



MÁSTER EN AUTOMÁTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

**DIAGNÓSTICO PARAMÉTRICO PREDICTIVO DE
FALLOS DE PANELES SOLARES EN CADENA
UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE BAJO COSTO**

Autor: Neisser Fernando Ponluisa Marcalla

Director: Dr. Emilio García

Valencia, 2021

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo fin de máster a toda mi familia que a la distancia me han brindado apoyo con sus palabras de aliento para seguir a mi meta, en especial a mi Madre, de igual manera a Francisco, Pamela y a mis amigos por el apoyo que me han brindado desinteresadamente, a mis compañeros y los profesores que han impartido sus conocimientos para el desarrollo del máster.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi tutor Emilio García Moreno por la confianza depositada en mí y la oportunidad de realizar una publicación y además de su apoyo en el trabajo fin de máster. Por otro lado, agradezco a todos los profesores por hacer posible el máster en estos momentos que estamos viviendo y a los amigos que hice en el trayecto del máster.

TABLA DE CONTENIDOS

Contenido

CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
2. Justificación del Problema	4
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo General	5
3.2. Objetivos Específicos	5
4. Estado del Arte	6
CAPÍTULO 2	10
5. Sistemas Fotovoltaicos	10
5.1. Historia	10
5.2. Radiación Solar	11
5.3. Energía Fotovoltaica	12
5.4. Celda Solar	13
5.5. Herramientas	13
5.5.1. Paneles Solares	13
5.5.2. Módulo ESP8266	15
5.5.3. Módulo CD74HC4067	15
5.5.4. Sensor de corriente ACS712	17
5.5.5. Sensor de voltaje FZ0430	18
5.5.6. Módulos de Relés	18
5.5.7. Materiales Varios	19
5.6. Software	19
CAPÍTULO 3	20
6. Desarrollo de metodología e implementación	20
6.1. Circuito Eléctrico para operación de los paneles solares.	22
6.2. Programación en Arduino Ide.	23
6.3. Configuración KepServer.	27
6.4. Configuración OPCServer iFIX	30
6.5. Creación de tag con el servidor OPCServer iFIX	33
CAPÍTULO 4	39

7. Experimentos, resultados y discusión	39
7.1. Comprobación de la medición de los sensores	39
7.2. Experimentos en los paneles solares	42
7.2.1. Paneles Solares sin sombras	42
7.2.2. Experimentos con áreas cubiertas de diferente tamaño en un panel solar.	43
CAPÍTULO 5	50
8. CONCLUSIONES	50
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXO 1	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Datos de REE.....	11
Figura 2. Azimut y Altitud Solar	12
Figura 3. Sistema de paneles solares con conexión a la red eléctrica.	12
Figura 4. a) Circuito básico de una celda solar; b) Curvas I-V y P-V de una celda solar.	13
Figura 5. Paneles solares conectados en serie.	14
Figura 6. Módulo NodeMCU V3 CH340/ ESP8266	15
Figura 7. Modulo CD74HC4067	16
Figura 8. Rangos de operación y sensibilidad [51].	17
Figura 9. Sensor de Corriente; a) Sensor de 5A; b) Curva de funcionamiento del sensor [51]......	17
Figura 10. Sensor de Voltaje; a) Divisor de Voltaje; b) Módulo del Sensor de Voltaje.	18
Figura 11. Módulo de Relés 8 canales.....	18
Figura 12. Arquitectura del diagnóstico predictivo de fallos.	21
Figura 13. Modificación sensores de voltaje; a) Sensor para un panel solar; b) Sensor para paneles en serie	21
Figura 14. Nuevos Sensores de Voltaje; a) Nuevo sensor para un panel solar; b) Nuevo sensor para los paneles solares en serie.....	22
Figura 15. Circuito de control automático de los paneles solares.	23
Figura 16. Librerías.	23
Figura 17. Credenciales de red WiFi.....	23
Figura 18. Definición de variables protocolo Modbus.	24
Figura 19. Definición de variables protocolo Modbus.	24
Figura 20. Definiendo pines digitales ESP8266 para el módulo CD74H4067.....	24
Figura 21. Variables y constantes auxiliares.	24
Figura 22. Inicialización del puerto serial y conexión al WiFi.....	25
Figura 23. Inicialización del puerto serial y conexión al WiFi.....	25
Figura 24. Código para leer los datos del sensor de voltaje.....	25
Figura 25. Código para leer los datos del sensor de corriente.....	26
Figura 26. Código para leer los datos del sensor de corriente.....	26
Figura 27. Código para leer los datos del sensor de corriente.....	27
Figura 28. Definiendo protocolo Modbus TCP/IP Ethernet.	27
Figura 29. Conexión TCP/IP y definición del puerto de conexión.	28
Figura 30. Pantalla serial del módulo ESP8266.	28

Figura 31. Ingreso de dirección ip del módulo ESP8266.	28
Figura 32. Asignación de puerto para la conexión.	29
Figura 33. Configuración Timing.	29
Figura 34. Crear servidor para módulo ESP8266.....	29
Figura 35. Creación de Tags.	29
Figura 36. Direcciones de puertos Modbus y tipo de datos	30
Figura 37. Use Local OPC Client Driver	30
Figura 38. Nuevo servidor en OPC de iFIX.....	30
Figura 39. Seleccionar el servidor local.	31
Figura 40. Creación de grupo para las Tags.....	31
Figura 41. Creación de Tags.....	31
Figura 42. Selección del Tag del servidor KEPServerEX V6.....	32
Figura 43. Seleccionar el tipo de señal.....	32
Figura 44. Los Tags creados para iFIX.....	32
Figura 45. Los Tags creados en la base de datos iFIX.	33
Figura 46. Selección de Tag a crear.	33
Figura 47. Tipos de bloques.....	34
Figura 48. Circuito de adquisición de datos y control de los paneles solares.....	34
Figura 49. Circuito de adquisición de datos y control de los paneles solares.....	35
Figura 50. Creación de tags en iFIX 6.5.	35
Figura 51. Sistema SCADA; a) Pantalla Principal; b) Pantalla prueba de Isc y Voc; c) Pantalla de Datos históricos.....	37
Figura 52. Medición de Voc en string paneles solares.	40
Figura 53. Pruebas Voc-Isc en SP1; a) Curva Voc; b) Curva Isc.....	41
Figura 54. Test de Voc; a) Test Voc al string de los SP; b) Test Voc a cada uno de los paneles solares; c) Test Isc a cada uno de los paneles solares.....	42
Figura 55. Test de Isc y Voc a SP1 con área sombreada del 0.8%	43
Figura 56. Test de Isc y Voc a SP1 con área sombreada del 2.52%	44
Figura 57. Test de Isc y Voc a SP1 con área sombreada 5.98%	45
Figura 58. Test de Isc y Voc a SP1 con área sombreada 10.73%.....	45
Figura 59. Test de Isc y Voc a SP1 con área sombreada 14.22%.....	46
Figura 60. Test de Isc y Voc a SP1 con área sombreada 26.34%.....	47
Figura 61. Test de Isc y Voc a SP1 con área sombreada 65%.....	48
Figura 62. Datos históricos del string de paneles solares Voc	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del panel solar modelo SPM04041200	14
Table 2. Tabla de verdad del Multiplexor/demultiplexor.	16
Tabla 3. Softwares.	19
Tabla 4. Mediciones de Voc en los paneles solares.	41
Tabla 5. Mediciones de Isc en los paneles solares.	41
Tabla 6. Áreas Sombreadas	43
Tabla 7. Costos de los materiales para implementar la solución planteada.....	49

ABREVIATURAS

I	Corriente
V	Voltaje/[Voltios]
WiFi	Fidelidad Inalámbrica
Isc	Corriente de corto circuito
Voc	Voltaje de circuito abierto
W	Vatio
m ²	Metro cuadrado
T	Temperatura
Ir	Irradiancia
°C	Grados Celsius
wsd	Velocidad y dirección del viento
H	Humedad
A	Amperio
VDC/Vcc	Voltaje de corriente continua/directa
DC/CC	Corriente continua/directa
GND	Ground
AC/CA	Corriente alterna
h	Sensor de calor
PLC	Controlador lógico programable
TCP/IP	Protocolo de control de transmisión/Protocolo de Internet
OPC	OLE (incrustación y enlazado de objetos) para control de procesos
OPC UA	Arquitectura Unificada OPC
MQTT	Transporte de telemetría de cola de mensajes
SCADA	Supervisión, Control y Adquisición de Datos
Pc	Computadora personal
IoT	Internet de las cosas
Si	Silicio
COM	Común
NO	Normalmente abierto
NC	Normalmente cerrado
RT	Resistencia total
SP	Solar panel
kg	Kilogramo
mm	milímetro
cm	Centímetro
GPIOs	Interfaz de entrada/salida de propósito general
SDIO	Interfaz de entrada / salida digital segura
SPI/HSPI	Interfaz de periféricos en serie
I ² C	Interface inter-integrated circuit
I ² S	Interface Integrated Interchip Sound
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
PWM	Pulse-Width Modulation
IR	Remote Control

ADC	Analog-to-Digital Converter
kW	Kiloohmio
ip/IP/lp	Protocolo de Internet

RESUMEN

La creciente demanda de energía eléctrica en la sociedad, ha provocado la necesidad de buscar nuevas formas para producir energía eléctrica y que a su vez sea amigable con el medio ambiente, por ello cada día se realizan investigaciones como es el caso de este trabajo, enfocado en los paneles solares. La instalación de los paneles solares en la actualidad crece de una manera exponencial y al ser instalados en la intemperie, están expuestos a diferentes tipos de degradación que causan fallos que afectan el óptimo desempeño en la producción de energía, por lo que es de gran importancia aplicar técnicas avanzadas de diagnóstico predictivo de fallos durante la su operación, para que garanticen su viabilidad económica en cuanto a los costes de mantenimiento en las energías renovables.

El objetivo principal de este trabajo es proponer un método para la supervisión y diagnóstico predictivo de fallo en una cadena de paneles solares en tiempo real utilizando tecnología de bajo costo. La detección de fallo se enfoca en el análisis de las curvas Voc-Isc, por otro lado, se hace énfasis en el uso de tecnología de bajo costo como son: el módulo ESP8266, sensor ACS712-5A, sensor FZ0430 y módulos de relés.

La arquitectura del método a seguir para su desarrollo es adquirir los datos de los sensores a través del módulo ESP8266 que envía a internet usando el protocolo Modbus TCP/IP hasta un computador en donde está instalado el sistema SCADA iFIX y KepServerEX; El software KepServerEX recibe los datos del módulo ESP8266 y transmite por un túnel de comunicación OPC hasta el SCADA (iFIX). En el SCADA se realizan diferentes experimentos, que se basa en cubrir diferentes áreas de un SP, con la finalidad de observar las variaciones en las curvas Voc-Isc para evidenciar si el método propuesto logra el diagnóstico predictivo de fallos en tiempo real, además, facilita la desconexión automática del panel solar con fallo.

Finalmente se comprobó que el método propuesto cumple el objetivo, siendo una solución sencilla, confiable, eficiente y fácil de implementar para el diagnóstico predictivo de fallos, además, se necesita muy bajo presupuesto y es aplicable a instalaciones fotovoltaicas de gran tamaño.

ABSTRACT

The growing demand for electrical energy in society has led to the need to seek new ways to produce electrical energy and that in turn be friendly to the environment, for this reason, research is carried out every day, as is the case in this work, focused on the solar panels. The installation of solar panels at present grows exponentially and when installed outdoors, they are exposed to different types of degradation that cause failures that affect the optimal performance in energy production, so it is of great importance. apply advanced predictive fault diagnosis techniques during operation, to ensure their economic viability in terms of maintenance costs in renewable energies.

The main objective of this work is to propose a method for the monitoring and predictive diagnosis of failure in a chain of solar panels in real time using low-cost technology. Failure detection focuses on the analysis of the Voc-Isc curves, on the other hand, emphasis is placed on the use of low-cost technology such as: the ESP8266 module, ACS712-5A sensor, FZ0430 sensor and relay modules.

The architecture of the method to be followed for its development is to acquire the data from the sensors through the ESP8266 module that sends to the internet using the Modbus TCP / IP protocol to a computer where the SCADA iFIX and KepServerEX system is installed; The KepServerEX software receives the data from the ESP8266 module and transmits it through an OPC communication tunnel to the SCADA (iFIX). In SCADA, different experiments are carried out, which are based on covering different areas of a SP, in order to observe the variations in the Voc-Isc curves to show if the proposed method achieves the predictive diagnosis of failures in real time, in addition, facilitates automatic disconnection of the failed solar panel.

Finally, it was verified that the proposed method meets the objective, being a simple, reliable, efficient and easy-to-implement solution for predictive failure diagnosis, in addition, it requires a very low budget and is applicable to large photovoltaic installations.

CAPÍTULO 1

1. Introducción

En la actualidad el consumo de energía eléctrica crece cada día más, debido a que el mundo cada vez es más tecnológico y la demanda de energía eléctrica es proporcional al crecimiento de la tecnología, se debe mencionar que el recurso más usado para la generación de energía es los combustibles fósiles, generando la mayor cantidad de energía eléctrica en el mundo a un alto costo para el medio ambiente, además de ser un recurso no renovable, por lo que hace plantear nuevas ideas para generar energía eléctrica que sean amigables con el medio ambiente.

El uso de recursos renovables hoy en día tiene gran importancia y su crecimiento es exponencial, su uso busca causar menor impacto en el medio ambiente cuando se genera energía eléctrica. La fuente de energía más grande es la energía de solar, este recurso es el más importante entre los recursos naturales, porque permite crear nuevas categorías de recursos renovables como son: la energía eólica, biomasa, energía hidráulica, energía hidroeléctrica, geotérmica, energía térmica, energía de los océanos y energía fotovoltaica.

En este trabajo está encaminado en la energía fotovoltaica que es el uso la radiación del sol para generar energía eléctrica, a partir de la incidencia de la radiación del sol en las

celdas solares y mediante el efecto fotoeléctrico en el interior de cada celda transforma la energía solar en energía eléctrica, a su vez la integración de varias células solares forma un panel solar, estas células pueden estar conectadas de manera paralela, serie o mixta. Es necesario indicar que los paneles solares se instalan en la intemperie, están expuestos a diferentes tipos de degradaciones que provocan fallos entre los más comunes son: los cambios de climas extremos, desgaste, corrosión, roturas, burbujas, decoloración, delaminación, puntos calientes, excrementos de aves, sombras por edificaciones cercanas entre otras, por lo que es necesario aplicar técnicas avanzadas para el diagnóstico predictivo de fallos en los paneles solares para realizar el mantenimiento adecuado y cada cierto tiempo.

El trabajo de fin de máster enfocado para supervisar, diagnosticar y operar de manera predictiva sobre cada uno de los paneles solares que forman parte de una cadena, en este documento se propone un ALGORITMO que desarrollado sobre un SCADA se lleve a cabo la detección de fallos en tiempo real mediante el análisis comparativo de series temporales de los valores paramétricos del voltaje en circuito abierto (V_{oc}) y corriente de cortocircuito (I_{sc}) a cada uno de los paneles solares utilizando el módulo inalámbrico ESP8266 (tecnología de bajo costo), además, con el análisis de las curvas características V_{oc} - I_{sc} , se detecta el fallo en tiempo real y si el fallo compromete a la producción aislarlo hasta determinar el tipo de fallo y el método de corrección que se debe realizar, evitando así los costos de reemplazo de materiales o el consumo de energía producida por sí mismo, además mejorar la optimización en la producción. Para la adquisición de datos se utilizan sensores de voltaje y corriente, y de forma complementaria para la operación selectiva de aislamiento de cada panel solar se realiza mediante módulos de relés. Todas las acciones están programadas en el software IDE de Arduino que permite realizar la programación del módulo ESP8266 que incluye conexión Wireless. Para la comunicación industrial se usa el protocolo Modbus TcP/Ip y OPC permitiendo la unión entre ESP8266 y el software Industrial iFIX de la empresa General Electric.

Este método no solo permite medir la producción de voltaje en circuito abierto de los paneles solares conectados en serie, sino también realizar pruebas a cada uno de los paneles solares comprobando el voltaje en circuito abierto y la corriente en cortocircuito para compararlos. Siendo los paneles solares de las mismas características su producción debería ser similar. En caso de no ser así es porque se ha producido y detectado un fallo, y en caso de perdurar el fallo en la curva con el paso de los días poder realizar la desconexión inmediata del panel sin afectar a la producción y evitando fallos futuros daños al resto de los paneles solares. De este modo este método logra la detección fallos y la operación de los paneles solares a un bajo costo usando un SCADA de un software industrial, fácil de implementar y mejorando el desempeño de los paneles solares cuando existe un fallo.

El documento está dividido en los siguientes capítulos: en el capítulo 1 en el que consta la introducción, justificación, objetivos y el estado del arte (trabajos referentes a los fallos más habituales y trabajos similares al propuesto), seguidamente en el capítulo 2 se describen los conceptos principales y los materiales para el desarrollo del trabajo; En el

capítulo 3 se realiza el desarrollo del trabajo como la metodología, diseño, software e implementación; En el capítulo 4 se desarrolla los experimentos, resultados y análisis de los resultados obtenidos, por último el capítulo 5 se presentan las conclusiones, recomendaciones y posibles trabajos a futuro que se podría realizar.

2. Justificación del Problema

Los paneles solares en actualidad se utilizan en varios campos donde se requiere energía eléctrica como en la industria, desierto o en lugares poco accesibles de llegar con la energía eléctrica convencional o para comercializar su producción.

Los paneles solares al ser instalados a la intemperie surgen diferentes tipos de afectaciones causando fallos, estos pueden ser por las sombras de las nubes, arboles, hojas que caen directamente en el panel, excrementos de pájaros o polvo, roturas en los paneles, lo que genera un punto caliente al estar expuesto por mucho tiempo; representando pérdidas económicas, daños de algunos materiales de la instalación, reducción en la potencia de salida, comprometiendo el óptimo desempeño.

A día de hoy, existen varios trabajos que permiten realizar el diagnóstico predictivo de fallos en tiempo real prediciendo fallos, sin embargo, no permiten operar directamente en los paneles solares, además, de ser muy costosos de implementar.

De acuerdo a lo señalado anteriormente, ha motivado desarrollar un método que permita la supervisión y diagnóstico predictivo de fallos en tiempo real en cada uno de los paneles solares que están conectados en serie, además, se usa tecnología de bajo costo, para que sea económico y no represente una gran inversión y a su vez sea fácil de implementar.

El método planteado permite no solo a la industria dedicada a la producción de energía eléctrica con paneles solares, sino también a pequeñas instalaciones que deseen supervisar y diagnosticar sus paneles solares; ahorrando muchos problemas como son los casos: de consumo de la energía que produce, cambiar piezas del panel o cambiar todo el panel.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Desarrollar un modelo para la supervisión y diagnóstico predictivo de fallos en tiempo real de paneles solares conectados en serie, usando tecnología de bajo costo.

3.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar los elementos necesarios para el desarrollo del método teniendo en cuenta que debe ser tecnología de bajo costo.
- Diseñar el circuito de control automático de los paneles solares.
- Seleccionar protocolos de comunicación desde el módulo ESP8266 hasta el SCADA.
- Calibrar los sensores para medir el voltaje V_{oc} y la corriente I_{sc} .
- Realizar pruebas V_{oc} - I_{sc} a cada uno de los paneles solares.
- Interpretar los resultados de los experimentos realizados a los paneles solares

4. Estado del Arte

Los paneles solares al estar en la intemperie se ven expuestos a fallos, comprometiendo su óptimo desempeño, siendo necesario predecir los fallos para obtener el máximo rendimiento posible, esto se puede realizar a través de la supervisión; a continuación, se indicará como está el estado actual en los métodos para la detección de fallos, la supervisión y el diagnóstico de fallos.

4.1.1. Revisión de fallos

Los fallos es el problema más grande al que se enfrentan los paneles solares por esta razón se han realizado varios estudios para la detección de fallos [1,3,19,20,21,22,23]. Varias investigaciones han realizado un resumen de varios métodos para la clasificación y detección de fallos, donde se pueden señalar que en [1] ha realizado una clasificación de fallos basándose en corriente continua (DC) y corriente alterna (AC) mostrando así un campo amplio de los avances dentro de estos parámetros. En [3] clasifica los fallos producidos por causas ambientales, errores humanos, ciclo de vida entre otras más permitiendo detectar los fallos y las técnicas de monitoreo. Igualmente, en [19] realiza una clasificación de los fallos teniendo en cuenta los fallos físicos, fallos eléctricos y los fallos del medio ambiente en el que se han instalado, facilitando a los investigadores tener una mejor idea al momento de seleccionar algún tipo de fallo, sea para añadir algo nuevo a las técnicas ya existentes o definir un método nuevo.

A medida que se desarrollan nuevos métodos para detectar los fallos en [21] propone un nuevo método para detectar seis tipos de fallos tal como fallo en los diodos, roturas (panel, conectores, barras de conducción de energía), sobre calentamiento de los paneles y los puntos calientes, usando la termografía para adquirir los datos (fotografías). Se debe indicar que es un buen método para detectar fallos en pocos paneles, sin embargo el realizar un análisis termográfico a un campo grande de paneles solares es realmente costoso y no es práctico por el personal que se debe contratar para cubrir toda el área de la instalación [22]. También se debe mencionar que uno de los fallos irreparables que compromete la producción de energía consumiendo corriente y comportándose como una carga es el fallo del punto caliente, este fallo es consecuencia de sombras parciales, excrementos de aves, arboles, edificios, etc., al no haber una distribución de irradiancia en todo el panel solar produce un aumento en la temperatura del panel y crea el punto caliente en el área de la sombra, algunas veces esto puede provocar incendios [1, 23], por tal motivo se sigue aun buscando nuevos métodos para monitorizar y controlar los paneles solares.

Sumándose a los métodos antes mencionados se desarrollan nuevas técnicas, metodologías y tecnologías para la detección de fallos como inteligencia artificial, redes neuronales, simulaciones en Matlab, termografía, diodos de derivación, reconfiguraciones eléctricas, formulaciones matemáticas y analizando las curvas características I-V [2,22,23,24,25-30], consiguiendo la detección de los fallos y en algunos casos la supervisión en tiempo real.

4.1.2. Trabajos similares de supervisión, diagnóstico y control.

La prioridad en la supervisión para el diagnóstico predictivo de fallos y el control en los paneles solares es esencial para mejorar el rendimiento de la producción de energía solar, esto ayuda a la detección, aislamiento y análisis de fallos, y a focalizar mejor el mantenimiento en los paneles solares. Por la importancia que tiene se están desarrollando varios métodos para realizar la supervisión en [6,7] proponen el uso de sensores de redes inalámbricas y la comunicación a través de Zigbee de bajo alcance enviando los datos de corriente, voltaje, radiación y temperatura para monitorizar sus curvas en una aplicación web o aplicación móvil, cabe indicar que estos dispositivos poseen poco alcance de conexión Wireless. En [8] se propone un método para la adquisición de datos de irradiancia solar, temperatura ambiental, velocidad y dirección de viento, voltaje, corriente y temperaturas de panel a través de una PcDuino permitiendo el diagnóstico de manera local o aplicaciones con internet, diagnosticando los fallos en tiempo real e incluso guardando los datos en una tarjeta SD, este método aísla el panel solar con fallo para su mantenimiento, sin embargo, no se puede controlar cada panel solar de la red a la que están unidos. Por otro lado, el método en [9,12] consigue el diagnóstico de fallos de los paneles solares, compilando los datos de los sensores para corriente, voltaje y otros datos meteorológicos usando varias tarjetas como Arduino y Raspberry Pi para la adquisición de los datos que son enviados por internet a un servidor, para su posterior visualización en una página web logrando la supervisión, sin embargo, su costo global está cerca de los 100 euros siendo aún un valor elevado para ser implementado en cada panel solar. La mayoría de trabajos se enfocan en las curvas de I y V , al igual que en [31] que propone la adquisición de datos con la tarjeta Arduino y los sensores utilizados para medir la corriente es ACS712 de efecto hall y para el voltaje un divisor de voltaje permitiendo monitorear I_{sc} y V_{oc} , al igual que la I y V con carga variable pero solo muestra en el monitor serial de Arduino y se grafican los datos en Excel, por lo cual este tipo de supervisión no es recomendable debido a que no se puede hacer en tiempo real, además la placa Arduino siempre debe estar conectada al computador(Pc).

En [13] se indica otro de los métodos para el diagnóstico de los paneles y presenta la monitorización en modo remoto con Arduino para la adquisición de datos y para enviar los datos al servidor ThinkSpeak con la tarjeta ESP8266. Este servidor permite visualizar en un dashboard los datos recogidos con los sensores ACS712-30A y un sensor de voltaje para adquirir los datos de I y V , también en [10] los datos son guardados en el servidor ADAFRUIT CLOUD, donde se muestran en un dashboard que ofrece el servidor. Cabe señalar que estos servidores no son gratuitos por lo que significa un gasto adicional y los paneles solares solo se pueden visualizar, pero no controlar. En [32] se plantea un nuevo método para diseñar antenas de radiofrecuencia en los cristales de los paneles solares funcionando como transpondedores de sensores baratos, realizando un mejor diagnóstico de fallos en las curvas I - V , sin embargo, esta nueva técnica no permite operar con los paneles solares siendo poco eficientes en caso de fallos graves.

Dentro de este orden de ideas en [33] se muestra la supervisión y operación de los paneles solares usando la técnica de detención de fallos de red neuronal NARX difusa con tecnología IoT (Internet de las Cosas). Esta técnica detecta el fallo de forma rápida y precisa consiguiendo incluso la operación en tiempo real, lo cual significa que se puede desconectar el panel solar del sistema si está fallando. Aunque esto es un gran avance desde el punto de vista del control automático, se debe indicar que este método solo permite la desconexión de los paneles solares en pares, ocasionando una desventaja a la hora de optimizar su producción en caso de que el fallo sea en un panel solar. En [34] se plantea un método para la supervisión con una plataforma open source basado en IoT con las ventajas que tiene sobre los sistemas SCADA utilizando los softwares Eclipse Kura y Eclipse Kapua para transmitir los datos en tiempo real o por lotes, además el hardware necesario para la puerta de enlace (Kura) y el servidor (Kapua) utiliza PC Moxa UC-2112 la cual transmite los datos por alguno de los protocolos de comunicación como pueden ser TCP, OPC, Modbus, Mqtt, OPC-UA, etc. La comunicación se ejecuta por MQTT desde el servidor Kapua enviando los datos de cada uno de los paneles solares para ser mostrada en la plataforma Grafana donde se dibujan las curvas correspondientes a los parámetros leídos de los paneles solares. Aunque el método es muy innovador en cuanto a las nuevas tecnologías de comunicación posee un vacío en la operación automática, igualmente es necesario indicar que Eclipse Kura es una versión no estandarizada por lo que surgen algunos problemas de estabilidad con varios dispositivos de hardware.

A medida que avanza la tecnología siguen surgiendo nuevas propuestas como en [14] donde se plantea realizar pruebas in situ para la realizar el diagnóstico de fallos en los paneles solares individuales, basándose en la utilización de un dispositivo llamado SmartPV con un costo alrededor de 40 euros. Este dispositivo permite obtener los parámetros de operación de cada panel solar como, voltaje, corriente, temperatura, intensidad de la radiación solar, temperatura ambiente y humedad. La transmisión de datos lo hace por Wireless a un servidor, los datos solo permiten visualizar las curvas de cada uno de los parámetros, pero no permite realizar ninguna acción sobre el panel solar como la desconexión automática de un string de los paneles solares, mostrando una desventaja en caso de que existiera un fallo grave que ponga en riesgo a gran parte de la producción por lo que no existe un avance en cuanto al control automático.

En este trabajo se propone el diagnóstico predictivo de fallos utilizando como banco de pruebas experimental la operación de tres paneles solares conectados en serie, sobre los que se puede realizar la desconexión automática del panel solar en tiempo real en caso de un fallo grave que comprometa la producción del string de paneles solares. El desarrollo de esta metodología se hace haciendo uso del módulo ESP8266. La supervisión y control de los paneles solares se realiza en el software HMI/SCADA (iFIX 6.5) dedicado a la automatización de la familia de productos de GE (General Electric), es un software industrial confiable con muchos años de implantación en el mercado industrial. El trabajo realizado, demuestra que se puede integrar la tecnología de bajo costo con softwares industriales robustos sin la necesidad de un PLC, haciendo compatible la aplicación del diagnóstico predictivo a bajo

coste. Este método muestra la supervisión de la curva del voltaje de circuito abierto de los tres paneles solares en tiempo real, pudiendo realizar pruebas a los tres paneles solares, basadas en la desconexión de cada uno de los paneles solares para realizar pruebas Voc-Isc. La prueba permite detectar si los paneles solares tienen algún fallo para en consecuencia, aislar el panel solar con fallo y realizar la desconexión automática permanente para que no perjudique a la generación de energía de la cadena completa mientras se toman las acciones pertinentes como por ejemplo hacer el mantenimiento de limpieza a los paneles solares, usando alguno de los métodos propuestos en [35,36].

CAPÍTULO 2

Los paneles solares en la actualidad cada vez son más usados en hogares, industrias o empresas para producir energía y venderla, además se produce de un recurso natural inagotable como es la energía solar, en este capítulo se define conceptos básicos de la generación de energía eléctrica por medio de los paneles solares, historia de los paneles solares, tipos de paneles solares, el efecto fotovoltaico en las celdas, las herramientas para el desarrollo del método propuesto.

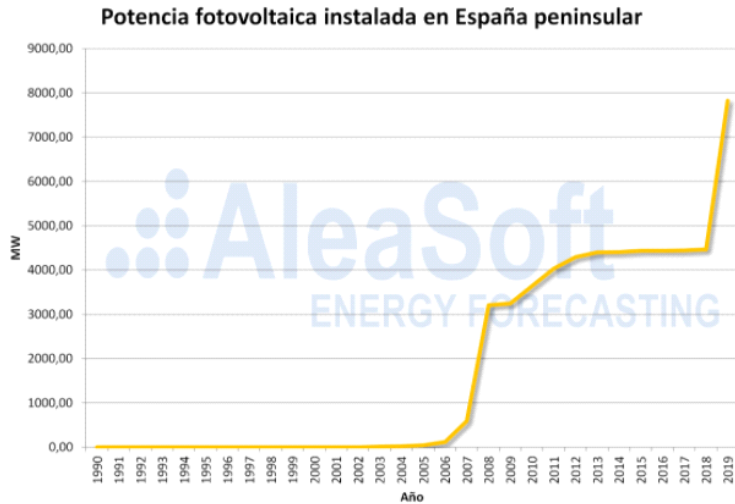
5. Sistemas Fotovoltaicos

5.1. Historia

El efecto fotovoltaico fue descubierto por el francés Alexandre Edmond Becquerel en 1838 cuando estaba experimentando con una pila electrolítica con electrodos de platino donde comprobó que la corriente subía en uno de los electrodos si se exponía al sol.

En 1873 el inglés Willoughby Smith descubre el efecto fotovoltaico en sólidos de Selenio. En 1877, el inglés William Grylls Adams profesor de Filosofía Natural en la King College de Londres, junto Richard Evans Day, crearon la primera célula fotovoltaica de selenio [59].

España se empezó a incluir al sistema eléctrico en el año 1984 por medio de la empresa Iberdrola que invirtió en el primer parque de paneles solares y conectados a la red eléctrica se realizó en San Agustín de Guadalix produciendo 100 kWp [60] lo cual motivo a muchas más empresas empezaron a instalar más paneles solares y cada vez más, dando un crecimiento exponencial (ver figura 1) debido a que representa un ahorro, además de ser amigable con el medio ambiente y siendo un recurso ilimitado.



Fuente: Elaborado por AleaSoft con datos de REE.

Figura 1. Datos de REE.

5.2. Radiación Solar

La radiación solar son ondas electromagnéticas propagadas en todas las direcciones por el sol; el sol es un recurso natural inagotable de gran importancia para la creación de nuevas formas de energía renovables como la energía eólica, biomasa, undimotriz, térmica entre otras, además de generar el efecto de evaporación, la formación de nubes, etc.

La cantidad de radiación depende de la composición de atmósfera, la intensidad y la distribución espectral [61]. La radiación solar global para la generación de energía eléctrica a través de los paneles solares está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Radiación solar global} = \text{Directa} + \text{Difusa} + \text{Reflejada} \quad \text{\$ } \mathbf{1.000 \text{ W/m}^2\text{-día}} \quad (1)$$

La radiación solar incidente por unidad de superficie sobre un plano dado, se obtenida por integración de la irradiancia durante un intervalo de tiempo dado, normalmente una hora o un día y se expresa en MJ/m² o kWh/m

La cantidad de radiación solar depende de la inclinación y el ángulo de los rayos del sol que forman con la superficie terrestre o del panel solar (ver figura 2).

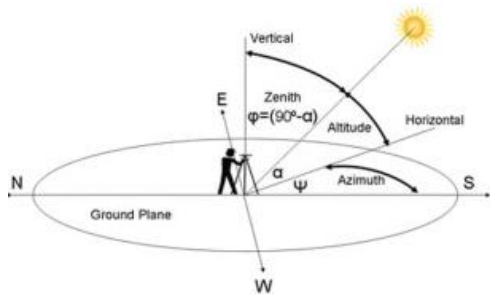


Figura 2. Azimut y Altitud Solar

5.3. Energía Fotovoltaica

La energía fotovoltaica se basa en la transformación de la radiación solar a energía eléctrica a través de varios materiales que permiten aprovechar la radiación, mediante la celda solar facilita que el haz de luz atraviese la celda generando una cantidad de corriente mínima que circula por un semiconductor siendo esta corriente no suficiente para alimentar a una carga, sin embargo, al conectar las celdas solares en diferentes configuraciones ya sea en serie, paralelo o mixto, se puede obtener una corriente, voltaje o potencia más alta y así alimentar a una carga; la unión de celdas solares es lo que se conoce como panel solar o modulo solar y su conjunto forman un generador de energía eléctrica, además la energía producida puede ser almacena o distribuida directamente a la red eléctrica convencional (ver figura 3).

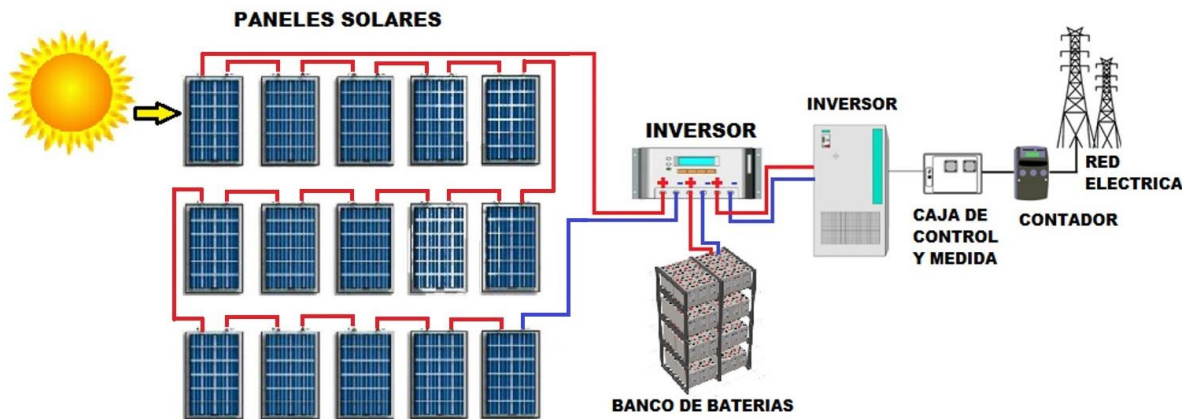


Figura 3. Sistema de paneles solares con conexión a la red eléctrica.

5.4. Celda Solar

La celda solar es la encargada de transformar la energía solar a energía eléctrica, esto lo hace mediante el efecto fotovoltaico en el que un haz de luz incide en las capas P y N de la celda permitiendo el desplazamiento de los electrones de una capa a la otra generando corriente eléctrica, el material más usado en las celdas solares es el semiconductor de silicio y dependiendo del orden de sus átomos en la células se derivan a silicio policristalino, monocristalino o amorfo, depende del tipo de configuración de silicio se produce de corriente y voltaje en cantidades pequeñas y para que produzca lo que requiere para aplicaciones en la que se usará se debe conectar en paralelo, serie o mixto. El circuito básico que define a una celda solar se indica en la figura 4, donde se puede apreciar que el modelo está formado por un solo diodo y cuatro elementos tales como una fuente de corriente, un diodo, una resistencia en paralelo a la fuente y el diodo, y una resistencia en serie [37,38,39,40,41].

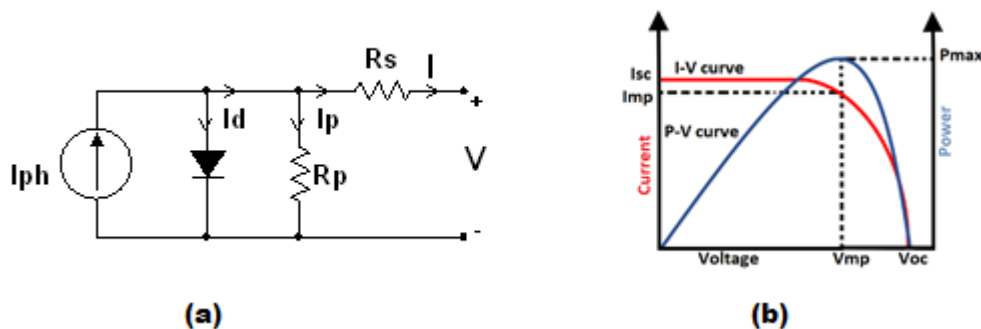


Figura 4. a) Circuito básico de una celda solar; b) Curvas I-V y P-V de una celda solar.

5.5. Herramientas

Los elementos que se ha usado para el desarrollo de la metodología como es el diagnóstico en la detección de fallos en tiempo real de los paneles solares conectados en serie, se describen en esta sección.

5.5.1. Paneles Solares

Los paneles solares están compuestos de un arreglo de celdas solares conectados en serie, paralelo o mixto, la combinación permite que la energía eléctrica producida sea mayor; en serie los voltajes aumentan y en paralelo sus corrientes se suman, al combinar los dos su potencia de salida aumenta siendo controlada básicamente por la configuración interna, lo mismo sucede cuando se realiza la misma configuración con los paneles solares.

Los paneles solares están básicamente se representados con el circuito que define a una celda solar se muestra en la figura 4, donde se puede apreciar que el modelo está formado por un solo diodo y cuatro elementos tales como una fuente de corriente, un diodo, una resistencia en paralelo a la fuente y el diodo, y una resistencia en serie, existen

otros modelos con más elementos, pero aquí básicamente se trabaja con el modelo básico y su curva igual está definida en la figura 4 [37,38,39,40,41].

En este trabajo se utilizaron tres paneles solares de monocristalino de la marca Victron Energy Blue Power de 40W (ver figura 5), su número de serie SPM040401200 y sus características se describen en la tabla 1. Están fabricados con vidrio templado de alta transmisión y alta calidad para una mejor dureza y resistencia a los impactos e igualmente posee un sólido bastidor de aluminio galvanizado para la instalación en distintos sistemas de montaje. Su caja de conexión es hermética proporcionando una alta seguridad en la que se puede comprobar la existencia de un diodo de derivación para la desconexión automática de las celdas afectadas por un evento de sombreado. La potencia de salida siempre dependerá de los parámetros estándares descritos en la tabla 1 [43].



Figura 5. Paneles solares conectados en serie.

Tabla 1. Características del panel solar modelo SPM04041200

Parameter	Symbol	Value	Unit
Rated Maximum Power	Pmax	40	W
Tolerance	Tol	0±3	%
Voltage at Pmax	Vmp	18.33	V
Current at Pmax	Imp	2.19	A
Open-Circuit Voltage	Voc	22.45	V
Short-Circuit Current	Isc	2.40	A
Nominal Operating Cell Temperature	NOCT	47±2	°C
Maximum System Voltage		1000	VDC
Maximum Series Fuse Rating		10	A
Weight		3.10	Kg
Dimensions		425x668x25	mm
Operating Temperature		-40 to +85	°C
Application Class		Class A	
Protection Class		□	
Cell Technology		Mono-Si	

5.5.2. Módulo ESP8266

El dispositivo ESP8266 fue desarrollado por la empresa Espressif y se caracteriza por ser un chip de bajo costo que se usa conjuntamente con el módulo NodeMCU con Wireless incluido para la conexión a internet.

El módulo ESP8266 hoy en día es muy usado en la actualidad por su versatilidad en el desarrollo de aplicaciones que necesitan conectarse a internet para transmitir los datos u operaciones en tiempo real, también se utiliza en aplicaciones IoT.

El voltaje de operación es de 3.3V, sin embargo, permite el ingreso hasta 10V y una corriente de 80 mA, su velocidad de procesamiento es de 160 Mhz, siendo necesario indicar que es un chip de bajo costo comercial, como también es de bajo consumo y fácil de programar; la programación del módulo ESP8266 se realiza en el software Arduino IDE. El módulo está compuesto de varios pines como son: GPIO, SDIO, SPI/HSPI, I2C, I2S, UART, PWM, IR y ADC, existen varias versiones del módulo [44].

En este trabajo se usa un módulo NodeMCU V3 CH340 ESP8266 para la monitorizar y controlar los paneles solares en tiempo real (ver figura 6).



Figura 6. Módulo NodeMCU V3 CH340/ ESP8266

Una desventaja que presenta el módulo ESP8266 es que solo posee un pin de entrada analógica (DCA), característica importante cuando se quiere realizar aplicaciones con más de una entrada analógica digital, motivo por el cual en este trabajo se ha usado un multiplexor/demultiplexor que se describe seguidamente.

5.5.3. Módulo CD74HC4067

El módulo CD74HC4067 funciona como interruptor giratorio dirigiendo internamente el pin común al pin del canal seleccionando por el cual va a transmitir los datos, esto permite aumentar las entradas analógicas en ESP8266, funciona con señales analógicas y digitales, además se debe tener en cuenta que el voltaje no debe ser mayor al V_{cc} .

El módulo trabaja con un rango de voltaje de 2V a 6V, para su configuración se necesita 4 entradas digitales, 2 entradas GND (ground), una entrada analógica y V_{cc} (Voltaje de

corriente continua) (ver figura 7) [50]; sus pines de entradas están definidos por la configuración descrita en la tabla 2; esta tabla está creada a partir de los 4 pines digitales de entrada (4 pines de la ESP8266) creando una matriz con 16 canales de entrada que transmiten sus datos leídos a la entrada analógica digital de la ESP8266.

Table 2. Tabla de verdad del Multiplexor/demultiplexor.

S0	S1	S2	S3	ADC	CANAL DE ENTRADA
# PIN	# PIN	# PIN	# PIN	1	NONE
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	2
1	1	0	0	0	3
0	0	1	0	0	4
1	0	1	0	0	5
0	1	1	0	0	6
1	1	1	0	0	7
0	0	0	1	0	8
1	0	0	1	0	9
0	1	0	1	0	10
1	1	0	1	0	11
0	0	1	1	0	12
1	0	1	1	0	13
0	1	1	1	0	14
1	1	1	1	0	15

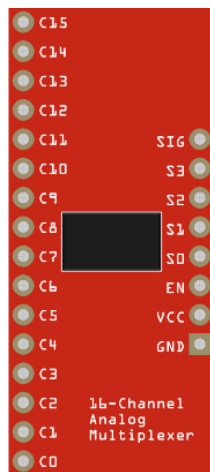


Figura 7. Modulo CD74HC4067

5.5.4. Sensor de corriente ACS712

Es un sensor de tipo Hall mide la intensidad de corriente tanto alterna como continua que atraviesa por el conductor. Este tipo de sensor es muy económico y fácil de usar para medir corrientes; su funcionamiento es mediante el efecto hall es decir mide la corriente cuando el campo magnético está perpendicular al conductor generando una diferencia de voltaje proporcional a la corriente que pasa por él. Es muy usado cuando se trabaja con microcontroladores como Arduino, Raspberry Pi o en este caso ESP8266, el sensor fue desarrollado para trabajar con 5V, la variación del amperaje depende del modelo seleccionado que pueden ser de 5A, 20A, 30A (ver figura 8), de la selección del sensor depende también la sensibilidad. Se debe tener presente que no se puede usar este sensor si hay un campo magnético muy fuerte porque se vería afectado en la resolución de lectura [51,52,53].

Part Number	Packing*	T _A (°C)	Optimized Range, I _p (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±30	66

Figura 8. Rangos de operación y sensibilidad [51].

El sensor que se usó para este trabajo está implementado en un módulo que permite realizar las conexiones de manera fácil y consta con 3 pines para su conexión VCC, OUT, GND (ver figura 8a). Según la curva de funcionamiento (ver figura 8b) el voltaje medio en la salida del sensor es 2.5 V indicando que la corriente es de 0A, este valor varía según lo indicado anteriormente en el funcionamiento. El sensor utilizado en este trabajo es de 5A y su sensibilidad es de 185mV/A. Hay que tener en cuenta que si el voltaje es menor a 2.5 V significa que la corriente es negativa, los cálculos para medir la corriente se realizarán más adelante.

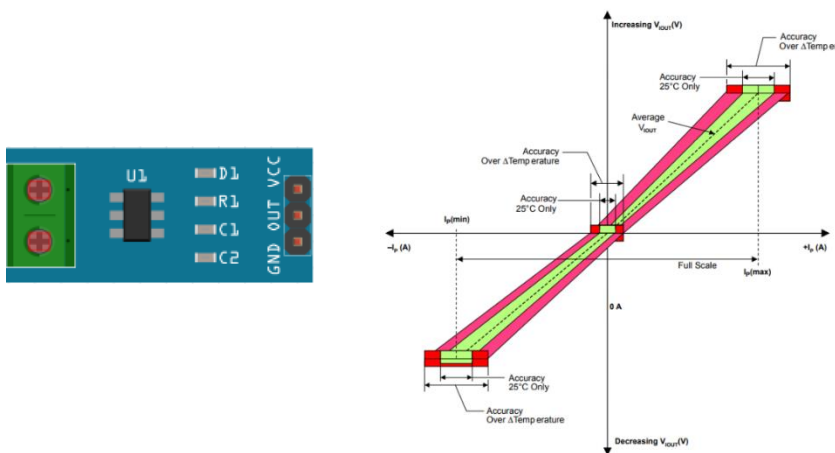


Figura 9. Sensor de Corriente; a) Sensor de 5A; b) Curva de funcionamiento del sensor [51].

5.5.5. Sensor de voltaje FZ0430

El sensor de voltaje FZ0430 es un módulo que nos facilita medir voltajes de forma sencilla; el módulo está construido por un divisor de voltaje (ver figura 10) y tiene una resolución de 24.41 mV en su medición, además, es necesario indicar que el sensor puede medir hasta un máximo de 25V en microcontroladores que funcionan con 5V, por otro lado, en microcontroladores que funcionan con 3.3V como es el caso del módulo ESP8266, se puede leer voltajes hasta 16.5V si se sobre pasa esos voltajes se pueden generar daños graves en los pines del microcontrolador usado[54].

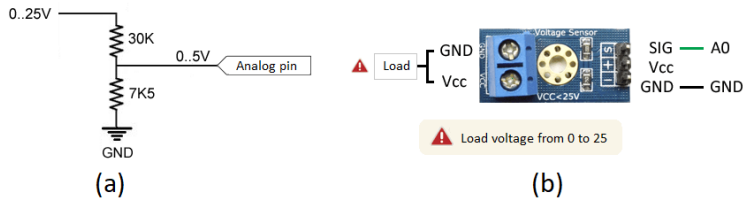


Figura 10. Sensor de Voltaje; a) Divisor de Voltaje; b) Módulo del Sensor de Voltaje.

En este trabajo las lecturas a medir son superiores a los 16.5V según las características del panel solar (ver tabla 1), además, se está usando un módulo ESP8266, siendo esto una desventaja al usar este sensor, sin embargo, al ser un sensor divisor de voltaje en su interior es fácil de modificar la entrada, simplemente se necesita conectar una resistencia superior para ampliar el rango de voltaje en la entrada; se realizan los cálculos más adelante en la metodología.

5.5.6. Módulos de Relés

Los módulos de relés permiten realizar la conmutación de cargas a través de acción mecánica. El módulo está compuesto de optoacopladores para realizar la conexión y desconexión de las cargas; los relés se activan cuando supera su valor de funcionamiento y puede hacer la activación y desactivación desde microcontroladores, Arduino, ESP8266, etc., además, cada relé está compuesto por los pines COM, NO y NC y su voltaje de operación depende de sus características por ejemplo en este trabajo se utiliza el módulo de 8 canales y sus características de funcionamiento es en CC 30V/10A y CA 250V/10A y el voltaje de activación es de 3.3V (ver figura 11) [55].



Figura 11. Módulo de Relés 8 canales.

Este módulo nos permite realizar la conexión y desconexión de los paneles solares cuando exista un fallo importante en el panel solar, sin embargo, para que funcione correctamente se debe diseñar un circuito que permita además unir los paneles solares en serie, el diseño del circuito se explicará más adelante en la metodología.

5.5.7. Materiales Varios

En esta sección se debe indicar que se usaron resistencias, fuentes de energía externas, protoboard, cables, conectores entre otros elementos necesarios para el desarrollo del método que no son muy relevantes definirlos en esta sección.

5.6. Software

Para el desarrollo de este trabajo se usaron varios softwares tanto como para comunicación, adquisición de datos y la integración con el sistema SCADA.

La utilización conjunta ha permitido lograr la supervisión, diagnóstico predictivo y operación en tiempo real de los paneles solares, además, de llevar a cabo la integración de tecnología de bajo costo (ESP8266) con un software industrial de calidad contrastada. Los softwares utilizados se describen en la tabla 3.

Tabla 3. Softwares.

Nombre	Versión	Características	Empresa
Arduino IDE	1.8.15	<ul style="list-style-type: none"> • Código abierto • Fácil de programar • Versátil para la programación de otros módulos [56]. 	Arduino
KEPServerEX	6.4.321.0	<ul style="list-style-type: none"> • Versatilidad para unir varias tecnologías de comunicación. • Seguridad en las comunicaciones. • Reúne varias tecnologías industriales. • Comunicación segura con software para el desarrollo de sistemas SCADAs [57]. 	Kepware
iFIX	6.5.	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo HMI/ SCADA. • Alto rendimiento en Monitoreo y Control. • Mayor Eficiencia en operaciones [58]. 	General Electric

CAPÍTULO 3

6. Desarrollo de metodología e implementación

La supervisión, el diagnóstico de fallos y control de los paneles solares es de gran importancia para detectar fallos que comprometan la producción de energía eléctrica, por esta razón en este trabajo se propone una solución fácil y rápida de implementar, con materiales de tecnología de bajo costo mencionados en la sección 2.5, además, la comunicación se realiza con los softwares descritos en la sección 2.6, al igual que el desarrollo del algoritmo sobre el Sistema SCADA.

El desarrollo del método propuesto empieza con el módulo ESP8266 que lee los datos desde los sensores y además permite la operación de conexión/desconexión de los paneles solares, todos los datos son enviados a internet a través del protocolo de comunicación modbus TCP/IP hasta un computador local, el cual se tiene instalado los softwares Kepserver e iFIX. El software Kepserver está configurado con el mismo protocolo de comunicación que la ESP8266 para intercambiar los datos u operaciones a realizar, cabe indicar que el software Kepserver permite la configuración de varios protocolos de comunicación de manera versátil para la unión entre tecnologías de diferentes fabricantes. Además, el software Kepserver en este trabajo es un intermediario de comunicación con iFIX por medio de la comunicación OPC local para así conseguir la transferencia exitosa de los datos adquiridos en la ESP8266.

En iFIX se leen los datos que han sido transmitidos desde el módulo ESP8266 y se muestran en los dashboard del sistema SCADA, realizando una pantalla muy intuitiva para que cualquier operador pueda entender el funcionamiento del sistema Scada.

La arquitectura de desarrollo del modelo propuesto se describe a continuación (ver figura 12).

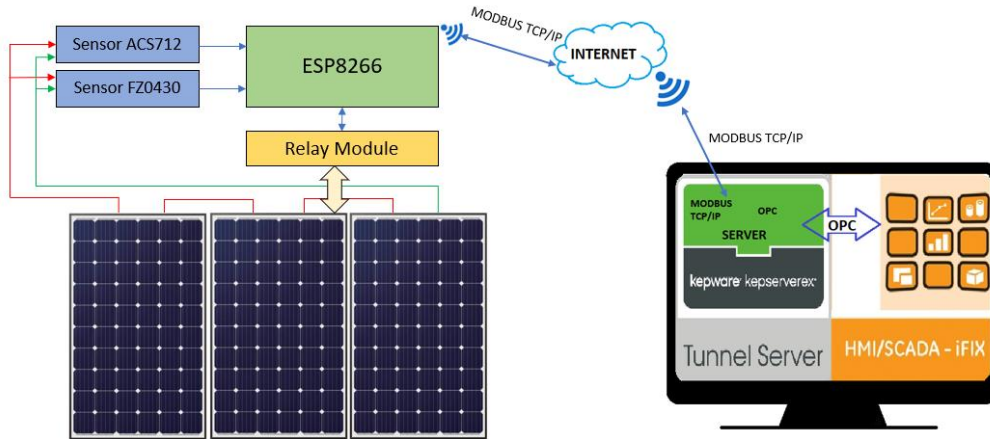


Figura 12. Arquitectura del diagnóstico predictivo de fallos.

Dentro del orden de ideas explicadas en el párrafo anterior se procede a una descripción más amplia del método propuesto. En el desarrollo del trabajo y los cambios realizados en los sensores de voltaje como se explicó en la sección 2.5.5, se indica que el sensor de voltaje FZ0430 es un divisor de voltaje y que el módulo ESP8266 solo puede medir voltajes de 0 a 16.5V, sin embargo, se puede ampliar el rango de medición del voltaje, añadiendo una nueva resistencia en la entrada V+(Voltaje positivo de la fuente), este cambio se realiza en los dos sensores porque van a leer voltajes superior al indicado anterior, según las características del panel solar siendo una manera fácil de modificar de acuerdo con las características, tanto para el sensor del string de paneles solares como en el sensor para la prueba de Voc de cada panel solar(ver figura 13).

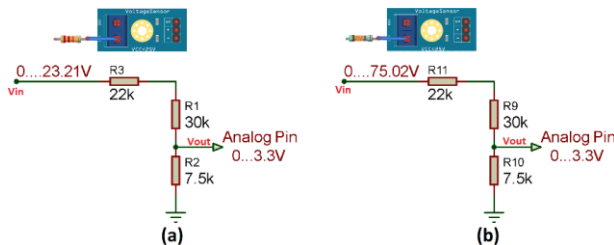


Figura 13. Modificación sensores de voltaje; a) Sensor para un panel solar; b) Sensor para paneles en serie

De acuerdo con los cambios realizados en la figura 13, es necesario calcular el valor de voltaje que puede ser leído por el módulo ESP8266, sin embargo, primero hay que realizar el cálculo de la nueva resistencia (ver figura 13), esto es una suma de resistencias (ecuación 1) dando como resultado el reajuste en la lectura del sensor. A continuación, se describen las operaciones realizadas:

$$\begin{aligned}
 RT &= R1 + R3 & RT &= R4 + R6 \\
 RT &= 30K\Omega + 22K\Omega & RT &= 30K\Omega + 133K\Omega \\
 RT &= 52K\Omega & RT &= 163K\Omega
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

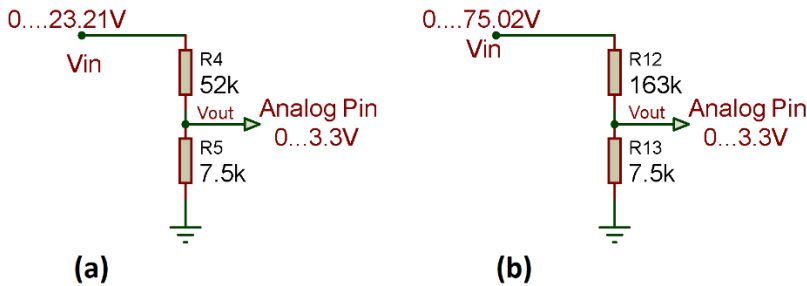


Figura 14. Nuevos Sensores de Voltaje; a) Nuevo sensor para un panel solar; b) Nuevo sensor para los paneles solares en serie.

Una vez obtenido el nuevo valor de la resistencia, se necesita conocer el valor que puede medir el sensor desde el módulo ESP8266, para lo cual se realiza los cálculos a partir de la figura 14 (ecuación 2).

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= V_{in} \frac{R5}{(R4+R5)} & V_{out} &= V_{in} \frac{R13}{(R12+R13)} \\
 V_{in} &= V_{out} \frac{(R4+R5)}{R5} & V_{in} &= V_{out} \frac{(R12+R13)}{R13} \\
 V_{in} &= 3.3V \frac{(52K\Omega+7.5k\Omega)}{7.5k\Omega} & V_{in} &= 3.3V \frac{(163K\Omega+7.5k\Omega)}{7.5k\Omega} \\
 V_{in} &= 23.21V & V_{in} &= 75.02V
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

6.1. Circuito Eléctrico para operación de los paneles solares.

En esta sección se diseña el circuito de control para realizar la operación de conexión y desconexión de los paneles solares, teniendo en cuenta que los paneles solares están conectados en serie; lo que significa que y si uno de los paneles solares es desconectado la producción de energía se detiene, motivo por el cual es necesario realizar un circuito que permita desconectar uno de los paneles solares sin afectar la producción, para dar solución este inconveniente se utilizan los módulos de relés (sección 2.5.6) que son compatibles con la aplicación a realizarse.

El diseño de este circuito se ha realizado con la ayuda del software Proteus 8 Professional, software que nos permite simular circuitos eléctricos, para comprobar que el diseño del circuito eléctrico está funcionando correctamente (ver figura 15); no se ha mencionado en la sección 2.6, porque no es necesario su uso en el desarrollo del método, como los demás softwares.

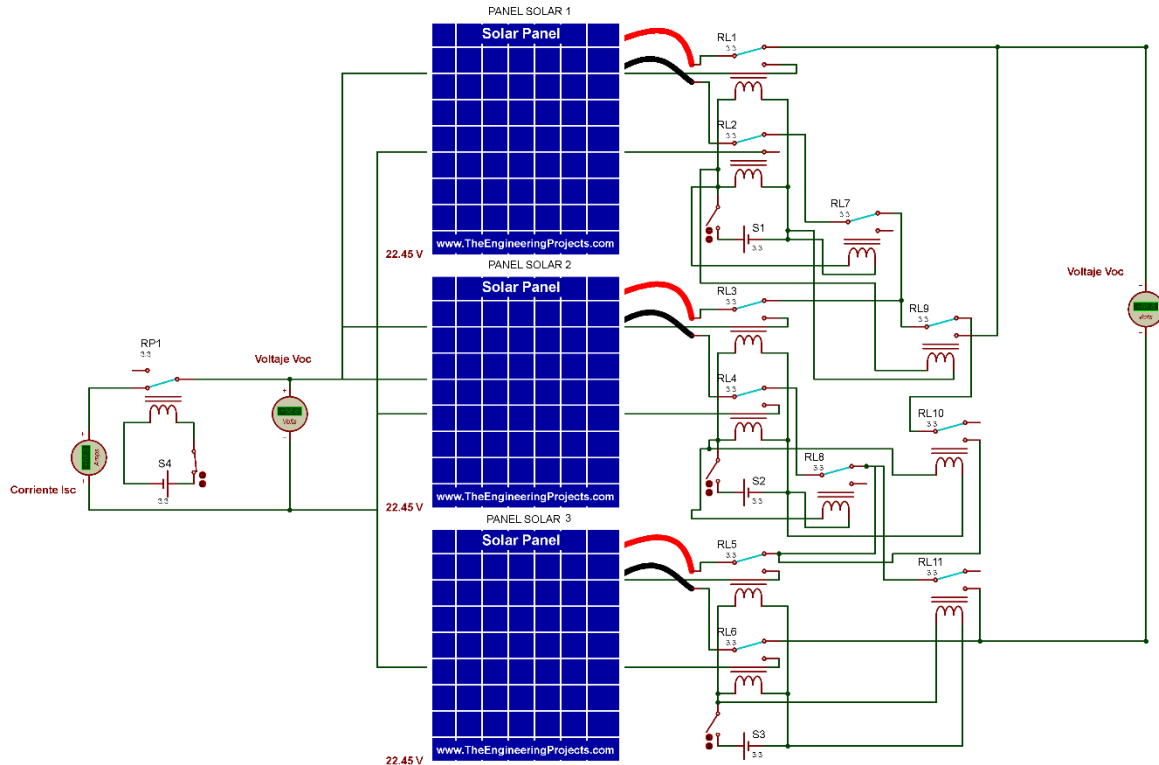


Figura 15. Circuito de control automático de los paneles solares.

6.2. Programación en Arduino Ide.

El código desarrollado para el método propuesto se ha realizado en el Software Arduino Ide; en el software se debe configurar el tipo de tarjeta que se va a usar, en este caso la ESP8266 e incluir ciertas librerías que son necesaria para que el código escrito funcione adecuadamente, en esta sección se indicaran fragmentos de código que son relevantes.

- Librerías que se usó en el método, la primera es para usar el módulo CD74HC4067 descrito en la sección 2.5.3 y la siguiente librería se utiliza para la comunicación Modbus TCP/IP (Ver figura 16)

```
#include "light_CD74HC4067.h"
#include "ModbusIP ESP8266.h"
```

Figura 16. Librerías.

- Credenciales de la red a la que el módulo ESP8266 se va a conectar para enviar los datos (ver figura 17).

```
//Credenciales WiFi
const char *ssid = "PSolares_plus"; // Nombre de la red
const char *password = "PSolares21"; // Contraseña de la red
```

Figura 17. Credenciales de red WiFi.

- Definición de las variables para registrar los valores de los sensores en el protocolo Modbus (Ver figura 18).

```
//////// REGISTRO MODBUS ////////////
//-----ENTRADAS ANALOGICAS DEL PANEL SOLAR -----//
const int SA_VP = 0;          // Valor Entrada analogica de voltaje de un panel    // E0
const int SA_IP = 1;          // Valor entrada analogica de corriente de un panel    // E2
const int SA_VT = 2;          // Valor entrada analogica de voltaje total en serie    // E1

// RELES PANEL //
const int Rele1=0; // Rele para desconectar panel 1
const int Rele2=1; // Rele para desconectar panel 2
const int Rele3=2; // Rele para desconectar panel 3
const int Rele4=3; // Rele para realizar prueba de Corriente de cortocircuito

#define Rele_1 14 //D5
#define Rele_2 12 //D6
#define Rele_3 13 //D7
#define Rele_4 16 //D8
```

Figura 18. Definición de variables protocolo Modbus.

- Creando objeto Modbus (ver figura 19)

```
////////// CREANDO OBJETO MODBUS ////////////
ModbusIP mb; //Objeto Modbus
```

Figura 19. Definición de variables protocolo Modbus.

- Definiendo los pines digitales del módulo ESP8266 para ser usadas por el módulo CD74H4067, además de la entrada analógica del módulo ESP8266, que es por donde va a transmitir los datos del módulo CD74H4067 (ver figura 20)

```
///// MULTIPLEXOR DE SEÑALES MODULO CD74H4067 ////////////
//          Pines S0,S1 S2 S3: del Mux
CD74HC4067 mux(5, 4, 0, 2); // Conexión pines del ESP8266
const int signal_A = A0; // ESP8266 Analog Pin ADC0 = A0
```

Figura 20. Definiendo pines digitales ESP8266 para el módulo CD74H4067.

- Variables y constantes auxiliares (ver figura 21).

```
float Sensor_VP; //Offsets Voltaje
float Sensor_IP; // Corriente
float Sensor_VT; //Offsets

// VARIABLES CORRIENTE
float sensibilidad_5A = 0.185;
```

Figura 21. Variables y constantes auxiliares.

- Conexión WiFi (ver figura 22).

```
Serial.begin(9600);
//*****//
//////// CONEXION AL WiFi //////////
//*****//
WiFi.begin(ssid,password);
Serial.print("Connecting");
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
{
  delay(500);
  Serial.print(".");
}
Serial.println();
Serial.print("Connected, IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());

// FIN CONEXION WIFI
```

Figura 22. Inicialización del puerto serial y conexión al WiFi.

- Añadiendo las variables Modbus en los registros del protocolo (ver figura 23).

```
//-----//
//////// REGISTRO MUDBUS //////////
//-----//
mb.server(); //Start Modbus IP
mb.addIreg(SA_VP); //Registrando lectura analogica del sensor de voltaje de un panel
mb.addIreg(SA_VT); //Registrando lectura analogica del sensor de voltaje de los paneles en serie
mb.addIreg(SA_IP); //Registrando lectura analogica del sensor de ACS712 /
mb.addCoil(Rele1); //Registro panel solar 1
mb.addCoil(Rele2); //Registro panel solar 2
mb.addCoil(Rele3); //Registro panel solar 3
mb.addCoil(Rele4); //Registro para test Isc 4
```

Figura 23. Inicialización del puerto serial y conexión al WiFi.

- Adquisición de datos del sensor de voltaje (ver figura 24), “mux.channel(0)” indica el número del canal o pin por donde lee los datos en el módulo CD74H4067.

```
//-----//
// SENSOR DE VOLTAJE //
//-----//
for(int i=0;i<muestras1;i++)
{
  mux.channel(0); // Número Canal del multiplexor Modulo CD74H4067
  VolSensor= analogRead(signal_A); // Obteniendo Voltaje
  VoltajeS1=VoltajeS1+VolSensor;
}

int S_VP1 = VoltajeS1/muestras1;
Serial.print(S_VP1);
Serial.print("\t");
mb.Ireg(SA_VP,S_VP1); // REGISTRO DE SEÑAL ANALOGICA
```

Figura 24. Código para leer los datos del sensor de voltaje.

- Adquisición de datos del sensor de corriente (ver figura 25), “mux.channel(2)” indica el número del canal o pin por donde lee los datos en el módulo CD74H4067.

```
//-----//  
// SENSOR ACS712 CORRIENTE //  
//-----//  
  
for(int i=0;i<muestras1;i++)  
{  
mux.channel(2); // Número Canal del multiplexor Modulo CD74H4067  
VSensor = analogRead(signal_A); // Obteniendo Corriente  
corrientel=corrientel+VSensor; //Ecuación para obtener la corriente  
}  
int SI1 = corrientel/muestras1; //analogRead(signal_A); NOTA : ACTIVAR AQUI LOS SENSORES  
Serial.print(" \t");  
Serial.print(SI1);  
mb.Ireg(SA_IP,SI1); // REGISTRO DE SEÑAL ANALOGICA
```

Figura 25. Código para leer los datos del sensor de corriente.

- Lee el estado de los relés para indicar la conexión o desconexión (ver figura 26).

```
//-----//  
// RELES //  
//-----//  
  
void Reles(){  
Serial.println("RELE 1 RELE 2 RELE 3 RELE 4");  
Serial.print(mb.Coil(Rele1));  
Serial.print("\t\t");  
digitalWrite(Rele_1,mb.Coil(Rele1));  
  
Serial.print(mb.Coil(Rele2));  
Serial.print("\t\t");  
digitalWrite(Rele_2,mb.Coil(Rele2));  
  
Serial.print(mb.Coil(Rele3));  
Serial.print("\t\t");  
digitalWrite(Rele_3,mb.Coil(Rele3));  
  
Serial.print(mb.Coil(Rele4));  
Serial.println("\t\t");  
digitalWrite(Rele_4,mb.Coil(Rele4));  
}
```

Figura 26. Código para leer los datos del sensor de corriente.

6.3. Configuración KepServer.

Este apartado se indica la configuración del software KEPServerEX 6 (ver figura 27) que permite realizar la conexión con el módulo ESP8266 para transmitir los datos hasta el software industrial iFIX, en el que se encuentra el sistema SCADA para la monitorización y operación de los paneles solares.

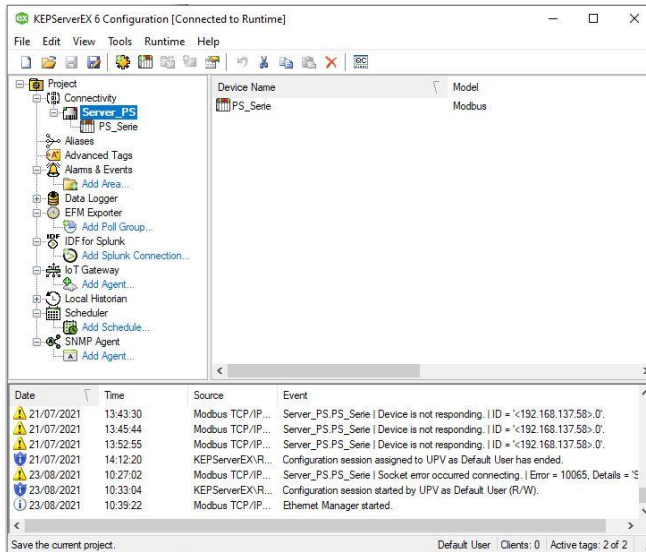


Figura 27. Código para leer los datos del sensor de corriente.

1. Crear el módulo de servidores con el que se va a conectar y configurar el protocolo a utilizar (ver figura 28).

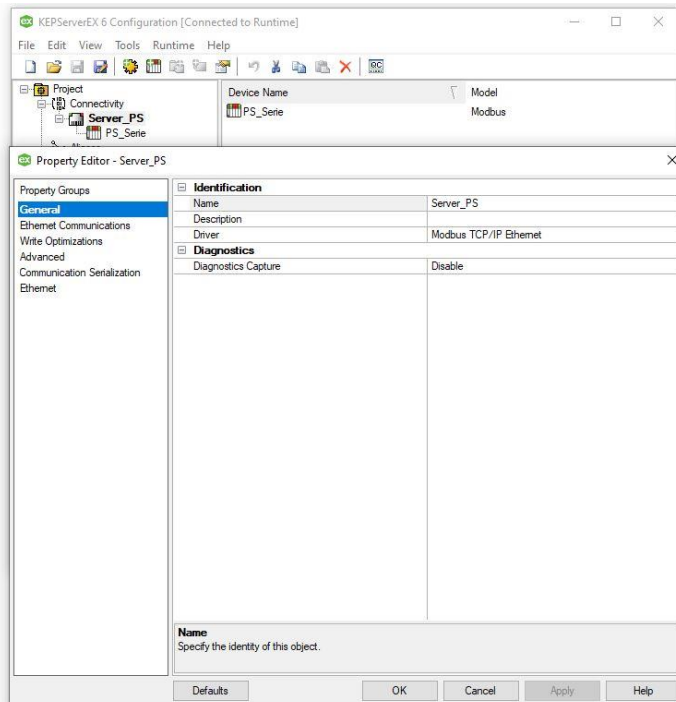


Figura 28. Definiendo protocolo Modbus TCP/IP Ethernet.

2. Conexión TCP/IP y definición del puerto de conexión.

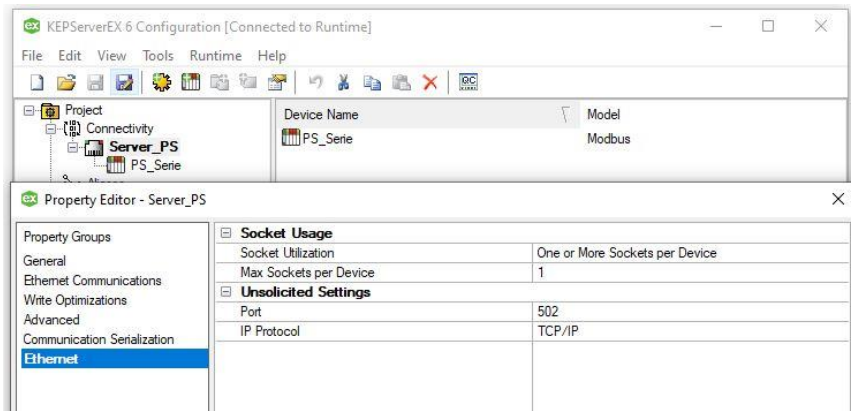


Figura 29. Conexión TCP/IP y definición del puerto de conexión.

3. Ingresar el número de ip al que se conectó el módulo ESP8266, como en este caso se conectó a la ip: 192.168.137.59 (ver figura 30 - 31)

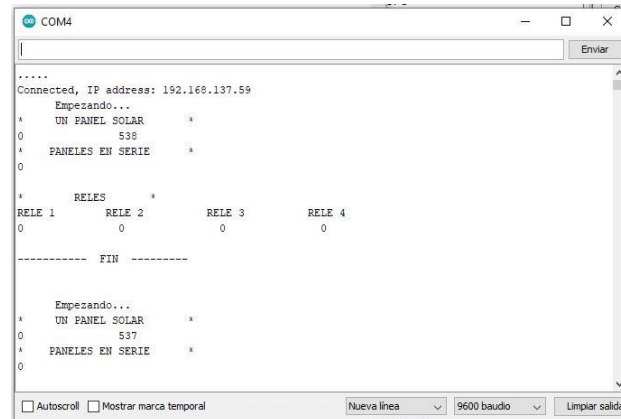


Figura 30. Pantalla serial del módulo ESP8266.

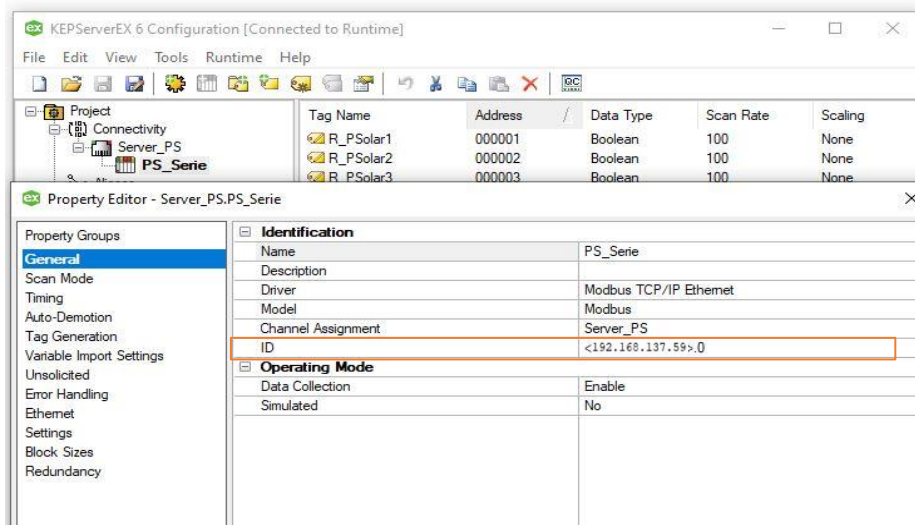


Figura 31. Ingreso de dirección ip del módulo ESP8266.

4. Asignación del puerto por el que va a conectar el módulo ESP8266.

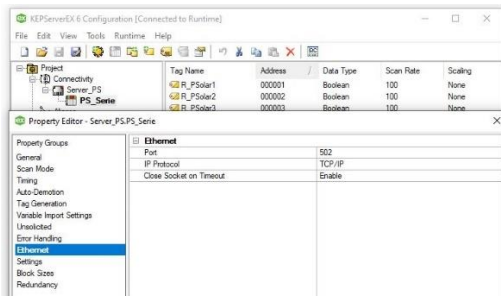


Figura 32. Asignación de puerto para la conexión.

5. Establecer la cantidad de intento para conectarse o desconectarse, también el tiempo que debe esperar por la conexión del módulo ESP8266 (ver figura 33).

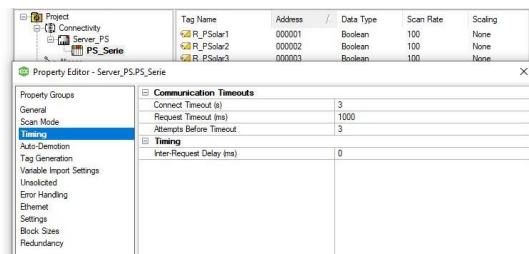


Figura 33. Configuración Timing.

6. Crear el servidor al que se va a conectar el módulo ESP8266 (ver figura 34).

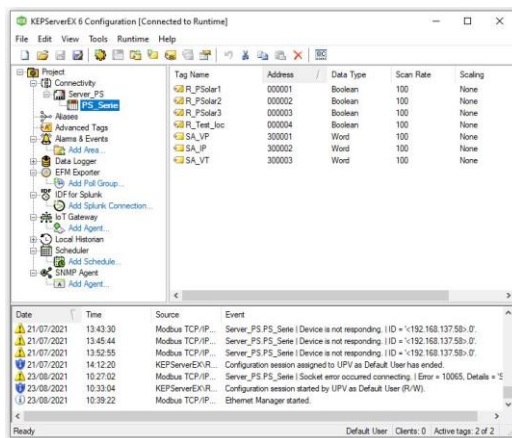


Figura 34. Crear servidor para módulo ESP8266.

7. Crear las variables Tag con los nombres de los datos que van ingresar y establece la dirección del puerto Modbus al cual se va a conectar y a la vez si es un Tag de Lectura, Escritura o Lectura/Escritura (ver figura 35).

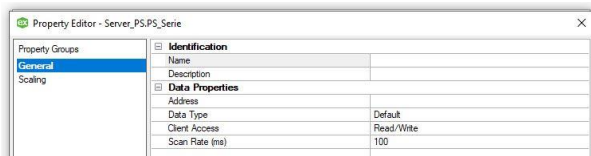


Figura 35. Creación de Tags.

Direcciones de puertos Modbus y tipo de datos que van ingresar por las variables (ver figura 36)

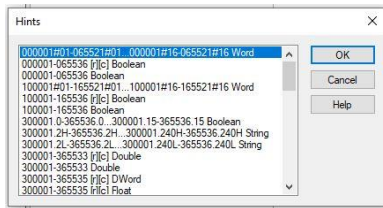


Figura 36. Direcciones de puertos Modbus y tipo de datos

6.4. Configuración OPCServer iFIX

En esta sección se indica la configuración realizada en el OPC Client Server Connection de iFIX.

1. Escoger "Use Local OPC Client Driver"

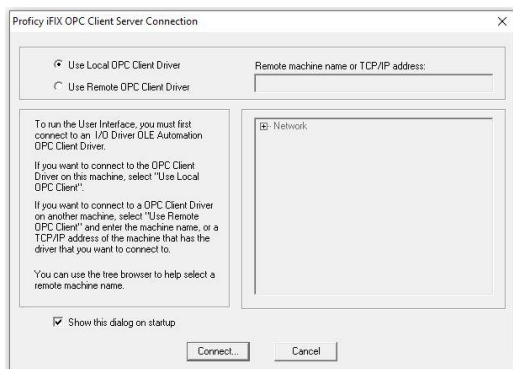


Figura 37. Use Local OPC Client Driver

2. Dar click en el circulo señalado para crear el nuevo servidor en OPC de iFIX.

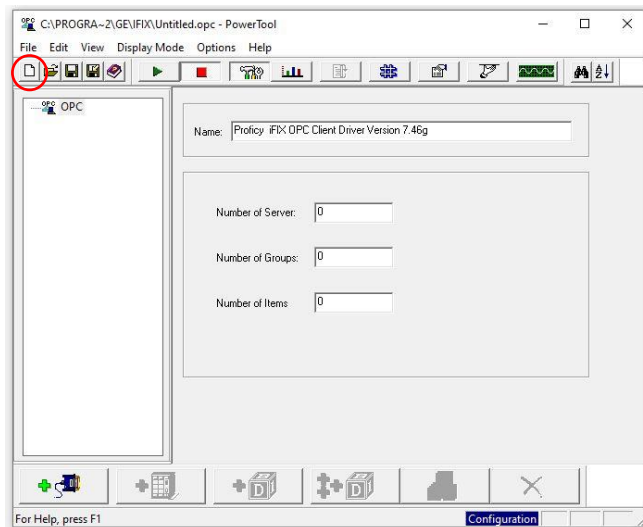


Figura 38. Nuevo servidor en OPC de iFIX

3. Seleccionar el servidor al local al que se va a conectar el servidor/cliente de iFIX, este caso se escoge “Kepware KEPServerEx V6”

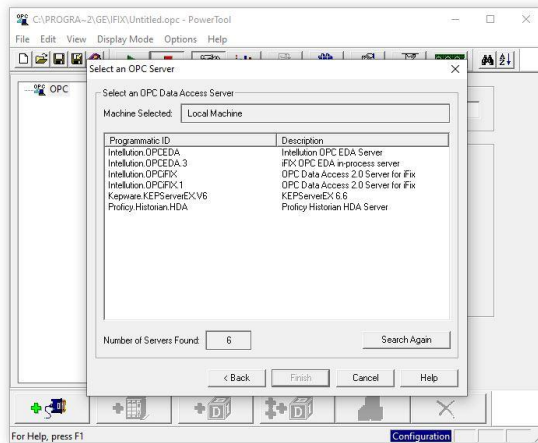


Figura 39. Seleccionar el servidor local.

4. Crear un Grupo para crear las Tags de comunicación con el software KEPServerEX V6.

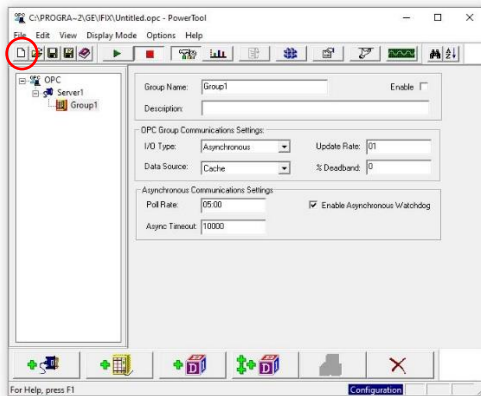


Figura 40. Creación de grupo para las Tags.

5. Creación de Tags para la conexión de las Tags creadas en Software KEPServerEX V6.

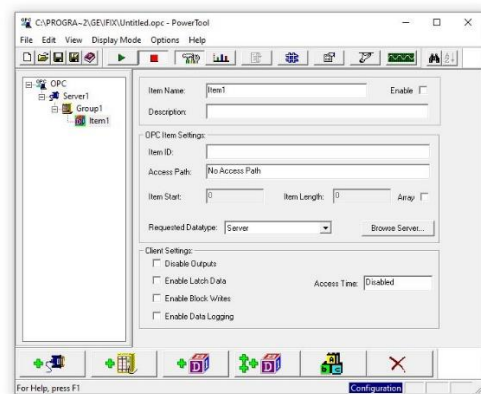


Figura 41. Creación de Tags.

6. Seleccionar el Tag que se ha declarado en KEPServerEx V6.

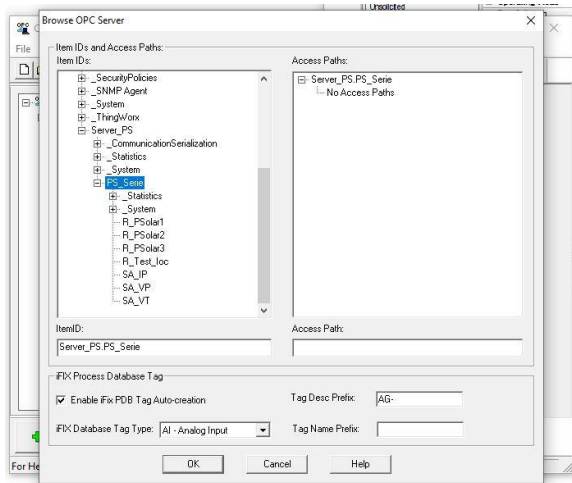


Figura 42. Selección del Tag del servidor KEPServerEX V6.

7. Seleccionar el tipo de dato que señal que se va a representar.

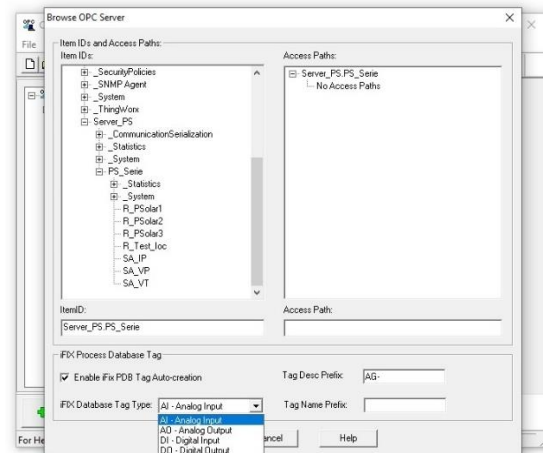


Figura 43. Seleccionar el tipo de señal.

8. Creación de todos los Tag a utilizar en iFIX.

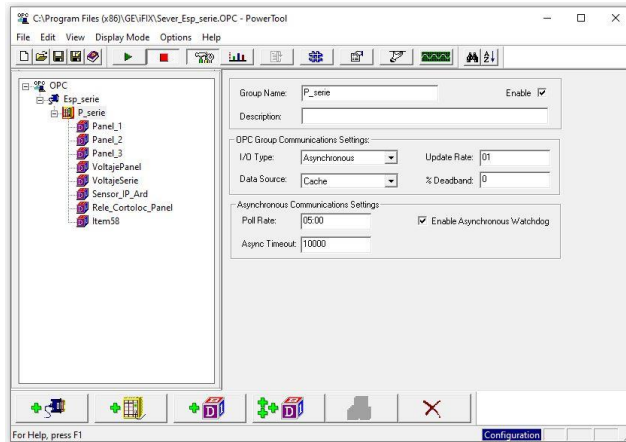


Figura 44. Los Tags creados para iFIX.

6.5. Creación de tag con el servidor OPCServer iFIX

Esta sección se presenta la creación de Tags con los Tags creados en el servidor OPCServer iFIX, estos Tags permiten hacer las operaciones necesaria para obtener los datos reales obtenidos desde el módulo ESP8266, al igual que nos permiten realizar las pruebas Voc-Isc, además con estos datos permiten detectar los fallos, para luego aislarlo y finalmente analizar el fallo para realizar las acciones pertinentes para detener el fallo, los pasos para crear los Tag son los siguientes:

1. Crear Tags con el servidor OPCServer iFIX.

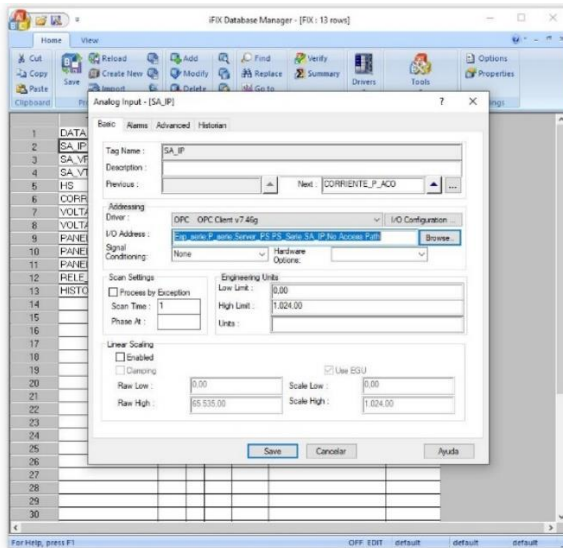


Figura 45. Los Tags creados en la base de datos iFIX.

2. Seleccionar el Tag a crear.

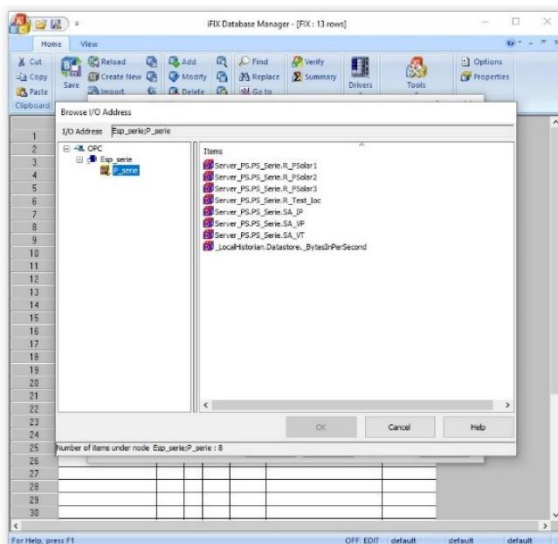


Figura 46. Selección de Tag a crear.

3. Seleccionar el tipo de bloque a Crear.

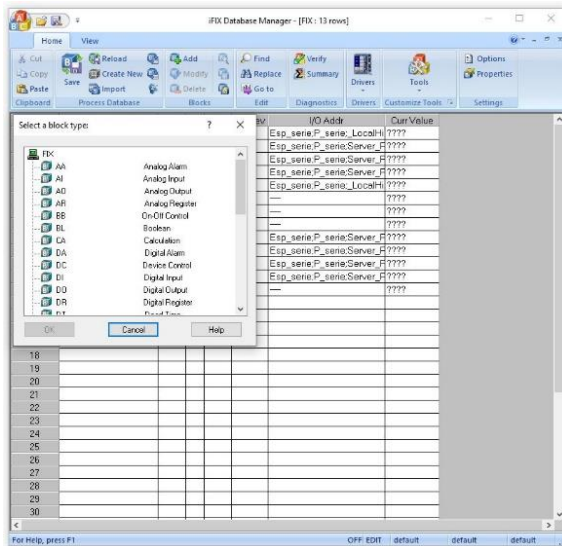


Figura 47. Tipos de bloques.

Realizada la configuración tanto en los softwares y el rediseño de los sensores de voltaje con sus cálculos hechos en las ecuaciones 1 y 2, se procede a realizar las conexiones físicas para la lectura de datos y el control de los paneles solares, siendo necesario realizar las siguientes conexiones (Ver figura 48).

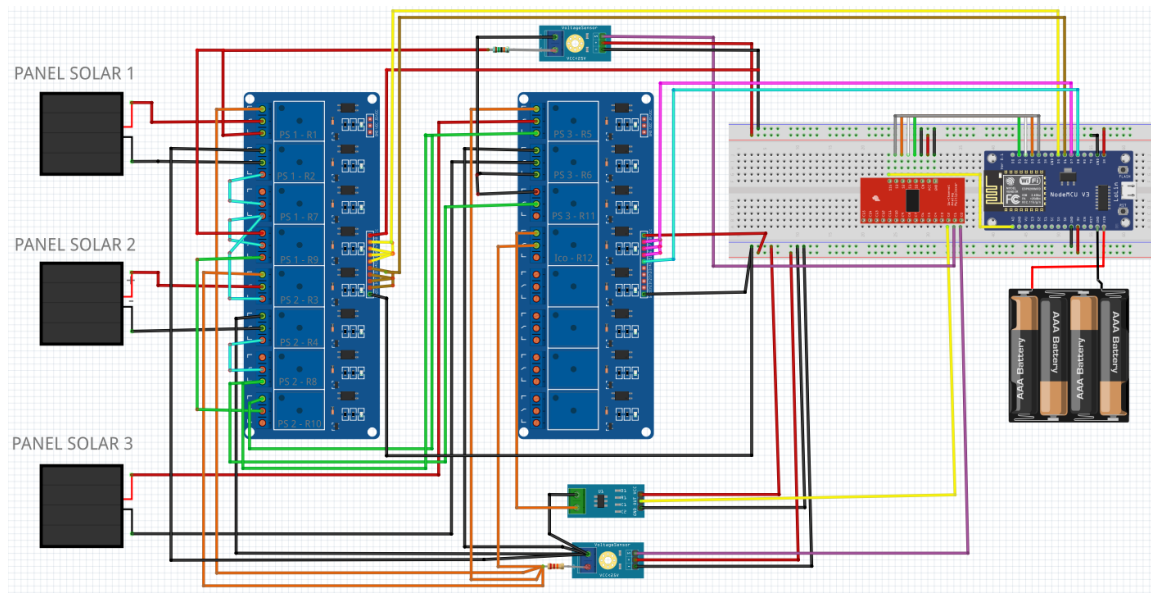


Figura 48. Circuito de adquisición de datos y control de los paneles solares.

Adicionalmente, se debe indicar que la resolución del módulo ESP8266 es de 10 bits, esto significa que en la entrada analógica ingresa un voltaje de 0V a 3.3 V, siendo este voltaje representado de 0 a 1024. Por otro lado, es importante mencionar que para la adquisición de datos de los sensores es necesario realizar la programación del módulo ESP8266, cuya programación se realiza en el software Arduino IDE, siendo indispensable agregar varias librerías mencionadas en la figura 16 de la sección 6.2, para su correcto funcionamiento.

Después de haber sido leídos los datos por los sensores de voltaje y corriente por el módulo ESP8266, son enviados a internet por medio del protocolo de comunicación Modbus TCP/IP hasta el computador remoto en el que está instalado los softwares iFIX y KepserverEX. El software KepserverEX se usa como túnel de comunicación entre el módulo ESP8622 y el SCADA (iFIX). Es importante señalar que para la comunicación entre los softwares mencionados anteriormente es necesario realizar la configuración del protocolo de comunicación indicados en la sección 6.3, 6.4 y 6.5 (ver figura 49).

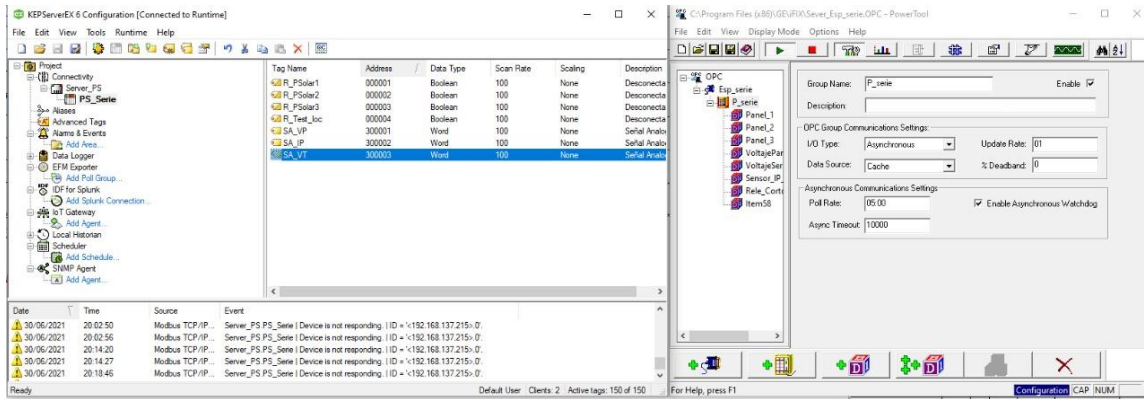


Figura 49. Circuito de adquisición de datos y control de los paneles solares.

Los datos transferidos desde KepserverEx a iFIX se definen como tags de señales analógicas y señales digitales (ver figura 48). Además, los cálculos para indicar los valores leídos por los sensores de corriente y voltaje se realizaron en tags de cálculo. También es conveniente acotar que el sensor de Corriente ACS712 debe ser alimentado a 5V siendo 2.5V equivalente a 0A, está definido en la sección 5.5.4, sin embargo, se debe tener en cuenta que el voltaje de referencia del módulo ESP8266 es 3.3V, por lo cual se debe realizar cálculos que permitan mostrar la lectura correcta (ver ecuaciones abajo).

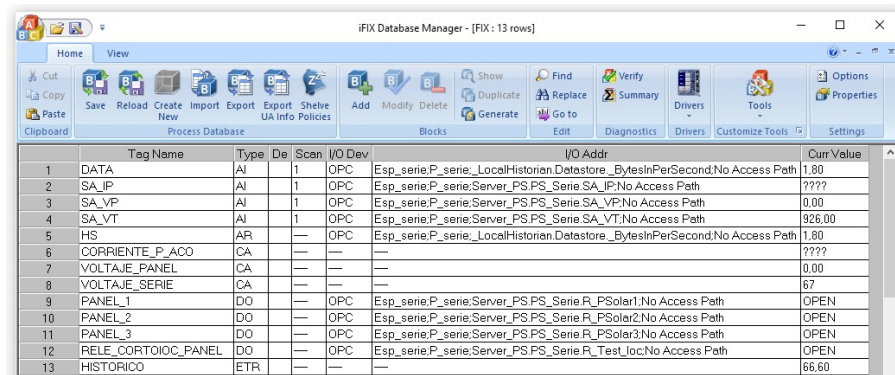


Figura 50. Creación de tags en iFIX 6.5.

El funcionamiento del sensor:

- $V_{in} > 2.5 \rightarrow +\uparrow A$ (3)
- $V_{in} = 2.5 \rightarrow 0 A$ (4)
- $V_{in} < 2.5 \rightarrow -\downarrow A$ (5)

Sensibilidad del sensor = 0.185μV → ACS712 (5A)

Resolución del voltaje de referencia = 3.3V/1024 (6)

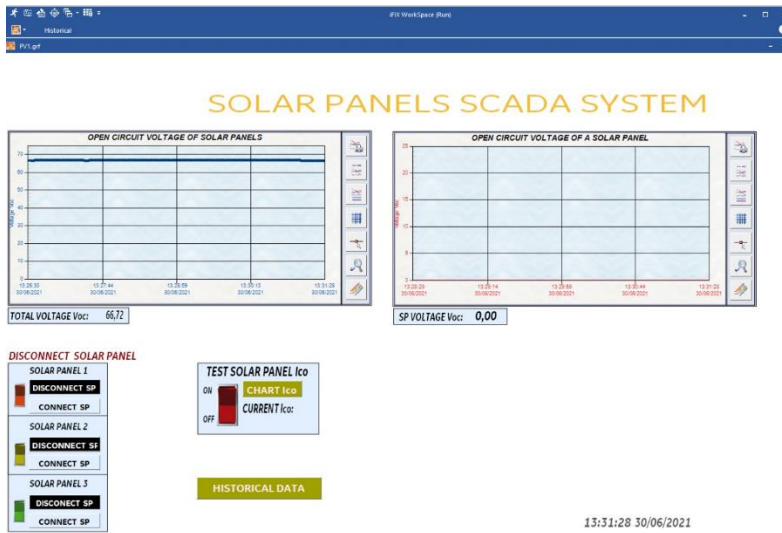
$$I = \{[(V_{in} * Resolución) - 2.5V]/Sensibilidad\} A \quad (7)$$

El valor de la corriente (I) medida por el sensor es definida por la ecuación (7), donde V_{in} es el voltaje que ingresa en el pin 2 del módulo CD74HC4067 (pin de salida del sensor ACS712), la resolución es el voltaje de referencia del módulo ESP8266 (3.3V) dividido para los 10 bits (1024) y la sensibilidad del sensor ACS712-5A es 0.185μV/A (ver figura 6).

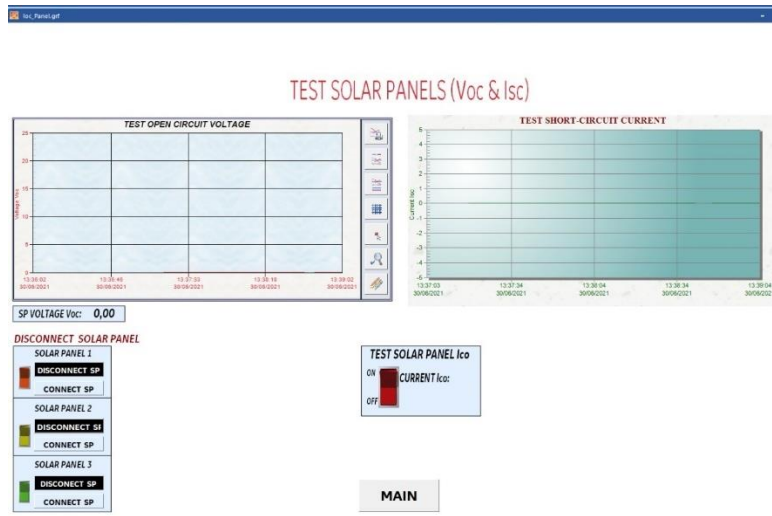
Por otro lado, el voltaje leído por el módulo ESP8266 se interpreta según la ecuación 8; los cálculos se realizan en un tag de cálculo dentro del software iFIX [54].

$$V = (V_{in} - R_{min}) * \left(\frac{V_{max} - V_{min}}{R_{max} - R_{min}} \right) + V_{min} \quad (8)$$

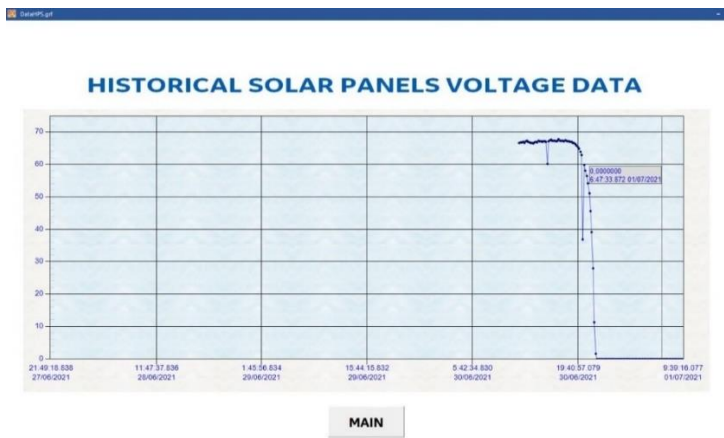
V_{in} es el voltaje que ingresa en el pin 0 y 1 del módulo CD74HC4067, R_{min} es resolución de mínima del módulo ESP8266 (R_{min} = 0); V_{max} es el voltaje máximo de la ecuación 2 (V_{max} = 23.21V ó 75.05V) y R_{max} es la resolución máxima del módulo ESP8266 (R_{max}=1024). Los valores calculados de los sensores de voltaje y corriente se muestran en el dashboard del SCADA realizado en iFIX (ver figura 51).



(a)



(b)



(c)

Figura 51. Sistema SCADA; a) Pantalla Principal; b) Pantalla prueba de Isc y Voc; c) Pantalla de Datos históricos.

Las pruebas Voc-Isc consiste en desconectar un panel solar para graficar sus curvas en el dashboard del Scada; es necesario indicar que primero se realiza la prueba de Voc y luego se activa un relé que permite realizar la prueba Isc, este mismo proceso se realiza para los paneles solares restantes.

Todas las pruebas en los paneles solares se pueden hacer en menos de 2 minutos, es decir depende del tiempo del operador tarde en hacerlas, estas señales son graficadas en el mismo dashboard lo que facilita la comparación de las curvas Isc-Voc de los 3 paneles solares, sin embargo, es necesario mencionar que el tiempo en la actualización de los datos es cada 1 segundo aunque se podría realizar hasta en 100ms, pero a esta velocidad se puede perder los datos con mayor facilidad, motivo el cual la configuración realizada es de 1 segundo, además en la programación se hace un muestreo de 300 lecturas y se promedian para tener una sola lectura que es la que se envía cada segundo dando así un resultado más fiable, también en la configuración en el software KEPServerEX V6, se define el tiempo de 1 segundo en la espera de actualización, configuración realizada en la sección 6.3. El método

presenta un inconveniente en cuanto a la comunicación que es la inestabilidad de la Red WiFi, siendo necesario tener en cuenta al duplicar este método.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que las curvas Voc-Isc deben ser similares, por ser del mismo fabricante y con las mismas características, sin embargo, si alguna de ellas es diferente se puede entender que se ha detectado un fallo, por lo que es necesario aislar de manera automática el panel solar para no comprometer toda la producción del string de paneles solares hasta analizar el tipo de fallo, la causa y finalmente darle la atención necesaria para corregir el fallo, y en consecuencia volverlo a conectar al string de paneles solares.

Finalmente, se comprueba el método propuesto para el diagnóstico predictivo paramétrico de fallos, se realiza a través de 8 experimentos, el primero cuando los paneles solares están en funcionamiento de manera correcta y sin sombras, los 7 restantes se realizaron cubriendo diferentes áreas del panel solar (SP1) con pedazos de cartón de varios tamaños. Los pedazos de cartón representan las sombras parciales o fallos, en la siguiente sección se explica los resultados encontrados de los experimentos.

CAPÍTULO 4

7. Experimentos, resultados y discusión

En esta sección se presentan los diferentes experimentos realizados en el SP1 (ver figura 3), estos experimentos se basan en primer lugar el string de paneles solares sin sombras y luego cubriendo diferentes áreas del panel solar para observar el comportamiento de la curva de I_{sc} y V_{oc} con respecto a los otros paneles solares. El experimento se hizo en la terraza del Edificio 5C de la Universitat Politècnica de Valencia (Latitud y longitud: $+39^{\circ} 28' 56.53''$, $-0^{\circ} 20' 36.88''$ · 39.482369, -0.343578). Es importante señalar que las características mencionadas en la tabla 1 sobre las dimensiones del módulo solar es 37x63.5 cm y su área es 0.235 m².

7.1. Comprobación de la medición de los sensores

La calibración de los sensores es importante para conocer el error de medición del sensor respecto al multímetro DT-33D, debido a que la lectura de los sensores debe cumplir con la norma IEC61724. La norma indica que la precisión de la medición en voltaje y corriente debe tener un error máximo de 1% y el error máximo de la potencia debe ser del 2% [9].

a) Medición de V_{oc} del string de paneles solares (ver figura 52).

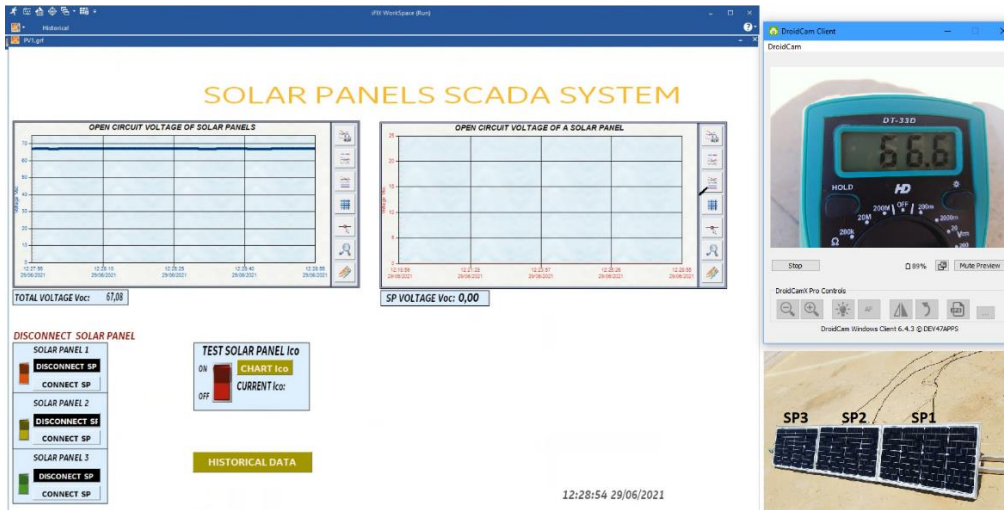
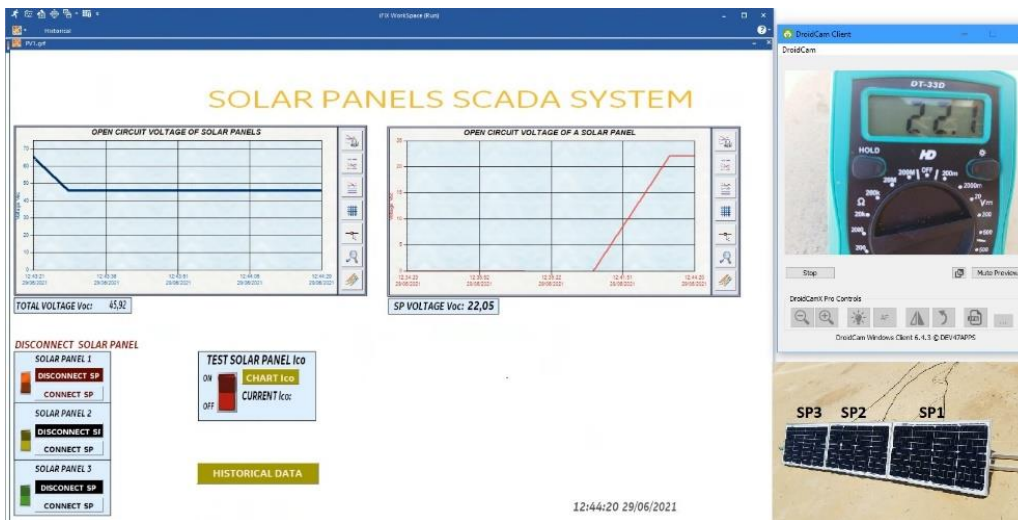
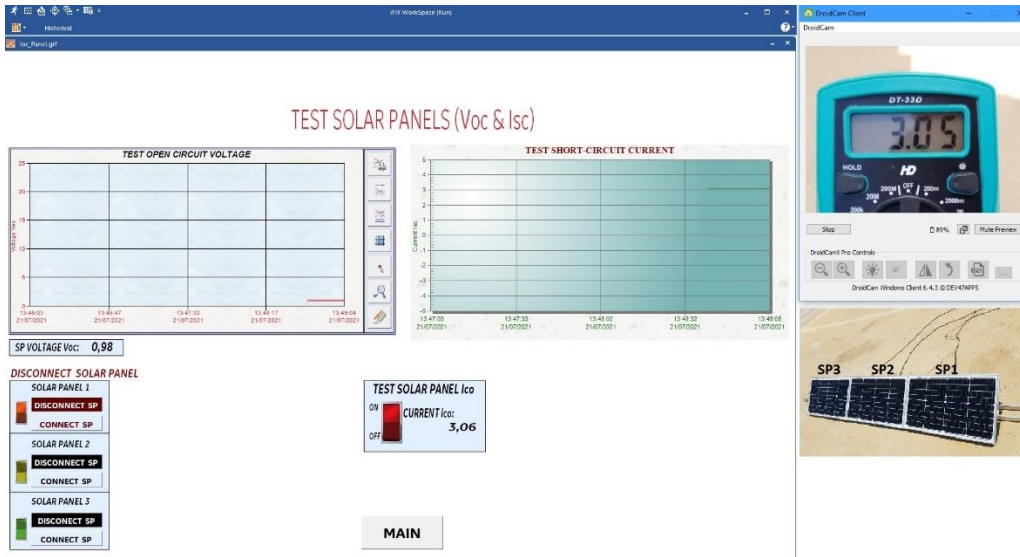


Figura 52. Medición de V_{oc} en string paneles solares.

b) Medición de I_{sc} y V_{oc} de un panel solar (ver figura 53).



(a)



(b)

Figura 53. Pruebas Voc-Isc en SP1; a) Curva Voc; b) Curva Isc.

Los datos medidos cumplen con la norma IEC61724, en la tabla 4 se indica que el error de lectura del sensor voltaje está por debajo del 1% como indica la norma.

Tabla 4. Mediciones de Voc en los paneles solares.

SP	Multímetro (V)	Sensor (V)	Error	%
String SP	66,6	67,08	0,48	0,72%
SP 1	22,1	22,05	0,05	0,23%
SP 2	22,10	22,10	0,00	0,00%
SP 3	22,2	22,15	0,05	0,23%

En la tabla 5 se indican las mediciones realizadas en los tres paneles por el sensor ACS712 verificando que se cumple la norma IEC61724 en la medición I_{sc}.

Tabla 5. Mediciones de Isc en los paneles solares.

SP	Multímetro (A)	Sensor (A)	Error	%
SP 1	2,14	2,13	0,01	0,47%
SP 2	2,23	2,25	0,02	0,90%
SP 3	2,24	2,23	0,01	0,45%

7.2. Experimentos en los paneles solares

Los experimentos de esta sección es el análisis del comportamiento de la curva I_{sc} y V_{oc} para el diagnóstico de fallos.

7.2.1. Paneles Solares sin sombras

En este apartado, se aprecia el voltaje producido por el string de paneles solares en circuito abierto en su funcionamiento normal (ver figura 54), también se gráfica las curvas V_{oc} de cada uno de los paneles solares. En la figura 54 (a) se puede apreciar la suma de voltaje de los tres paneles solares conectados en string siendo de 67.08 V. Por otro lado, la figura 54 (b) tiene dos dashboard, el primero dashboard (izquierda) se puede apreciar como decrece el voltaje V_{oc} del string de los paneles solares cuando se desconecta un SP, mientras que en el segundo dashboard (derecho) se puede ver que las tres curvas V_{oc} son similares debido a que están bajo las mismas condiciones. Para poder ver estas curvas se han desconectado por menos de un minuto a cada uno de los paneles solares. También en la figura 54 (c) las curvas I_{sc} presentadas son de cada panel solar, además, presentan el mismo comportamiento que la figura 54 (b).

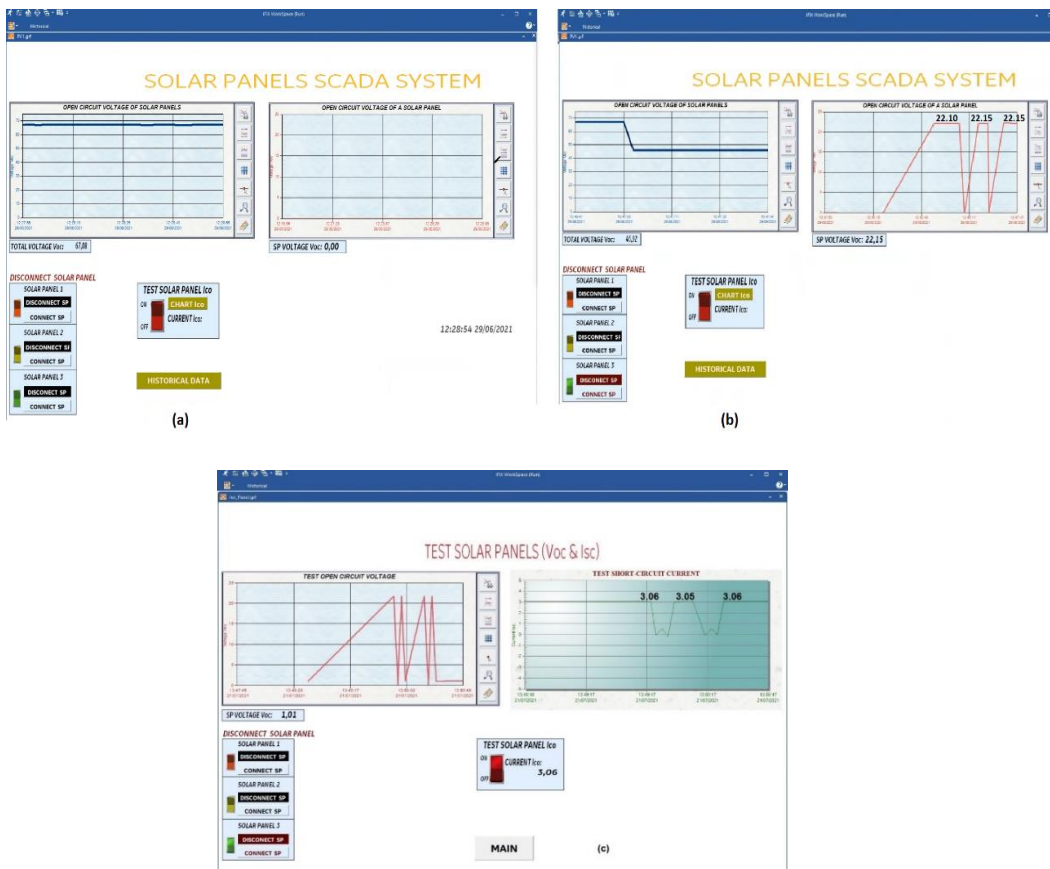


Figura 54. Test de V_{oc}; a) Test V_{oc} al string de los SP; b) Test V_{oc} a cada uno de los paneles solares; c) Test I_{sc} a cada uno de los paneles solares

Las pruebas realizadas en cada uno de los paneles solares se han realizado en tiempo real y en menos de 2 minutos. Estos resultados sería diferentes sí los paneles solares estuviesen expuestos a diferentes condiciones o al detectar un fallo.

7.2.2. Experimentos con áreas cubiertas de diferente tamaño en un panel solar.

En este apartado se realizó 7 experimentos diferentes a un solo panel solar (SP1) del string, para analizar el comportamiento de sus curvas I_{sc}-V_{oc}. Las áreas de sombreadas usadas para el experimento se enumeran en la tabla 6.

Tabla 6. Áreas Sombreadas

	L1 (cm)	L2 (cm)	Área (m ²)	%
Panel Solar	37	63,5	0,235	100,00%
Sombra 1	4,7	4	0,002	0,80%
Sombra 2	16	3,7	0,006	2,52%
Sombra 3	37	3,7	0,014	5,98%
Sombra 4	63	4	0,025	10,73%
Sombra 5	20,5	16,3	0,033	14,22%
Sombra 6	37	16,5	0,061	25,98%
Sombra 7	46	33,2	0,153	65,00%

a) Área de la sombra del 0.80%

En la figura 55 se puede apreciar que está cubierto un área del 0.80% del SP1, esto representa una celda del panel solar; al realizar las pruebas Voc-Isc en SP1 y luego en los demás paneles solares, se puede observar que las curvas I_{sc}-V_{oc} del SP1 no muestran cambios significativos en el Voc respecto a los demás paneles solares, sin embargo, se puede apreciar una pequeña afectación en la curva I_{sc} del SP1 respecto a los otros paneles solares (ver figura 55). Aunque los cambios no sean significativos está prediciendo un fallo, que puede comprometer al panel solar generando un punto caliente en un futuro.

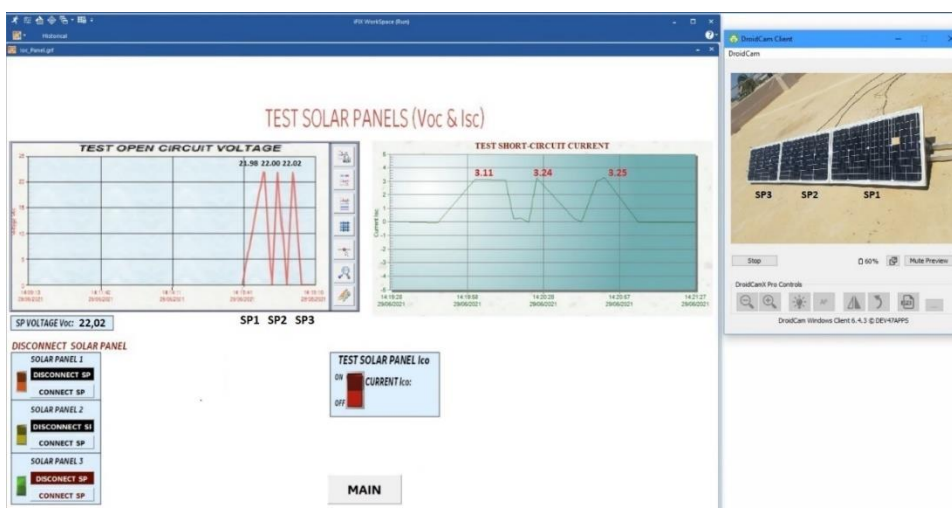


Figura 55. Test de I_{sc} y V_{oc} a SP1 con área sombreada del 0.8%

b) Área de sombra del 2.52%

En la figura 56 se puede observar que el área sombreada cubre un 2.52% del SP1, representando a 4 celdas del SP1, sin embargo, al realizar las pruebas Voc-Isc, el cambio en la curva Voc del SP1 no refleja ningún cambio en referencia con el Voc de los demás paneles solares, pero la curva Isc del SP1 con respecto a los otros paneles solares, indica que existe una caída de corriente de cortocircuito del 13%. Demostrando que el método propuesto detecta el fallo en el SP1.

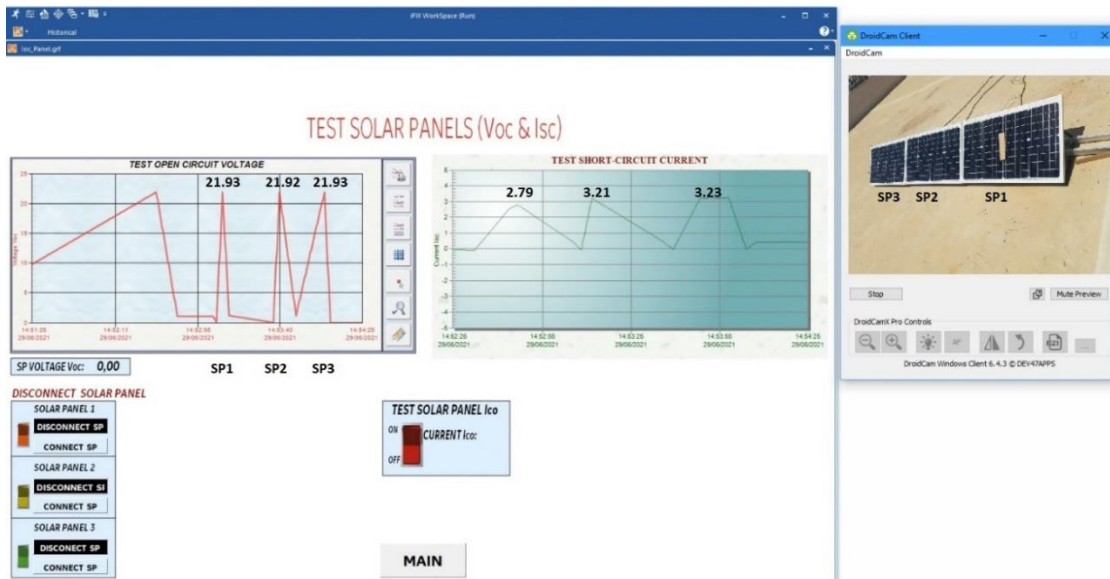


Figura 56. Test de Isc y Voc a SP1 con área sombreada del 2.52%

c) Área de sombra del 5.98%

En la figura 57 se aumenta el área de sombra en un 237% en relación con el experimento del literal b, en otras palabras, se cubre toda una columna de celdas solares del SP1. Las pruebas Voc-Isc realizadas en SP1 muestran como resultado, que en la curva de Voc hay un ligero cambio disminuyendo en un 0.11% en referencia con los otros paneles solares, sin embargo, la curva de Isc del SP1 se puede apreciar que decrece en un 24% en relación con las otras curvas Isc, este valor es significativo en una producción por lo que se ha detectado un fallo importante que debe ser revisado.

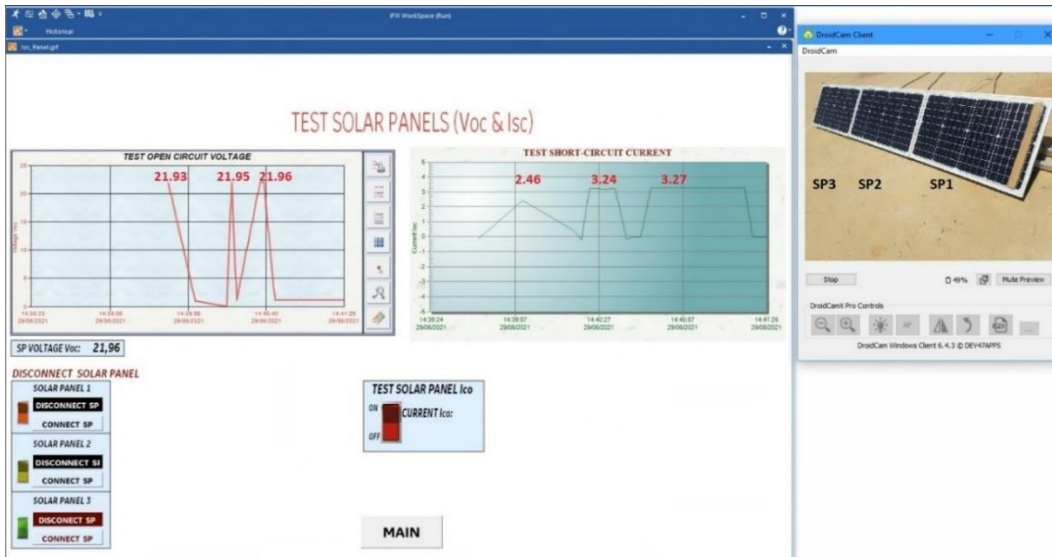


Figura 57. Test de I_{sc} y V_{oc} a SP1 con área sombreada 5.98%

d) Área de sombra del 10.73%

En la figura 58 se cubre toda una fila de celdas solares y se procede a realizar las pruebas V_{oc} - I_{sc} , proporcionando como resultado que en el V_{oc} se reduce en un 0.77% en el SP1, este decremento no presenta cambios significativos en relación con los otros paneles solares, no obstante, el resultado de la prueba I_{sc} en el SP1 I_{sc} decrece de una manera abrupta en 108% al comparar con las I_{sc} de los otros paneles solares, además se puede observar que el SP1 empieza a consumir energía de los otros paneles solares reduciendo su producción. Por consiguiente, al detectar el fallo y ver que tiene mucha relevancia, además de afectar significativamente la producción; es necesario realizar la desconexión inmediata del SP1 del string de paneles solares hasta que se realice un adecuado mantenimiento. Por consiguiente, se demuestra nuevamente que el método propuesto es efectivo y confiable al momento de detectar fallos.

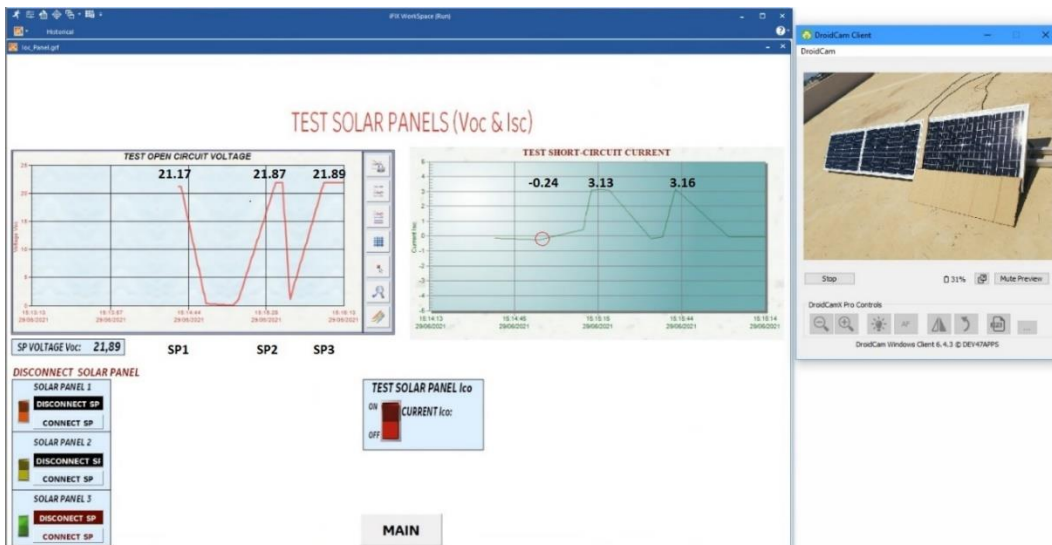


Figura 58. Test de I_{sc} y V_{oc} a SP1 con área sombreada 10.73%

e) Área de sombra al 14.22%

En la figura 59, el área de sombra es mayor al experimento anterior, sin embargo, en las pruebas Voc-Isc, se observa un decrecimiento de 1.28% en el voltaje de la curva Voc del SP1, sin embargo, en Isc decrece en un 75% en relación con los otros paneles solares, a pesar de que este decrecimiento no es tan grave como en el literal d, donde el SP1 se comportaba como una carga siendo el área de sombreado menor; esto es debido a la configuración de sus celdas solares. Aún sigue siendo crítico al producir un 25% respecto a los demás paneles solares.

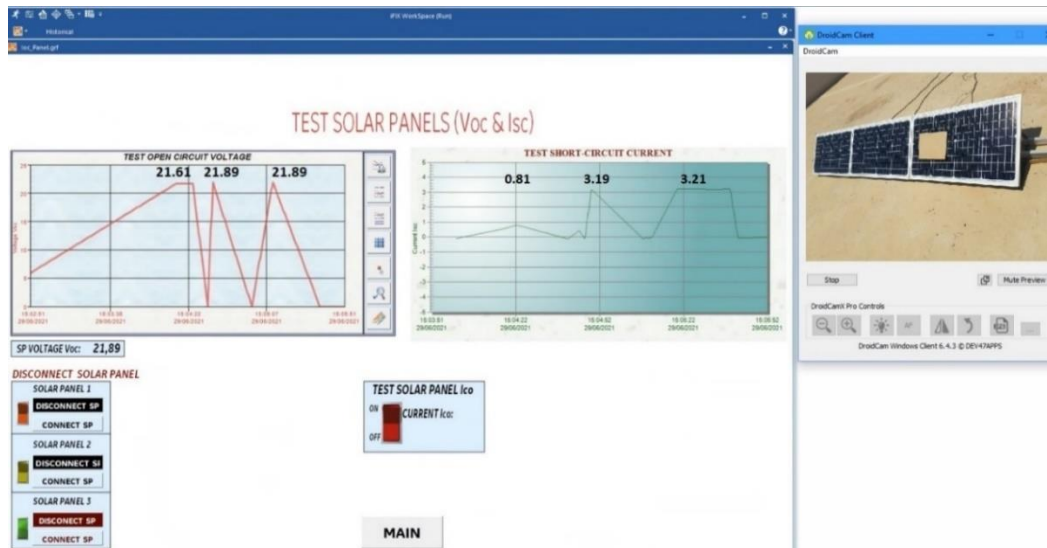


Figura 59. Test de Isc y Voc a SP1 con área sombreada 14.22%

f) Área de sombra al 26.34%

En la figura 60 el área de sombra representa más de la cuarta parte del panel solar; las pruebas Voc-Isc realizadas muestran que existe un decremento del 4.11% en el Voc del SP1, muy a pesar de eso no es tan grande la diferencia del Voltaje Voc en relación con los otros paneles, por otro lado, se puede ver que la Isc del SP1 tiene una caída bastante brusca y que el panel empieza a absorber energía y no a generar corriente en referencia con los otros paneles solares, su decremento es del 109% siendo un porcentaje que compromete a toda la producción por lo cual se debe desconectar del string de paneles solares, adicionalmente, es necesario indicar que la desconexión del SP1 se realiza de manera automática y online.

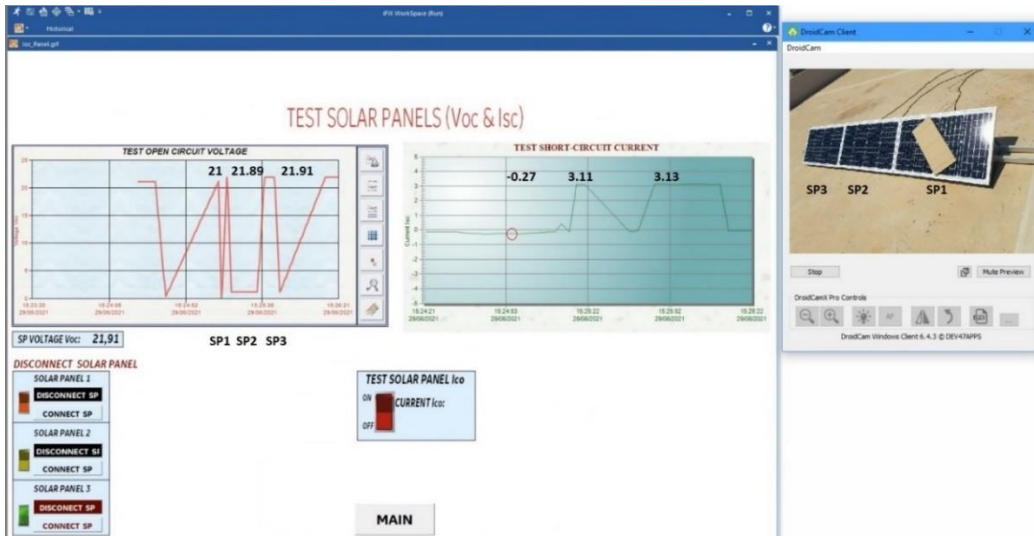


Figura 60. Test de Isc y Voc a SP1 con área sombreada 26.34%

g) Área de sombra al 65.00%

En la figura 61 se experimenta sombreando el 65% del SP1; el experimento deja notar que Voc decrece en un 19% del SP1 en relación con los otros paneles solares, siendo esta vez evidente el cambio de la curva Voc, pero aun es capaz de producir un voltaje alto; no sucede lo mismo cuando se realiza la prueba Isc a cada uno de los paneles solares, donde claramente se puede observar que nuevamente la curva Isc del SP1 vuelve a disminuir respecto al experimento anterior en un 29,6% y en relación con los otros paneles solares en un 472%, esto indica que el panel solar está consumiendo corriente de los otros paneles, si se tiene en cuenta el primer experimento con sombras en este experimento los paneles SP2 y SP3 ha reducido su generación en 3.7% y en 3.4% respectivamente, motivo por el cual se debe desconectar el SP1 del string de paneles solares.

Una vez más queda demostrado que el método propuesto es eficiente en la detección de fallos en tiempo real, además de permitir operar cada uno de los paneles solares e incluso se puede desconectar el panel con el fallo sin comprometer la producción de energía eléctrica de los demás paneles solares conectados en string.

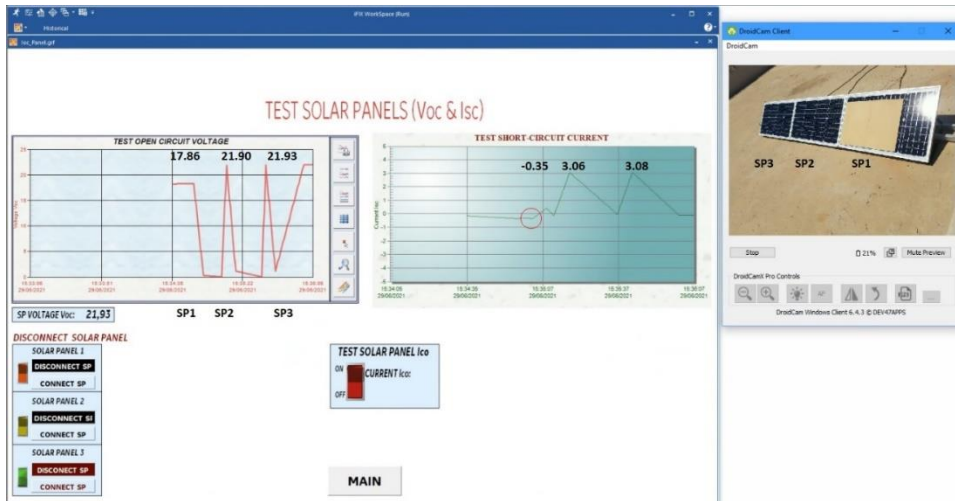


Figura 61. Test de I_{sc} y V_{oc} a SP1 con área sombreada 65%.

Después de los experimentos realizados se puede ver que el método desarrollado permite realizar un diagnóstico predictivo de fallos y también la operación de los paneles solares en tiempo real, garantizando que a través de las pruebas Voc-I_{sc} se puede detectar los fallos y además se puede desconectar el panel solar con el fallo del string de los paneles solares, sin amenazar la producción hasta realizar el mantenimiento adecuado y volver a conectar el panel solar al string.

El SCADA igualmente permite ver los datos históricos Voc del string de paneles solares, sin embargo, en este trabajo solo se muestra un histórico menor a 72 horas consecutivas (ver figura 62).

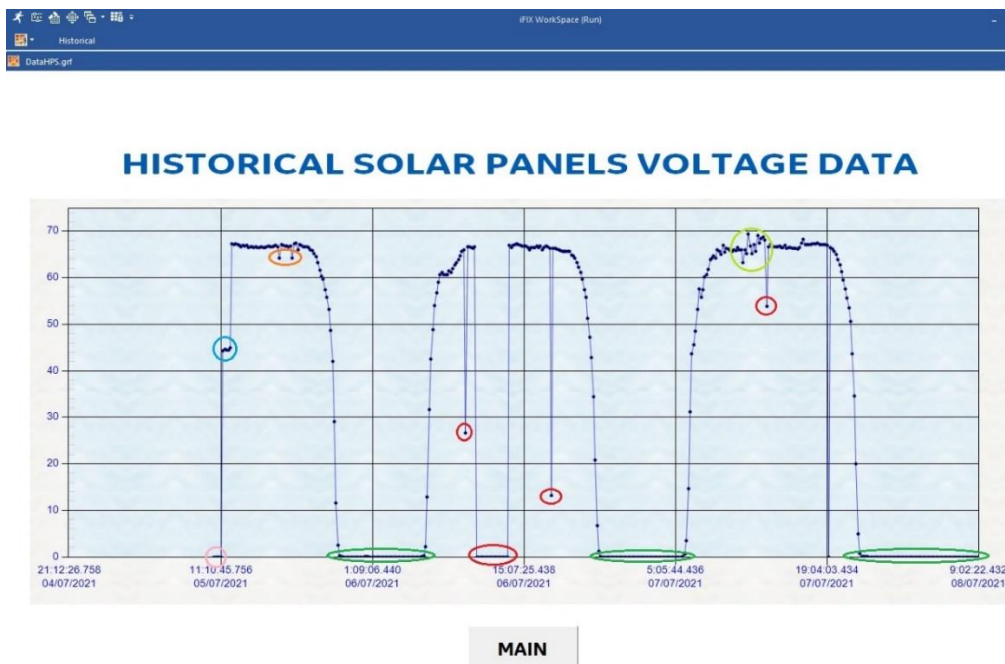


Figura 62. Datos históricos del string de paneles solares Voc

En la Figura 62 se evidencia múltiples variación en los datos históricos del voltaje producido en circuito abierto por el string de los paneles solares; las variaciones se encuentran señaladas con óvalos de diferentes colores estos son los siguientes: color rosado cuando los paneles solares están siendo conectados; color celeste se puede apreciar que solo se han conectado 2 paneles solares; color naranja se observa unos pequeños picos que indican que hay sombras esporádicas por nubes; color es verde oscuro que indica la producción de la noche en este caso es 0V; color rojo indica la pérdida de conexión a la red por varios : segundos, minutos y varias horas; por último el color verde claro indica la variación de la irradiancia solar.

Es importante mencionar que el trabajo encontró una solución sencilla, fácil de implementar, confiable y eficiente para el diagnóstico de fallos en un string de paneles solares, además, el método propuesto es de muy bajo costo de implementación. En la tabla 7 se enumeran los materiales y los precios para el desarrollo del método.

Tabla 7. Costos de los materiales para implementar la solución planteada

Description	Units	Unit Price (€)	Total Price (€)
ESP8266 Module	1	2,31	2,31
CD74HC4067 Module	1	0,44	0,44
ACS712ELCTR-05B-T Sensor	1	0,83	0,83
FZ0430 Sensor	2	0,21	0,42
Relay Module	2	3,55	7,10
Resistor 22 kΩ	1	0,05	0,05
Metal film resistor 133 kΩ	1	0,10	0,10
Male and female waterproof connector	3	0,16	0,48
Terminal blocks	4	0,17	0,68
Breadboard	1	0,96	0,96
Perforated breadboard	1	0,58	0,58
Total			13,95

Finalmente, se debe indicar que no se ha tomado en cuenta los costos de softwares, los paneles solares, la caja hermética y la fuente de alimentación.

PUBLICACIÓN REVISTA

Por la importancia que tiene el método propuesto permitió la realización de un artículo científico próximo a ser publicado en una revista JCR.

Nombre del artículo: “Solar Panels string Predictive & parametric fault diagnosis using low-cost technology “

Autores: Neisser Ponluisa, Emilio García.

Instituto de Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain;

neipon@posgrado.upv.es (NP), egarciam@isa.upv.es (E.G.); *

CAPÍTULO 5

8. CONCLUSIONES

El diagnóstico de fallos en los paneles solares sigue cobrando importancia por el aumento de nuevas instalaciones de plantas solares y su aspiración de tener una óptima producción, motivo por el cual, este trabajo propone desarrollar un nuevo método que permita realizar la supervisión y diagnóstico de fallos que facilite predecir los fallos en tiempo real.

Los parámetros para realizar este método se basan en las curvas V_{oc} - I_{sc} de un string de tres paneles solares, estos tipos de curvas son capaces de proporcionar información suficiente para detectar fallos en los paneles solares, sin embargo, basándose en los experimentos realizados se puede decir que la mejor opción en la detección de fallos es la curva I_{sc} , dado que muestra mayor sensibilidad a las sombras cuando cubren el panel solar.

Por otro lado, el método utiliza protocolos de comunicación estándares de fácil configuración y permite vincular diferentes tipos de tecnologías, como es el caso este trabajo utilizó tecnología de bajo costo con un software netamente industrial que anteriormente solo se podía conectarse por medio de un PLC; mostrando que el método es muy versátil al unir diferentes tecnologías. También se encontró que el método propuesto en este trabajo es fácil de implementar, es confiable y versátil; es escalable a un string con un mayor número de paneles solares, además, el método es de muy bajo costo como se indica en la tabla 7, lo que permite mejorar la viabilidad económica en el mantenimiento de los paneles solares.

Finalmente, se necesita de una buena conexión de red; el módulo ESP8266 y la computadora en el que se realizó el SCADA deben estar conectadas a la misma red. El siguiente

avance en esta línea del método propuesto podría ser el uso de tecnología IoT para no depender de la misma red de comunicación entre el Módulo ESP8266 y el sistema SCADA.

BIBLIOGRAFÍA

1. Madati, S; Singh, S. A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system. *Solar Energy* Volume 158, 2017, Pages 161-185. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.069>.
2. Abdin, Z; Kumar, A; Haque, A. Scheme for predictive fault diagnosis in photo-voltaic modules using thermal imaging. *Infrared Physics & Technology* 83 (2017) 182-187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2017.04.015>.
3. Lahiani, A; Abdelghani, A; Slama, I. Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 82, Part 3, February 2018, Pages 2680-2692. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.101>.
4. Rahman, M; Selvaraja, J; Rahima, N.A; Hasanuzzaman, M. Global modern monitoring systems for PV based power generation A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.111>.
5. Dupont, I; Carvalho, P; Jucáb, S; Netoc, J. Novel methodology for detecting non-ideal operating conditions for grid-connected photovoltaic plants using Internet of Things architecture. *Energy Conversion and Management* 200 (2019) 112078. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112078>.
6. Papageorgas, P; Primails, D; Antonakoglou, K; Vokas, G; Tseles, D; Arvanitis, K. Smart Solar Panels: In-situ monitoring of photovoltaic panels based on wired and wireless sensor networks, *Energy Procedia* 36 (2013) 535 – 545.
7. Hua, T; Zhenga, M; Tana, J; Zhua, L; Miao, W. Intelligent photovoltaic monitoring based on solar irradiance big data and wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks* 35 (2015) 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.07.004>.
8. Erraissi, N; Raoufi, M; Aarich, N; Akhsassi, M; Bennouna, A. Implementation of low-cost data acquisition system for “PROPRE.MA” Project. *Measurement*, 117, 2018.
9. Paredes, J; Mateo, A; Silvente, G; Bueso, M; Molina, A. PV Module Monitoring System Based on Low-Cost Solutions: Wireless Raspberry Application and Assessment. *Energies* 2018, 11, 3051, <https://doi.org/10.3390/en11113051>.
10. Ali, M; Khalid, B. AN IOT BASED APPROACH FOR MONITORING SOLAR POWER CONSUMPTION WITH ADAFRUIT CLOUD. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 2020 Vol. 4, Issue 9, ISSN No. 2455-2143, Pages 335-341.
11. Somantri, Yustiana, I; Nugraha, A. Electrical Consumption Monitoring and Controlling System Based on IoT and Mobile Application. *IEEE*, 2020, 978-1-6654-0422-8.
12. Vargas, A; Fuentes, M; Vivar, M; Muñoz, F. Low-Cost Datalogger Intended for Remote Monitoring of Solar Photovoltaic Standalone Systems Based on Arduino™, *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 19, NO. 11, JUNE 1, 2019
13. Ghodake, S; Ghadage, P; Patil, N; Jadhav, A. Remotely Monitoring Health of the Solar Power System Using Arduino. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2019, Page 1871-1874.

14. Woszczyński, M.; Rogala-Rojek, J.; Bartoszek, S.; Gaiceanu, M.; Filipowicz, K.; Kotwica, K. In Situ Tests of the Monitoring and Diagnostic System for Individual Photovoltaic Panels. *Energies* 2021, 14, 1770. <https://doi.org/10.3390/en14061770>
15. Kermani, M.; Adelmanesh, B.; Shirdare, E.; Sima, C.; Carnì, D.L.; Martirano, L. Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications. *Renewable Energy* 117 (2021) 1115–1127. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.008>
16. Kazala, R.; Straczynski, P. The Most Important Open Technologies for Design of Cost Efficient Automation Systems. *IFAC PapersOnLine* 52-25 (2019) 391–396. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.567>.
17. Brzoza, R.; Szydło, T.; Wandzel, P.; Zajecka, M. SPP 2.0 Simple Packet Protocol for ultra low cost wired networks. *IFAC PapersOnLine* 52-27 (2019) 222–227. [10.1016/j.ifacol.2019.12.760](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.760).
18. Nadeem, A.; Ahmed, H.; Faisal, A.; Ahmed, N. Online current-sensorless estimator for PV open circuit voltage and short circuit current. *Solar Energy* 213 (2021) 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.004>.
19. Pillai, D.; Rajasekar, N. A comprehensive review on protection challenges and fault diagnosis in PV systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 91, August 2018, Pages 18–40. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.082>.
20. Zhang, Y.; Yu, Y.; Meng, F.; Liu, Z. Experimental Investigation of the Shading and Mismatch Effects on the Performance of Bifacial Photovoltaic Modules. *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, VOL. 10, NO. 1, JANUARY 2020. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2949766>.
21. Hwang, M.-H.; Kim, Y.-G.; Lee, H.-S.; Kim, Y.-D.; Cha, H.-R. A Study on the Improvement of Efficiency by Detection Solar Module Faults in Deteriorated Photovoltaic Power Plants. *Appl. Sci.* 2021, 11, 727. <https://doi.org/10.3390/app11020727>.
22. Toledo, C.; Serrano, L.; Abad, J.; Lampitelli, A.; Urbina, A. Measurement of Thermal and Electrical Parameters in Photovoltaic Systems for Predictive and Cross-Correlated Monitorization. *Energies* 2019, 12(4), 668; <https://doi.org/10.3390/en12040668>.
23. Pandian, A.; Bansal, K.; Thiruvadigal, D.J. et al. Fire Hazards and Overheating Caused by Shading Faults on Photovoltaic Solar Panel. *Fire Technol* 52, 349–364 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0509-7>.
24. Garoudja, E.; Chouder, A.; Kara, K.; Silvestre, S. An enhanced machine learning based approach for failures detection and diagnosis of PV systems. *Energy Conversion and Management* Volume 151, 1 November 2017, Pages 496–513. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.019>.
25. Garoudja, E.; Harrou, F.; Sun, Y.; Kara, K.; Chouder, A.; Silvestre, S. Statistical fault detection in photovoltaic systems. *Solar Energy* Volume 150, 1 July 2017, Pages 485–499. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.043>.
26. Harrou, F.; Dairi, A.; Taghezouit, B.; Sun, Y. An unsupervised monitoring procedure for detecting anomalies in photovoltaic systems using a one-class Support Vector Machine. *Solar Energy* Volume 179, February 2019, Pages 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.045>.
27. Chen, Z.; Chen, Y.; Wu, L.; Cheng, S.; Lin, P. Deep residual network based fault detection and diagnosis of photovoltaic arrays using current-voltage curves and ambient conditions. *Energy Conversion and Management* Volume 198, 15 October 2019, 111793. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111793>.

28. Ranjan, P; Sharma, R. Power and mismatch losses mitigation by a fixed electrical reconfiguration technique for partially shaded photovoltaic arrays. *Energy Conversion and Management* Volume 192, 15 July 2019, Pages 52-70. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.039>.
29. Fadhel, S; Delpha, C; Diallo, D; Bahri, I. PV shading fault detection and classification based on I-V curve using principal component analysis: Application to isolated PV system. *Solar Energy* Volume 179, February 2019, Pages 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.048>.
30. Ullah, I; Ul, A; Mahmoud, Y; Jalal, M; Aamir, M; Ullah, M; Mehmood, K. Comparative Analysis of Photovoltaic Faults and Performance Evaluation of Its Detection Techniques. *IEEE Access* V8 p 26676 – 26700, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970531>.
31. Rahhman, K; Munim, A; Rahman, H. Implementing a Data Acquisition System for Solar PV Modules with a Variable Load. *International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET)* 23-24 December, 2019.
32. Weglarski, M; Jankowski-Miśkiewicz, P; Chamera, M; Dziedzic, J; Kwásnicki, P. Designing Antennas for RFID Sensors in Monitoring Parameters of Photovoltaic Panels. *Micromachines* 2020, 11, 420; <https://doi.org/10.3390/mi11040420>.
33. Natsheh, E; Samara, S. Tree Search Fuzzy NARX Neural Network Fault Detection Technique for PV Systems with IoT Support. *Electronics* 2020, 9, 1087; doi:10.3390/electronics9071087
34. Fernández, P; Fernández, M; Carús, J; Arboleya, P. An IoT open source platform for photovoltaic plants supervision. *Electrical Power and Energy Systems*, 125, 2021, 106540.
35. Abushgair, K.; Al-Waked, R. Effects of Coating Materials as a Cleaning Agent on the Performance of Poly-Crystal PV Panels. *Coatings* 2021, 11, 544. <https://doi.org/10.3390/coatings11050544>.
36. Pryadharsini, K; Dinesh Kumar, J,R; Srikanth,A; Sounddar,V; Senthamilselvan,M. Elegant method to improve the efficiency of remotely located solar panels using IoT. *Materials Today: Proceedings*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.572>.
37. Afef Bennani-Ben, A; Attia Sethom, H, B. Modeling PV installations under partial shading conditions. *SN Applied Sciences* (2020) <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2458-0>.
38. Nguyen, X.H. Matlab /Simulink Based Modeling to Study Effect of Partial Shadow on Solar Photovoltaic Array. *Environ Syst Res* 4, 20 (2015). <https://doi.org/10.1186/s40068-015-0042-1>
39. Deng, S; Zhang, Z; Ju, C; Dong, J; Xia, Z; Yan, X; Xu, T; Xing, G. Research on hot spot risk for high-efficiency solar module. *Energy Procedia* 130 (2017) 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.399>.
40. Maa, M; Liua, H; Zhanga, Z; Yunb, P; Liua, F. Rapid diagnosis of hot spot failure of crystalline silicon PV module based on I-V curve. *Microelectronics Reliability* 100-101 (2019) 113402. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.113402>.
41. Fuentes, M; Nofuentes, G; Aguilera, J; Talavera, D; Castro, M. Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates. *Solar Energy* 81 (2007) 1396-1408. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.008>.
42. Kumar, P; Kumar H; Kumar, A. Analysis of Solar Photovoltaic panel Characteristics using MATLAB. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 6, Issue 11, November-2015.
43. Victron Energy España. 2021. https://www.victronenergy.com/es/upload/documents/Brochure-Off-Grid-backup-and-island-systems_ES_web.pdf.
44. Espressif. 2021. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf.

45. Mesquita, J; Guimaraes, D; Pereira, C; Santos, F; Almeida, L; Assessing the ESP8266 WiFi module for the Internet of Things. 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). <https://doi.org/10.1109/ETFA.2018.8502562>.
46. Shazwani, R; Hadi, M; Rafiqul, Md. Characteristic Analysis of Received Signal Strength Indicator from ESP8266 WiFi Transceiver Module. 2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCC). <https://doi.org/10.1109/ICCC.2018.8539338>.
47. Chase, O; Borges, M; Rodrigues, MJS; Souza, J; Negrao, W; Tavares, C. A Low-Cost, Stand-Alone Sensory Platform for Monitoring Extreme Solar Overirradiance Events. *Sensores* 2018, 18(8), 2685; <https://doi.org/10.3390/s18082685>.
48. Kalia, P; Alam, M. IOT based air quality and particulate matter concentration monitoring system. *Materials Today: Proceedings* 32 (2020) 468-475. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.179>.
49. Bhagavan, Nvs; Saranya, P. Water pollutants monitoring based on Internet of Things. *Inorganic Pollutants in Water 2020*, Pag 371-397. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00018-4>.
50. Texas Instruments, 21/06/2021. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4067.pdf>.
51. Allegro Micro. 21/06/2021. <https://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx>.
52. Raza, A; Stojcevski, A; Seyedmahmoudian, M; Abas, N; Kalair, A; Khan, N; Shoaib, M. Steady-state and time-varying harmonics in distribution system. *Uncertainties in Modern Power System 2021*, Pag. 485-539. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820491-7.00014-1>.
53. Joseph, J; Josh, F; Leander, S. A test bench on quality checking for electric vehicle chargers. *Materialstoday: proceedings Volumen 45, Part 9, 2021, Pages 8176-8181*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.554>.
54. Luis Llamas. 21/06/2021. <https://www.luisllamas.es/medir-voltajes-de-hasta-25v-con-arduino-y-fz0430/>.
55. Bolaños Daniel J. 22/06/2021. <https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/moduloRele.pdf>
56. Arduino, 21/06/2021. <https://www.arduino.cc/>.
57. Kepserver. 21/06/2021. <http://www.kepware.com>.
58. General Electric. 21/06/2021, <https://www.ge.com/digital/applications/hmi-SCADA/ifix>.
59. Christian Abele, <https://www.hogarsense.es/energia-solar/historia-energia-solar-fotovoltaica>
60. Aleasoft Energy Forecasting, <https://elperiodicodelaenergia.com/historia-de-la-fotovoltaica-en-espana-desde-sus-inicios-en-1984-a-sus-objetivos-para-2030/>
61. Salvador Escoda S.A., Edición 18.1, Libro blanco de las energías renovables, pág. 21-22.

ANEXO 1

Programa desarrollado en IDE ARDUINO

```
#include "light_CD74HC4067.h"
#include "ModbusIP_ESP8266.h"

//Credenciales WiFi
const char *ssid = "PSolares_plus"; // Nombre de la red
const char *password = "PSolares21"; // Contraseña de la red

//////// REGISTRO MODBUS //////////
//-----ENTRADAS ANALOGICAS DEL PANEL SOLAR -----//
const int SA_VP = 0; // Valor Entrada analogica de voltaje de un panel // E0
const int SA_IP = 1; // Valor entrada analogica de corriente de un panel // E2
const int SA_VT = 2; // Valor entrada analogica de voltaje total en serie // E1

// RELES PANEL //
const int Rele1=0; // Rele para desconectar panel 1
const int Rele2=1; // Rele para desconectar panel 2
const int Rele3=2; // Rele para desconectar panel 3
const int Rele4=3; // Rele para realizar prueba de Corriente de cortocircuito

#define Rele_1 14 //D5
#define Rele_2 12 //D6
#define Rele_3 13 //D7
#define Rele_4 16 //D8

float Sensor_VP; //Offsets Voltaje
float Sensor_IP; // Corriente
float Sensor_VT; //Offsets

// VARIABLES CORRIENTE
float sensibilidad_5A = 0.185;

///////// CREANDO OBJETO MODBUS //////////
ModbusIP mb; //Objeto Modbus
```

```
//// MULTIPLEXOR DE SEÑALES MODULO CD74H4067 //////////
// Pines S0,S1 S2 S3: del Mux
CD74HC4067 mux(5, 4, 0, 2); // Conexión pines del ESP8266
const int signal_A = A0; // ESP8266 Analog Pin ADC0 = A0

// _____
//////////////////// SE EJECUTA UNA VEZ //////////////////////
// _____

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  //*****//
  ////////// CONEXION AL WiFi //////////
  //*****//
  WiFi.begin(ssid,password);
  Serial.print("Connecting");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println();
  Serial.print("Connected, IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  // FIN CONEXION WIFI

  //-----//
  ////////// REGISTRO MODBUS //////////
  //-----//
  mb.server(); //Start Modbus IP
  mb.addreg(SA_VP); //Registrando lectura analogica del sensor de voltaje de un panel
  mb.addreg(SA_VT); //Registrando lectura analogica del sensor de voltaje de los paneles en serie
  mb.addreg(SA_IP); //Registrando lectura analogica del sensor de ACS712 /
  mb.addCoil(Rele1); //Registro panel solar 1
  mb.addCoil(Rele2); //Registro panel solar 2
  mb.addCoil(Rele3); //Registro panel solar 3
  mb.addCoil(Rele4); //Registro para test Isc 4

  //// DESACTIVANDO LAS SALIDAS DIGITALES ////
  pinMode(Rele_1, OUTPUT);
  digitalWrite(Rele_1,LOW);
  pinMode(Rele_2, OUTPUT);
```

```
digitalWrite(Rele_2,LOW);
pinMode(Rele_3, OUTPUT);
digitalWrite(Rele_3,LOW);
pinMode(Rele_4, OUTPUT);
digitalWrite(Rele_4,LOW);
}

//-----//
// SENSOR DE UN PANEL SOLAR //
//-----//
void Panel_Solar() {

    int muestras1=300;
    float VSensor,VolSensor;
    float corriente1=0;
    float VoltajeS1=0;

    //-----//
    // SENSOR DE VOLTAJE //
    //-----//
    for(int i=0;i<muestras1;i++)
    {
        mux.channel(0); // Número Canal del multiplexor Modulo CD74H4067
        VolSensor= analogRead(signal_A); // Obteniendo Voltaje
        VoltajeS1=VoltajeS1+VolSensor;
    }

    int S_VP1 = VoltajeS1/muestras1;
    Serial.print(S_VP1);
    Serial.print("\t");
    mb.lreg(SA_VP,S_VP1); // REGISTRO DE SEÑAL ANALOGICA

    //-----//
    // SENSOR ACS712 CORRIENTE //
    //-----//

    for(int i=0;i<muestras1;i++)
    {
        mux.channel(2); // Número Canal del multiplexor Modulo CD74H4067
        VSensor = analogRead(signal_A); // Obteniendo Corriente
        corriente1=corriente1+VSensor; //Ecuación para obtener la corriente
    }
    int SI1 = corriente1/muestras1; //analogRead(signal_A); NOTA : ACTIVAR AQUI LOS SENSORES
```

```
Serial.print(" \t");
Serial.print(SI1);
mb.Ireg(SA_IP,SI1); // REGISTRO DE SEÑAL ANALOGICA
}

//-----//
// PANELES SOLARES EN SERIE //
//-----//
void Paneles_en_serie() {
    int muestras2=300;
    float VolSensor2;
    float VoltajeS2=0;

// SENSOR DE VOLTAJE FZ0430 //
for(int i=0;i<muestras2;i++)
{
    mux.channel(1); // Número Canal del multiplexor Modulo CD74H4067
    VolSensor2= analogRead(signal_A); // Obteniendo Voltaje
    VoltajeS2=VoltajeS2+VolSensor2;
}

    int S_VT2 = VoltajeS2/muestras2;
    Serial.print(S_VT2);
    Serial.print(" \t");
    mb.Ireg(SA_VT,S_VT2);
}

//-----//
// RELES //
//-----//
void Reles(){
    Serial.println("RELE 1     RELE 2     RELE 3     RELE 4");
    Serial.print(mb.Coil(Rele1));
    Serial.print("\t\t");
    digitalWrite(Rele_1,mb.Coil(Rele1));

    Serial.print(mb.Coil(Rele2));
    Serial.print("\t\t");
    digitalWrite(Rele_2,mb.Coil(Rele2));

    Serial.print(mb.Coil(Rele3));
    Serial.print("\t\t");
    digitalWrite(Rele_3,mb.Coil(Rele3));
```

```
Serial.print(mb.Coil(Rele4));
Serial.println("\t\t");
digitalWrite(Rele_4,mb.Coil(Rele4));
}

//-----//
//   LOOP           //
//-----//

void loop() {
  mb.task();

  Serial.println(" Empezando... ");
  //Datos del Panel Solar 1
  Serial.println("* UN PANEL SOLAR *");
  Panel_Solar();
  Serial.println("");

  //Datos del PANELES SOLARES EN SERIE
  Serial.println("* PANELES EN SERIE *");
  Paneles_en_serie();
  Serial.println("");

  Serial.println("");
  Serial.println("* RELES *");
  Reles();
  Serial.println("");

  Serial.println("----- FIN -----");
  Serial.println("");
  Serial.println("");

  delay(1000);
}
```