26 V
- Reports Current, Voltage, and Power
- 16 Programmable Addresses
- High Accuracy: 0.5% (Maximum) Over Temperature (INA219B)
- Filtering Options
- Calibration Registers
- SOT23-8 and SOIC-8 Packages

2 Applications

- Servers
- Telecom Equipment
- Notebook Computers
- Power Management
- Battery Chargers
- Welding Equipment
- Power Supplies
- Test Equipment

3 Description

The INA219 is a current shunt and power monitor with an I²C- or SMBUS-compatible interface. The device monitors both shunt voltage drop and bus supply voltage, with programmable conversion times and filtering. A programmable calibration value, combined with an internal multiplier, enables direct readouts of current in amperes. An additional multiplying register calculates power in watts. The I²C- or SMBUS-compatible interface features 16 programmable addresses.

The INA219 is available in two grades: A and B. The B grade version has higher accuracy and higher precision specifications.

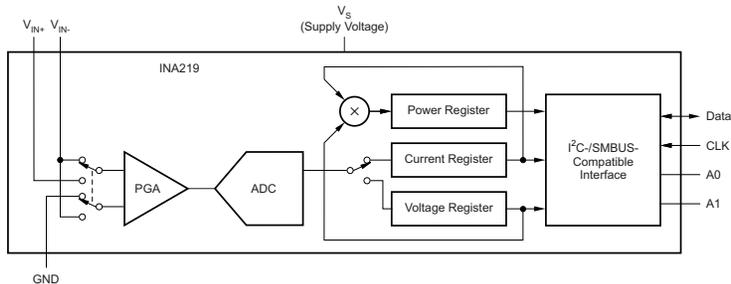
The INA219 senses across shunts on buses that can vary from 0 to 26 V. The device uses a single 3- to 5.5-V supply, drawing a maximum of 1 mA of supply current. The INA219 operates from -40°C to 125°C.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
INA219	SOIC (8)	3.91 mm × 4.90 mm
	SOT-23 (8)	1.63 mm × 2.90 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Simplified Schematic



INA219

Table of Contents

1	Features	1	8.3	Feature Description	9
2	Applications	1	8.4	Device Functional Modes	11
3	Description	1	8.5	Programming	12
4	Revision History	2	8.6	Register Maps	18
5	Related Products	3	9	Application and Implementation	25
6	Pin Configuration and Functions	3	9.1	Application Information	25
7	Specifications	4	9.2	Typical Application	25
7.1	Absolute Maximum Ratings	4	10	Power Supply Recommendations	27
7.2	ESD Ratings	4	11	Layout	27
7.3	Recommended Operating Conditions	4	11.1	Layout Guidelines	27
7.4	Thermal Information	4	11.2	Layout Example	27
7.5	Electrical Characteristics	5	12	Device and Documentation Support	28
7.6	Bus Timing Diagram Definitions	6	12.1	Community Resources	28
7.7	Typical Characteristics	7	12.2	Trademarks	28
8	Detailed Description	9	12.3	Electrostatic Discharge Caution	28
8.1	Overview	9	12.4	Glossary	28
8.2	Functional Block Diagram	9	13	Mechanical, Packaging, and Orderable Information	28

4 Revision History

NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

Changes from Revision F (September 2011) to Revision G

- Added ESD Ratings table, Feature Description section, Device Functional Modes, Application and Implementation section, Power Supply Recommendations section, Layout section, Device and Documentation Support section, and Mechanical, Packaging, and Orderable Information section 1
- Updated Bus Timing Diagram Definitions table. I²C timing table values were previously based on simulation and not characterized 6

Changes from Revision E (September 2010) to Revision F

- Changed step 5 and step 6 values in Table 8 26

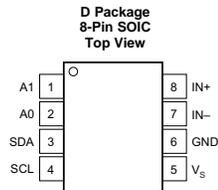
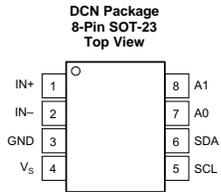
Changes from Revision D (September 2010) to Revision E

- Updated Packaging Information table 3

5 Related Products

DEVICE	DESCRIPTION
INA209	Current/power monitor with watchdog, peak-hold, and fast comparator functions
INA210, INA211, INA212, INA213, INA214	Zero-drift, low-cost, analog current shunt monitor series in small package

6 Pin Configuration and Functions



Pin Functions

NAME	PIN		I/O	DESCRIPTION
	SOT-23	SOIC		
IN+	1	8	Analog Input	Positive differential shunt voltage. Connect to positive side of shunt resistor.
IN-	2	7	Analog Input	Negative differential shunt voltage. Connect to negative side of shunt resistor. Bus voltage is measured from this pin to ground.
GND	3	6	Analog	Ground
V _S	4	5	Analog	Power supply, 3 to 5.5 V
SCL	5	4	Digital Input	Serial bus clock line
SDA	6	3	Digital I/O	Serial bus data line
A0	7	2	Digital Input	Address pin. Table 1 shows pin settings and corresponding addresses.
A1	8	1	Digital Input	Address pin. Table 1 shows pin settings and corresponding addresses.

7 Specifications

7.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

	MIN	MAX	UNIT	
V _S Supply voltage		6	V	
Analog Inputs IN+, IN-	Differential (V _{IN+} – V _{IN-}) ⁽²⁾	–26	26	V
	Common-mode (V _{IN+} + V _{IN-}) / 2	–0.3	26	V
SDA	GND – 0.3	6	V	
SCL	GND – 0.3	V _S + 0.3	V	
Input current into any pin		5	mA	
Open-drain digital output current		10	mA	
Operating temperature	–40	125	°C	
T _J Junction temperature		150	°C	
T _{stg} Storage temperature	–65	150	°C	

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) V_{IN+} and V_{IN-} may have a differential voltage of –26 to 26 V; however, the voltage at these pins must not exceed the range –0.3 to 26 V.

7.2 ESD Ratings

V _(ESD)	Electrostatic discharge	VALUE	UNIT
		Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001, all pins ⁽¹⁾	±4000
Charged device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101, all pins ⁽²⁾	±750		
Machine Model (MM)	±200		

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.
- (2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

7.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

	MIN	NOM	MAX	UNIT
V _{CM}		12		V
V _S		3.3		V
T _A	–25		85	°C

7.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾	INA219		UNIT
	D (SOIC)	DCN (SOT)	
	8 PINS	8 PINS	
R _{θJA} Junction-to-ambient thermal resistance	111.3	135.4	°C/W
R _{θJC(top)} Junction-to-case (top) thermal resistance	55.9	68.1	°C/W
R _{θJB} Junction-to-board thermal resistance	52	48.9	°C/W
ψ _{JT} Junction-to-top characterization parameter	10.7	9.9	°C/W
ψ _{JB} Junction-to-board characterization parameter	51.5	48.4	°C/W
R _{θJC(bot)} Junction-to-case (bottom) thermal resistance	N/A	N/A	°C/W

- (1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).

DS18B20

Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

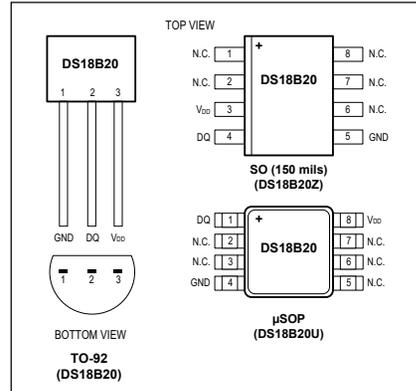
Ordering Information appears at end of data sheet.

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
 - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
 - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
 - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
 - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
 - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin μSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

Pin Configurations



DS18B20

Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

Absolute Maximum Ratings

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground-0.5V to +6.0V	Storage Temperature Range-55°C to +125°C
Operating Temperature Range-55°C to +125°C	Solder TemperatureRefer to the IPC/JEDEC J-STD-020 Specification.

These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

DC Electrical Characteristics

(-55°C to +125°C; V_{DD} = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V _{DD}	Local power (Note 1)	+3.0		+5.5	V
Pullup Supply Voltage	V _{PU}	Parasite power	+3.0		+5.5	V
		Local power	+3.0		V _{DD}	
Thermometer Error	t _{ERR}	-10°C to +85°C			±0.5	°C
		-30°C to +100°C			±1	
		-55°C to +125°C			±2	
Input Logic-Low	V _{IL}	(Notes 1, 4, 5)	-0.3		+0.8	V
Input Logic-High	V _{IH}	Local power	+2.2		The lower of 5.5 or V _{DD} + 0.3	V
		Parasite power	+3.0			
Sink Current	I _L	V _{I/O} = 0.4V	4.0			mA
Standby Current	I _{DDS}	(Notes 7, 8)		750	1000	nA
Active Current	I _{DD}	V _{DD} = 5V (Note 9)		1	1.5	mA
DQ Input Current	I _{DQ}	(Note 10)		5		μA
Drift		(Note 11)		±0.2		°C

Note 1: All voltages are referenced to ground.

Note 2: The Pullup Supply Voltage specification assumes that the pullup device is ideal, and therefore the high level of the pullup is equal to V_{PU}. In order to meet the V_{IH} spec of the DS18B20, the actual supply rail for the strong pullup transistor must include margin for the voltage drop across the transistor when it is turned on; thus: V_{PU_ACTUAL} = V_{PU_IDEAL} + V_{TRANSISTOR}.

Note 3: See typical performance curve in Figure 1. Thermometer Error limits are 3-sigma values.

Note 4: Logic-low voltages are specified at a sink current of 4mA.

Note 5: To guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions, V_{ILMAX} may have to be reduced to as low as 0.5V.

Note 6: Logic-high voltages are specified at a source current of 1mA.

Note 7: Standby current specified up to +70°C. Standby current typically is 3μA at +125°C.

Note 8: To minimize I_{DDs}, DQ should be within the following ranges: GND ≤ DQ ≤ GND + 0.3V or V_{DD} - 0.3V ≤ DQ ≤ V_{DD}.

Note 9: Active current refers to supply current during active temperature conversions or EEPROM writes.

Note 10: DQ line is high ("high-Z" state).

Note 11: Drift data is based on a 1000-hour stress test at +125°C with V_{DD} = 5.5V.

AC Electrical Characteristics—NV Memory

(-55°C to +125°C; V_{DD} = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
NV Write Cycle Time	t _{WR}			2	10	ms
EEPROM Writes	N _{EEWR}	-55°C to +55°C	50k			writes
EEPROM Data Retention	t _{EEDR}	-55°C to +55°C	10			years

AC Electrical Characteristics

(-55°C to +125°C; V_{DD} = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Temperature Conversion Time	t _{CONV}	9-bit resolution			93.75	ms	
		10-bit resolution			187.5		
		11-bit resolution	(Note 12)				375
		12-bit resolution			750		
Time to Strong Pullup On	t _{SPON}	Start convert T command issued			10	μs	
Time Slot	t _{SLOT}	(Note 12)	60	120		μs	
Recovery Time	t _{REC}	(Note 12)	1			μs	
Write 0 Low Time	t _{LOW0}	(Note 12)	60	120		μs	
Write 1 Low Time	t _{LOW1}	(Note 12)	1	15		μs	
Read Data Valid	t _{RDV}	(Note 12)		15		μs	
Reset Time High	t _{RSTH}	(Note 12)	480			μs	
Reset Time Low	t _{RSTL}	(Notes 12, 13)	480			μs	
Presence-Detect High	t _{PDHIGH}	(Note 12)	15	60		μs	
Presence-Detect Low	t _{PDLOW}	(Note 12)	60	240		μs	
Capacitance	C _{IN/OUT}			25		pF	

Note 12: See the timing diagrams in Figure 2.

Note 13: Under parasite power, if t_{RSTL} > 960μs, a power-on reset can occur.

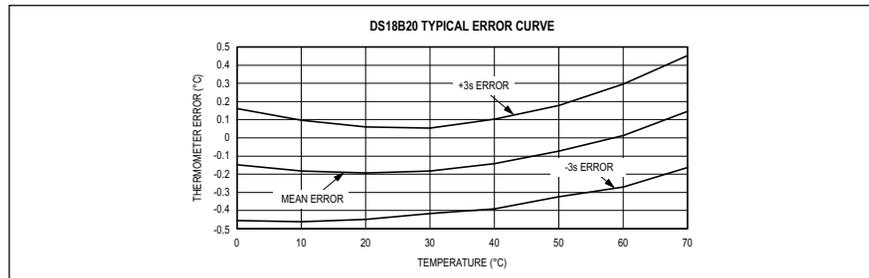


Figure 1. Typical Performance Curve

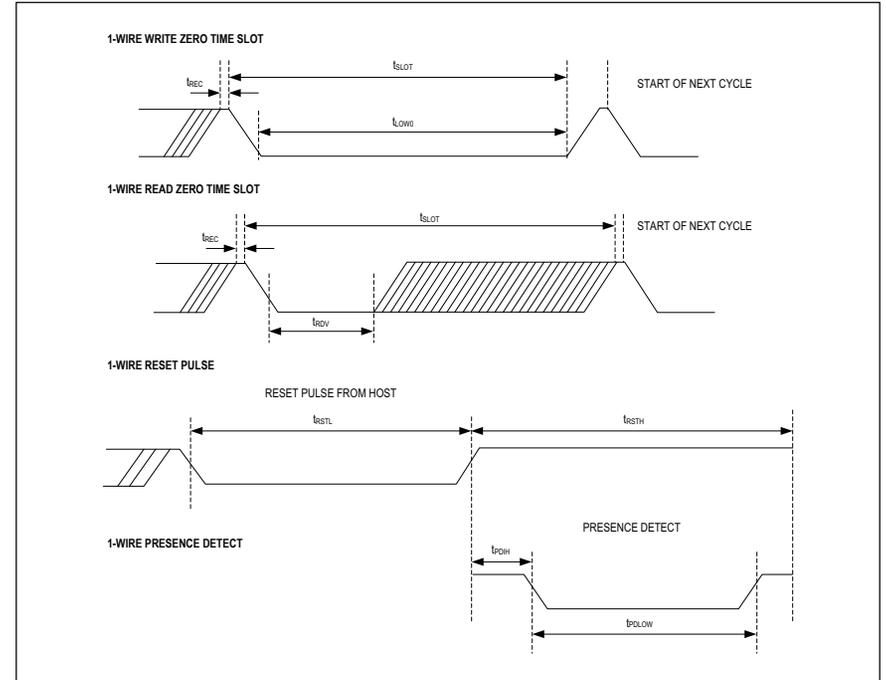


Figure 2. Timing Diagrams

Pin Description

SO	PIN		NAME	FUNCTION
	μSOP	TO-92		
1, 2, 6, 7, 8	2, 3, 5, 6, 7	—	N.C.	No Connection
3	8	3	V _{DD}	Optional V _{DD} . V _{DD} must be grounded for operation in parasite power mode.
4	1	2	DQ	Data Input/Output. Open-drain 1-Wire interface pin. Also provides power to the device when used in parasite power mode (see the <i>Powering the DS18B20</i> section.)
5	4	1	GND	Ground