



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



TESIS

**SISTEMA DE ADQUISICIÓN INALÁMBRICO CON REGISTRO Y PROCESAMIENTO
DE DATOS EN FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE CON INTERFAZ GRÁFICA**

Que para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Presenta
Ing. José Angel Zumaya García
G20073007
No. CVU: 1086650

Director de Tesis
Dr. Pedro Martín García Vite
No. CVU: 227310

Cd. Madero, Tamaulipas

septiembre 2022

Ciudad Madero, Tamaulipas, **28/junio/2022**

OFICIO No.: U.102/22
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE
IMPRESIÓN DE TESIS

C. JOSÉ ÁNGEL ZUMAYA GARCÍA
No. DE CONTROL G20073007
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

“SISTEMA DE ADQUISICIÓN INALÁMBRICO CON REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS EN FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE CON INTERFAZ GRÁFICA”

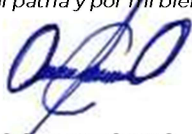
El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	DR.	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
SECRETARIA:	DRA.	MARÍA LUCILA MORALES RODRÍGUEZ
VOCAL:	DR.	JUAN JAVIER GONZÁLEZ BARBOSA
SUPLENTE:	DR.	NELSON RANGEL VALDEZ
DIRECTOR DE TESIS:	DR.	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Por mi patria y por mi bien"®



MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p.- Archivo
MACG



Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos C.P. 89440 Cd. Madero, Tam.

Tel. 01 (833) 357 48 20, ext. 3110, e-mail: depi_cdmadero@tecnm.mx

tecnm.mx | cdmadero.tecnm.mx



Dedicatoria

A mis padres, mi ejemplo a seguir. A mi novia, mi compañera fiel. A mi país, el lugar que amo.
A Jesucristo, la fuente de mi sabiduría.

Agradecimientos

Agradezco a mi directo de tesis el Dr. Pedro Martín García Vite, por su imprescindible apoyo en estos cuatro semestres de maestría. A mi comité tutorial, conformado por Dr. Luciano Aguilera Vázquez, Dra. María Lucila Morales Rodríguez, Dr. Nelson Rangel Valdez y Dr. Juan Javier González Barbosa por sus valiosos comentarios y aportaciones. A los diferentes docentes y coordinadores de la maestría en Ciencias de la Ingeniería. Así como mis compañeros de posgrado, en especial a Aracely Zapién Castillo. De igual manera, agradezco a toda mi familia por su constante apoyo y aliento. Pero principalmente a Dios por su ayuda y dirección en esta etapa.

Agradecimientos especiales:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado a través de una beca.

Al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Sistema de adquisición, registro y procesamiento de datos en fuentes de energía renovable con interfaz gráfica

José Angel Zumaya García

Resumen

La situación ambiental de nuestro planeta nos impulsa cada vez más al uso y aprovechamiento de energías limpias y de calidad. Del uso de estas surge el concepto de redes eléctricas inteligentes las cuales, a diferencia de las redes eléctricas tradicionales, suplen la demanda energética mediante diversas fuentes incluyendo las energías renovables. De estas sobresale la energía solar fotovoltaica, la cual debido a sus destacadas características resulta idónea para aplicaciones residenciales e industriales. Sin embargo, esta fuente de energía renovable tiene una producción variable debido a diversos factores ambientales que mitigan su rendimiento. Esto se reflejan en las variables eléctricas que describen el estado del sistema fotovoltaico. Por ello, para optimizar la generación de energía se requiere un adecuado control de las variables implicadas en el proceso.

En el presente trabajo se miden en tiempo real las tres variables ambientales que más repercuten en la eficiencia de una red de sistemas fotovoltaicos. Además, se supervisan las señales eléctricas que representan el comportamiento de la red. Dicho proceso se hace de manera inalámbrica, permitiendo así analizar a distancia el estado de una red fotovoltaica con múltiples nodos. Asimismo, mediante una interfaz gráfica y una App móvil se muestra la información sensada para que el usuario final pueda implementar acciones preventivas o correctivas.

De esta manera, el objetivo principal de este trabajo es diseñar e implementar un sistema de medición remoto para conocer el estado actual de una red de sistemas fotovoltaicos y a fin de proveer

información para la toma de decisiones que ayuden a la extracción de energía eléctrica.

En conclusión, se hace el monitoreo de una red de estaciones fotovoltaicas mediante diversos sistemas de adquisición de datos (SAD). Cada uno de ellos mide en tiempo real variables eléctricas y meteorológicas y envía inalámbricamente los datos obtenidos a una Raspberry Pi. Esta información es almacenada en el dispositivo y mostrada en una interfaz gráfica o, si el usuario lo desea, en una App móvil. En la interfaz gráfica portable, además de monitorear la red, se puede analizar a detalle cada una de las estaciones por medio de gráficas, ampliar la red o recibir retroalimentación cuando ocurra una falla en algún nodo, esto último gracias al análisis realizado con datos recopilados.

Viendo en perspectiva todo el trabajo realizado a lo largo de la maestría, se concluye que se han alcanzado exitosamente los objetivos planeados inicialmente, incluso superándolos ampliamente por la cantidad de artículos y participaciones en diferentes convocatorias. Finalizado satisfactoriamente el trabajo de investigación.

Data acquisition, recording and processing system on renewable energy sources with graphical interface

José Angel Zumaya García

Abstract

The environmental situation of our planet drives us more and more to use and take advantage of clean and quality energy. From the use of these arises the concept of intelligent electrical networks which, unlike traditional electrical networks, supply the energy demand through various sources, including renewable energies. Among these, photovoltaic solar energy stands out, which due to its outstanding characteristics is ideal for residential and industrial applications. However, this renewable energy source has a variable production due to various environmental factors that mitigate its performance. This is reflected in the electrical variables that describe the state of the photovoltaic system. Therefore, to optimize energy generation, adequate control of the variables involved in the process is required.

In the present work, the three environmental variables that most affect the efficiency of a network of photovoltaic systems are measured in real time. In addition, the electrical signals that represent the behavior of the network are monitored. This process is done wirelessly, thus allowing remote analysis of the status of a photovoltaic network with multiple nodes. Likewise, through a graphical interface and a mobile app, the information sensed is displayed so that the end user can implement preventive or corrective actions. In this way, the main objective of this work is to design and implement a remote measurement system to know the current status of a network of photovoltaic systems and in order to provide information for decision-making that helps the extraction of electrical energy.

In conclusion, a network of photovoltaic stations is monitored using various data acquisition

systems (DAQ). Each of them measures electrical and meteorological variables in real time and wirelessly sends the data obtained to a Raspberry Pi. This information is stored in the device and displayed in a graphical interface or, if the user wishes, in a mobile App. In the portable graphical interface, in addition to monitoring the network, each of the stations can be analyzed in detail through graphs, expand the network or receive feedback when a failure occurs in a node, the latter thanks to the analysis carried out with data collected.

Looking at all the work carried out throughout the master's degree in perspective, it is concluded that the initially planned objectives have been successfully achieved, even surpassing them widely due to the number of articles and participation in different calls. Successfully completed the research work.

Índice general

Pág.

Resumen	I
Abstract	III
Índice de Tablas	VIII
Índice de Figuras	X
Nomenclatura	XI
1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivos específicos	6
1.3 Justificación del estudio	7
1.4 Organización de la tesis	8
2 Antecedentes	9
2.1 Energías No Renovables	10
2.2 Algunos Tipos de Energías Renovables	10
2.2.1 Energía Solar	11
2.3 Redes Eléctricas Inteligentes	15
2.4 Comunicación inalámbrica	16
2.4.1 Módulos Xbee	17
2.5 Python en aplicaciones solares	18

2.6 Minería de datos en aplicaciones solares	18
2.7 Estado del Arte	20
2.8 Conclusión	23
3 Desarrollo del proyecto	24
3.1 Metodología	25
3.2 Estructura propuesta para el SAD	27
3.2.1 Acondicionamiento de variables	27
3.3 Comunicación remota con el Xbee	28
3.4 Topologías de red inalámbrica	32
3.5 Proceso en la Raspberry Pi	34
3.5.1 Interfaz Gráfica	34
3.5.2 Test de usabilidad de la interfaz gráfica	36
3.5.3 ThingSpeak	37
3.6 Conclusiones	38
4 Implementación y validación experimental	39
4.1 Sistema de Adquisición de Datos	40
4.2 Red Inalámbrica Xbee	41
4.3 Raspberry Pi	42
4.4 Programa en Python	43
4.4.1 Almacenamiento en .xlsx	44
4.4.2 Configuración ThingSpeak	48
4.4.3 Interfaz Gráfica	55
4.4.4 Test de usabilidad de la interfaz gráfica	56
4.5 Recolección de datos en campo	57
4.6 Conclusiones	58

5 Análisis de datos	60
5.1 Adquisición de Datos	61
5.2 Análisis en Minitab	62
5.3 Análisis con Minería de Datos	63
5.4 Acciones correctivas recomendadas	66
5.5 Aplicaciones con la base de datos	68
5.6 Conclusiones	69
6 Conclusiones y Trabajos Futuros	71
6.1 Conclusiones Generales	71
6.2 Contribuciones	74
6.3 Recomendaciones para trabajos futuros	74
6.4 Actividades realizadas	75
6.5 Publicaciones	75
Bibliografía	76

Índice de Tablas

Pág.

Tabla 2.1	Tabla comparativa de ZigBee, Wifi y Bluetooth.	17
Tabla 5.1	Fragmento de los datos recopilados.	62

Índice de Figuras

Pág.

Figura 2.1 Eficiencia histórica de las celdas solares.	12
Figura 2.2 Tipos de celdas solares.	13
Figura 2.3 Esquema sistema fotovoltaico conectado a la red.	14
Figura 2.4 Módulo Xbee Pro.	17
Figura 3.1 Diagrama de Flujo de la Metodología.	25
Figura 3.2 Curva Potencia–Voltaje con diferentes valores de irradiancia.	26
Figura 3.3 Circuito electrónico de las estaciones de medición.	27
Figura 3.4 Diagrama de flujo del proceso interno en microcontrolador.	32
Figura 3.5 Topologías de redes inalámbricas.	33
Figura 3.6 Proceso interno en Raspberry Pi.	35
Figura 3.7 App ThingView Free.	38
Figura 4.1 Circuito impreso del SAD.	41
Figura 4.2 Ventana de configuración de XCTU®.	42
Figura 4.3 Pantalla conectada a Raspberry Pi con sistema operativo instalado.	43
Figura 4.4 Archivo.xlsx generado con los datos recopilados.	44
Figura 4.5 Ventana de configuración ThingSpeak.	49
Figura 4.6 Pantalla principal de interfaz gráfica.	55
Figura 4.7 Monitoreo de una red de sistemas PV.	57
Figura 4.8 Monitoreo de la red mediante la Interfaz Gráfica.	58

Figura 5.1 Parte posterior de panel PV.	61
Figura 5.2 Resumen gráfico diario en Minitab®.	63
Figura 5.3 Datos de irradiancia, temperatura y potencia clasificados con <i>k</i> -means.	64
Figura 5.4 Árbol de Decisión generado en Python.	65
Figura 5.5 Mensajes en Interfaz Gráfica.	67
Figura 5.6 Resultados de Simulación en PV*SOL.	69

Nomenclatura

SAD Sistema de Adquisición de Datos

PV Fotovoltaico

REI Red eléctrica inteligente

A Amperios

V Voltios

W Watts

W/m² Watt sobre metro cuadrado

MG Microrred

CA Corriente alterna

CD Corriente directa

DG Generación distribuida

TIC Tecnologías de la información y la comunicación

SCADA Sistema de supervisión, control y adquisición de datos

WAN Red de área amplia

FAN	Red de área de campo
HAN	Redes de área de hogar
CEP	Convertidores estáticos de potencia
MCU	Unidad de Microcontrolador
AT	Aplicación transparente
API	Interfaz de aplicación programable

Introducción

En la búsqueda de optimizar la generación, transporte y distribución de energía eléctrica ha surgido un sistema capaz de suplir y superar al sistema eléctrico convencional. Este sistema permite la integración de distintas fuentes de energía para en conjunto suplir la demanda energética poblacional, al mismo tiempo que monitorea a los elementos interconectados por medio de tecnologías de la información, de ahí el nombre de redes eléctricas inteligentes (REI). En este tipo de redes, las energías renovables juegan un papel crucial, lo que las hace relevantes ante la necesidad de implementar acciones que mitiguen o contrarresten el cambio climático. Las REI integran la generación centralizada a través de grandes plantas generadoras, con la generación distribuida en pequeña escala de energías renovables. Lo que permite al usuario consumir y enviar energía a la red, debido a que la red posibilita la incorporación de microrredes, las cuales son sistemas pequeños y autónomos [1]. La importancia de estos sistema recae en la generación de energía eléctrica por medio de energías renovables.

Si bien existen muchas fuentes de generación de energía dadas por la naturaleza, una de las principales es la obtenida a partir de la radiación electromagnética procedente del Sol. Esto se logra

gracias al efecto fotovoltaico, el cual consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de células o celdas Fotovoltaica(o) (PV). Estas, en conjunto con otros componentes electrónicos, forman los sistemas PV. Los cuales son una fuente limpia e inagotable de energía, ideal para lugares que carecen de conexión a la red eléctrica nacional [2], pero también para grandes metrópolis conectadas a una Red Eléctrica Inteligente(o) (REI). Ciertamente, su instalación requiere una gran inversión inicial pero posteriormente el costo de mantenimiento es bajo ya que se basa principalmente en la limpieza de los módulos PV y, en algunos casos, lubricación de las partes móviles [3]. Además, el costo de la electricidad generada a partir de energía solar PV ha registrado un descenso en los últimos años, debido principalmente a la reducción en los precios de los módulos [4]. Por el contrario, la eficiencia de estos ha aumentado considerablemente, lo cual hacen más rentable la energía solar.

Pese a las grandes ventajas, esta fuente de energía alternativa, al igual que todas las energías renovables, tiene una producción variable ya que es afectada por factores ambientales como las nubes, el horario o las estaciones del año. Por lo cual es necesario medir estas variables, sus efectos en los sistemas de generación e implementar estrategias de control. Por eso, se considera que el buen desempeño de las REI depende en buena medida de las tecnologías de comunicación que se empleen para transmitir estos datos. Debido al gran tamaño de las redes, la tecnología inalámbrica es una de las principales alternativas ya que permite la transferencia de información entre dos o más puntos sin la necesidad de una infraestructura física. No obstante, aunque llega a tener problemas con interferencias electromagnéticas, es excelente para el monitoreo y registro de información. Estas tecnologías de comunicación inalámbrica incluyen principalmente redes de área local inalámbricas (WLAN), las cuales son ideales para la comunicación en microrredes que generen su energía por medio de sistemas PV, siempre y cuando se seleccione la topología apropiada para la aplicación deseada [5].

Sin duda, las REI son necesarias para progresar en el campo de las energías renovables, para lo cual es imprescindible, además de una comunicación eficaz, la medición, visualización y análisis de las variables que influyen en la generación de energía eléctrica. Por esto, en el presente proyecto se propone el diseño e implementación de un sistema de medición remoto para conocer el estado actual de

una red de sistemas PV con el fin de generar señales de respuesta que garantizan su correcta operación. Este incluye una interfaz gráfica que posibilita la visualización, la implementación de una plataforma en la nube y el registro de las variables para crear una base de datos mediante tecnología de interconexión inalámbrica.

En este capítulo introductorio se muestra el planteamiento del problema y la justificación del proyecto, el cual se enfoca en el monitoreo de sistemas fotovoltaicos. Además, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo. Para terminar presentando la organización de la tesis.

1.1. Planteamiento del problema

La necesidad de contrarrestar el cambio climático nos ha situado en un periodo de transición referente al uso y generación de energía. La situación ambiental nos ha motivado a tomar acciones para cambiar el uso de recursos no renovables, como el petróleo o el carbón, a recursos renovables, como el sol o el viento. A pesar de que, la producción de energía a nivel global ya está sufriendo una transformación, este periodo de transición durará décadas. Ya que después de varios años de desarrollo, aun no es suficiente la energía que se produce con estos recursos para satisfacer la demanda energética actual [6]. Sin embargo, el aumento gradual de la temperatura media global, diversas enfermedades infecciosas y la tendencia a que las consecuencias se agraven hasta niveles catastróficos [7] nos impulsan a acelerar la optimización de las llamadas energías renovables.

Referente al marco legal y como muestra de su interés, el 14 de septiembre de 2016, el senado mexicano ratificó el Acuerdo de Paris sobre el cambio climático en donde se comprometió a tomar acciones que contribuyan a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [8]. Por ello, México busca fortalecer la generación de energías limpias, ya que además cuenta con las características geográficas y ambientales para convertirse en terreno fértil de este tipo de energías. Sin embargo, para que estas lleguen a ser la principal fuente energética del país, deben ser económicamente rentables. Esto depende de diversos factores, pero al monitorear las variables que afectan la producción de energía se pueden tomar acciones para maximizar la generación.

Existen muchas energías renovables dadas por la naturaleza. Una de las principales es la obtenida a partir de la radiación electromagnética procedente del Sol. La cual es una de las fuentes de generación de energía con mayor potencial en nuestro país y en nuestro estado [9]. Sin embargo, la energía solar tiene una producción variable ya que es afectada por factores como las estaciones del año, la zona geográfica, condiciones climáticas y variables ambientales, principalmente la temperatura e irradiancia. Esta última se define como la cantidad de potencia incidente sobre en la superficie del panel PV. A pesar de que los paneles solares se prueban en condiciones estándares (STC), las cuales son 1000

W/m² de irradiancia y una temperatura de 25 °C, en la realidad estos factores ambientales varían e impactan directamente el rendimiento de los sistemas solares. Este rendimiento se refleja en las curvas características de los paneles PV. Dada la naturaleza variable de la irradiancia y de la temperatura no es posible garantizar una producción constante. Más allá de emplear algoritmos de seguimiento de máxima potencia, es importante conocer la cantidad de energía disponible en un horizonte corto con el fin de administrar y asegurar el balance de generación y consumo.

Por lo anterior, es necesario conocer en tiempo real las curvas características y el estado de los dispositivos encargados de captar la radiación solar, para, con base a los datos obtenidos, plantear estrategias encaminadas a incrementar la eficiencia de la energía solar. Para lo cual es necesario implementar adecuadamente el control inalámbrico de los sistemas fotovoltaicos, así mediante la observación y el análisis en tiempo real del comportamiento y el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, se puedan tomar decisiones capaces de potencializar la generación de energía. Sin duda, la incorporación de fuentes fotovoltaicas y de redes eléctricas inteligentes es provechoso y necesario en nuestro país. Sin embargo, para alcanzar este objetivo es imprescindible monitorear, analizar e implementar acciones en los sistemas fotovoltaicos.

1.2. Objetivos

Diseñar e implementar un sistema de medición remoto para conocer el estado actual de un sistema solar fotovoltaico con el fin de tomar acciones correctivas que ayuden a la producción de energía.

1.2.1. Objetivos específicos

- Registrar las variables adquiridas de un sistema fotovoltaico mediante la tecnología de interconexión inalámbrica.
- Mostrar y registrar mediante una interfaz gráfica los datos de una red de sistemas fotovoltaicos.
- Establecer señales de respuesta basadas en el análisis de los datos adquiridos para garantizar la correcta operación de un sistema fotovoltaico aislado.
- Realizar la conexión de red de varios dispositivos remotos.

1.3. Justificación del estudio

Con el fin de reducir el efecto invernadero se ha optado por el uso de energías limpias, destacando la generación solar PV. No obstante, la generación de energía por este medio tiene una producción variable que no se puede predecir con certeza, ya que existen factores ambientales que afectan el rendimiento como lo son principalmente la temperatura, la irradiancia y la humedad [10]. Además, existen otros agentes externos que también impactan en los sistemas PV como lo son el polvo, el viento o las nubes. Estos causan efectos como el sombreado parcial, el cual ocurre cuando las nubes impiden que la irradiancia incida sobre los paneles provocando caídas en la generación de energía, o la acumulación de polvo sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos que causan una disminución considerable de la potencia de salida. Todos estos fenómenos dificultan mantener un equilibrio consumo—generación, por lo tanto, se requiere de equipos eléctricos para controlar el voltaje en circuitos de distribución y de acciones correctivas que permitan que el sistema genere su máxima potencia de salida.

En el presente proyecto de investigación, se propone monitorear el estado de una red de sistemas PV en tiempo real, por medio de dispositivos que posibiliten medir y registrar las variables eléctricas y meteorológicas implicadas en el proceso. Esto se hará inalámbricamente por medio del protocolo ZigBee, el cual destaca por su distancia de comunicación, implementación sencilla y bajo costo. Además, se prevé facilitar la manera en la que se visualizan los datos mostrando la información a través de una App móvil y en una interfaz funcional. En esta también se recomendarán acciones, en base a los datos sensados, para contrarrestar efectos como el sombreado parcial o la acumulación de polvo. Esto beneficiará al usuario responsable del sistema fotovoltaico, ya que estos datos sentarán las bases para implementar estrategias que maximicen y economicen a largo plazo la generación de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos.

1.4. Organización de la tesis

En las siguientes páginas de esta tesis se explican los pormenores del proyecto. En el Capítulo II: Antecedentes se presentan conceptos indispensables que sustentan al proyecto así como trabajos similares que integran el estado del arte. En el Capítulo III: Metodología se analizan cada una de las etapas que se siguieron para concluir satisfactoriamente este trabajo de investigación. Enseguida en el Capítulo IV: Implementación y validación experimental se exponen los prototipos, la interfaz diseñada, las pruebas en campo y otros detalles de la implementación. Posteriormente en el Capítulo V: Análisis de Datos se hace un estudio de la base de datos recopilada a través del sistema propuesto. Por último en el Capítulo VI: Conclusiones se presenta los resultados, comentarios finales, recomendaciones y actividades extracurriculares desarrolladas durante el posgrado.

Antecedentes

Desde su origen el ser humano ha estado en una búsqueda constante de recursos naturales capaces de proveerle la energía necesaria para realizar trabajo y satisfacer sus necesidades. De hecho, las fuentes de energía han estado fuertemente vinculadas al desarrollo y evolución de la vida del hombre y la sociedad.

La energía, según la Real Academia Española, es la capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo. Dicho de otra manera, es la fuerza que permite mantener a flote la sociedad moderna, lo cual se refleja en el continuo crecimiento de la demanda energética global, la cual se prevé que al menos se duplique para mediados de nuestro siglo [11]. La energía que utilizamos proviene de distintas fuentes las cuales se clasifican en no renovables y renovables.

2.1. Energías No Renovables

Las fuentes de energías no renovables son aquellas que existen en cantidad limitada en la naturaleza, pues no se renuevan a corto plazo y por lo tanto se agotan, como el petróleo o el carbón. A pesar que durante siglos las energías convencionales han sido la principal fuente energética, el consumo de estas ha dado origen a los graves problemas ambientales que sufrimos en la actualidad. De ahí la necesidad de recurrir a fuentes de energía renovables, estas provienen de recursos inagotables, ya sea por la enorme cantidad de energía que poseen, como el sol o porque son capaces de regenerarse a una mayor velocidad de la que se extraen, como la biomasa [12].

2.2. Algunos Tipos de Energías Renovables

Existen diferentes fuentes de energía renovables entre las que se encuentra:

- Energía eólica: Transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica a través de aerogeneradores, que utilizan una hélice para transmitir el movimiento que el viento produce en sus palas al rotor de un alternador.
- Energía hidráulica: Deja caer agua retenida en un embalse o presa por una tubería, a cuya salida se coloca una turbina que girar al caer al agua, poniendo en marcha el generador eléctrico.
- Energía geotérmica: Aprovecha las temperaturas de casi 5000 °C del núcleo de la tierra. Este calor fluye hacia la superficie formando depósitos subterráneos de agua caliente y vapor, las cuales se aprovechan para generar electricidad o calentar edificios.
- Energía mareomotriz: Emplea el ascenso y descenso del agua de mar producido por las fuerzas gravitatorias del sol y la luna para hacer girar turbinas y producir electricidad.
- Energía solar: Por medio de dispositivos fotovoltaicos captan la radiación del sol y la transforman en otra forma de energía.

Esta última es analizada con mayor detalle a continuación puesto que es objeto de estudio en esta investigación.

2.2.1. Energía Solar

La obtención de electricidad por medio del sol es posible gracias al efecto fotovoltaico. Este fue descubierto por Alexandre-Edmond Becquerel en 1839 y consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Estos pueden absorber los rayos solares con longitudes de onda entre 400 nm y 1200 nm [13], cubriendo casi por completo el rango visible y parte del espectro infrarrojo. El primer diseño de este dispositivo tenía solo una eficacia del 6% sin embargo, a partir de la década de los 80's se desarrollan proyectos internacionales que han impulsado la aparición de numerosas compañías de fabricación de celdas y módulos fotovoltaicos las cuales paulatinamente han aumentado su eficiencia tal como lo muestra la Fig. 2.1 diseñada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos [14].

Las celdas están elaboradas a base de cristales de silicio puro con adición de ciertos elementos químicos y se clasifican de acuerdo a su estructura cristalina. Las células solares de silicio fabricadas con silicio monocristalino son las más eficientes, populares y costosas, tienen una eficiencia de hasta el 20% en campo y en laboratorio de 25%. Las celdas de silicio policristalino tienen un menor costo de fabricación, pero su eficiencia también es menor, con una medida del 18%. El más barato de producir es el silicio amorfo pero su mejor eficiencia es solo del 8% además sufre degradación cuando se expone por primera vez a la luz. En Fig. 2.2 diseñada por [15], se presentan estos tipos de celdas.

Estos tres tipos de celdas solares son la primera generación y aunque ha surgido la segunda, conformada por las celdas solares de película fina, y tercera generación, con celdas solares que utilizan semiconductores orgánicos o sensibilizados con colorantes, estos siguen siendo los más utilizados pese a su mayor costo de fabricación debido a su eficiencia, es decir a la cantidad de energía solar recibida

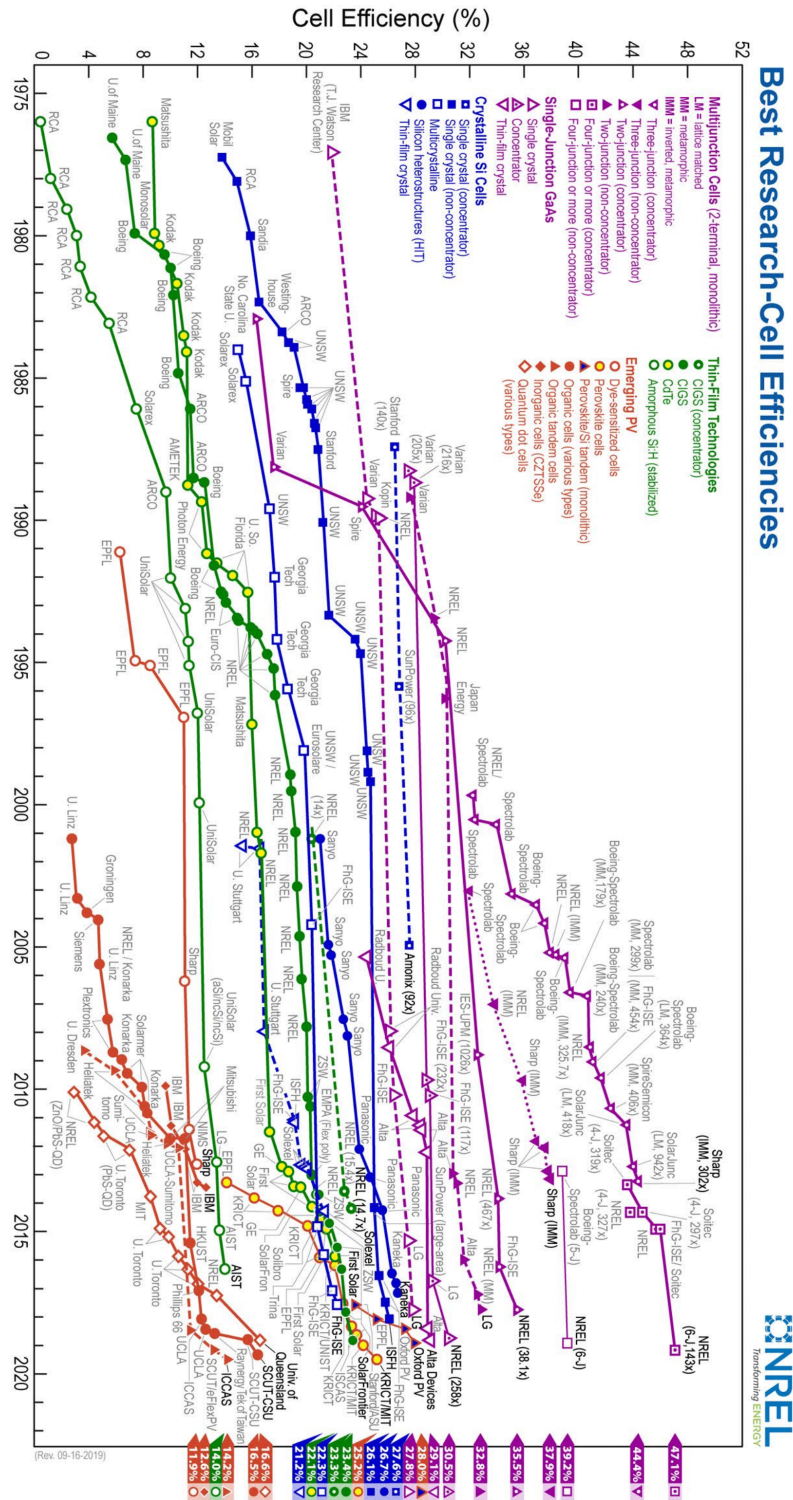


Figura 2.1: Eficiencia histórica de las celdas solares.

que se convierte en energía utilizable.

Una vez que las celdas ya forman parte de un sistema PV, su comportamiento se refleja en las denominadas curvas características: la curva de corriente-voltaje (I-V) y curva de potencia-voltaje (P-V). En ellas se puede observar el comportamiento del panel a través de los valores de voltaje y corriente de salida, los cuales son determinados por las condiciones ambientales en las que el panel trabaja.

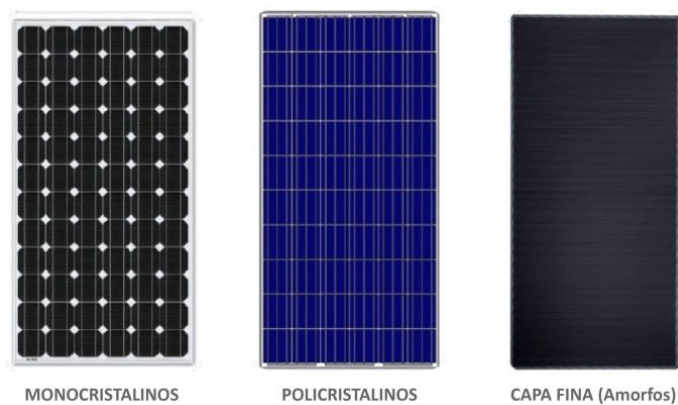


Figura 2.2: Tipos de celdas solares.

Elementos de un Sistema PV

Los sistemas fotovoltaicos están conformados por diversos componentes que resultan imprescindibles para captar la energía del sol y llevar a cabo su transformación. Normalmente las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red se forman como se muestra en la Fig. 2.3. La parte que más destaca del sistema son los módulos fotovoltaicos o paneles solares, compuestos por un conjunto de células solares, ya que son los componentes encargados de transformar la radiación solar en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico.

Los módulos fotovoltaicos se colocan en grandes áreas despejadas o sobre los techos de edificaciones, para esto requieren de soportes especiales. Estos son los encargados de mantener en su lugar los módulos fotovoltaicos y deben estar proyectados para soportar la intemperie de forma constante

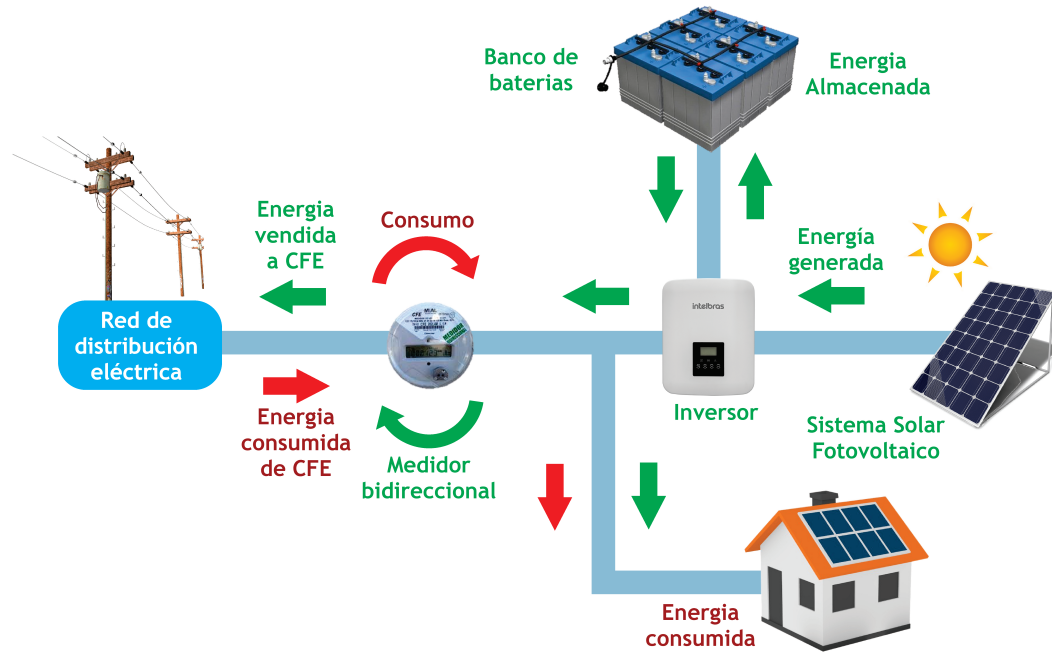


Figura 2.3: Esquema sistema fotovoltaico conectado a la red.

durante mínimo 25 años. Se clasifican en fijos y móviles, los primeros tienen un ángulo de inclinación de 30° o 60°, aunque también se puede regular, mientras que los otros son parte de seguidores solares. Ambos tipos suelen estar fabricados de aluminio. La conexión de los paneles solares puede ser en serie, en paralelo o una combinación de serie y paralelo. Con la conexión en paralelo aumenta la corriente, pero el voltaje es el mismo. En serie aumenta el voltaje, pero la corriente se mantiene igual, mientras que la conexión combinada aumenta la corriente y el voltaje. El tipo de conexión seleccionada depende de la cantidad de paneles y del amperaje y voltaje necesario.

El inversor solar es el encargado de convertir la corriente continua, es decir la energía que producen los módulos fotovoltaicos, en corriente alterna la cual es la generalmente empleada por cargas residenciales. Esta será la misma que se utiliza en la red eléctrica, en el caso de México 127 V con una frecuencia de 60 Hz. Además, cuenta con un algoritmo seguidor del punto máximo potencia, el cual optimiza la generación de energía de los paneles solares. También permite monitorear el funcionamiento del sistema desde el propio dispositivo o desde alguna aplicación móvil, dependiendo del inversor. Existen dos tipos principales de inversores solares: los inversores centrales o comunes, en donde toda

la energía producida se envía a un solo inversor, y los microinversores, que hacen la conversión a nivel modular, es decir, utiliza uno por panel, aunque ciertos modelos permiten hasta 6. Se trata de un elemento indispensable en cualquier instalación fotovoltaica, ya sea de conexión a red o instalaciones aisladas.

Algunos inversores permiten la incorporación de bancos de baterías. Estos son dispositivos que nos permiten almacenar la energía que generamos a través de los paneles solares para hacer uso de la misma cuando la demanda es mayor a la energía generada. En sistemas autónomos no conectados a la red el uso de baterías es imprescindible, para lo cual se utiliza un regulador o controlador de carga, el cual se ocupa de que los bancos de baterías funcionen adecuadamente, ya que previene las situaciones de carga y sobredescarga que pueden dañarlas. Este componente es comercializado basado en su capacidad máxima de corriente a controlar y existen dos tipos de reguladores: MPPT (Seguidor de punto de máxima potencia) y PWM (Modulación por ancho de pulsos). La elección de uno u otro dependerá de cómo sea la instalación solar y el uso que se le vaya a dar. Además, en sistemas conectados a la red, se utiliza un medidor bidireccional de energía, este dispositivo contabiliza la energía que fluye de la red eléctrica al consumidor, pero también la energía que el consumidor inyecta en la red eléctrica. Esto permite vender los excedentes energéticos a CFE.

2.3. Redes Eléctricas Inteligentes

A pesar del aumento de la eficacia de los paneles fotovoltaicos, la energía eléctrica se sigue transportando de la misma manera que los últimos 100 años: a través de un sistema de distribución pasivo con poca comunicación, donde no hay un monitoreo en tiempo real y existe muy poca interacción entre las cargas y el sistema de potencia. Debido a esto, a partir del 2005 surgió el concepto de redes eléctricas inteligentes (REI). Las REI son redes que integran la generación centralizada a través de grandes plantas generadoras, con la generación distribuida en pequeña escala de energías renovables, incluyendo generadores fotovoltaicos, en la cual el usuario puede consumir y enviar energía a la red. De

esta manera la suma de muchas fuentes satisface la demanda energética. En la actualidad, países como Estados Unidos, Japón, Canadá, Australia y la Unión Europea han conseguido grandes avances en este campo y se encuentran un proceso de transición de la red eléctrica convencional a las REI [16]. Una característica importante de estas redes es que son flexibles y permiten la incorporación de microrredes, las cuales operan conectadas a la red eléctrica principal, con la capacidad de funcionar como una isla. Son sistemas pequeños y autónomos que permite a individuos o comunidades generar su propia electricidad, así como vender los excedentes a la red principal [17]. Además, todo lo que está conectado a la red puede ser monitoreado en tiempo real, es decir que existe una comunicación bidireccional entre usuarios y proveedores.

2.4. Comunicación inalámbrica

El desempeño de las REI depende de las tecnologías de comunicación que se empleen para transmitir los datos de monitoreo. Debido al gran tamaño de las redes, la tecnología inalámbrica es ideal para el monitoreo y registro de información de las fuentes de generación eléctrica, principalmente las de fuentes renovables ya que son afectadas por factores ambientales como la solar fotovoltaica.

Las redes inalámbricas se clasifican según el área de aplicación y el alcance de la señal. De acuerdo a [18], las redes de mayor a menor alcance son:

- WWAN: son las redes inalámbricas de área amplia las cuales permiten la comunicación entre países y continentes.
- WMAN: son las redes inalámbricas de área metropolitana.
- WLAN: son las redes inalámbricas de área local.
- WPAN: son las redes inalámbricas de área personal.

Dentro de las WLAN existen diversos tipos como Bluetooth, WiFi y ZigBee, las cuales son ideales

Tabla 2.1: Tabla comparativa de ZigBee, Wifi y Bluetooth.

Requerimientos	Wifi	Bluetooth	ZigBee
Rango	< 100m	< 100m	< 10m
Ancho de banda	< 2.4GHz	2.4GHz - 5GHz	< 2.4GHz
Fiabilidad	Alta	Alta	Media
Latencia	< 20ms	< 10ms	< 10ms
Uso de potencia	Bajo	Medio	Bajo
Costo por módulo	\$1 – \$5	\$1 – \$10	\$2 – \$5

para redes inteligentes. Cada una de ellas tiene características específicas, las cuales se muestran en la Tabla [2.1](#).

2.4.1. Módulos Xbee

ZigBee es un estándar de red de malla inalámbrica de bajo consumo y bajo costo. Esta tecnología proporciona pequeñas cantidades de datos y la mayoría de los dispositivos conectados funcionan con batería. Esta tecnología se utiliza ampliamente para la navegación y el posicionamiento en interiores. Incluso existen pequeños microcontroladores de bajo costo que permiten la comunicación inalámbrica por medio de este tipo de red, como el módulo Xbee que se presenta en la Fig. [2.4](#).



Figura 2.4: Módulo Xbee Pro.

2.5. Python en aplicaciones solares

Los datos obtenidos en las REI se pueden manipular con la ayuda un lenguaje de código abierto, como lo es Python. Este juega un papel importante en una amplia gama de aplicaciones solares, pero principalmente en proyectos relacionados con aumentar la energía eléctrica generada por medio de paneles fotovoltaicos. Esto es posible debido a que Python cuenta con diversas bibliotecas para el estudio de la energía solar como PVLIB Python, Solpy, Pandapower, Pyleecan, Scipy, Numpy o Matplotlib. Las cuales se emplean para el pronóstico de energía solar, simulación de modelos, detección de fallas, monitoreo inalámbrico en tiempo real, aplicación de técnicas de minería de datos para la toma de decisiones, análisis de redes de sistemas fotovoltaicos, entre otras muchas aplicaciones [19].

2.6. Minería de datos en aplicaciones solares

Por medio del Sistema propuesto es posible crear una base de datos con las variables ambientales y eléctricas de una red de sistemas PV. Sin embargo, una de las maneras en las que se pueden analizar los datos adquiridos es por medio de técnicas de minería de datos. Existen 2 técnicas ampliamente utilizadas para procesar datos: k -means y árboles de decisión.

El algoritmo de k -means es un método iterativo de aprendizaje no supervisado, donde los datos no se encuentran clasificados inicialmente. Por lo que el algoritmo se encargará de agrupar en k clases al conjunto de datos de entrada a través de los siguientes pasos:

1. **Asignar k :** k es el número de grupos en los que se desea clasificar el conjunto de datos, y se asigna de manera arbitraria según el contexto de los datos.
2. **Definir los centroides iniciales:** serán k centroides iniciales definidos, y se pueden elegir de manera aleatoria del mismo conjunto de datos.
3. **Asignar los datos al centroide más cercano:** a cada valor del conjunto de datos se le asigna el

centroide más cercano, resultando así la separación de los datos en k grupos. La distancia de los datos a los centroides se calcula generalmente con la distancia Euclídeana [20].

4. **Reubicación de centroides:** cada centroide representativo se reubica al centro (la media) de todos los datos asignados a dicho centroide. El algoritmo converge en cuanto la ubicación de los centroides no cambia.

Por otro lado, la técnica de árboles de decisión es un algoritmo de aprendizaje supervisado que utiliza un conjunto de datos de entrenamiento para posteriormente ser capaz de clasificar nuevos valores. Partiendo del conjunto de entrenamiento que posee diversos atributos y una clase asignada a cada punto, el ID3 desarrolla reglas de decisión que clasifican cada punto (o caso) del conjunto de entrenamiento, y posteriormente, será capaz de predecir la clase de nuevos datos.

Para encontrar cuál es el atributo más significativo en cada caso, se utilizan dos conceptos: entropía y ganancia. La entropía se puede definir como la incertidumbre que se tiene sobre la clase a la que pertenecerá un ejemplo escogido al azar del conjunto de datos [21]. Con base al concepto de entropía, la ganancia se define como la disminución de entropía que se produce al dividir el conjunto de datos de entrenamiento según los distintos valores v_i de un atributo A [21]. Para llevar a cabo el algoritmo ID3 considerando los conceptos anteriores se siguen los siguientes pasos:

1. **Construir tablas de frecuencia:** con base en el conjunto de entrenamiento, se construyen n tablas de frecuencias, siendo n el número de atributos. Asimismo, cada tabla de frecuencia debe contener los valores de A y sus correspondientes clasificaciones.
2. **Calcular la entropía del conjunto:** definida por (2.6.1), donde S es el conjunto de datos, C el conjunto de clases y p_i la probabilidad de que un valor dado pertenezca a la clase i .

$$E(S) = \sum_{i \in C} -p_i \log_2(p_i) \quad (2.6.1)$$

3. **Calcular la ganancia por atributo:** en (2.6.2) se describe la ganancia por atributo, donde V es el conjunto de valores que puede tomar el atributo A mientras que S_{v_i} es el subconjunto de datos de S cuyo atributo A tiene el valor v_i , es decir, el segundo término de la diferencia en la ganancia es la suma de las entropías de los conjuntos resultantes, ponderadas por el tamaño de dichos conjuntos con respecto al inicial [21].

$$G(S,A) = E(S) - \sum_{v_i \in V} \frac{|S_{v_i}|}{|S|} E(S_{v_i}) \quad (2.6.2)$$

4. **Construir el árbol de decisión:** para realizar este paso primero se elige la ganancia más alta, la cual definirá el atributo o la nueva hoja del árbol de decisión. Con esto, las tablas de frecuencia se harán más pequeñas por hoja, y los pasos del 1 al 3 deberán repetirse hasta que exista homogeneidad en las tablas resultantes.
5. **Simplificar el árbol de decisión:** este paso se realizará en cuanto las tablas de frecuencia sean homogéneas, ya que solo hay que representar las hojas del árbol para facilitar la lectura del mismo.
6. **Construir las reglas de decisión:** hay que recorrer el árbol final de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, estableciendo todas las combinaciones posibles.

Estas dos técnicas se aplicaran a los datos recopilados a través del sistema propuesto. Esto se verá mas a detalle en la Sección V: Análisis de datos.

2.7. Estado del Arte

En los últimos años se han desarrollado diversas propuestas para monitorear las variables implicadas en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Algunas aportaciones del 2018 incluyen sistemas de medición por medio del microcontrolador Arduino que permiten mostrar los datos en

un display y comparar estos con los valores del fabricante [22], medición alámbrica con la misma placa que muestra los datos en archivos .xlsx [23], sistemas de monitoreo agrícola solar que mide las condiciones ambientales con convertidores de potencia, XBee Serie 2 y el mismo Arduino [24], circuitos que proporciona la curva característica I-V de un grupo de paneles conectados en serie y las compara con la curva ideal para determinar la probabilidad de falla [25] y sistemas que monitorean inalámbricamente diversas fuentes de energía mediante el protocolo TCP/IP y un software de análisis de energía [26].

Para el siguiente año se plantearon diversas alternativas entre las que destaca un sistema alámbrico con Arduino Uno capaz de almacenar y tabular los datos en una computadora [27], registrador de datos para sistemas autónomos con el mismo microcontrolador, el cual muestra los datos en un display y los almacena en una memoria SD [28]. Además, un sistema que adquiere los datos meteorológicos de un sitio de prueba y los eléctricos con inversores fotovoltaicos tipo Kaco Powador, permitiendo la visualización de estos en un servidor web [29], una red de Internet de las Cosas para el análisis de eficiencia, detección de fallas en plantas fotovoltaicas descentralizadas con procesadores ESP32, ESP8266 mediante un sitio web para consulta de datos [30] y un sistema capaz de leer valores de medición y hacer ajustes mediante el protocolo SunSpec desde un centro de control [31].

Durante el 2020 se propuso la medición Suns-Voc como herramienta para generar la curva I-V y monitorear los datos mediante un microcontrolador Atmega328, complementado con una estación meteorológica de sitio [32]. Un sistema de monitoreo de sitio basado en tecnología WSN con procesamiento de datos en la nube y XBee serie 3 que conforman una red inalámbrica [33]. Además se creó un diseño basado en la web con conexión al sistema meteorológico nacional, inversores que envían los datos eléctricos al servidor con HTTP y una interfaz web para la administración de datos [34] y una propuesta de adquisición, registro y procesamiento de datos de fuentes de generación distribuida en una microrred de CD [35].

A lo largo del 2021 también se desarrollaron proyectos como el presentado en [36] donde crean

un sistema experimental que mide la curva I-V un panel fotovoltaico a fin de monitorear el sistema fácilmente. Sin embargo, no consideran factores ambientales en este proceso alámbrico. También se diseñó un sistema para detectar defectos en paneles fotovoltaicos en condiciones ambientales adversas con la ayuda de termografía sincronizada (ST) [37]. No obstante, este proceso con imágenes infrarrojas (IR) está limitado a un solo panel. Asimismo, se propuso un proyecto que monitorea inalámbricamente el estado de postes de luz solares. Utiliza radiofrecuencia para transmitir y recibir datos entre sí y se muestra en la interfaz gráfica de usuario. La información se muestra en una Raspberry Pi 3 B + con su pantalla táctil [38].

Durante este año, se han desarrollado proyectos como [39] donde por medio del monitoreo en tiempo real de un sistema fotovoltaicos se establecen mantenimientos predictivos los cuales permiten un mejor retorno de inversión.

Como resultado del monitoreo, usualmente se tiene una amplia base de datos por lo que se continúa con el análisis de los valores obtenidos. El análisis y procesamiento de datos en sistemas de energía solar PV, generalmente se realiza mediante técnicas estadísticas o de minería de datos, según la literatura. En relación a las técnicas estadísticas, en [40] los datos recopilados se procesan con la técnica de Correlación de Pearson y el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios en Matlab para obtener valores predictivos de irradiancia, además calculan el Error Porcentual Absoluto Medio de los valores reales de irradiancia contra los valores predictivos calculados.

Respecto a los trabajos que incluyen minería de datos, se encuentra [41] donde la potencia se predice con una hora de anticipación gracias al uso de redes neuronales, mientras que en [42] mejoran el desempeño de las MSV utilizando el algoritmo de colonia de abejas artificiales. En otro trabajo reportado [43], se extrae un conjunto de valores de irradiancia horizontal global, directa y difusa, temperatura de bulbo seco y humedad relativa de una base de datos de acceso público procedente de la localidad “Nevada Power Clark Station” [44]. Dichos datos se tomaron de un día y fueron guardados en intervalos de un minuto. Se emplearon dos técnicas de minería de datos (k -NN y Naive Bayes) para

modelar la irradiancia horizontal global, reportando la técnica de k -NN superior con base al porcentaje de Error Medio Absoluto. En [45] emplean un método basado en un análisis de agrupamiento múltiple junto con el modelo de distribución de probabilidad de los datos para modelar la potencia generada de un sistema PV. Además, se analizan dos grupos de datos: unos en escala de horas y otros en escala de minutos, y para ambas muestras de datos se calculan sus correspondientes centroides.

2.8. Conclusión

Sin duda aún existe la necesidad de optimizar la medición de las variables implicadas en la eficiencia de los sistemas de generación de energía, no solo de energía solar, sino de las diferentes energías renovables, ya que son una alternativa real para proveer energía eléctrica limpia a toda la población. ¿Será acaso que encontramos la fuente energética que tanto hemos buscado?

Desarrollo del proyecto

En este capítulo se abordan los procedimientos utilizados para alcanzar los objetivos planteados en este proyecto. También se presenta la estructura propuesta para los SADs instalados en cada uno de los nodos de la red, así como el procedimiento de acondicionamiento de las señales CD (Corriente Directa). De la misma manera se presenta el protocolo de comunicación inalámbrico utilizado para el monitoreo de la red, junto a los dispositivos que la efectúan y las diferentes topologías de red. Además, se describen los diferentes procesos que se ejecutan en el interior de la computadora principal. Todo lo anterior tiene el fin de proporcionar información confiable y suficiente al sistema para poder implementar acciones por el usuario para maximizar la cantidad de energía eléctrica obtenida por medio de esta fuente de energía renovable.

3.1. Metodología

Para implementar un sistema que permita monitorear las variables ambientales y eléctricas de una red de sistemas PV se recurrió a un diseño experimental. Esta propuesta muestra a través de una App móvil o de una interfaz gráfica la relación entre las variables ambientales y eléctricas para indicar el comportamiento de la red, crear una base de datos e implementar acciones correctivas. Los alcances de este proyecto abarcan un enfoque cualitativo puesto que asigna valores específicos, por medio de instrumentación electrónica, a las variables físicas que intervienen en el proceso.

En el diagrama de flujo de la Figura 3.1 se muestran las diversas partes que conforman la metodología propuesta. El primer paso consiste en delimitar el alcance del proyecto, así como, seleccionar los componentes que mejor se adaptaban a los objetivos planteados previamente. Uno de ellos, es medir en tiempo real las variables ambientales que más afectan la generación de energía solar fotovoltaica. Por lo que, después de una revisión bibliográfica de trabajos similares como [46] y [47], se seleccionó a la irradiancia, la temperatura y la humedad como los factores ambientales que más repercuten en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos.

Por otro lado, existen señales de energía que permiten observar el comportamiento del sistema por medio de dos curvas características. Estas curvas son conocidas como la Curva de Corriente–Voltaje o Curva de Intensidad de corriente y la Curva de Potencia–Voltaje o Curva de Potencia. Esta última

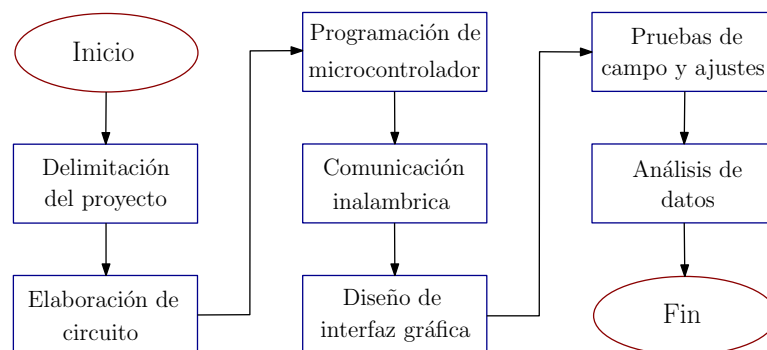


Figura 3.1: Diagrama de Flujo de la Metodología.

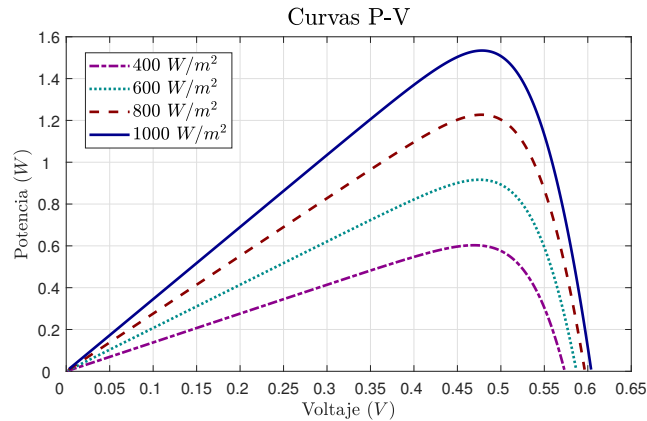


Figura 3.2: Curva Potencia–Voltaje con diferentes valores de irradiancia.

es mostradas en la Figura 3.2, la cual muestra la repercusión del nivel de irradiancia en el Punto Máximo de Potencia (PMP) de un sistema fotovoltaico [48]. Sin embargo, para obtener estas curvas se necesita conocer la corriente y el voltaje del sistema, por lo que además de las variables ambientales ya mencionadas, se requiere medir estas dos señales de energía.

Otro de los objetivos específicos es realizar el monitoreo de una red fotovoltaica, es decir, no analizar únicamente un panel solar sino varias estaciones de generación de energía fotovoltaica, también denominadas nodos de la red. Cada una de estas estaciones está conformada por uno o más paneles solares los cuales alimentan una carga. Por lo que se contempla la adquisición de datos de por lo menos dos estaciones, con la posibilidad de añadir más a través de la interfaz gráfica.

Por todo lo anterior, el sistema fotovoltaico seleccionado para implementar el proyecto está constituido por 2 paneles solares monocristalinos de 50 watts, donde cada panel fotovoltaico representa una estación de generación o nodo de la red. Los paneles solares se encuentran disponibles en el Laboratorio de Electrónica de Posgrado dentro del Campus II del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero Campus.

Posterior a las pruebas de campo, se llevará a cabo un análisis de los datos recopilados a través del monitoreo de la red de sistemas PV. Sin duda, la influencia de las variables ambientales, principalmente la irradiancia y la temperatura, son determinantes en el rendimiento de los proyectos solares, por lo

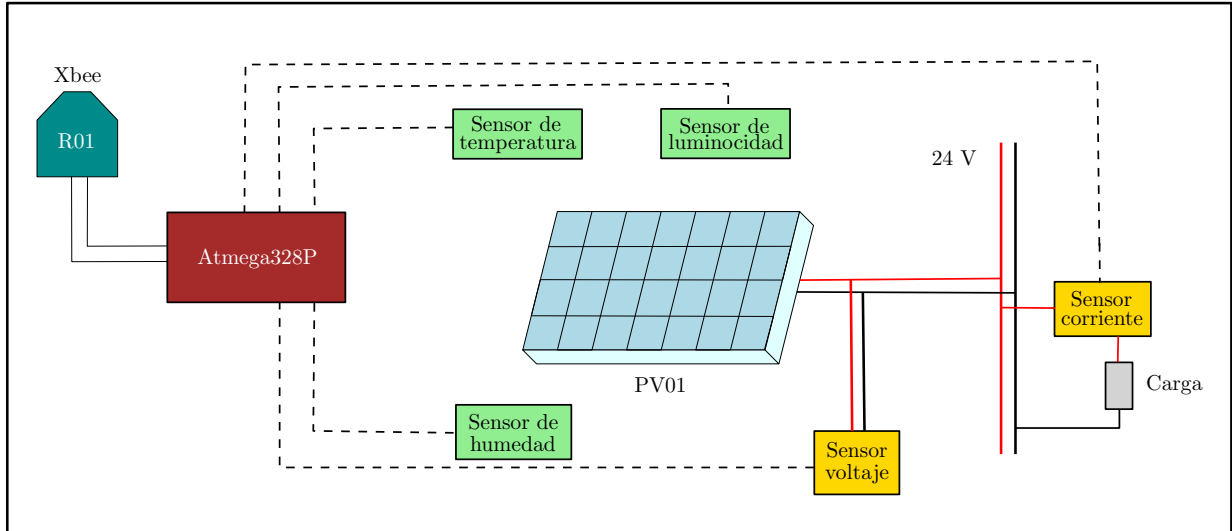


Figura 3.3: Circuito electrónico de las estaciones de medición.

cual se necesita estudiar a fondo los datos recopilados. Para esto, se utilizan métodos estadísticos y técnicas de minería de datos, empleando tanto software especializados como programas codificados en Python, el cual es un lenguaje de código abierto.

3.2. Estructura propuesta para el SAD

Para lograr la adquisición de datos de una red de sistemas fotovoltaicos, se deben implementar diversos circuitos electrónicos que en conjunto se denominan: Sistemas de Adquisición de Datos (SAD). Cada nodo de la red, es decir, cada conjunto de paneles que conformen una estación, debe contar con un SAD. En él, se miden las señales de energía que representan el comportamiento del sistema y diversos factores ambientales que afectan la generación de energía eléctrica.

3.2.1. Acondicionamiento de variables

Al ser de diferente naturaleza cada una de las variables, se emplean distintos tipos de sensores. Para medir el voltaje se utiliza un divisor de voltaje integrado por un conjunto de resistencias el cual

tiene rango de funcionamiento de hasta 55 V, esto es posible debido a que el sistema de medición es referido al mismo punto que la tierra del sistema de potencia, mientras que para la corriente se utilizar el sensor ACS712 5A, que permite medir hasta 5 A, ambos rangos son más que suficientes para los niveles de voltaje y corriente que se manejan en el sistema, ya que la red conformada por paneles solares es de 24 V de CD.

Dentro del grupo de variables ambientales, se mide la irradiancia por medio de un sensor RK 200-04. Este instrumento de radiación solar tiene un rango de funcionamiento de 0 a 1500 W/m² y una salida de 4-20 mA por lo que antes de enviar la señal al microcontrolador debe pasar por una etapa de acondicionamiento donde se convierte a una salida de 1-5 V. Una ventaja de utilizar este intervalo como señal de salida en lugar que 0-5 V, es que aun cuando la irradiancia detectada por el sensor sea nula, llegará un voltaje que confirma el funcionamiento del sensor, lo cual no se sabría si el offset fuera cero. Por otro lado, para la temperatura y la humedad se usa un módulo DHT11, el cual mide simultáneamente ambas variables con un rango de operación de 0° a 50 °C, un voltaje de operación de 3.3 V a 5 V y de 20%-90% de humedad relativa. El módulo DHT11 contiene un sensor analógico, que dentro del propio dispositivo hace la conversión analógico-digital y envía una trama a un microcontrolador ATmega328P con los datos de temperatura y humedad relativa.

Como se muestra en la Figura 3.3, todos los sensores están conectados al microcontrolador ATmega328p, el cual recibe las señales de salida de los instrumentos a fin de procesar la información recopilada. Este proyecto está delimitado a dos estaciones por lo que cada una de ellas tiene este circuito propuesto, aunque se podría aumentar el tamaño de la red sin ningún problema.

3.3. Comunicación remota con el Xbee

El ATmega328P es un circuito integrado programable que cuenta con un programa escrito en lenguaje C. El programa codificado se encarga de leer las variables analógicas de los sensores

conectados en sus entradas. Esta información es convertida a digital para, posteriormente, formar una sucesión de bits organizados llamada trama, la cual se envía inalámbricamente por radiofrecuencia mediante un módulo Xbee Router que se encuentra conectado al mismo microcontrolador. La estructura de la trama es especificada por el fabricante de los módulos Xbee y está en función del tipo de comunicación utilizado. Todo este proceso se realiza de forma cíclica, de manera que permite conocer en tiempo real el estado de la estación correspondiente. En el diagrama de flujo de la Figura 3.4 se muestra el procedimiento detallado. Sin embargo, a continuación se presenta el programa completo que permite enviar la trama de 5 sensores de forma inalámbrica por medio del Atmega328P y un Xbee Router (2 bytes por dato):

```
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
int sensord=2;
DHT dht (sensord,DHT11);
int temperatura, humedad,i,y,k,checksum,entrada[30];
byte trama[40]={0x7E,0x00,0x18,0x10,0x01,0x00,0x13,0xA2,0x00,
                0x40,0xC2,0x94,0x24,0xFF,0xFE,0x00,0x00};

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();
}

void loop() {
  int lecvol = analogRead(A0); //Sensor voltaje
  unsigned char Hv=lecvol>>8;
```

```
unsigned char Lv=lecvol;

entrada[0]=Hv;

entrada[1]=Lv;

int I=analogRead(A1); //Sensor corriente

unsigned char Hi=I>>8;

unsigned char Li=I;

entrada[2]=Hi;

entrada[3]=Li;

int tem=dht.readTemperature();//Sensor temperatura

unsigned char Ht=tem>>8;

unsigned char Lt=tem;

entrada[4]=Ht;

entrada[5]=Lt;

int hum=dht.readHumidity();//Sensor de humedad

unsigned char Hh=hum>>8;

unsigned char Lh=hum;

entrada[6]=Hh;

entrada[7]=Lh;

int leclux = analogRead(A4); //Sensor de irradiancia

unsigned char Hl=leclux>>8;

unsigned char Ll=leclux;

entrada[8]=Hl;
```

```
entrada[9]=L1;

//envio de la trama y calculo del checksum
for(i=0;i<=16;i++)\{
    Serial.write(trama[i]);
    k=3+i;
    checksum=checksum+trama[k];
\}
k=0;

//envio de datos y calculo del checksum
for(y=0;y<=9;y++){
    Serial.write(entrada[y]);
    checksum=checksum+entrada[y];
}

//formula checksum
checksum=0xFF-checksum;
Serial.write(checksum);
checksum=0;
delay(1000);
}
```

Este programa se carga en el microcontrolador que se encuentra dentro del SAD de cada nodo de la red. El programa se codificó en el software de Arduino y se cargo al Atmega328P por medio de una placa Arduino Uno.

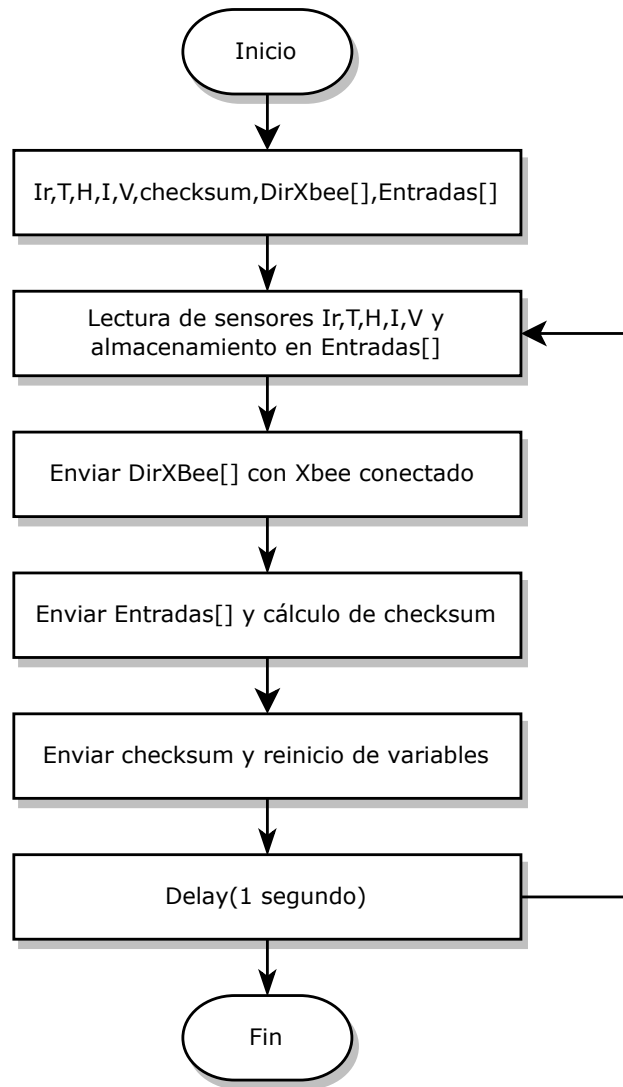


Figura 3.4: Diagrama de flujo del proceso interno en microcontrolador.

3.4. Topologías de red inalámbrica

Para lograr la conexión inalámbrica se analizaron diversas tecnologías de comunicación, entre ellas WiFi y Bluetooth las cuales tienen características sobresalientes. Sin embargo, ZigBee destaca por su alta confiabilidad, bajo uso de energía, bajo costo por módulo y principalmente un rango de operación

de hasta 100 metros, por lo cual se seleccionó este tipo de comunicación. Existen módulos llamados Xbee los cuales permiten implementar fácilmente este protocolo. En cada una de las estaciones de generación o nodos se encuentra un dispositivo Xbee denominado Router formando parte del Sistema de Adquisición de Datos, el cual se encarga de enviar la información. Mientras que el receptor de estos datos es otro módulo Xbee que funciona como Coordinador.

El envío de información entre dispositivos Xbees se puede realizar en Modo AT (Application Transparent). Este modo permite una comunicación punto a punto. Sin embargo, en este proyecto la comunicación se realiza en Modo API (Application Programming Interface) con tipo de trama Transmit Request. Este modo permite que varias estaciones de generación de energía solar fotovoltaica (nodos), con Xbees Routers independientes, envíen su información a un mismo Xbee Coordinador, lo cual es imposible en el otro modo de operación [49].

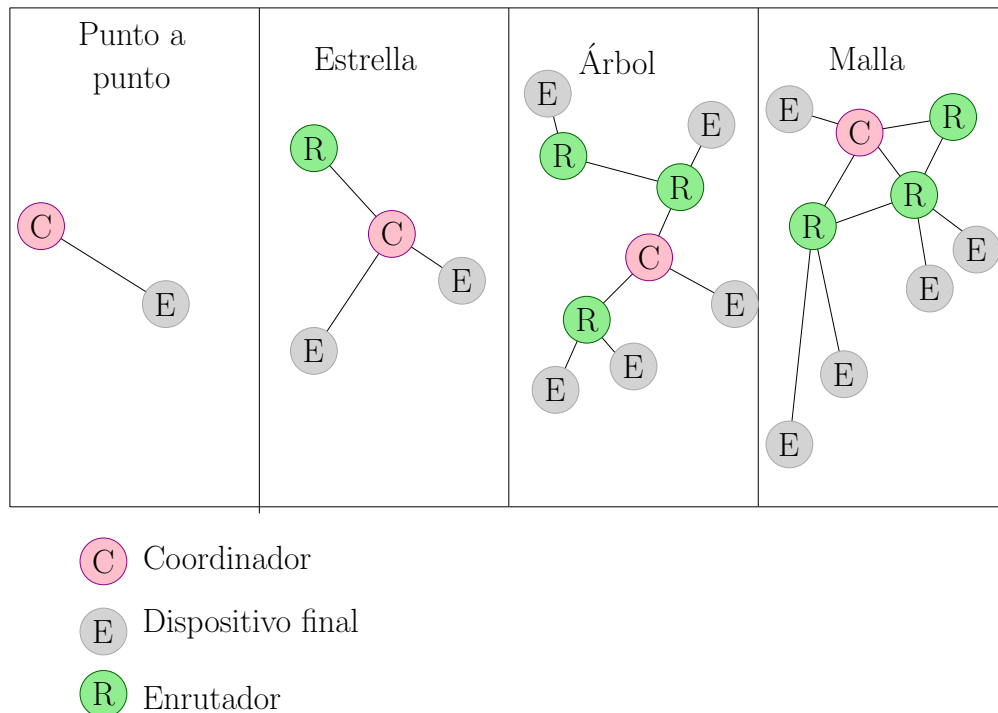


Figura 3.5: Topologías de redes inalámbricas.

Existen diferentes topologías para las redes de Xbee, estas se muestran en la Figura 3.5. Las principales son punto a punto, estrella, malla y árbol. Para este proyecto se seleccionó una conexión

estrella debido a que la distancia alcanzada es suficiente para los objetivos del proyecto y, principalmente, porque permite que todos los nodos tengan comunicación directa con el coordinador.

3.5. Proceso en la Raspberry Pi

El Xbee Coordinador está conectado al puerto USB de un procesador Raspberry Pi, el cual es una computadora de tamaño reducido que permite la realización de proyectos electrónicos. Dentro de esta, por medio de un programa codificado en Python, se desempaqueta la información de la trama y se procesa para convertir los datos en valores decimales entendibles por el usuario. Tal como lo muestra la Figura 3.6, esta información se almacena y se muestra a través de una App móvil o mediante una interfaz gráfica con un monitor conectado a la Raspberry Pi. Aunque si se desea, es posible utilizar la Raspberry sin la necesidad de periféricos, esto es, por medio de una computadora que esté conectada a la misma red WiFi y del protocolo SSH (Secure Shell).

Si importar la manera en la que se desee monitorear la red, los datos sensados se almacenan en la memoria interna de la Raspberry Pi en archivos .xlsx. El nombre de este documento es la fecha y hora iniciales de la toma de muestras. Este se genera automáticamente cada hora, cada 8 horas, diariamente o según el periodo indicado por el usuario. El archivo .xlsx contiene los datos ordenados por variables y la hora exacta de muestreo, además los datos de cada nodo de la red están separados en hojas individuales del documento.

3.5.1. Interfaz Gráfica

Los datos de cada uno de los nodos de la red se envían inalámbricamente hasta la Raspberry Pi. Este proceso de recepción de trama y desempaqueamiento de datos se repite cada segundo. Sin embargo, para tener un monitoreo eficiente no basta con ver la información en la consola sino que es necesario contar con la representación visual de esta información. Por lo que, se diseñó una interfaz gráfica

en Python. El propósito de esta interfaz de usuario es monitorear la red de sistemas fotovoltaicos en tiempo real. Donde el usuario decide si quiere dar seguimiento a toda la red o a una estación en específico. Este monitoreo se realiza de manera visual, atractiva y sencilla para que se pueda identificar cuando se presenta una falla en algún punto de la red. Para comodidad del usuario en las ventanas de menús la información mostrada está en la parte superior y los botones y datos que debe introducir el usuario en la parte inferior, mientras que en las ventanas de monitoreo los botones y datos que debe introducir el usuario en la parte superior y la información mostrada en la parte inferior. Por otro lado, los colores de la interfaz se basan en los colores institucionales, los cuales transmiten sentimientos tanto de éxito y confianza, como de optimismo y vitalidad.

Por medio de la interfaz, se logra observar numéricamente y a través de gráficos lineales los datos de las variables ambientales y su repercusión en las variables eléctricas. La interfaz permite visualizar inalámbricamente el estado de cada uno de los nodos de la red sin la necesidad de WiFi, al mismo tiempo que recomienda acciones correctivas cuando los datos sensados muestran bajo rendimiento en la generación energética. Un ejemplo de las sugerencias al usuario es limpiar los paneles solares cuando las variables ambientales sean buenas pero la potencia de salida baja o indicar que la generación es baja debido a sombreado parcial. Adicionalmente, cuando alguna de las variables sensadas sea baja en relación a un umbral introducido por el usuario, por ejemplo: irradiancia $< 750 \text{ W/m}^2$, temperatura $< 20\text{C}$,

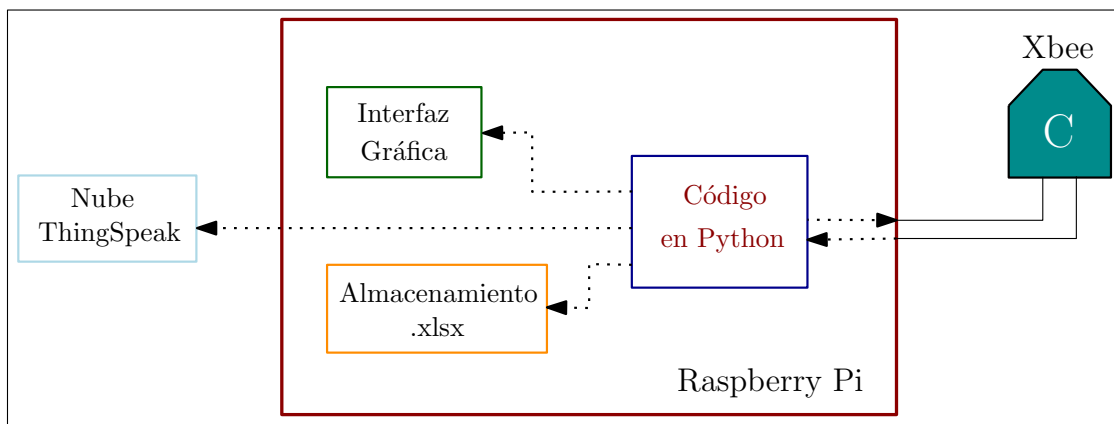


Figura 3.6: Proceso interno en Raspberry Pi.

humedad < 50%, voltaje < 15 V, corriente < 1.5 A y potencia < 30 W, se encenderá un indicador rojo y cuando sea buena uno verde.

Desde la interfaz gráfica es posible añadir nuevos nodos a la red o bien eliminar alguno de los ya registrados. Además, es posible configurar cada cuánto tiempo desea que se genere un archivo .xlsx con la información de ese periodo. Este se modifica desde el botón configuraciones, donde además es posible cambiar el tiempo de muestreo, el número de estaciones que del que se desea guardar información, así como otras opciones útiles para crear la base de datos de una red de sistemas fotovoltaicos.

3.5.2. Test de usabilidad de la interfaz gráfica

A fin de evaluar la usabilidad de la interfaz gráfica se seleccionó un test especializado. La escala de usabilidad del sistema llamada SUS (System Usability Scale) [50] es una escala simple de diez elementos que ofrece una visión global de las evaluaciones subjetivas de usabilidad. Cada una de las preguntas se responden dándole valor del 1 al 5 en donde el 1 es muy en desacuerdo y 5 muy de acuerdo. En este test los incisos con número impar impactan de manera positiva en los resultados, ya que para su calificación parcial se toma la respuesta del usuario y se le resta uno (Calificación del usuario – 1). Mientras que las afirmaciones con número par impactan de manera negativa, ya que se resta 5 menos la calificación del usuario (5 - Calificación del usuario). Posterior a obtener la calificación parcial de cada afirmación se suman y multiplica por 2.5. En este test 100 expresa el máximo nivel de agrada respecto a la usabilidad de la interfaz.

A continuación se presentan el Test de Usabilidad (SUS) en donde se debe responder a cada una de las siguientes afirmaciones asignándole un número del 1-5 donde 1 es muy de acuerdo y 5 muy en desacuerdo. Este Test se aplicó a una muestra representativa de usuarios de la Interfaz gráfica propuesta.

1. Creo que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia.

2. He encontrado el sistema innecesariamente complejo.
3. Pensé que el sistema era fácil de usar.
4. Creo que necesitaría el apoyo de una persona para poder utilizar este sistema.
5. Me pareció que las diversas funciones en este sistema están bien integradas.
6. Pensé que era demasiado inconsistente este sistema.
7. Imagino que la mayoría de la gente aprende a utilizar este sistema rápidamente.
8. Me pareció que el sistema es difícil de usar.
9. Me sentí muy segura utilizando el sistema.
10. Necesito aprender muchas cosas antes de usar este sistema.

3.5.3. ThingSpeak

Por otro lado, si el usuario así lo desea, en lugar de visualizar localmente la información de la red fotovoltaica, los datos de los sensores pueden ser enviados por medio de WiFi a una plataforma online llamada ThingSpeak en su versión gratuita (thingspeak.com), la cual permite almacenar los datos de 4 estaciones (en su versión completa tipo comercial hasta 250) en la nube y visualizar gráficas que muestran el comportamiento de las variables de cada estación medidas en tiempo real, como lo muestra la Figura [3.7](#). Estos gráficos pueden ser visualizadas desde cualquier dispositivo inteligente con acceso a internet mediante la App ThingView Free. Sin embargo, esta herramienta es opcional y puede ser seleccionada por el usuario al entrar a la interfaz gráfica desde la Raspberry Pi.

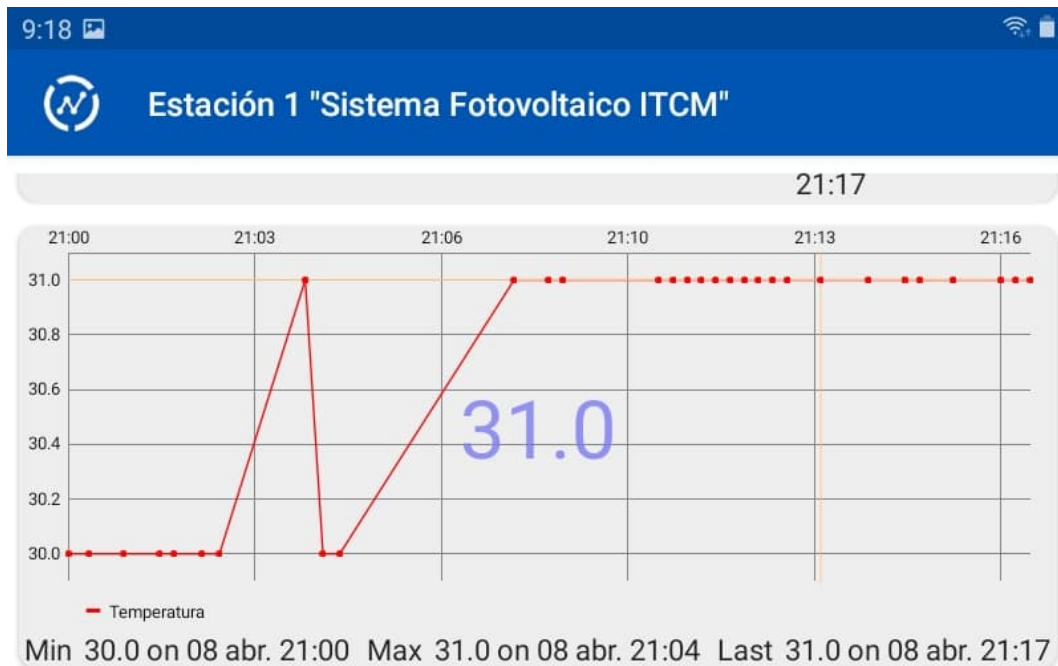


Figura 3.7: App ThingView Free.

3.6. Conclusiones

Por último, toda la metodología previamente explicada se puso a prueba en condiciones reales. Los Sistemas de Adquisición de Datos se construyeron en circuitos impresos y los sensores empleados para las mediciones fueron de tipo industrial. Además, se emplearon los paneles fotovoltaicos del laboratorio de electrónica de posgrado como estaciones aisladas de generación de energía eléctrica y se pusieron a prueba a la intemperie. A cada estación se le instaló un SAD y la instrumentación necesaria para medir los factores ambientales y las señales eléctricas. Para, con toda la información recopilada, implementar las acciones pertinentes que aumenten la eficiencia de la red de sistemas fotovoltaicos.

Implementación y validación experimental

Después de tener un panorama global del área de investigación, un objetivo general y objetivos específicos claros y la metodología a seguir definida, se prosiguió a la elaboración de los sistemas de adquisición de datos. En este capítulo se describen las pruebas experimentales en software de simulación, la elaboración de prototipos en circuitos impresos, así como el monitoreo de una red de sistemas PV con paneles fotovoltaicos reales. Todas las complicaciones, áreas de oportunidad y resultados técnicos conseguidos a lo largo de los cuatro semestres del posgrado se muestran y explican a detalle en esta sección.

4.1. Sistema de Adquisición de Datos

Todo el proyecto gira en torno al monitorear el estado de una red de sistemas fotovoltaicos, por lo que para comenzar las pruebas se emplearon dos paneles solares pequeños; cada uno brinda 5 V con 160 mA, en su punto nominal de operación. A pesar de esto, son ideales para representar el comportamiento de un sistema fotovoltaico, en donde cada panel simboliza una estación de generación fotovoltaica o dicho de otra manera, un nodo de la red.

Cada uno de los nodos tiene un sistema de adquisición de datos individual, los cuales inicialmente se simulaban en el Software Proteus Design Suite y posteriormente se construyeron en tablillas protoboard de experimentos. En este sistema se encuentra el microcontrolador ATmega328p junto a otros componentes electrónicos y las conexiones de los sensores mencionados en el Capítulo 3. Sin embargo, con el objetivo de disminuir el número de errores provocados por falsos contactos y aumentar la calidad del proyecto se construyeron los circuitos impresos para dos estaciones de la red. El diseño del circuito se realizó en el software Ares Profesional, posteriormente se imprimió en una placa fenólica. Después de llevar a cabo un extenso proceso (sumergirlo en ácido férrico, limpiarlo, hacer los orificios, etc.) finalmente se soldaron los componentes electrónicos del circuito propuesto. De esta manera se evitan errores de falsos contactos o ruido y se asegura que el sistema de adquisición de datos obtendrá información confiable.

En la Figura 4.1 se muestra el circuito impreso de una de las estaciones de medición, en ella se observan las conexiones de los sensores, el microcontrolador ATmega328p, la fuente de alimentación, el convertidor boost elevador de voltaje y otros componentes que permiten su correcto funcionamiento. Además, un Xbee Router está conectado al mismo microcontrolador, del cual se proporcionarán más detalles en la siguiente sección. El SAD se alimenta con 5 V, y en su interior se regula el voltaje para alimentar con 12 V a los componentes que así lo requieren, de esta manera se puede alimentar el circuito con un cargador de celular común o bien mediante alguna otra fuente de generación de 5 V.

4.2. Red Inalámbrica Xbee

Como se mencionó en capítulos anteriores, la comunicación inalámbrica se realiza mediante el protocolo Zigbee a través de módulos Xbee. Cada una de las estaciones cuenta con un Xbee Router. Los cuales mandan los datos recopilados por los sensores a un único Xbee Coordinador. Sin embargo, previamente deben configurarse los Xbee individualmente. La manera de hacer los ajustes pertinentes es por medio del software XCTU®, el cual es proporcionado por el mismo fabricante de los dispositivos.

Por esa razón, antes de incorporar los Xbee al circuito electrónico explicado en la sección anterior, se conectaron de manera individual a la computadora por medio de un programador USB para Xbee, sobre el que se empotra el módulo. Una vez dentro del software XCTU® aparece una ventana de configuraciones como la de la Figura 4.2 en la cual se le asigna un sobrenombre al Router, el modo de comunicación, la dirección del Xbee que será su Coordinador, entre otras configuraciones que depende de la aplicación del proyecto. Otra herramienta de este software es el modo de trabajo Consola, que permite mandar mensajes entre el Xbee Router y el Xbee Coordinador para asegurarnos que existe una

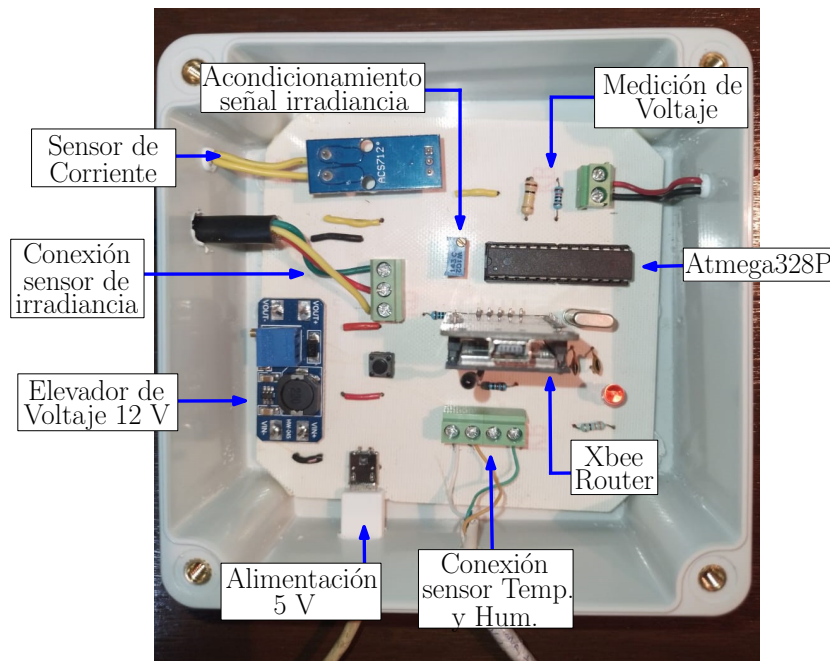


Figura 4.1: Circuito impreso del SAD.

correcta comunicación entre ambos módulos. Después de esto se conectan los módulos Router a los circuitos de prueba, para que por medio del programa que cargado en el microcontrolador se envíe de forma organizada la información de los instrumentos.

4.3. Raspberry Pi

El módulo Xbee coordinador está conectado a uno de los puertos USB de una Raspberry Pi. Sin embargo, previamente se configura esta pequeña computadora. La placa Raspberry es un hardware libre, con software de código abierto. Incluso inicialmente no cuenta con ningún sistema operativo y ni siquiera incluye periféricos. Debido a esto, el primer paso es descargar, desde la página oficial raspberrypi.org, el sistema operativo denominado Raspberry Pi OS. Este se descarga desde otra computadora en una memoria SD, para posteriormente introducirla en la Raspberry y hacer la instalación. Una vez hecho esto, se observa como la Figura 4.3 y está lista para su uso.

Para manipular este ordenador de placa simple se conecta una pantalla, un mouse y un teclado. No obstante, existe una alternativa para hacer uso de la Raspberry inalámbricamente, sin ningún

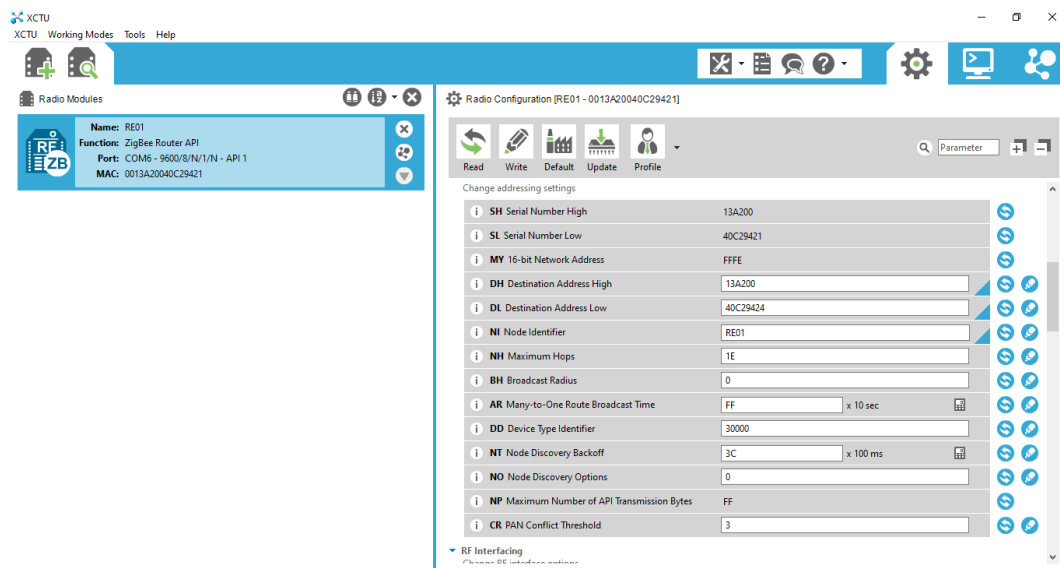


Figura 4.2: Ventana de configuración de XCTU®.

periférico, desde otra computadora conectada a la misma red WiFi por medio del protocolo SSH. Esto se logra con la ayuda de los softwares PuTTY Configuration y VNC Viewer. Esta opción es bastante viable cuando se requiere acceder remotamente, sin tener que llevar consigo todos los periféricos y ha sido ampliamente usada en este proyecto.

4.4. Programa en Python

Dentro de la Raspberry Pi se encuentra un programa codificado en Python que desempaqueta y manipula la información que llega al Xbee coordinador. Este programa utiliza librerías creadas por ZigBee para leer la trama que llega desde el Xbee Router y extraer los datos recopilados por el SAD. El usuario indica desde el programa el puerto USB dónde es conectado el Xbee coordinador y la tasa de transferencia en baudios, la cual debe ser la misma indicada en el microcontrolador. Es posible monitorear los datos de la red en una App móvil o a través de una interfaz gráfica local. No obstante, sin importar la forma de monitoreo, por medio de programa de Python se crea una base de datos de la red.

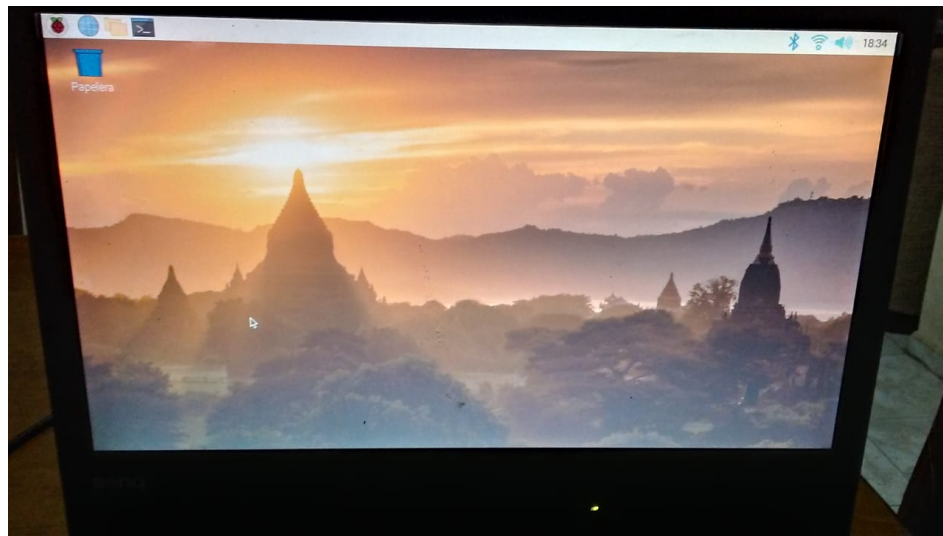


Figura 4.3: Pantalla conectada a Raspberry Pi con sistema operativo instalado.

	A	B	C	D	E	F	G
1		Hora	Voltaje [v]	Corriente	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Luminocidad
2	0	19:06:33	18.32	1018	30	72	579
3	1	19:06:44	5.08	1023	30	72	112
4	2	19:06:55	18.22	503	30	72	579
5	3	19:07:06	4.92	49	30	72	110
6	4	19:07:18	6.49	45	30	72	295
7	5	19:07:29	11.57	50	30	72	315
8	6	19:07:40	18.22	46	30	72	575
9	7	19:07:51	18.49	51	30	72	495
10	8	19:08:02	4.59	57	30	72	257
11	9	19:08:13	18.49	656	30	72	495
12							

Figura 4.4: Archivo.xlsx generado con los datos recopilados.

4.4.1. Almacenamiento en .xlsx

En el programa de Python el usuario indica cada cuánto desea que se genera un archivo .xlsx. Este contiene los datos recopilados por los sensores de forma organizada. Tal como lo muestra la Figura 4.4, tiene una columna con la hora exacta de muestreo, y otras cinco en donde se indica si el dato es voltaje, corriente, temperatura, humedad o irradiancia. Dependiendo la cantidad de estaciones que el usuario haya indicado, será el número de hojas que contenga el libro .xlsx, ya que en la hoja 1 estarán los datos de la estación 1, en la hoja 2 los datos de la estación 2 y así sucesivamente. El proyecto contempla únicamente una red de dos nodos, sin embargo al añadir más se generarán nuevas hojas.

A continuación se muestra un código preliminar desarrollado en Python que permite leer y almacenar los datos de 2 estaciones de monitoreo:

```
import serial, struct, datetime, codecs
from time import sleep
from xbee import ZigBee
from xbee.helpers.dispatch import Dispatch
```

```
import pandas as pd

import numpy as np

PORT='COM6' #Puerto donde esta el XBee Coordinador

BAUD_RATE=9600 #Velocidad de transmisión

sizeData=10 #Se pone el doble de sensores (si hay 5 sensores,
#sizeData=10 porque hay 2 bytes por sensor)

N=10 #Numero de muestras (Si N=20 y hay 2 Xbee Router serán
#10 muestras para cada xbee router)

AddXbee_R01=b'0013a20040c29421' #Direccion Xbee Router 1
AddXbee_R02=b'0013a20040b515d8' #Direccion Xbee Router 2

Tm=5 #Tiempo de muestreo en segundos

while True:

    tv=int(N/2) #Tamaño vector

    y=np.zeros((sizeData,tv)) #Vector datos estación 1
    z=np.zeros((sizeData,tv)) #Vector datos estación 2

    hrE1_array=[] #Vector hora estación 1
    hrE2_array=[] #Vector hora estación 2

    fe1=0 #Filas vector estación 1
    fe2=0 #Filas vector estación 2

    #Generación nombre de archivo:

    name=datetime.datetime.now()

    name0=name.strftime('%H%M %d-%m-%Y')

    name1=str(name0)

    name2='%s.xlsx'%name1
```

```
for k in range(N):
    ser=serial.Serial(PORT,BAUD_RATE,timeout=1) #Apertura
    zb=ZigBee(ser)
    frame=zb.wait_read_frame() #Lectura de trama
    dest=(frame['source_addr_long']) #Dirección Xbee Router
    dir = codecs.encode(dest, 'hex_codec') #Codificar dirección

    if dir==(AddXbee_R01): #Estación 1
        #Procesamiento columna hora en archivo .xlsx de Est. 1
        pst=datetime.datetime.now()
        pst0=pst.strftime('%H:%M:%S')
        pst1=str(pst0)
        hrE1_array.append(pst1)

        for n in range(0,sizeData,2): #Desempaquetamiento de datos
            datos=bytes(frame['rf_data']) #Lectura de datos sensores

            if n==0: #Procesamiento del voltaje
                print("Estación 1")
                a=((datos[n]*256)+(datos[n+1]))
                y[n,fe1]="{: .2f}".format(a/18.5)
                print(y[n,fe1]) #Datos leídos
            else: #Proceso de otras variables
                y[n,fe1]=((datos[n]*256)+(datos[n+1]))
                print(y[n,fe1]) #Datos leídos
```

Capítulo 4. Implementación y validación experimental

```
fe1=fe1+1 #No de fila de la matriz de datos estación 1

elif dir==(AddXbee_R02): #Estacion 2

    #Procesamiento columna hora en archivo .xlsx de Estación 2

    pst=datetime.datetime.now()

    pst0=pst.strftime('%H:%M:%S')

    pst1=str(pst0)

    hrE2_array.append(pst1)

    for n in range(0,sizeData,2): #Desempaquetamiento de datos

        datos=bytes(frame['rf_data']) #Lectura de datos sensores

        #Procesamiento del voltaje

        if n==0: #Procesamiento del voltaje

            print("Estación 2")

            a=((datos[n]*256)+(datos[n+1]))

            z[n,fe2]="{: .2f}".format(a/18.5)

            print(z[n,fe2]) #Datos leídos

        else: #Proceso de otras variables

            z[n,fe2]=((datos[n]*256)+(datos[n+1]))

            print(z[n,fe2]) #Datos leídos

        fe2=fe2+1 #No de fila de la matriz de datos estación 2

    else:

        print("Estación desconocida ;Configura el programa!")

print("Medición: ",k) #No de muestreo
```

```
print("-----") #línea de separación
sleep(Tm) #Tiempo de espera para nuevo muestreo
ser.close() #cerrar puerto serial

#guardar datos Estación 1
sensores1={'Voltaje [v]':y[0,:], 'Corriente':y[2:],
'Temperatura [°C]':y[4:], 'Humedad [%]':y[6:], 'Irradiancia':y[8:],
'Hora':hrE1_array}
p1=pd.DataFrame(sensores1, columns=['Hora', 'Voltaje [v]',
'Corriente', 'Temperatura [°C]', 'Humedad [%]', 'Irradiancia'])

#guardar datos Estación 2
sensores2={'Voltaje [v]':z[0:], 'Corriente':z[2:],
'Temperatura [°C]':z[4:], 'Humedad [%]':z[6:], 'Luminocidad':z[8:],
'Hora':hrE2_array}
p2=pd.DataFrame(sensores2, columns=['Hora', 'Voltaje [v]',
'Corriente', 'Temperatura [°C]', 'Humedad [%]', 'Irradiancia'])

#Creacion de documento .xlsx
with pd.ExcelWriter(name2) as writer:
    p1.to_excel(writer, sheet_name='Estación 1')
    p2.to_excel(writer, sheet_name='Estación 2')
```

4.4.2. Configuración ThingSpeak

Para usar la plataforma ThingSpeak en su versión gratuita primero se debe realizar una cuenta en su página oficial. Enseguida se crea un canal por nodo en la red, en este caso dos canales, y se

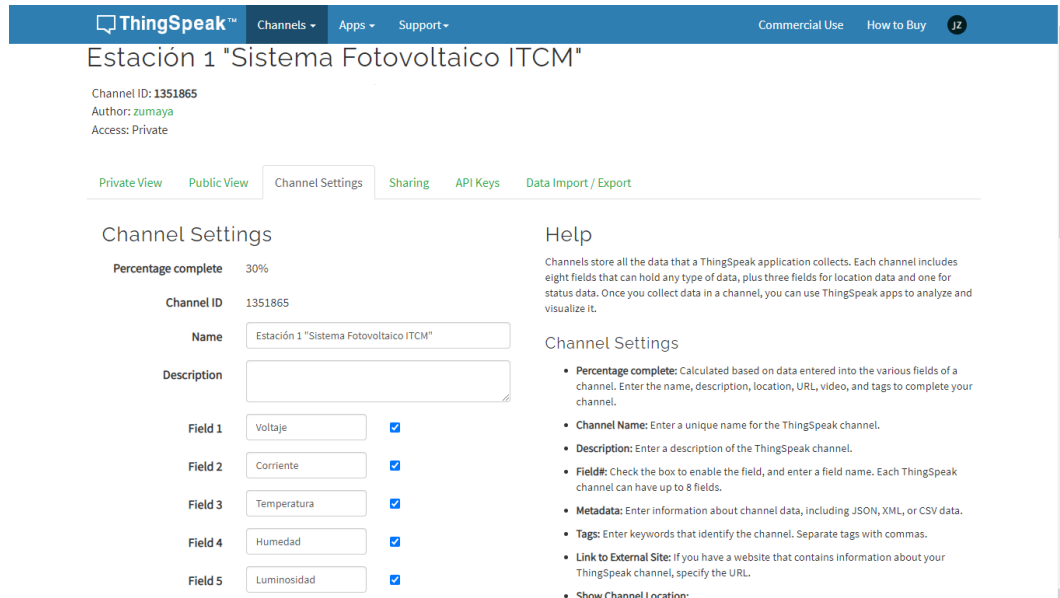


Figura 4.5: Ventana de configuración ThingSpeak.

configuran las características del canal como en la Figura 4.5. ThingSpeak proporciona una clave ApiKey por estación la cual se agrega al programa de Python para enviar los datos sensados a un canal específico. El proceso de envío de información es sencillo y se explica en la página web oficial thingspeak.com. Esta cada 15 segundos permite almacenar los datos de 4 estaciones (en su versión completa tipo comercial hasta 250) en la nube y visualizar gráficas que muestran el comportamiento de los nodos de la red. Estas pueden ser visualizadas desde cualquier dispositivo inteligente con acceso a internet mediante la App ThingView Free. Esta alternativa de monitoreo es atractiva, sin embargo, debido a que no siempre se cuenta con internet se destaca el uso de una interfaz gráfica para hacer este proceso. A continuación se muestra un código preliminar desarrollado en Python que permite enviar los datos sensados a la App ThingSpeak:

```
import serial, struct, datetime, codecs, urllib, http.client
from time import sleep
from xbee import ZigBee
from xbee.helpers.dispatch import Dispatch
```

```
import pandas as pd

import numpy as np

#Datos modificados por el usuario:

PORT='COM6' #Puerto donde esta conectado el XBee Coordinador

BAUD_RATE=9600 #Velocidad de transmisión

sizeData=10 #Se pone el doble de sensores (2 bytes por sensor)

N=30 #Numero de muestras

AddXbee_R01=b'0013a20040c29421' #Direccion Xbee Router 1

AddXbee_R02=b'0013a20040b515d8' #Direccion Xbee Router 2

Tm=15 #Tiempo de muestreo en segundos

apikeyE1="3KABEK3LUEK2H35B" #Clave ThingSpeak Estación 1

apikeyE2="8NHHZL4000X70LFA" #Clave ThingSpeak Estación 2

while True:

    tv=int(N/2) #Tamaño vector

    y=np.zeros((sizeData,tv)) #Vector datos estación 1

    z=np.zeros((sizeData,tv)) #Vector datos estación 2

    hrE1_array=[] #Vector hora estación 1

    hrE2_array=[] #Vector hora estación 2

    fe1=0 #Filas vector estación 1

    fe2=0 #Filas vector estación 2

    ultdir=0

    #Generación nombre de archivo

    name=datetime.datetime.now()

    name0=name.strftime('%H%M %d-%m-%Y')
```

```
name1=str(name0)
name2='%s.xlsx'%name1

for k in range(N):
    ser=serial.Serial(PORT,BAUD_RATE,timeout=1) #Apertura
    zb=ZigBee(ser)

    while True:    #proceso que permite leer alternadamente los Xbee Router
        frame=zb.wait_read_frame() #Lectura de trama
        dest=(frame['source_addr_long']) #Dirección Xbee Router
        dir = codecs.encode(dest, 'hex_codec') #Codificar dirección
        if dir!=ultdir:
            break

    if dir==(AddXbee_R01): #Estación 1
        #Procesamiento columna hora en archivo .xlsx de Estacion 1
        pst=datetime.datetime.now()
        pst0=pst.strftime('%H:%M:%S')
        pst1=str(pst0)
        hrE1_array.append(pst1)

    for n in range(0,sizeData,2):    #Desempaquetamiento de datos
        datos=bytes(frame['rf_data']) #Lectura de datos de sensores
        if n==0:    #Procesamiento del voltaje
            print("Estación 1")
            a=((datos[n]*256)+(datos[n+1]))
```

```
y[n,fe1]="{: .2f}".format(a/18.5)
print(y[n,fe1]) #Datos leídos
else:    #Proceso de otras variables
    y[n,fe1]=((datos[n]*256)+(datos[n+1]))
    print(y[n,fe1]) #Datos leídos

#Proceso para enviar datos a ThingSpeak
params=urllib.parse.urlencode({'field1':y[0,fe1],'field2':y[2,fe1],
'field3':y[4,fe1],'field4':y[6,fe1],'field5':y[8,fe1],'key':apikeyE1})
headers={"Content-type": "application/x-www-form-urlencoded",
"Accept": "text/plain"}
conn=http.client.HTTPConnection("api.thingspeak.com:80")
conn.request("POST", "/update", params, headers)
response=conn.getresponse()
print(response.status,response.reason)
data=response.read()
conn.close()

fe1=fe1+1 #No de fila de la matriz de datos estación 1

elif dir==(AddXbee_R02):    #Estacion 2

    #Procesamiento columna hora en archivo .xlsx de Estación 2

    pst=datetime.datetime.now()
    pst0=pst.strftime('%H:%M:%S')
    pst1=str(pst0)
    hrE2_array.append(pst1)
```

```
for n in range(0,sizeData,2): #Desempaquetamiento de datos
    datos=bytes(frame['rf_data']) #Lectura de datos de sensores
    #Procesamiento del voltaje
    if n==0: #Procesamiento del voltaje
        print("Estación 2")
        a=((datos[n]*256)+(datos[n+1]))
        z[n,fe2]="{: .2f}".format(a/18.5)
        print(z[n,fe2]) #Datos leídos
    else: #Proceso de otras variables
        z[n,fe2]=((datos[n]*256)+(datos[n+1]))
        print(z[n,fe2]) #Datos leídos

#Proceso para enviar datos a ThingSpeak
params=urllib.parse.urlencode({'field1':z[0,fe2], 'field2':z[2,fe2],
    'field3':z[4,fe2], 'field4':z[6,fe2], 'field5':z[8,fe2], 'key':apikeyE2})
headers={"Content-type": "application/x-www-form-urlencoded",
    "Accept": "text/plain"}
conn=http.client.HTTPConnection("api.thingspeak.com:80")
conn.request("POST", "/update", params, headers)
response=conn.getresponse()
print(response.status, response.reason)
data=response.read()
conn.close()

fe2=fe2+1 #No de fila de la matriz de datos estación 2

else:
```

```
print("Estación desconocida ;Configura el programa!")

ultdir=dir

print("Medición: ",k) #No de muestreo

print("-----")

sleep(Tm) #Tiempo de espera para nuevo muestreo

ser.close() #Cerrar puerto serial

#guardar datos Estación 1

sensores1={'Voltaje [v]':y[0,:], 'Corriente':y[2,:], 'Temperatura [°C]':y[4,:],
'Humedad [%]':y[6,:], 'Irradiancia':y[8,:], 'Hora':hrE1_array}

p1=pd.DataFrame(sensores1,columns=['Hora', 'Voltaje [v]', 'Corriente',
'Temperatura [°C]', 'Humedad [%]', 'Irradiancia'])

#guardar datos Estación 2

sensores2={'Voltaje [v]':z[0,:], 'Corriente':z[2,:], 'Temperatura [°C]':z[4,:],
'Humedad [%]':z[6,:], 'Irradiancia':z[8,:], 'Hora':hrE2_array}

p2=pd.DataFrame(sensores2,columns=['Hora', 'Voltaje [v]', 'Corriente',
'Temperatura [°C]', 'Humedad [%]', 'Irradiancia'])

#Creacion de documento .xlsx

with pd.ExcelWriter(name2) as writer:

    p1.to_excel(writer, sheet_name='Estación 1')

    p2.to_excel(writer, sheet_name='Estación 2')
```

4.4.3. Interfaz Gráfica

Inicialmente el monitoreo de las variables se llevaba a cabo mediante la consola de Python en la Raspberry Pi. Sin embargo, esta manera de presentar la información es poco factible y complicada para el usuario. Por esto, para monitorear la red de forma más visual, sencilla y práctica se desarrolló una interfaz gráfica en Python. La cual permite visualizar el comportamiento de toda la red o de una estación en particular, ver gráficos históricos de cada una de las variables eléctricas y ambientales, configurar el tiempo de generación de archivos .xlsx, agregar nuevas estaciones a la red y eliminar estaciones de la red, entre otras opciones. En la Figura 4.6 se puede observar la pantalla principal de la interfaz gráfica.



Figura 4.6: Pantalla principal de interfaz gráfica.

Además, cuando el usuario decide monitorear toda la red, en la parte inferior de esta ventana se muestran alertas y mensajes con recomendaciones. Estas son acciones correctivas sugeridas por el software cuando las variables eléctricas muestra una baja potencia de salida o cuando los factores ambientales no son los adecuados. Las recomendaciones pueden ser implementadas por el usuario, ya que tienen el fin de tener las condiciones adecuadas para proteger la red y generar la máxima potencia

de salida.

En esta interfaz se emplean colores claros destacando el pale goldenrod, el cual es un color claro y tranquilo que transmite sentimientos tanto de confianza y éxito como de energía y optimismo. Además, los colores empleados son los mismos que los usados por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero como colores institucionales. Por otro lado, las tipologías empleadas para los títulos de la interfaz es EngraversGothic BT, mientras que para la información y datos presentados se usa Arial. Estos tipos de letra no incluye ninguna proyección al final de los trazos de las formas de las letras. Por lo que transmiten modernidad, seguridad, alegría y, en ciertas ocasiones, neutralidad o minimalismo.

En lo que se refiere a la distribución de la información, en las ventanas menús o principales, la información mostrada por la interfaz está en la parte superior y los botones y datos que debe introducir el usuario en la parte inferior. Mientras que en las ventanas de monitoreo o secundarias ocurre lo contrario, es decir, los botones y datos que debe introducir el usuario se presentan en la parte superior y la información mostrada en la parte inferior.

4.4.4. Test de usabilidad de la interfaz gráfica

Una vez que todo el sistema funciona de manera correcta, se prosiguió a evaluar la usabilidad de la interfaz gráfica por medio del test especializado SUS (System Usability Scale) a fin de hacer las mejoras pertinentes recomendadas por los usuarios finales. Tal como se menciona en la Sección 3 Metodología, en este test 100 expresa el máximo nivel de agrado respecto a la usabilidad de la interfaz. Sin embargo, una calificación entre 0 y 50 manifiesta usabilidad inaceptable, entre 51 y 68 es marginal, mientras que de 69 a 100 representa una usabilidad aceptable. El Test SUS se aplicó a una muestra representativa obteniendo resultados favorables con un promedio de 86.5, lo cual denota una usabilidad aceptable de la interfaz gráfica. A pesar de ello, los usuarios hicieron sugerencias las cuales se tomaron en cuenta para el proceso de mejora continua.



Figura 4.7: Monitoreo de una red de sistemas PV.

4.5. Recolección de datos en campo

Después de diseñar y construir los SAD, de configurar la comunicación inalámbrica en la red y de codificar la Interfaz gráfica en Python, se prosiguió a implementar todo el proyecto en una red de paneles fotovoltaicos reales. Tal como se mencionó en secciones anteriores, se utilizaron los paneles solares del Laboratorio de Electrónica del Tecnológico de Ciudad Madero Campus 2. Fueron en esas mismas instalaciones en donde se conectó la red de sistemas fotovoltaicos, la cual está conformada por dos nodos, con un panel PV cada uno en conexión estrella tal como se muestra en la Figura 4.7.

El circuito propuesto se introdujo en un gabinete plástico a fin de protegerlo de las inclemencias del tiempo y se fijó al soporte vertical de los paneles solares. De igual manera ocurrió algo similar con los sensores, los cuales se fijaron en uno de los paneles. Si en cada nodo de la red existieran varios paneles solares conectados entre sí, de igual manera solo se necesitaría un circuito y un kit de los sensores, los cuales estarían fijados en uno de los paneles solares del nodo. En este caso, solo hay un panel por nodo por lo que ese es quien tiene todos los componentes.



Figura 4.8: Monitoreo de la red mediante la Interfaz Gráfica.

El proyecto permitió monitorear la red desde la App ThingSpeak y también desde la interfaz gráfica local tal como se muestra en la Figura 4.8. Además, almacenó la información sensada en la memoria interna de la Raspberry Pi, creando de esta manera una base de datos con información confiable de los sistemas fotovoltaicos. Adicionalmente, en base a las condiciones ambientales la interfaz recomendó acciones correctivas las cuales se siguieron y propiciaron que el sistema generara la energía eléctrica esperada.

4.6. Conclusiones

De esta manera fue posible implementar un sistema complejo capaz de monitorear toda una red de sistemas PV. Esto se logró por medio de la elaboración de SAD's en tabllas de circuitos impresos, los cuales permitieron recopilar información confiable de las variables ambientales y eléctricas de cada sistema PV. Además, se estableció comunicación inalámbrica entre los dos nodos de la red mediante una conexión tipo estrella y dispositivos XBees, los cuales emplean el protocolo ZigBee. Así fue posible monitorear la red desde cualquier dispositivo móvil con la aplicación ThingSpeak o de manera

local desde la Raspberry Pi con una interfaz gráfica codificada en Python. Esta interfaz muestra alertas y mensajes emergentes cuando alguna de las variables tiene bajo rendimiento de acuerdo al análisis de datos posterior. Complementariamente, se almacenan todos los datos sensados en la memoria de la Raspberry Pi. Todo esto se probó con paneles solares de potencia obteniendo resultados favorables.

Análisis de datos

Una vez que la red de sistemas fotovoltaicos ya está conectada y se ha realizado el monitoreo en tiempo real de cada nodo de la red, se prosiguió a generar una base de datos con la información ambiental y eléctrica de la red. Esto, con el propósito de llevar a cabo un análisis detallado de los datos recopilados que ayuden a implementar estrategias para cuantificar, y en un momento dado maximizar, la cantidad de energía eléctrica generada. En este capítulo se detallan las técnicas empleadas para la adquisición y posterior generación de la base de datos. Para el estudio se utilizó un software estadístico llamado Minitab, así como algunas técnicas de minería de datos que permiten encontrar patrones y tendencias en los datos adquiridos. De esta manera, fue posible determinar diferentes alertas y mensajes emergentes que se muestran en la interfaz gráfica.

5.1. Adquisición de Datos

La red de sistemas PV utilizada en este proyecto se delimitó a 2 estaciones de generación, donde cada una está conformada por un panel fotovoltaico. Por lo que, en la parte posterior sobre el soporte del panel se fijó uno de los SAD. Debido a que los sistemas se colocaron en la intemperie, los circuitos propuestos se instalaron dentro de un gabinete tipo industrial a fin de evitar filtraciones de humedad y líquidos. Además, el sensor de irradiancia RK200-04 se colocó en la parte superior del soporte del panel PV, mientras que el sensor de temperatura y humedad DHT11 en la parte inferior del soporte de aluminio. Por otro lado, a fin de generar una corriente eléctrica se conectaron cargas independientes en cada uno de los nodos de la red. Estas cargas son resistencias eléctricas de potencia de 50Ω , las cuales se interconectaron al panel solar, al sensor de voltaje en paralelo y al sensor de corriente en serie, tal como lo muestra la Fig. 5.1.

Adicionalmente, debido a que los sistemas PV se colocan en zona alejadas de conexiones eléctricas era imposible alimentar el SAD con la red eléctrica general, por lo que se optó por incluir *power banks* o baterías portátiles en cada uno de los SAD. Estas tienen la capacidad de suministrar

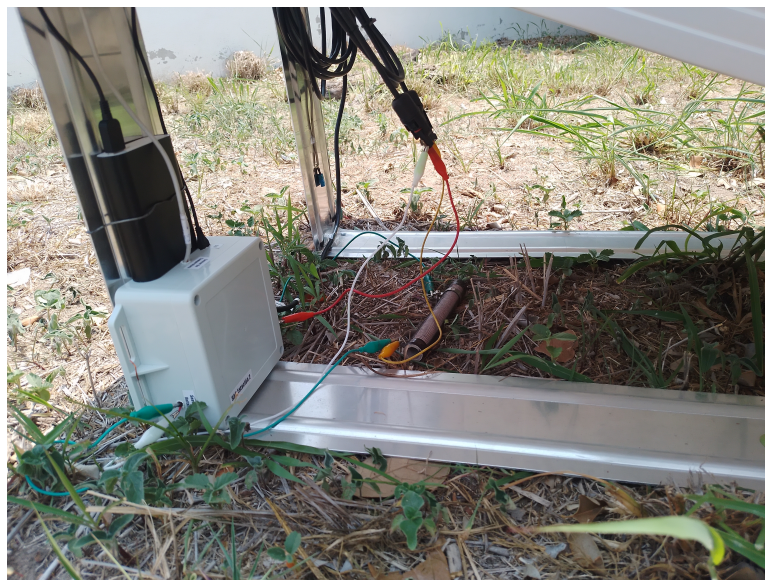


Figura 5.1: Parte posterior de panel PV.

Tabla 5.1: Fragmento de los datos recopilados.

Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Irradiancia (W/m ²)
12:52:00	17.14	2.06	35.31	38	60	858.97
12:52:06	17.19	2.03	34.90	38	60	842.49
12:52:12	17.14	2.03	34.79	38	60	853.48
12:52:18	17.08	2.03	34.67	38	60	866.30
12:52:24	17.19	2.03	34.90	38	60	860.81
12:52:30	17.14	2.03	34.79	38	59	860.81
12:52:36	17.08	2.03	34.79	38	59	862.64
12:52:42	17.19	2.03	34.90	38	60	873.63
12:52:48	17.19	2.03	34.90	38	59	864.47
12:52:54	17.24	2.03	35.00	38	59	864.47

energía al circuito de monitoreo hasta por 8 horas. Aunque, para etapas futuras se propone sustituir esta batería por un pequeño panel solar exclusivo para alimentar el circuito, ya que al ser un sistema que se alimenta con 5 V no requiere un panel demasiado grande.

De esta manera, a lo largo de varios días se llevó a cabo el monitoreo de la red por medio de la interfaz gráfica y de la App móvil, así como el almacenamiento de los datos sensados en la Raspberry Pi. Como consecuencia de esto, se creó una base de datos con la información ambiental (irradiancia, temperatura y humedad) y eléctrica (voltaje, corriente y potencia) de cada uno de los nodos de la red. Estos datos se adquirieron desde las 6 am hasta las 9 pm ya que es el horario aproximado en el que hay luz solar. En la Tabla 5.1 se muestra un fragmento de los datos recopilados por el sistema el día 19 de Mayo del 2022. Esta base de datos se elaboró en archivos .xlsx los cuales se almacenan en la memoria interna de la Raspberry Pi.

5.2. Análisis en Minitab

Una vez recopilados los datos por medio de la interfaz gráfica y los SAD, se introdujeron cada uno de los días al programa de Minitab® para elaborar un análisis estadístico rápido de los mismos. Con la opción de *Resumen gráfico* se muestra el histograma de la distribución de los datos, así como la media, desviación estándar, curtosis, cuartiles y el valor p de los datos. Este último indica si se sigue o no una distribución normal, es decir, si $p < 0.05$, los datos no son normales. La anormalidad de

los datos generalmente se debe a alguna anomalía en el proceso o la simple naturaleza de los datos no sigue una distribución normal. Para el caso particular de la irradiancia y temperatura durante el día no siguen una distribución normal, ya que estas variables fluctúan hora a hora dependiendo de las condiciones climáticas. Por lo tanto, la anormalidad de estos datos está justificada. En la Fig. 5.2 se puede visualizar un resumen gráfico obtenido con los datos de uno de los días sensados, donde se evidencia la anormalidad de los datos de irradiancia a lo largo del día.

Informe de resumen de Irradiancia Real

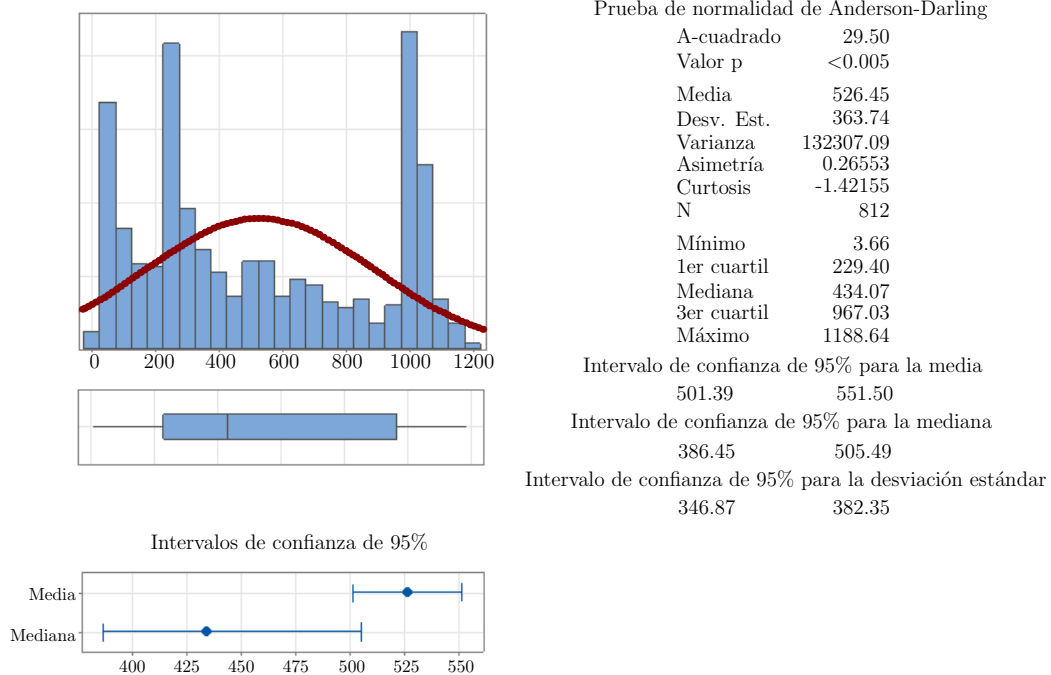


Figura 5.2: Resumen gráfico diario en Minitab®.

5.3. Análisis con Minería de Datos

Por medio de los SAD se obtienen los valores sin estar previamente clasificados por lo que, para hacer un análisis profundo es necesario procesar los datos por medio de diferentes técnicas de minería de datos y así poder mostrar mensajes oportunos en la interfaz gráfica. Para clasificar los datos se emplea la técnica de agrupamiento de *k*-means. Se eligió esta técnica debido a que destacando entre las

10 más utilizadas [51]. El algoritmo de k -means es un método iterativo de aprendizaje no supervisado, donde los datos no se encuentran clasificados inicialmente. Por lo que el algoritmo se encargará de agrupar en k clases al conjunto de datos de entrada.

Para aplicar la técnica de k -means se desarrolló un código en Python en el cual se utilizó la librería `sklearn.cluster`. Los datos se clasificaron en 3 dimensiones, es decir para este análisis solo se considera la irradiancia, la temperatura y la potencia. Además, se eligió el valor de $k = 2$, para que las clases fueran condiciones de generación excelentes y condiciones de generación malas, en caso de que el dispositivo se encuentre generando potencia de manera forzada, o en caso contrario, de manera óptima. El código de Python generó la Figura 5.3 basada en los datos obtenidos del SAD y en el algoritmo implementado, y arrojó los centroides (692.116667, 40.71, 0.272413640) y (747.432083, 42.2775, 0.292783986), donde los ejes están dados por irradiancia, temperatura y potencia, respectivamente. Además, se generó un archivo `.xlsx` con los valores de irradiancia, temperatura y potencia ya clasificados.

Datos clasificados con K-Means

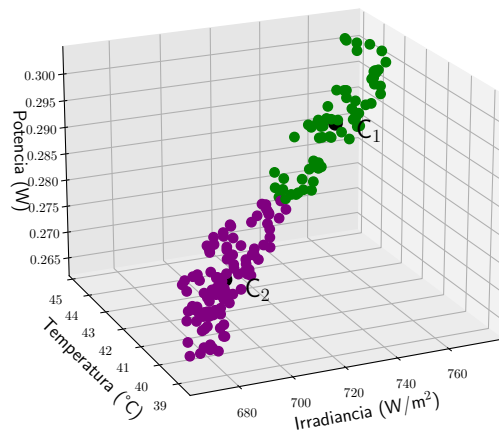


Figura 5.3: Datos de irradiancia, temperatura y potencia clasificados con k -means.

Una vez clasificados los datos obtenidos con el algoritmo k -means, es necesario continuar con

una técnica de minería de datos que aprenda a clasificar nuevos datos, empleando el conjunto de datos ya clasificado como conjunto de entrenamiento. Para la segunda parte del análisis se optó por utilizar la técnica de árboles de decisión o ID3 (por sus siglas en inglés, Induction Decision Trees), ya que al igual que k -means, es una de las 10 técnicas de minería más empleadas y es sencilla de implementar [51].

La técnica de árboles de decisión es un algoritmo de aprendizaje supervisado que utiliza un conjunto de datos de entrenamiento para posteriormente ser capaz de clasificar nuevos valores. Partiendo del conjunto de entrenamiento que posee diversos atributos y una clase asignada a cada punto, el ID3 desarrolla reglas de decisión que clasifican cada punto (o caso) del conjunto de entrenamiento, y posteriormente, será capaz de predecir la clase de nuevos datos.

Por lo tanto, el archivo .xlsx que fue generado anteriormente por medio de la técnica k -means en Python, se utilizó como conjunto de entrenamiento de la técnica árbol de decisión, también conocida como ID3. De igual manera, esta técnica se implementó mediante un programa de Python, para lo cual se empleó la librería `DecisionTreeClassifier`. Esta es capaz de realizar una clasificación en un conjunto de datos con varias clases. Para esto toma como entrada dos matrices: una matriz \mathbf{X} que contiene las muestras de entrenamiento, en este caso la irradiancia, temperatura y potencia, y una matriz \mathbf{Y} que contiene las etiquetas de clase para las muestras de formación, es decir condiciones de generación energética buenas o malas. Con estas matrices se entrenó el programa y se generó el árbol de decisiones de la Fig. 5.4. Este comienza con una condición donde se evalúa si la irradiancia es menor o igual a 719.82 y a su vez si la potencia es menor o igual 0.283. Cuando es verdadera la condición toma la rama de la izquierda, caso contrario la de la derecha, es decir indica si pertenecerá a

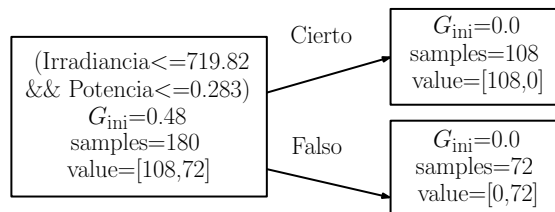


Figura 5.4: Árbol de Decisión generado en Python.

la clase condiciones de generación energética buenas o malas. G_{ini} es una variable que representa el porcentaje de respuestas similares y utiliza (5.3.1), donde x es el número de respuestas positivas (“Sí”), y el número de respuestas negativas (“No”) y n es el número de muestras. Por otro lado, si se desea, el árbol de decisión también se puede exportar en formato textual con la función `export_text` para que se pueda apreciar como un conjunto de reglas.

$$G_{ini} = 1 - \left(\frac{x}{n}\right)^2 - \left(\frac{y}{n}\right)^2 \quad (5.3.1)$$

La técnica ID3 también se puede utilizar para predecir la clase a la que pertenece una muestra dada por el usuario. Es decir, se ingresan datos de irradiancia, temperatura y potencia al programa ya entrenado y mediante la instrucción `dtree.predict` Python predice la clase correspondiente. En este caso señala si las condiciones de generación energética son buenas o malas con base a las condiciones ambientales y eléctricas introducidas al programa.

5.4. Acciones correctivas recomendadas

Después de crear una base de datos por medio de los sensores y los SAD, de hacer un análisis estadístico por medio del software Minitab® y de aplicar las técnicas de minería de datos *k-means* y árboles de decisión, se prosiguió a tomar los resultados obtenidos para definir las alertas, mensajes emergentes y acciones correctivas recomendadas al usuario a través de la interfaz gráfica. En la parte inferior de la ventana MONITOREO DE RED PV, se encuentra un apartado que se titula RECOMENDACIONES en la cual aparecen distintas alertas en base a los datos que se miden en tiempo real. Además, en la misma ventana cambia el color de los recuadros que contienen los valores sensados, esto dependiente si las condiciones monitoreadas son buenas o malas.

Con base a los resultados obtenidos del análisis estadístico preliminar de Minitab® se considera irradiancia buena, temperatura buena y humedad buena cuando son mayores a 750 W/m^2 , a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y a

50%, respectivamente. En estos casos el recuadro se enciende de color verde, caso contrario de color rojo. Algo similar ocurre con las variables eléctricas, ya que en base al mismo análisis en Minitab® se considera al voltaje, a la corriente y a la potencia buenas cuando sus valores son mayores a 15 V, 1.5 A y 30 W respectivamente. De igual manera el color del recuadro cambia de acuerdo a los datos sensados en tiempo real.

Asimismo, tal como lo muestra la Fig. 5.5 cuando las 3 variables ambientales bajan de sus valores nominales se muestra un mensaje de alerta que invita al usuario a tomar las medidas necesarias ya que la potencia de salida será baja por las condiciones meteorológicas, incluso se pueden llegar a activar los diodos bypass que protegen a los paneles lo cual provocará menos generación energética. Por otro lado, cuando las condiciones eléctricas bajan y las ambientales son buenas muestra un mensaje que invita al usuario a asegurarse que los paneles no se encuentran sucios de polvo o algún elemento que provoque condiciones de sombreado parcial. Estas son solo 2 mensajes que se muestran, sin embargo con el uso prolongado del sistema se pueden encontrar nuevas circunstancias que propicien nuevas alertas.



Figura 5.5: Mensajes en Interfaz Gráfica.

5.5. Aplicaciones con la base de datos

El monitoreo en tiempo real de la red de sistemas PV es bastante útil ya que garantiza que el sistema genera energía de manera satisfactoria y permite hacer correcciones inmediatas cuando es necesario. Sin embargo, la base de datos que se genera como resultado del monitoreo de la red es igual de importante, ya que es posible usarla para implementar diferentes aplicaciones que, de igual forma, contribuyen a la optimización de la energía solar PV.

Una de ellas es el estudio de factibilidad que se lleva a cabo previo a la instalación de un sistema PV. Ya que, a pesar de que la energía solar es un recurso abundante y que el costo de los paneles ha disminuido en los últimos años, no todas las zonas del planeta tienen condiciones ambientales que hagan rentable la inversión en proyectos solares. Por lo que, para hacer uso adecuado de esta energía es importante conocer la cantidad disponible. La NASA proporciona imágenes satelitales con los niveles de irradiancia y temperatura por país, también algunas organizaciones como Solargis generan mapas con base en datos históricos nacionales. Esta información es bastante útil, sin embargo, debido a que los datos mostrados son de grandes regiones, puede existir cierto error con la realidad, ya que incluso dentro de una misma ciudad, debido a la ubicación, altura o vegetación, existen variaciones en los niveles de irradiancia y temperatura. En nuestro país existen Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) del Servicio Meteorológico Nacional, las cuales están repartidas a lo largo de toda la república. Sin embargo, la mayoría de los datos no pueden ser proporcionados por las estaciones meteorológicas, además desafortunadamente aún no hay EMAS suficientes.

Afortunadamente este proyecto además de monitorear, permite crear una base de datos con información precisa de una zona donde se proyecta implementar un sistema fotovoltaico. De esta manera, con la ayuda de un software especializado es posible predecir la cantidad de energía que se generaría en ese lugar. Ayudando así a dimensionar un sistema fotovoltaico y determinar la viabilidad de invertir y poner en marcha un proyecto solar.

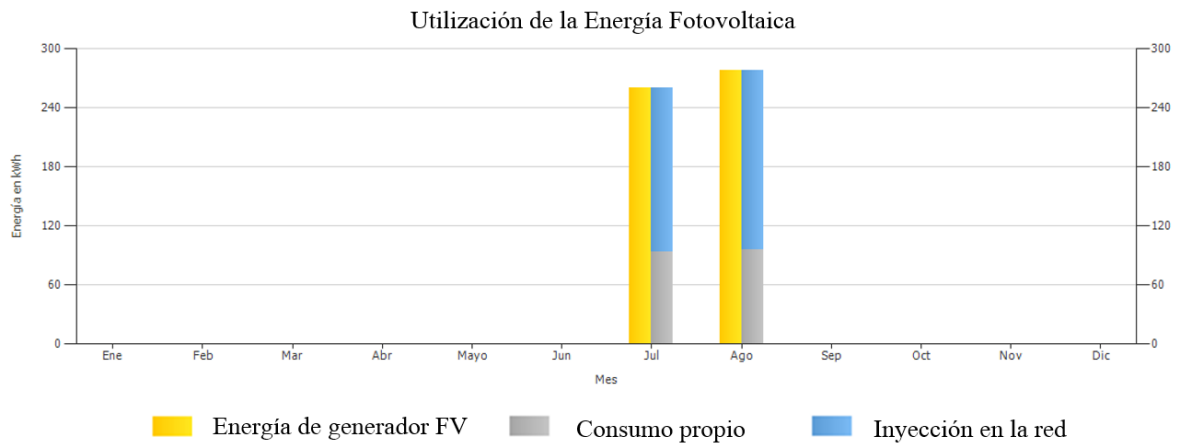


Figura 5.6: Resultados de Simulación en PV*SOL.

Con los datos que se recopilaron en la Raspberry Pi se obtuvo un promedio mensual, los cuales se ingresaron en el software PV*SOL® en su versión de prueba. Con los datos obtenidos y la ayuda de este software se logró hacer un análisis energético y económico de la implementación de un sistema fotovoltaico en la zona en la cual se tomaron las mediciones de irradiancia y temperatura. Para este análisis se consideró un consumo anual de 2,627 kWh, el cual corresponde al gasto eléctrico de una familia de 5 integrantes. Con 8 paneles solares de 200 W cada uno y un precio de la energía de 0.8490 \$/kWh se obtuvo la gráfica mostrada en la Fig. 5.6, la cual muestra una predicción de la energía que se generará, la que consumirá y la que se inyectará a la red. A pesar de que solo se muestran los dos meses en los que el SAD recopiló información, nos da un panorama general que nos permite determinar la viabilidad de implementar un sistema PV.

Este es solo un ejemplo de las aplicaciones que tiene la base de datos que se genera en el sistema de monitoreo propuesto, aunque seguramente en los próximos años se desarrollarán nuevas.

5.6. Conclusiones

A fin de que en los próximos años el porcentaje de energía producida por fuentes renovables sea mayor a la forma tradicional y se incremente su eficiencia, es necesario analizar los datos recopilados

por sistemas como el propuesto. Por esta razón, se llevo a cabo una exploración minuciosa de los datos recopilados por el sistema de monitoreo. Este análisis se realizo con el software especializado Minitab® y aplicando algunas de las técnicas de minería de datos más populares: *k-means* e ID3. La importancia de este análisis es que permitió establecer alertas en la interfaz gráfica, así como mensajes con acciones correctivas recomendadas al usuario. De esta manera, no son avisos al azar sino parámetros definidos con soporte estadístico. Por ultimo, se destaca la importancia de la base de datos recopilada para aplicaciones que van desde determinar la factibilidad de instalar un proyecto solar hasta predecir el momento en que disminuirá la cantidad de energía generada en un sistema PV.

Conclusiones y Trabajos Futuros

6.1. Conclusiones Generales

En primer lugar, se seleccionaron las variables eléctricas y ambientales que se monitorearían en la red de sistemas PV. Mediante una revisión bibliográfica se encontró que el comportamiento de un sistema fotovoltaico es reflejado en sus dos curvas características: la curva corriente–voltaje ($I-V$) y la curva potencia–voltaje ($P-V$). En ellas se puede observar el comportamiento de conjunto de paneles, sus valores de voltaje y corriente de salida e incluso su punto de máxima potencia (PMP). Debido a lo anterior, se seleccionó al voltaje, la corriente y la potencia de salida como las variables eléctricas a monitorear. Por otro lado, también se encontró que existen factores meteorológicos que afectan la eficiencia de los sistemas PV, incluso el impacto de estos factores repercute en las curvas características antes mencionadas. De la gran cantidad variables ambientales destacan principalmente la irradiancia y la temperatura, de hecho, la mayoría de trabajos anteriores miden de igual manera estas variables. Por lo tanto, se eligió a la irradiancia, la temperatura y la humedad como las variables ambientales a

monitorear.

Por otra parte, para enviar los datos de las variables seleccionadas desde los Sistemas PV en exterior hasta una computadora principal, fue necesario seleccionar una tecnología de comunicación inalámbrica. Para esto se analizaron las características de diversas propuestas, se revisó el estado del arte y trabajos similares, así como la disponibilidad y costo en el mercado. Tomando en cuenta estos aspectos, se determinó utilizar el protocolo ZigBee mediante módulos Xbee como tecnología de comunicación en este proyecto.

Teniendo en cuenta lo anterior, se diseñó un circuito el cual fungiría como Sistema de Adquisición de Datos en cada uno de los Sistemas PV que conformarían la red a monitorear. Primeramente, se desarrolló en un software de diseño electrónico en donde se simuló el funcionamiento del circuito y se corroboró su correcto desempeño. Posteriormente este circuito se construyó en una tablilla protoboard de experimentos donde se realizaron numerosas pruebas de operación, de estabilidad, de usabilidad y de comunicación por medio de los módulos Xbee y del software XCTU. Tiempo después se elaboró el circuito impreso del prototipo, permitiendo así, evitar ruido en el sistema y fallas por falsos contactos.

Para realizar un monitoreo eficiente se programó una interfaz gráfica en código abierto. Esta se instaló en una computadora de tamaño reducido llamada Raspberry Pi, la cual funciona como PC principal de la red ya que recibe y almacena toda la información de los nodos. Desde aquí es posible monitorear el estado de la red o de un sistema PV en específico sin la necesidad de WiFi. Por otro lado, si la red se encuentra en una zona con acceso a internet, y si el usuario así lo desea, es posible visualizar el estado de diversos Sistemas PV de la red desde una App comercial llamada ThinkSpeak. En ambos casos, al mismo tiempo que se monitorea la red de sistemas PV, se almacenan todos los datos sensados en archivos .xlsx los cuales se generan cada cierto tiempo según el periodo indicado por el usuario en la interfaz gráfica. De esta manera, se crea una base de datos con la información eléctrica y ambiental de la red.

El sistema propuesto en este trabajo de investigación se puso en funcionamiento en las instalacio-

nes del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero Campus II, en donde se creó una red conformada por dos paneles fotovoltaicos los cuales representan dos sistemas PV. Como consecuencia del monitoreo se produjo una base de datos, la cual se analizó por medio de métodos estadísticos a través del software Minitab®. Además, para hacer un estudio detallado de la información recopilada se implementaron dos de las técnicas de minería de datos más relevantes: *k*-means e ID3. De esta manera, la interfaz gráfica además de permitir observar con mayor claridad el estado de la red, también recomienda acciones correctivas al usuario y da alertas visuales, las cuales se basan en el análisis que se hizo con los datos previamente adquiridos. Las alertas se activan cuando una de las variables sensadas tienen bajo nivel de acuerdo al estudio previo, mientras que las acciones recomendadas buscan corregir alguna deficiencia con el fin obtener la máxima potencia de salida de cada uno de los sistemas PV conectados a la red.

En conclusión, se realizó la conexión inalámbrica de varios sistemas fotovoltaicos aislados en una red tipo estrella, se diseñaron y construyeron Sistemas de Adquisición de Datos para cada uno de los nodos de la red, se llevó a cabo el registro remoto de las principales variables eléctricas y ambientales en una Raspberry Pi, se analizaron los datos con métodos estadísticos y minería de datos, se creó una interfaz gráfica configurable que permite monitorear localmente la red o mediante una App móvil y se propusieron acciones de respuesta con base en el análisis de datos para asegurar la máxima generación de energía en la red.

6.2. Contribuciones

A lo largo de los cuatro semestre en los que se trabajó en el proyecto *Sistema de adquisición, registro y procesamiento de datos en fuentes de energía renovable con interfaz gráfica* se alcanzaron los objetivos trazados inicialmente. Esto se refleja en las contribuciones que se presentan a continuación.

- Conexión inalámbrica de dos sistemas fotovoltaicos aislados en una red tipo estrella.
- Diseño y construcción de Sistemas de Adquisición de Datos asequibles para cada nodo de la red.
- Registro remoto de variables eléctricas y ambientales adquiridas de una red de sistemas PV aislados.
- Interfaz gráfica configurable capaz de registrar y mostrar los datos de la red a través de la Raspberry Pi o de una App móvil.
- Análisis de los datos recopilados con métodos estadísticos y técnicas de minería de datos.
- Recomendaciones en tiempo real de acciones correctivas con base en el análisis de datos.
- Disponibilidad de información confiable para la toma de decisiones por parte del usuario.

6.3. Recomendaciones para trabajos futuros

- Agregar otros tipos de fuentes de generación, se pueden incluir hasta 255 nodos a la red.
- Experimentar con Convertidores Estáticos de Potencia (CEP).
- Implementar mecanismos que apliquen las acciones correctivas recomendadas.
- Desarrollar estrategias de optimización para transferencia de información y gestión de la red.

6.4. Actividades realizadas

- Participación en la “1ra Feria Virtual de Posgrado TecNM 2021”.
- Primer lugar en la etapa local y regional de la “Cumbre Nacional de Desarrollo Tecnológico, Investigación e Innovación: InnovaTecNM 2022” con el proyecto “SAD y minería de datos FV” en la categoría Energía Verde, obteniendo el pase a la fase nacional. Autores: **José Angel Zumaya García**, Aracely Zapién Castillo, Brenda Lizeth Reyes García y Héctor Jacinto Reyes García.
- Participación en la “2da Feria Virtual de Posgrado TecNM 2022”.

6.5. Publicaciones

Revista indizada

- Publicación en revista IEEE Latinoamérica “Irradiance acquisition in real time with long term data logger and post processing using data mining methods”. Autores: Aracely Zapién Castillo, **José Angel Zumaya García**, Pedro Martín García Vite, Luciano Aguilera Vázquez y Francisca Hernández Angel.

Congresos

- Publicación 13° Congreso Internacional de la Academia Mexicana Multidisciplinaria 2021 “Análisis, simulación y validación de modelos simplificados de sistemas solares fotovoltaicos”. Autores: Aracely Zapién Castillo, **José Angel Zumaya García**, Pedro Martín García Vite.
- Publicación 14° Congreso Internacional de la Academia Mexicana Multidisciplinaria 2022 “SAD para determinar la viabilidad de proyectos solares”. Autores: **José Angel Zumaya García**,

Aracely Zapién Castillo, Pedro Martín García Vite, Ana Lidia Martínez Salazar y Francisca Hernández Angel.

- Paper aceptado para publicación en el Coloquio de Investigación Multidisciplinaria 2022 (CIM) “Emulador Solar Fotovoltaico basado en Modelo Simplificado con Interfaz Inalámbrica”. Autores: Aracely Zapién Castillo, **José Angel Zumaya García**, María Andrea Olivo Calles, Brenda Lizeth Reyes García y Pedro Martín García Vite.

Bibliografía

- [1] H. Abdi, S. D. Beigvand, and M. L. Scala, “A review of optimal power flow studies applied to smart grids and microgrids,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 742–766, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116311583>
- [2] M. Nasir, H. A. Khan, A. Hussain, L. Mateen, and N. A. Zaffar, “Solar PV-based scalable dc microgrid for rural electrification in developing regions,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 390–399, 2018.
- [3] L. Hernández-Callejo, S. Gallardo-Saavedra, and V. Alonso-Gómez, “A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance,” *Solar Energy*, vol. 188, pp. 426–440, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19305912>
- [4] IRENA, “Renewable power generation costs in 2019,” *International Renewable Energy Agency*, pp. 60–73, 2020.
- [5] A. Bahashwan, M. Anbar, N. Abdullah, S. M. Hanshi, and T. Al-Hadhrani, *Review on Common IoT Communication Technologies for Both Long-Range Network (LPWAN) and Short-Range Network*, 10 2020, p. 341 353.
- [6] INEGI. (2018) Encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (encevi) 2018. [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/#Documentacion>

- [7] M. Aengenheyster, Q. Feng, F. Ploeg, and H. Dijkstra, “The point of no return for climate action: Effects of climate uncertainty and risk tolerance,” *Earth System Dynamics*, vol. 9, pp. 1085–1095, 08 2018.
- [8] S. de Gobernación. (2016) Decreto promulgatorio del acuerdo de París, hecho en París el doce de diciembre de dos mil quince. [Online]. Available: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5459825&fecha=04%2F11%2F2016
- [9] I. PROMÉXICO, GIZ, “La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México,” *Secretaría de Economía*, pp. 52–75, 2017.
- [10] A. Makkar, A. Raheja, R. Chawla, and S. Gupta, “IoT based framework: Mathematical modelling and analysis of dust impact on solar panels,” *3D Research*, vol. 10, 03 2019.
- [11] L. Szabó, “The history of using solar energy,” in *2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, 2017, pp. 1–8.
- [12] H. Balcioğlu, K. Soyer, and M. EL-Shimy, *Renewable Energy– Background*, 05 2017, pp. 17–33.
- [13] B. İner, “Data monitoring system for solar panels with bluetooth,” in *2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2017, pp. 1–4.
- [14] Nrel.gov. (2021) Best research-cell efficiency chart. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [15] (2021) Tipos de paneles fotovoltaicos. [Online]. Available: <https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>
- [16] P. Dionato, “Redes inteligentes: La evolución de las redes eléctricas inteligentes: presente y futuro,” *Revista Ingeniería Eléctrica*, vol. 311, pp. 1–6, 07 2016.
- [17] V. Gómez, C. Hernández, and E. Rivas, “Visión general, características y funcionalidades de la red eléctrica inteligente (Smart Grid),” *Información tecnológica*, vol. 29, pp. 89–102, 03 2018.

- [18] J. Salazar, “Redes inalámbricas,” *Republica checa*, 2016.
- [19] R. Sivapriyan, D. Elangovan, and K. S. N. Lekhana, “Review of python for solar photovoltaic systems,” 2021.
- [20] B. Zhou, W. Zhao, X. Su, S. Lu, T. Wang, W. Yao, P. Xie, T. Mao, L. Guan, and Y. Lv, “PV Power Characteristic Modeling based on Multi-scale Clustering and Its Application in Generation Prediction,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, vol. 2018-Augus, pp. 1–5, 2018.
- [21] M. Alfonso Galipienso, M. Cazorla Quevedo, O. Colomina Pardo, F. Escolano Ruiz, and M. Lozano Ortega, *Inteligencia artificial: modelos, técnicas y áreas de aplicación*. Ediciones Paraninfo, S.A, 2003. [Online]. Available: https://books.google.com.mx/books?id=_spC6S7UfZgC
- [22] A. A. Felix, O. Hope, O. Joseph, and N. Chukwuebuka, “Design and implementation of a solar energy measurement and monitoring system,” in *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2018, pp. 833–840.
- [23] A. Sani, E. Warman, A. P. S. Depari, and Suherman, “Measuring the commercial solar panel performance,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 420, p. 012051, oct 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/420/1/012051>
- [24] S. Sadowski and P. Spachos, “Solar-powered smart agricultural monitoring system using internet of things devices,” in *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 2018, pp. 18–23.
- [25] A. V. Joglekar and B. Hegde, “Online I-V tracer for per string monitoring and maintenance of PV panels,” in *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2018, pp. 1890–1894.

- [26] H. Shihui, Y. Zhongliang, and Z. Yu, “An intelligent power online monitoring and measurement system of FGC wind photovoltaic storage integrated power station,” *2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pp. 1–4, 2018.
- [27] G. Hashmi, S. Hasan, M. Efat, and M. H. Rahman, “Portable solar panel efficiency measurement system,” *SN Applied Sciences*, vol. 2, 01 2020.
- [28] A. López-Vargas, M. Fuentes, M. V. García, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Low-cost datalogger intended for remote monitoring of solar photovoltaic standalone systems based on arduino™,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 11, pp. 4308–4320, 2019.
- [29] D. Došen, M. Žnidarec, and D. Šljivac, “Measurement data acquisition system in laboratory for renewable energy sources,” in *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 2019, pp. 1–6.
- [30] R. I. S. Pereira, S. C. S. Jucá, P. C. M. Carvalho, and C. P. Souza, “IoT network and sensor signal conditioning for meteorological data and photovoltaic module temperature monitoring,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 06, pp. 937–944, 2019.
- [31] G. Heilscher, C. Kondzialka, S. Chen, F. Ebe, S. Hess, H. Lorenz, and J. Wening, “Integration of photovoltaic systems into smart grids demonstration of solar-, storage and e-mobility applications within a secure energy information network in germany,” in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2019, pp. 1541–1548.
- [32] A. C. Killam, J. F. Karas, A. Augusto, and S. G. Bowden, “Monitoring of photovoltaic system performance using outdoor Suns-Voc,” *Joule*, vol. 5, no. 1, pp. 210–227, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435120305158>
- [33] G. Filios, I. Katsidimas, E. Kerimakis, S. Nikolettseas, A. Souroulagkas, and P. Spirakis, “An IoT based solar park health monitoring system for pid and hotspots effects,” in *2020 16th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, 2020, pp. 396–403.

- [34] J. Choi, M. Choi, Y. Shin, and I.-W. Lee, “Design of web-based monitoring system for solar photovoltaic power plants,” in *2020 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, 2020, pp. 784–786.
- [35] B. L. R. García, “Adquisición, registro y procesamiento de datos de fuente de generación distribuida en una microrred de corriente directa,” 2020.
- [36] W. Sirichote, C. Wuttikornkanarak, S. Srathongkao, S. Suttiyan, N. Somdock, and B. Klongratog, “TV tracer for photovoltaic panel,” pp. 54–57, 2021.
- [37] C. Schuss, K. Remes, K. Leppänen, B. Eichberger, and T. Fabritius, “Thermography of photovoltaic panels and defect detection under outdoor environmental conditions,” pp. 1–6, 2021.
- [38] J. C. D. Cruz, M. C. Cabrera, C. A. V. Manahan, and M. J. T. Palmiano, “Wireless health status monitoring of solar lamp post using radio frequency,” pp. 47–52, 2021.
- [39] O. W. Compaore, Z. Koalaga, and G. Hoblos, “Instrumentation of real-time acquisition system for diagnosis in a photovoltaic generator,” pp. 1–5, 2022.
- [40] A. Prastiantono, M. Fadhil, A. Rahardjo, F. H. Jufri, and F. Husnayain, “Design of Solar Irradiance Measurement Based On Analytical Data Using Microcontroller,” in *2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 2019, pp. 137–141.
- [41] M. Rana, I. Koprinska, and V. G. Agelidis, “Univariate and multivariate methods for very short-term solar photovoltaic power forecasting,” *Energy Conversion and Management*, vol. 121, pp. 380–390, 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416303934>
- [42] X.-m. Gao, S.-f. Yang, and S.-b. Pan, “Optimal parameter selection for support vector machine based on artificial bee colony algorithm: A case study of grid-connected PV system power prediction,” *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2017, pp. 1–14, 08 2017.

- [43] M. Colak, M. Yesilbudak, and R. Bayindir, “Very Short-Term Estimation of Global Horizontal Irradiance Using Data Mining Methods,” in *7th International IEEE Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2018*, vol. 7. Paris: IEEE, 2018, pp. 1472–1476.
- [44] T. Stoffel and A. Andreas. <http://www.osti.gov/servlets/purl/1052547/>, 6 de Abril de 2021.
- [45] B. Zhou, W. Zhao, X. Su, S. Lu, T. Wang, W. Yao, P. Xie, T. Mao, L. Guan, and Y. Lv, “PV Power Characteristic Modeling based on Multi-scale Clustering and Its Application in Generation Prediction,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, vol. 2018-August, pp. 1–5, 2018.
- [46] J. Shen, H. Jie, and N. Ying, “Study on the photovoltaic power generation prediction methods based on comprehensive regression analysis of environmental factors,” in *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2015, pp. 1889–1893.
- [47] J. Choi, M. Choi, Y. Shin, and I. Lee, “Design of web-based monitoring system for solar photovoltaic power plants,” in *2020 International Conference on Information Networking (ICOIN)*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, jan 2020, pp. 784–786. [Online]. Available: <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICOIN48656.2020.9016482>
- [48] R. Bhol, R. Dash, A. Pradhan, and S. M. Ali, “Environmental effect assessment on performance of solar PV panel,” in *2015 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015]*, 2015, pp. 1–5.
- [49] (2018) Manual de usuario: Zigbee RF modules. modelos XBEE2, XBEEPRO2, PRO S2B. [Online]. Available: <https://www.digi.com/>
- [50] J. Brooke, “SUS: A quick and dirty usability scale,” *Usability Eval. Ind.*, vol. 189, 11 1995.

- [51] X. Wu, V. Kumar, Q. J. Ross, J. Ghosh, Q. Yang, H. Motoda, G. J. McLachlan, A. Ng, B. Liu, P. S. Yu, Z. H. Zhou, M. Steinbach, D. J. Hand, and D. Steinberg, *Top 10 algorithms in data mining*. springer, 2008.