

Sistema de monitoreo de paneles solares por medio del paradigma del internet de las cosas



Autoras:

Daniela María Perdomo Garavito

Addhy Daniela Venegas Garzón

Director:

Ing. Gustavo Adolfo Ramírez M. Sc

Tesis presentada para optar al título de
Ingeniera electrónica

Departamento de electrónica

Bogotá, D.C Colombia

2019

Agradecimientos

Agradecemos a nuestro director Gustavo Ramírez, por el apoyo ofrecido durante el proyecto, quien con sus conocimientos y entrega nos dio las herramientas para alcanzar esta meta. Al ingeniero Rafael Diez por brindarnos su ayuda en momentos en que nos sentimos perdidas. A Sebas y Vale por su gran corazón, sus sonrisas y su amistad.

A mis padres, Olga y Esteban por darme todo su amor y apoyo. Tienen mi admiración infinita. A mi hermanito Samu, por enseñarme a apreciar lo simple de la vida. A mi hermana Andrea por demostrarme que todo se puede alcanzar con dedicación y convicción. A mi familia, lo son todo y siempre están en mis pensamientos y oraciones.

A Dios, por siempre estar presente en mi vida y en la de mi familia y por permitirme terminar mi carrera a pesar de todas las dificultades y obstáculos.

A mi mamá, Erika Garzón por todo su amor, apoyo y sacrificio. Por ser una mujer guerrera y trabajadora y mostrarme que todo en la vida es posible. Toda mi amor y admiración para ti.

A mis abuelos, Gladys Gomes y Álvaro Garzón, mi tía y primos, por todo su apoyo, ayuda y comprensión, por siempre sacarme una sonrisa. Sin ustedes nada de esto hubiera sido posible.

Dios los bendiga y los amo mucho.

Contenido

Contenido	3
Figuras.....	5
Tablas	5
1. Introducción.....	6
2. Marco teórico.....	7
3. Objetivo general.....	9
3.1 Objetivos específicos.....	9
4. Descripción del sistema.....	10
4.1 Diagrama de bloques general	10
5. Implementación	12
5.1 Diseño general	12
5.2 Panel Solar	14
5.3 Subsistema digital (Procesador <i>Onion Omega2+</i>).....	15
5.3.1 Lenguaje de programación.....	16
5.4 Especificación de los sensores	16
5.4.1 Sensor de voltaje	16
5.4.2 Sensor de temperatura.....	16
5.4.3 Sensor de Irradiancia solar	16
5.5 Circuito para el ahorro de consumo.....	17
5.5.1 RTC	17
5.5.2 Microcontrolador de bajo consumo	17
5.5.3 Switch por medio de un transistor	18
6. Transmisión, recepción y análisis de datos.....	18
6.1 Tiempos de transmisión.....	19
6.2 Motor de analítica	19
6.3 Matlab en la nube	19
7. Análisis de datos	20
7.1 Detección de falla a partir de la corriente a corto circuito	20
7.2 Detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto	21
7.3 Detección de falla a partir de la relación entre corriente a cortocircuito e irradiancia solar.....	22
7.4 Alerta por aumento en la temperatura ambiente	24
8. Alarma.....	25
9. Interfaz de Usuario.....	25
10. Protocolo de pruebas	25

10.1 Pruebas sensores.....	26
10.1.1 Sensor de irradiancia solar	26
10.1.2 Sensor I-V	27
10.1.3 Sensor de temperatura.....	28
10.2 Prueba correspondencia de irradiancia solar con corriente a corto circuito.....	29
10.3 Pruebas sistema de conmutación.....	30
10.4 Pruebas motor analítica (Correcta detección de fallas).....	30
10.4.1 Prueba detección de falla a partir de la corriente a corto circuito.....	30
10.4.2 Prueba detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto.....	31
10.4.3 Pruebas detección de falla a partir de la relación entre corriente a cortocircuito e irradiancia solar	32
10.5 Pruebas sistema de notificación al usuario	34
10.6 Pruebas Interfaz de interacción con el usuario.....	35
11. Diseño – Caja Presentación PCB	36
12. Conclusiones.....	37
13. Anexos.....	38
14. Bibliografía.....	40

Figuras

Figura 1. Arquitectura IoT.....	7
Figura 2. Diagrama en bloques del sistema.....	11
Figura 3. Circuito de interruptores corto circuito y circuito abierto.	13
Figura 4. Esquemático circuito principal.	14
Figura 5. Esquemático para sensores de temperatura e irradiancia.	14
Figura 6. Comportamiento Corriente vs Voltaje Panel solar.....	15
Figura 7. Conexión I2C.....	18
Figura 8. Diagrama de flujo - Algoritmo de detección de falla en el panel solar a partir de la corriente a corto circuito.....	21
Figura 9. Diagrama de flujo - Algoritmo de detección de falla en el panel solar a partir del voltaje a circuito abierto.....	22
Figura 10. Diagrama de flujo- Algoritmo de detección de falla a partir de la relación entre corriente a cortocircuito e irradiancia solar	24
Figura 11. Comparación de Irradiancia solar, piranómetro vs sensor.....	26
Figura 12. Sensor de luz vs piranómetro.....	27
Figura 13. Medición de corriente a corto circuito.....	27
Figura 14. Comparación DVM vs Sensor.	28
Figura 15. Relación entre el sensor de temperatura y el termómetro digital.	28
Figura 16. Irradiancia vs corriente.	29
Figura 17. Corriente medida vs Corriente calculada.....	29
Figura 18. Gráfica de prueba detección de falla a partir de la corriente a cortocircuito.	31
Figura 19. Activación de bandera ShortCircuit cuando se detecta una falla a partir de la corriente a corto circuito.	31
Figura 20. Gráfica de prueba detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto.	32
Figura 21. Activación de bandera VopenCircuit cuando se detecta una falla a partir del voltaje a circuito abierto.	32
Figura 22. Gráfica de irradiancia solar tomada de la nube.....	33
Figura 23. Figura 21. Gráfica de corriente tomada de la nube.	33
Figura 24. Activación de bandera cc cuando se detecta una falla a partir de la relación entre irradiancia y corriente a corto circuito.	34
Figura 25. Notificación vía Twitter por deteccipon de falla a partir de la corriente a corto circuito.	34
Figura 26. Notificación vía twitter - Detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto.	34
Figura 27. Detección de falla a partir de la relación entre irradiancia y corriente a corto circuito.....	35
Figura 28. Alerta por temperatura ambiente mayor a 45°C.....	35
Figura 29. Interfaz de interacción con el usuario.....	36
Figura 30. Graficas de V-I en la nube.....	36

Tablas

Tabla 1. Estados de los interruptores	13
Tabla 2. Características del Microcontrolador usado.....	15
Tabla 3. Características principales sensores usados.	17
Tabla 4 Cálculo error relativo porcentual entre el DVM y el sensor.	28
Tabla 5. Error relativo porcentual entre los métodos usados.....	29
Tabla 6. Error relativo porcentual entre DVM vs corriente por correspondencia de irradiancia	30

1. Introducción

Con el acuerdo para el cambio climático de París en 2015 se dejó planteado que el desarrollo económico del mundo debe alinearse a partir de las energías renovables y de esta manera, abandonar la generación de energía basada en combustibles fósiles, como carbón, petróleo o gas natural[1].

En la actualidad, las energías renovables están siendo acogidas ampliamente como solución a la crisis energética. Según la Agencia internacional de energías renovables (IRENA) en el crecimiento del uso de recursos renovables para la generación de energía, la eólica ha aumentado un 2000%, la bioenergía un 214%, la geotérmica un 54% y la solar un 18461% [1]. El método fotovoltaico ha tenido mayor auge en Colombia según las estadísticas de la unidad de planeación minero-energética (UPME). De hecho, de las iniciativas radicadas en el 2017 el 88,3% involucra la energía fotovoltaica. Esto ha dado pie al desarrollo de proyectos de tecnología en esta área en donde cada vez es más común el uso de paneles solares en la cotidianidad [2].

Es importante tener en cuenta que, estos dispositivos necesitan de constante revisión técnica, ya que, al estar ubicados a la intemperie, son expuestos a distintos factores que pueden afectar su operación. En el estudio [3] se plantea que “Si una planta de energía solar de clase de 1MW utiliza 3500 paneles solares, aproximadamente 17.5 de sus paneles solares se romperán por año”. Entre las fallas más comunes en los paneles solares se encuentran el cortocircuito en la célula solar, menor absorción de la radiación solar debido a la presencia de nieve, hojas, ramas o polvo, rotura del panel o irradiación solar alta que puede llevar a un sobrecalentamiento del dispositivo [2].

Según el manual de mantenimiento para paneles solares fotovoltaicos de la escuela técnica superior de Sevilla[4], se debe realizar la comprobación del funcionamiento de cada panel solar fotovoltaico cada año por parte de personal calificado. Esto significa que el proceso de supervisión técnica requiere de factores humanos y económicos que podrían ser reducidos por un sistema automatizado de alerta de fallas en los paneles. Esto, ayudaría a las personas que dependen de esta como su única fuente de energía, así como a las empresas que brindan servicios de energía, alumbrado público y señalización.

En este documento se presenta el proceso de integración, implementación y comprobación de un sistema de detección de fallas en paneles solares fotovoltaicos por medio del paradigma del internet de las cosas.

2. Marco teórico

IoT es considerado como la conexión en red de objetos físicos o dispositivos en una red abierta y llena de objetos inteligentes, la cual, tiene la capacidad de auto gestionarse, compartir información, datos y recursos, reaccionar y actuar frente a situaciones y cambios en el medio ambiente. Se compone de seis elementos: objetos o cosas, contexto, ruta de comunicación, servicio, relaciones y temporalidad; de esta forma, IoT busca conectar algún lugar, comunicar alguna red, recolectar algún dato, servir a algún objeto, procesar alguna información, e integrar cosas [5].

Por un lado, en este trabajo de grado se integra un sistema por medio del paradigma del internet las cosas cuya arquitectura tiene sus propias características y permite tener nuevas funcionalidades. De la misma manera, los dispositivos IoT cuentan con una potencia muy limitada y con diferentes capacidades físicas. Estos sistemas, deben cumplir con los requerimientos de conectividad y comunicación, gestión de dispositivos, recolección, análisis y actuación de los datos, escalabilidad y seguridad[6]. En la Figura 1 se puede observar la gráfica de las capas de la arquitectura IoT, donde la capa más baja consiste en una red de sensores, sistemas embebidos, etiquetas *RFID* y lectores. La segunda capa es la capa de enlace y el *gateway*, esta capa es la responsable de transferir la información recolectada por los sensores para la siguiente capa. Debe ser escalable, flexible y estandarizado con los protocolos universales para la transferencia de datos desde diferentes dispositivos, esta capa debe tener alto rendimiento y una red robusta. La tercera capa es la de servicio de gestión y actúa como interfaz entre la capa de *Gateway* - enlace y la capa de aplicación en modo bidireccional. Es responsable por el manejo del dispositivo y de la información. La cuarta capa es la de aplicación y es la capa más alta de esta conexión la cual provee una interfaz de usuario para el acceso por parte de varios usuarios a diferentes aplicaciones[7].

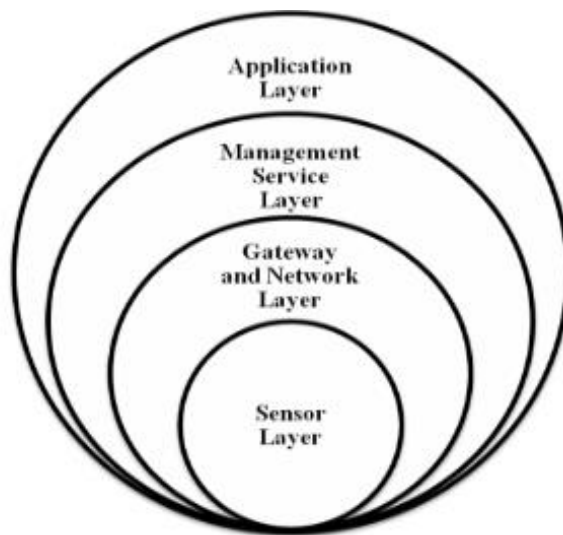


Figura 1. Arquitectura IoT.

Por otro lado, el enfoque de este trabajo de grado es hacia la detección de fallas en paneles solares fotovoltaicos. A continuación, se presentan estudios previos utilizando diferentes métodos para alcanzar este fin: En el estudio [8] se expone la utilización de drones con cámaras térmicas y cámaras RGB para la detección de fallas en paneles solares por medio del *Visual studio* y *OpenCV 3.2*, el sistema propuesto encuentra un arreglo de paneles solares y un daño en una celda solar. En [9] se utiliza la técnica de corriente y voltaje dinámico para determinar algunos parámetros del panel, gracias al algoritmo de optimización

MPSO (*Modified Particle Swarm Optimization*), el dispositivo propuesto provee a sus usuarios una herramienta de diagnóstico por medio de un algoritmo que evalúa los parámetros a nivel del circuito, sin interrumpir la generación de energía. Asimismo, el estudio [10] por medio de la captación de imágenes por sensores de radiación infrarroja y la *UAV platform* (un algoritmo diseñado para mantenimiento) y operación GCS (*Ground control system*), el sistema hace capturas de imágenes por medio del algoritmo de mantenimiento y gracias a una red inalámbrica almacena los datos para un procesamiento posterior por parte del GCS. Por último, en el estudio [11] se utilizó el paradigma del internet de las cosas, así mismo, se emplearon sensores SMD que miden corriente, voltaje y temperatura a través un software para detección de fallas y gestión de paneles solares, el cual permite monitorear el arreglo de 104 paneles solares por medio de un microprocesador instalado en el panel, el procesamiento de fallas se da por la conexión a IoT posteriormente.

Según las investigaciones anteriormente nombradas los estudios basados en detección y monitoreo de fallas en paneles solares tienen diversos métodos de toma de datos, análisis e implementación; se pueden observar los más relevantes encontrados en la búsqueda. Se encuentran sistemas de adquisición de datos por medio de procesamiento de imágenes térmicas tomadas por drones, sensores conectados directamente al panel para conocer su corriente y voltaje, la aplicación de sensores infrarrojos y posteriormente la implementación de un algoritmo diseñado para hacer el procesamiento de datos que permitirá saber el estado y rendimiento del panel solar. Sin embargo, todos estos métodos son muy costosos y la mayoría requiere de una persona esté en constante supervisión del sistema para realizar y obtener el análisis que se necesita. Así mismo, el estudio [7] sería el más similar al trabajo de grado en desarrollo, ya que, está basado en la arquitectura IoT. Sin embargo, las herramientas que utilizan para la detección de fallas son *Machine learning* y visión por computadora, lo cual diverge de los métodos utilizados en este trabajo de grado.

El sistema propuesto permite tener un monitoreo remoto, ya que el proceso de medición se realiza de forma automática, por medio de un procesador que hace la integración entre la capa de sensores y la capa de enlace. Posteriormente, se realiza un despliegue en la nube donde se ejecuta el análisis de los datos de forma autónoma; al momento de detectar una falla basada en los algoritmos desarrollados en este proyecto, se hace contacto con el cliente por medio de una alerta, de lo contrario el dispositivo realiza su tarea de manera mecánica guardando los datos para cuando el cliente lo requiera y podrá acceder a ellos por medio de una plataforma de visualización desplegada para este fin.

3. Objetivo general

Integrar un sistema de internet de las cosas para la adquisición de datos con el propósito de detectar fallas en la generación de energía eléctrica en un panel solar fotovoltaico.

3.1 Objetivos específicos

1. Diseñar un sistema que permita el monitoreo de un panel solar fotovoltaico por medio de la adquisición de los valores de corriente, voltaje, irradiación solar y temperatura.
2. Integrar un sistema de comunicación por medio de una red inalámbrica con el fin de transferir datos y su posterior análisis.
3. Integrar un sistema de alarmas desde un servidor en la nube para notificar fallas al usuario dependiendo del análisis de las variables adquiridas.
4. Diseñar y ejecutar un protocolo de pruebas para la verificación de los bloques que integran el sistema.

En este trabajo de grado se presenta la implementación de un prototipo que identifica si un panel solar presenta alguna falla por medio de la adquisición de señales provenientes del panel y el medio exterior, con capacidad de realizar analítica de datos y enviar notificaciones al usuario en caso de anomalías en la actividad del panel.

El dispositivo es no invasivo ya que no impide la generación de energía del panel por un largo periodo de tiempo. Sin embargo, si realiza una desconexión entre el panel y la carga.

Especificaciones

- Potencia y voltaje del panel solar: Los paneles solares a trabajar serán máximo a valores nominales de 20W y 20V de marca *RENOGY* suministrados por el laboratorio.
- Visualización de variables: El usuario tendrá acceso al *Dashboard* o interfaz creada para este proyecto por medio del lenguaje *HTML*. Donde se visualizarán las variables provenientes del panel adquiridas por el dispositivo, sin peligro a que el usuario las modifique por accidente.
- El sistema detecta cuando se presente alguna falla en el panel solar. El análisis se realizará para cada toma de datos.

4. Descripción del sistema

El presente trabajo de grado está basado en la integración de un sistema embebido el cual permite hacer el monitoreo de señales provenientes de un panel solar fotovoltaico. Estos datos se tomarán en el sitio donde esté ubicado el dispositivo y se transmitirán inalámbricamente a un servidor en la nube desplegado para este fin. En el cual, por medio de una serie de análisis de los datos adquiridos detectará si se presenta alguna falla en el panel solar a partir de los valores de corriente a cortocircuito, voltaje a circuito abierto e irradiancia solar. De ser así, se notificará al usuario por medio de una alerta.

Aparte de esto, se construyó una plataforma de visualización para que el usuario pueda ver el estado de sus paneles en cualquier momento. En otras palabras, este proceso de comunicación entre el módulo de adquisición de datos, el servidor y el usuario permite obtener una solución IoT, ya que el proyecto es un prototipo de sistema embebido con su respectiva implementación en la nube.

4.1 Diagrama de bloques general

El sistema final tiene como función la adquisición de señales provenientes de un panel solar y las señales externas que más influyen en su operación, por medio de cuatro sensores los cuales permitirán el análisis y posterior diagnóstico que causará la notificación al cliente de un fallo en su panel. Las señales adquiridas son: corriente, voltaje, irradiancia solar ambiental y temperatura del medio, utilizando el protocolo de comunicación I2C. Posterior a esto, se transmiten los datos por medio de internet de manera inalámbrica utilizando Wifi a través del protocolo de transferencia HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*).

De esta forma, se transfieren los datos adquiridos a un motor de analítica que se encuentra en un servidor en la nube. Con ello, el sistema analiza y compara según unos valores prestablecidos para determinadas condiciones de fallas en el panel solar, para finalmente hacer la notificación al usuario a través de un medio digital como redes sociales o móvil como un mensaje de texto.

Además de esto, el sistema cuenta con una interfaz gráfica que permite al usuario visualizar los valores adquiridos y su historial. Por otro lado, se diseñó un circuito de control de consumo que permitirá la reducción de la potencia consumida por el prototipo, ya que esto hace que el sistema solo permanezca encendido unos minutos por cada hora al día y apagado en la noche cuando el panel no esté generando energía, este sistema adicional se diseñó para la implementación en un proyecto futuro.

El presente trabajo se desarrollará basado en la metodología Top-Down la cual consiste en la formulación general del sistema por medio del diagrama en bloques de la Figura 2, el cual se profundiza en cada etapa hasta llegar a un objetivo específico.

A continuación, se muestra el diagrama en bloques del sistema diseñado:

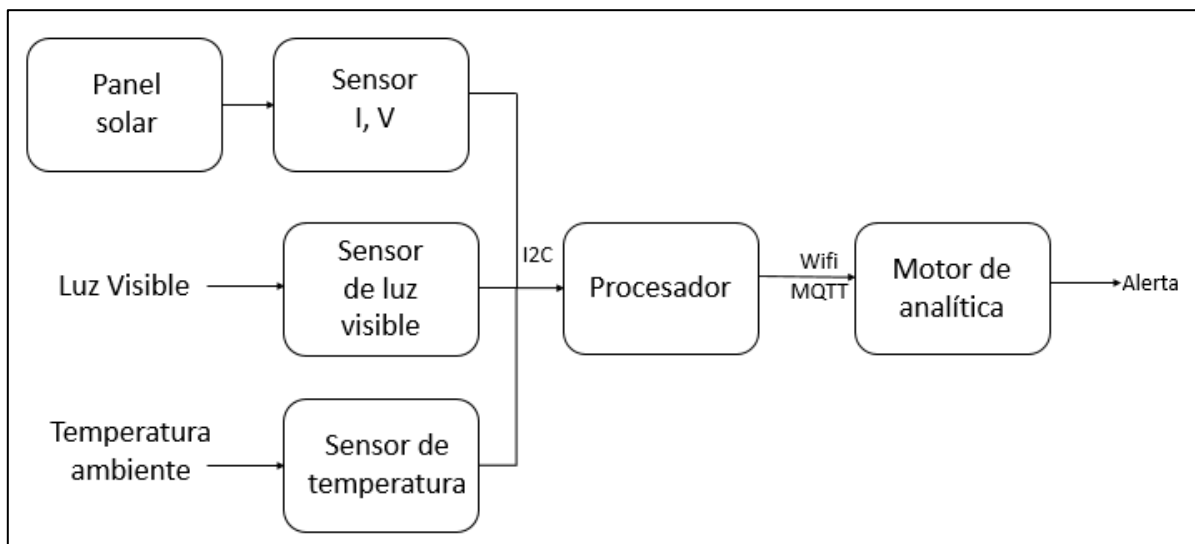


Figura 2. Diagrama en bloques del sistema

El sistema está conformado por tres circuitos, cada uno con una función diferente y ubicados en diferentes puntos. El primer circuito se diseñó para realizar la medición del parámetro de corriente en corto circuito y voltaje en circuito abierto, fue necesario hacer un circuito que se encargara de desconectar y conectar la carga del panel solar y unir sus terminales para así generar el corto circuito o abrir el circuito, ya que, las variables eléctricas que permiten saber si hay una falla requieren de este procedimiento.

Un segundo circuito fue necesario ya que, se requiere que la posición de los sensores de temperatura e irradiancia solar estén ubicados a la misma altura del panel para obtener las variables más cercanas posible a las reales que está recibiendo el panel.

El tercer circuito es el principal donde se encuentra el procesador Omega onion2+, junto con el sensor de voltaje y corriente y la adecuación del voltaje de alimentación para el funcionamiento de la tarjeta por medio de la batería de 12V. El prototipo diseñado cuenta con las siguientes etapas:

- **Etapas de adquisición de señales:** En esta etapa se escogieron los sensores adecuados para hacer las mediciones de voltaje, corriente y potencia generada por el panel solar, también para las mediciones de las señales de temperatura ambiente e incidencia de irradiancia solar. La principal característica que se tuvo en cuenta fue que contaran con un protocolo de comunicación I2C ya que éste utiliza una topología tipo bus, por lo que se evita la necesidad de cableado al tener los sistemas separados. Por otro lado, se buscaron que los sensores tuvieran una resolución de mínimo 8 bits dependiendo de la señal a adquirir ya que a cualquier cambio de valor el sistema debe seguirlo.
- **Etapas de envío, análisis y notificación:** Esta etapa empieza desde el procesador ya que éste cuenta con un sistema embebido que permite la comunicación con el motor de analítica que se encuentra en una aplicación de código abierto en la nube llamada *Thingspeak*.

Por un lado, antes de realizar el envío se hace el cálculo del promedio a la muestra de las señales en el procesador, ya que, la nube limita el sistema a un envío de 15seg por cada canal. La comunicación se hará por medio del protocolo de comunicación HTTP (REST) para así realizar el envío de los

datos. Posteriormente se utiliza la herramienta de Matlab en la nube, la cual permite hacer el análisis pertinente de acuerdo con ciertos parámetros que se mencionarán más adelante.

Dependiendo del resultado del análisis en la nube, se procede al envío de las notificaciones si se detecta alguna falla con los datos analizados. Adicional a esto los datos estarán en una interfaz gráfica creada para este proyecto por medio del lenguaje de programación HTML, donde se visualizarán las gráficas proporcionadas por la nube sin peligro a que se lleguen a modificar por accidente.

- **Etapa control de consumo:** Durante el desarrollo del sistema se detectó la necesidad de tener un circuito para el control del consumo del dispositivo, ya que la toma de datos no es continua en el tiempo y el sistema permanecerá encendido sin necesidad. En el presente trabajo de grado no se realiza la implementación de esta etapa, ya que no está considerado en los objetivos ni la planeación. Sin embargo, se establece un diseño el cual puede ser implementado para una mejora en el futuro.

Para el control de consumo se diseñó un sistema que permita hacer el encendido y apagado del dispositivo principal (tarjeta y sensores) por medio de un dispositivo RTC (*Real Time Clock*) y un microcontrolador de baja potencia, este último estará todo el tiempo encendido y conectado directamente a la batería. La comunicación entre los dispositivos anteriormente mencionados se realizaría a través del protocolo de comunicación I2C.

Adicional a estos dos componentes, se tiene un filtro pasa-bajos de 0.5 Hz que permite obtener el promedio de la señal cuadrada que da como salida el RTC en los dos estados, permitiendo así que haya una referencia para identificar cuando el procesador está encendido y apagado por medio de un circuito comparador diseñado para cambiar de estado de acuerdo con el voltaje DC de salida del filtro. Para revisar el diseño de esta etapa ir al **Anexo 2**

5. Implementación

5.1 Diseño general

En este capítulo se expone detalladamente el diseño del sistema y las consideraciones que se tuvieron en cuenta para alcanzar su correcto funcionamiento.

Para implementar el dispositivo IoT se tuvieron en cuenta las especificaciones del panel a monitorear, la resolución de las señales a tomar junto con las variables necesarias que se iban a adquirir para decidir cuándo se presentaba una falla en el panel solar.

El panel debe tener una carga para que éste sea útil en la generación de energía, es por esto que este viene con una batería adecuada para él con especificaciones de 12v y corriente de 7.5A/20H. El funcionamiento del dispositivo dependerá de la carga de la batería del panel por esto se debe adicionar un controlador de carga para panel solar, también de la marca RENOGY, de 12v/24v. El cual permite que el voltaje de alimentación sea constante y la corriente de la batería hacia la carga sea siempre la necesaria y no dependa

de la actividad del panel, ya que este puede variar drásticamente de un momento a otro corriendo el riesgo que el dispositivo no funcione si se deja directo al panel.

Por otro lado, para adquirir las señales de voltaje a circuito abierto y corriente a corto circuito sin que se afecte la generación de energía se debe diseñar un circuito que permita realizar las mediciones por un tiempo en específico, esto proceso se hace por medio de 2 interruptores de potencia *irfz44n* controlados por medio del procesador Omega onion2+. En la Figura 3 se puede observar la ilustración de los esquemáticos. En el **Anexo 8** se encuentran los archivos que conforman el diseño de este circuito.

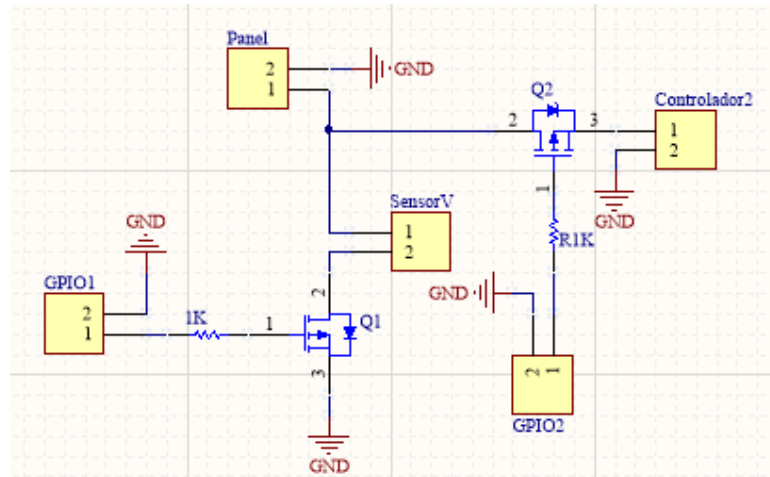


Figura 3. Circuito de interruptores corto circuito y circuito abierto.

Para el control de los interruptores cada uno cuenta con una señal *GPIO* (General Purpose Input/Output) por sus siglas en inglés, proveniente del procesador que se activa o desactiva dependiendo de la medición que se desee realizar. En la Tabla 1 se puede observar los estados de los interruptores para cada situación:

SW1	SW2	Tipo de medición
0	0	Sistema apagado
0	1	Funcionamiento normal
1	0	Voltaje a circuito abierto
0	0	Corriente a corto circuito

Tabla 1. Estados de los interruptores

Asimismo, en el circuito principal se utilizan 2 reguladores lineales de 12V a 5V (L7805CV), y de 5V a 3.3V(LM1117) para poder adecuar el valor del voltaje de alimentación para el procesador, ya que éste sólo se enciende con 3.3V exactos porque no posee un regulador interno. También cuenta con las conexiones para ubicar el sensor de voltaje y corriente, como también la batería del panel, y la llegada de las conexiones de los sensores de temperatura e irradiancia solar hacia el procesador. En la Figura 4 se puede observar el modelo del esquemático principal. En el **Anexo 9** se encuentran los archivos que conforman el diseño de este circuito.

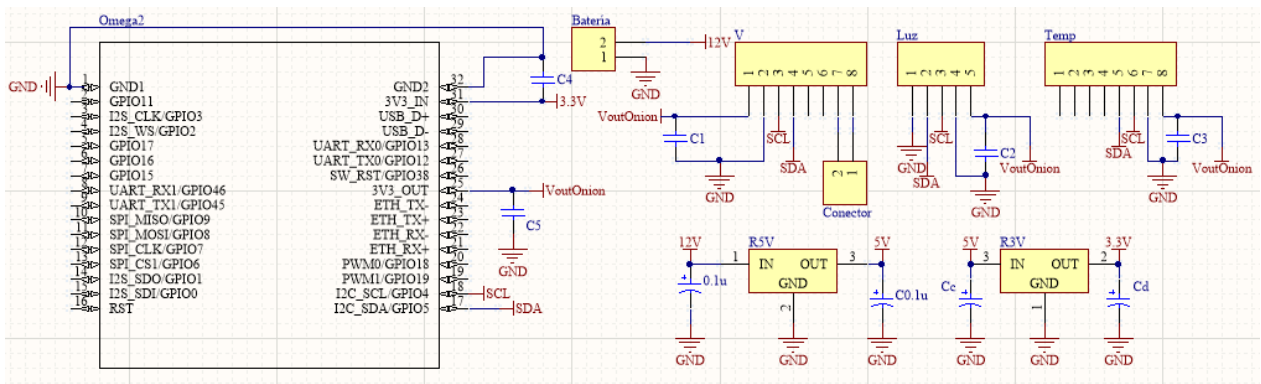


Figura 4. Esquemático circuito principal.

Para finalizar con los circuitos que componen el sistema, se diseñó un circuito que ubicación será diferente a la de los otros, para así poder obtener una buena lectura de las señales de irradiación solar y temperatura. En la Figura 5 se puede observar el modelo del tercer esquemático. Es importante mencionar que todos los circuitos impresos se diseñaron por medio del software *Altium Designer 19*; las vías de los esquemáticos de diseñaron teniendo en cuenta la cantidad de corriente que pasa por ellas, por eso algunos de los caminos se ven más gruesos que otros. En el **Anexo 10** y **Anexo 8** se encuentran los archivos que conforman el diseño de este circuito.

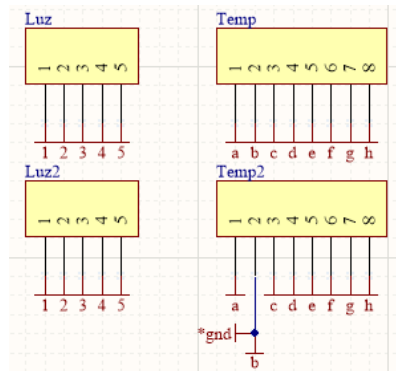


Figura 5. Esquemático para sensores de temperatura e irradiancia.

Para la programación del dispositivo el procesador *Omega Onion 2+*, este tiene un sistema operativo Linux que cuenta con distribución LEDE la cual es especial para dispositivos de bajo consumo y cuya intención es comunicarse a través de internet[12]. Este sistema soporta la programación por medio de lenguaje Python 2.7. Este procesador permite utilizar las librerías de la tarjeta para los sensores con *I2C*, *GPIO* junto con la del protocolo de comunicación HTTP. Posterior a esto se procede a hacer la programación de los sensores y adquisición de las señales junto con el tiempo respectivo de 0.5seg para hacer el envío los cuales se aseguran por medio del proceso de hilos explicados en la sección 6.1 Tiempos de transmisión. Para la recepción de los envíos se tiene un servidor web en la nube, el cual permite el análisis de datos a partir de las funciones de Matlab.

5.2 Panel Solar

El panel solar escogido es un monocristalino de marca RENOGY RNG-20D de dimensiones 16.14 x 13.77 x 3.89 pulgadas, que tiene como parámetros principales un voltaje de 21.6V a circuito abierto, una corriente de 1.23A en corto circuito y una potencia máxima en condiciones estándar de 20W de acuerdo al *datasheet* (

Anexo 1). En la Figura 6 se puede observar la gráfica de comportamiento de corriente vs voltaje para el panel solar escogido.

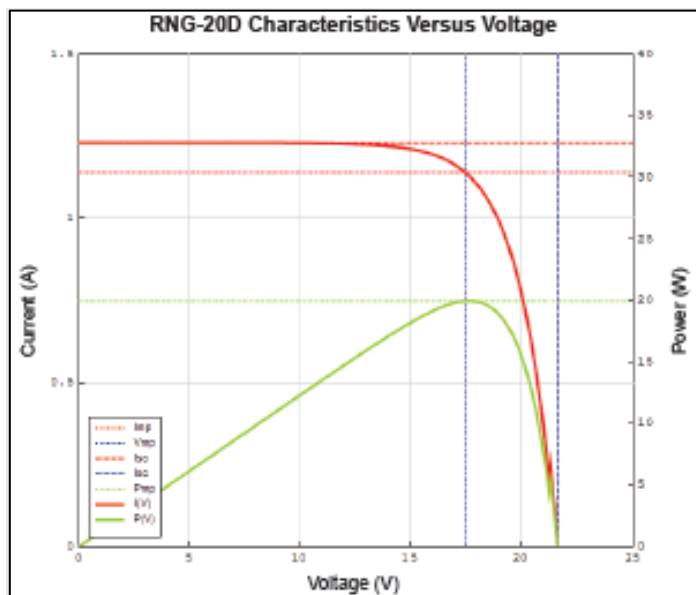


Figura 6. Comportamiento Corriente vs Voltaje Panel solar

5.3 Subsistema digital (Procesador *Onion Omega2+*)

En el mercado se puede encontrar gran cantidad de microprocesadores que podrían cumplir con los objetivos del sistema propuesto, sin embargo, esta decisión se tomó basado en el bajo costo (\$13 USD), así como su bajo consumo de energía, su pequeño tamaño, capacidad de procesamiento, interconexión y encriptación de la *Onion Omega2+* (**Anexo 3**). Además, esta tarjeta fue diseñada para el desarrollo de aplicaciones en Internet de las cosas. Asimismo, permite expandir su memoria por medio de una memoria microSD para su completo funcionamiento, adicionalmente su factor de forma y fácil acceso a sus pines para este tipo de desarrollo la hace ideal a diferencia de otro tipo de tarjetas.

En la siguiente Tabla 2 se pueden observar las especificaciones técnicas del microprocesador escogido:

<i>Onion Omega 2</i>	
Procesador	580MHz MIPS CPU
Memoria	128MB
Protocolos de comunicación	I2C, SPI, I2S
GPIOs	18
Conexión	Wifi

Tabla 2. Características del Microcontrolador usado

5.3.1 Lenguaje de programación

En el desarrollo del proyecto se hizo uso librerías ya creadas para el manejo de los sensores por medio del protocolo I2C y el envío de datos en HTTP, manejos de hilos del procesador por medio de Threading, junto con el tiempo.

Las librerías utilizadas en la programación con *Python2.7* del sistema fueron: *datetime*[13], *timesleep*[14], *time*[14], *OnionGpio*[15], *onionI2C*[16], *sys*[17], *urllib2*[18] y *Threading*[19].

5.4 Especificación de los sensores

Para la implementación del proyecto se escogieron sensores digitales, para así realizar la comunicación por medio del protocolo I2C.

5.4.1 Sensor de voltaje

El sensor de voltaje se escogió teniendo en cuenta la necesidad de una alta resolución de medida para poder conocer pequeños cambios de la señal proveniente del panel solar, por esta razón se escogió el módulo INA260 de *adafruit* (**Anexo 4**) para la adquisición de voltaje, corriente y potencia, en el cual la corriente pasa a través de la resistencia shunt de 2 miliohm y se mide por medio del ADC interno de 16 bits, permitiendo mediciones sobre el rango de corriente con una resolución de 1.5mA, junto con su protocolo de comunicación I2C que permite tener varios dispositivos a la vez por medio de solo dos terminales para el resto de los sensores.

5.4.2 Sensor de temperatura

Por medio de este sensor y el de irradiancia solar, se puede conocer las variables físicas del medio en el que va a estar el panel y que podrían afectar su funcionamiento. El LM75A (**Anexo 5**) es un circuito integrado con su propio circuito de control embebido, que proporciona una salida de voltaje proporcional a la temperatura. La salida del LM75A es lineal con la temperatura, incrementando el valor a razón de 10mV por cada grado centígrado. El rango de medición es de -55°C (- 550mV) a 150°C (1500 mV). Su precisión a temperatura ambiente es de 0,5°C y está equipado con un convertidor ADC de 9 bits, utiliza el protocolo I2C. Se decidió adquirir esta señal del medio, ya que se consideró importante monitorear el sitio en el que se encuentra el panel por si se encuentra una temperatura extrema, o podría haber un incendio, situaciones en las cuales los sensores o dispositivos no están en condiciones de funcionar.

5.4.3 Sensor de Irradiancia solar

Se escogió el sensor de irradiancia solar ambiente BH1750FVI digital (**Anexo 6**). Su comunicación se realiza a través del protocolo I2C. La respuesta espectral del sensor es aproximadamente la misma que la del ojo humano. Cuenta con un amplio rango y alta resolución de (1-65535lx), se eligió este

sensor en vez de un piranómetro, ya que, un sensor de este tipo aumentaría los costos de despliegue además de contar con dimensiones muy grandes para este tipo de aplicaciones. Por esta razón, se encontró una relación entre lux y w/m^2 , la cual es que por cada lux hay $0.0079w/m^2$ [20]. Este factor depende de las longitudes de onda que se están adquiriendo, en este caso las que encierra la luz visible. Asimismo, se hizo un protocolo de pruebas más adelante que corroboran esta equivalencia (10.1.1 Sensor de irradiancia solar) entre los datos tomados por este sensor y por el piranómetro y vemos que su grado de error es muy pequeño y aceptable para este proyecto de grado.

En la Tabla 3 se resumen las especificaciones principales de los sensores utilizados:

Sensor	Referencia	Vin	Iin	Resolución	Frecuencia I2C
Temperatura	CJMCU-9808	2,7-5,5	200uA	9 bits	400k Hz Max
Irradiancia Solar	BH1750	2,4-3,6	120uA	16 bits	400k Hz Max
I-V	INA260	2,7-5,5	310uA	16 bits	1k-2,94M Hz

Tabla 3. Características principales sensores usados.

5.5 Circuito para el ahorro de consumo

Como se mencionó previamente este diseño se hizo para su implementación en un proyecto futuro, ya que en este se vio la necesidad a medida del desarrollo mas no se tenía contemplado su implementación. Para este circuito se escogió un RTC (Real Time Clock) que permite llevar el control del tiempo y tiene pines de alarma para realizar la activación del dispositivo de acuerdo con su activación, un microcontrolador muy básico Attiny 85 que permite hacer el control del RTC, junto con su programación, un interruptor analógico que permitiera desconectar el dispositivo principal (Microprocesador, sensores, circuito de conmutación de sensores) de los otros componentes que deben estar en conexión continua.

5.5.1 RTC

Para el RTC se escogió un DS3231 el cual permite comunicación por I2C, 2 alarmas diferentes y varias configuraciones que permite adecuar el dispositivo como se requiera, para este caso se diseñó para dos alarmas, una cada hora por cierto tiempo para que el circuito principal este encendido por ese tiempo, y la otra para que a las 6am de cada día se encendiera y empezara la rutina. Para identificar el encendido del apagado se hizo programa el RTC para tener una frecuencia de 1Hz encendido y apagado un voltaje DC. Por otro lado para que la señal llegara de forma digital al principal (encendido o apagado) se diseñó un circuito adicional con un filtro pasa-bajos con frecuencia de corte de 0.5Hz, el cual su entrada es el pin de alarmas con las diferentes frecuencias y así tener el promedio de la señal, después se puso un comparador con voltaje de comparación de 2v que es aproximadamente la diferencia entre los promedios de las dos frecuencias de la alarma, este comparador da una salida de 12v o 0v al interruptor que separa el circuito principal del resto del dispositivo. El circuito anteriormente mencionado se puede observar en el **Anexo 11**.

5.5.2 Microcontrolador de bajo consumo

Este es un microcontrolador muy básico que solo tiene 5 pines para entradas, y permite comunicación I2C para hacer la programación del RTC. Tiene alimentación de 5V y es programado

por medio de la interfaz de Arduino lo que permite que sea fácil de utilizar y pequeño en tamaño para este tipo de aplicaciones. Fue escogido entre gran variedad de microcontroladores por su bajo precio y poco tamaño, las conexiones entre este microcontrolador y el *Real Time Clock* se pueden apreciar en el **Anexo 12**.

5.5.3 Switch por medio de un transistor

Este componente es muy importante ya que permite hacer cerrar o abrir el circuito para el encendido del circuito principal, para este se requiere que sea de potencia ya que el voltaje y corriente que le llega por parte del comparador es muy alta por esto se sugiere un transistor IRFZ44 que tiene un VGS de +/- 20V. Este transistor une las tierras del circuito principal con los circuitos de alimentación haciendo que sean las mismas o quede el circuito abierto cuando el RTC encienda su alarma.

A continuación, se muestra el diseño e integración de los ítems anteriormente mencionados, ya que este se probó en *protoboard* junto con la programación del microcontrolador, el código se encontrará adjunto en los anexos. En el **Anexo 13** se puede observar el circuito de conmutación para poder encender y apagar el sistema.

6. Transmisión, recepción y análisis de datos

Los sensores anteriormente mencionados se comunican de manera alámbrica con el procesador *Onion Omega2+* por medio del protocolo de comunicación I2C. Con este protocolo se tiene al procesador como maestro y a los cuatro sensores como esclavos. En la Figura 7 se puede observar el diagrama de conexión I2C. Este protocolo fue diseñado para comunicar diferentes dispositivos que trabajan a velocidades relativamente bajas, donde se comunican de manera serial y sincronizada [21]. Las líneas de comunicación que comparten los dispositivos son dos, la SCL la cual es la línea de reloj para la sincronización generada por el maestro y la SDA la cual es la línea bidireccional por donde se desplazan los datos. Cuando el maestro solicita a un esclavo enviar sus datos, lo hace por medio de la dirección I2C que identifica a cada uno de los esclavos.

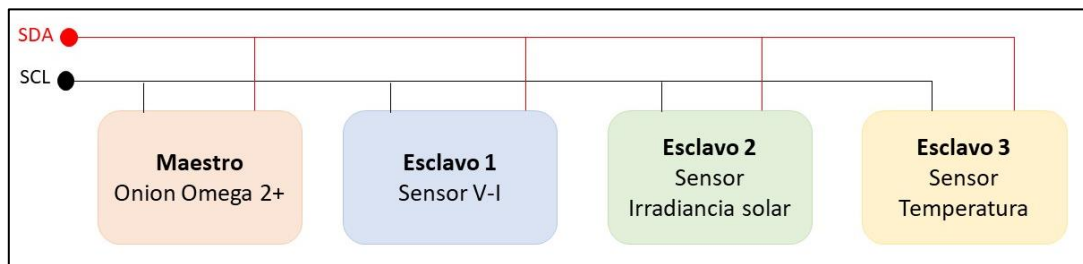


Figura 7. Conexión I2C.

Cada 0.5seg se realiza el muestreo de datos por parte del microprocesador. Después de que los datos han sido adquiridos por la *Onion Omega 2+*, ésta debe realizar su envío para su posterior análisis en la nube.

Este envío lo realiza a partir de la interconexión inalámbrica por medio del protocolo *Wifi* 802.11, haciendo uso del protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol) por sus siglas en inglés, el cual permite la comunicación máquina a máquina y que, a su vez, consume muy poco ancho de banda y permite la comunicación a través de publicación/suscripción para tener una comunicación bidireccional real. El modelo de mensajes publicación/suscripción ofrece una potente abstracción para multidifusión o comunicación en grupo. La operación publicar permite al proceso difundir a un grupo de procesos, y la operación suscribir permite a un proceso escuchar dicha difusión de mensajes[22].

6.1 Tiempos de transmisión

Para evitar los problemas de *jitter* en el muestreo de la adquisición de datos, se crearon diferentes hilos o *Threads* los cuales permiten separar tareas complejas en tareas más simples y concretas. Un hilo es un flujo de ejecución separado, esto significa que el programa tendrá varias cosas sucediendo a la vez [23], de esta forma, si un proceso falla, no bloquea toda la aplicación y asegura que la frecuencia de adquisición sea siempre la misma y si hay un retraso en la ejecución principal los datos siempre son tomados.

6.2 Motor de analítica

Para realizar la recolección de datos y su posterior análisis se escogió Thingspeak, una aplicación y API de Internet de las Cosas de código abierto para almacenar y recuperar datos usando el protocolo HTTP a través de Internet.

Este servidor permite recibir una solicitud cada 15 seg en su versión estudiantil, así que, cada variable será enviada desde el procesador cada 20 segundos para asegurar su envío y enviarán 50 muestras de cada variable así que el tiempo que durará esta transmisión será de aproximadamente 20 minutos.

Cada variable enviada tiene un procesamiento previo realizado en el procesador antes de hacer el envío, este consiste en hallar el promedio de 20 muestras para así tener una mayor tomada de datos y así no enviar un dato puro cada 2 minutos porque se tendría que tomar por un tiempo mayor y así interrumpir la generación de energía.

La nube tiene una configuración por canales, en los cuales puede haber hasta 8 campos para envío de variables, ya sean recibidas desde el procesador o creadas durante el análisis para utilizarlas posteriormente para alguna notificación o visualización. De acuerdo con lo anterior en este proyecto se crea un solo canal con 5 canales de variables a enviar y 3 de avisos de falla.

6.3 Matlab en la nube

Debido a que Thingspeak es propiedad de MathWorks, es posible implementar para esta aplicación la herramienta *Matlab Analysis*, la cual permite explorar los datos recolectados por un canal, crear modelos a partir de los datos recolectados y aplicar funciones de *Matlab* soportadas en *Thingspeak*.

Para el análisis de los datos en dos rangos de tiempo diferentes, Thingspeak tiene la función `thingSpeakRead` la cual permite tomar los datos de cada canal en donde se encuentra cada variable. Esta función deja tomar una cantidad de datos dependiendo del rango de tiempo en el que se tomaron y lo muestra en una tabla, lo

anterior se debe hacer dos veces en diferentes intervalos de tiempos. Posteriormente se procede a sacar el promedio de los dos vectores de datos tomados para cada variable. Se hace la derivada de las variables ya que se busca mirar que tanto cambia un valor con respecto al otro. Con esto se procede a hacer la verificación de las fallas con el voltaje a circuito abierto, la corriente a corto circuito y la correspondencia de irradiancia con la corriente que se explicaran en la sección **7. Análisis de datos** con más detalle.

Cuando el análisis encuentra una falla en el panel cambia una variable que se envía a un canal específico ya que para generar la notificación se requiere un canal para cada notificación de falla y de un aviso diferente como se evidencia en la sección 10. Protocolo de pruebas.

Asimismo, se planificó el análisis para que se activara cada hora ya que la nube permite que esto quede programado, adicional en el código se especificó el rango de horas de trabajo de 6:00am a 6:00pm hora Colombia ya que es el tiempo en el que el sistema estará operando.

Cada paso del análisis se realizó por medio de funciones creadas y funciones que permite utilizar Matlab ya que se requiere que se haga el mismo proceso para cada variable.

Por un lado, en el **Anexo 16** se puede encontrar el código implementado para el análisis en la nube Thingspeak por medio de Matlab. Por otro lado, en el **Anexo 17** se encuentra el código implementado en el procesador Omega Onion 2.

7. Análisis de datos

Para el análisis de datos, se estableció una conexión entre el canal de Thingspeak que contiene los datos medidos y Matlab. De esta manera los datos pueden ser manipulados desde esta plataforma.

Lo primero que se hace con estos datos es sacar el promedio de cada una de las variables en dos rangos de tiempo diferentes (dos horas diferentes) para hacer su comparación y verificar su variación y correspondencia (Irradiancia solar, Temperatura, Corriente, Voltaje y Potencia), esto se hace con la intención de evitar falsas alarmas que se pueden presentar a razón de nubes o sombras que pasen sobre el panel solar por un corto periodo de tiempo. Así, el promedio de cada variable es un valor representativo de las variables promediadas que nivela los valores del vector de datos mediante la rebaja del exceso de valor en los datos mayores para incorporarlo a la falta de valor en los datos menores.

Luego de obtener el resultado de la media de cada variable, se proceden a realizar las funciones que permitirán la detección de cada una de las fallas. Para este sistema se escogieron tres tipos de falla, la primera será la falla por medio de la corriente a corto circuito, la segunda será la falla por medio del voltaje a circuito abierto y la tercera la falla por la relación entre irradiancia y corriente a corto circuito.

7.1 Detección de falla a partir de la corriente a corto circuito

En la curva característica de voltaje vs corriente del panel solar fotovoltaico en la Figura 6, se puede observar que su máxima corriente es de 1.23A. En condiciones de falla los paneles se comportan como fuentes de corriente. La corriente de cortocircuito es apenas superior a la corriente de máxima potencia[24]. De esta forma, midiendo la corriente de cortocircuito del panel se puede saber si este presenta una falla.

El algoritmo para saber si el panel presenta una falla a partir de la corriente a corto circuito se puede observar en la Figura 8. Este algoritmo lo que hace es solicitar a la nube los datos recolectados de la medición de corriente a corto circuito para almacenarlos en un vector, luego de esto, realiza un promedio de los datos contenidos en este vector, a partir del dato de corriente a corto circuito promedio se realiza un condicional para saber si el valor de este promedio es mayor o igual a 1.23A el cual es el valor de la máxima corriente a corto circuito dada por el fabricante, si no se cumple esta condición, el algoritmo se devuelve al primer estado, si no, se envía una alerta vía Twitter por cambio de corriente. A continuación, se evidencia un diagrama en flujo que muestra el proceso del análisis:

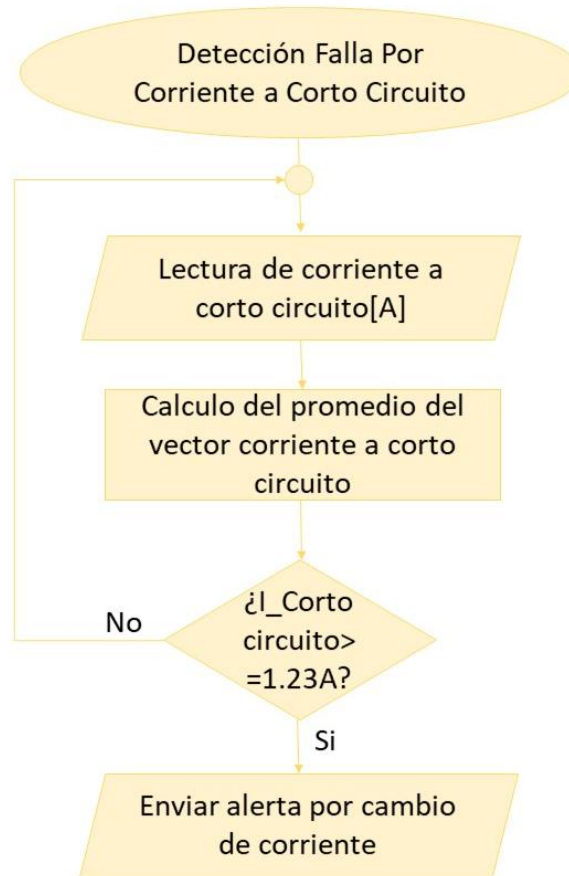


Figura 8. Diagrama de flujo - Algoritmo de detección de falla en el panel solar a partir de la corriente a corto circuito

7.2 Detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto

En paneles solares fotovoltaicos, el voltaje máximo es alcanzado con niveles muy bajos de insolación, el voltaje a circuito abierto del panel utilizado se puede observar en la curva de voltaje vs corriente en la Figura 6 siendo éste de 21.6V.

El algoritmo para saber si el panel presenta una falla a partir del voltaje a circuito abierto se puede observar en la Figura 9. Este algoritmo solicita a la nube los datos recolectados de la medición de voltaje cuando el panel no tenga ninguna carga, es decir a circuito abierto, luego los almacena en un vector, para después, sacar un promedio de los datos contenidos en este vector, a partir del dato de voltaje a circuito abierto promedio se realiza un condicional para saber si el valor de este promedio es mayor o igual a 21.6V el cual

es el valor del máximo voltaje en este panel solar según el fabricante, si no se cumple esta condición, el algoritmo se devuelve al primer estado, si no, se envía una alerta vía Twitter por voltaje a circuito abierto.

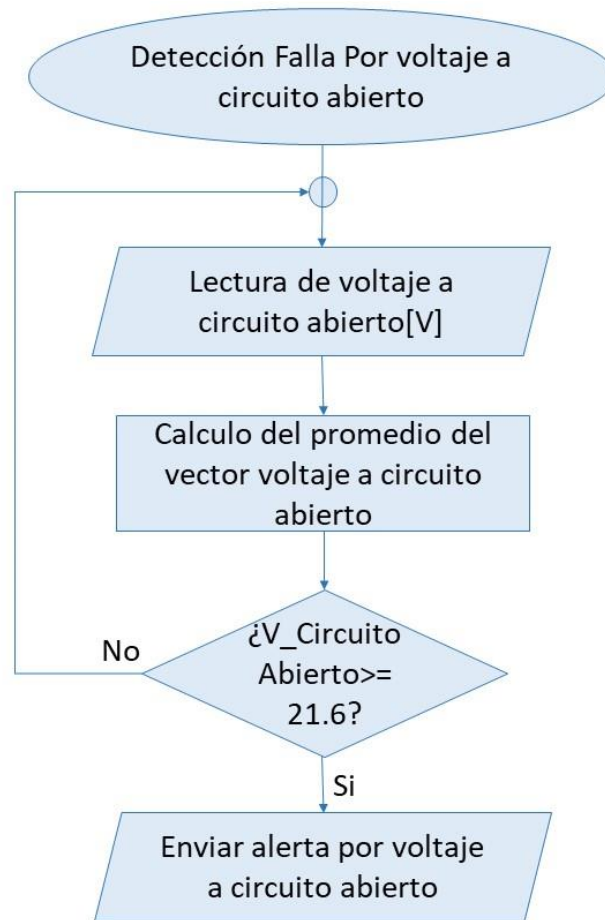


Figura 9. Diagrama de flujo - Algoritmo de detección de falla en el panel solar a partir del voltaje a circuito abierto

7.3 Detección de falla a partir de la relación entre corriente a cortocircuito e irradiancia solar

Los parámetros de mayor influencia sobre la curva I-V de una celda fotovoltaica serán la irradiancia y la temperatura. Por un lado, dado que la corriente de carga generada a partir de la radiación lumínica es proporcional al flujo de fotones con energía superior a la anchura de la banda prohibida (gap), la intensidad de cortocircuito de una celda solar es directamente proporcional a la intensidad de la iluminación incidente: ante un determinado aumento o disminución porcentual de la iluminación, la intensidad se ve modificada con un cambio porcentual similar en el mismo sentido[25]. En la $(Irradiancia_{Solar}(actual) \rightarrow x$

Ecuación 1) se puede observar la regla de tres que se llevó acabo en el algoritmo para poder hacer la estimación de corriente a cortocircuito dependiendo de la irradiancia solar.

$$Irradiancia_{Solar}(Instante1) \rightarrow Corriente_{Cortocircuito}(Instante1)$$

$$Irradiancia_{Solar}(actual) \rightarrow x$$

Ecuación 1. Regla de tres – relación irradiancia solar con corriente a cortocircuito

El algoritmo para saber si el panel presenta una falla a partir de la relación entre corriente a cortocircuito e irradiancia solar se puede observar en la Figura 10. Este algoritmo solicita a la nube los datos recolectados de la medición de irradiancia solar y hace la estimación de cuánta debería ser la corriente a cortocircuito en esas condiciones de irradiancia. Esta estimación la hace basado en un experimento llevado a cabo en el presente trabajo de grado en la (sección 10. Protocolo de pruebas).

Luego de esto, solicita los datos de corriente a corto circuito para comparar entre la corriente medida y la corriente estimada. Si estas corrientes no tienen una variación del 3% que fue el porcentaje calculado para corroborar la veracidad del sensor de irradiancia solar con respecto al piranómetro (sección 10.1.1 Sensor de irradiancia solar), el algoritmo vuelve al primer estado.

De lo contrario, se realiza el cálculo de la corriente aproximada máxima dependiendo de la irradiancia que se tiene actualmente sumando al valor de corriente leída su 15% y la corriente mínima restando al valor de corriente leída su 15%. Este 15% es el valor resultado del experimento (10.2 Prueba correspondencia de irradiancia solar con corriente a corto circuito).

Por último, realiza un condicional para saber si la corriente estimada no es menor a la corriente mínima, o mayor a la corriente máxima (anteriormente calculadas). De cumplirse esta condición, enviará una alerta por cambio de corriente, de lo contrario, el algoritmo se devolverá al primer estado.

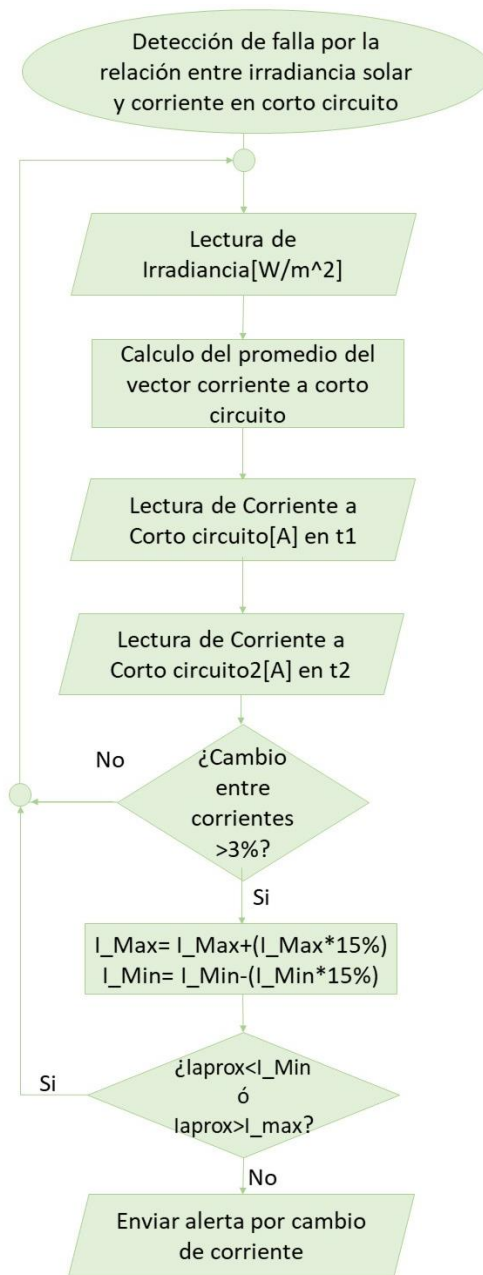


Figura 10. Diagrama de flujo- Algoritmo de detección de falla a partir de la relación entre corriente a cortocircuito e irradiancia solar

7.4 Alerta por aumento en la temperatura ambiente

En España, por causa de la ola de calor de julio de 2015, las temperaturas subieron hasta los 45° C. La producción de las instalaciones fotovoltaicas, cayeron un 4% a 5% de la producción habitual que habrían tenido con una temperatura de 10° C menos [26].

Por medio del sensor de temperatura escogido para el presente trabajo, se realizó la adquisición de esta variable. Por medio de un condicional se puede conocer si la temperatura del ambiente es igual o mayor a 45°C (**Ecuación 2**), la cual es la temperatura que empieza a afectar de manera significativa al panel solar.

Temperatura $\geq 45^{\circ}\text{C}$

Ecuación 2. Condición para enviar alarma por aumento en temperatura ambiente.

Si esta condición se cumple, el sistema enviará una alerta al usuario.

8. Alarma

La nube escogida cuenta con una herramienta llamada *React*, esta aplicación realiza una acción cuando los datos de un canal en específico cumplen una cierta condición preestablecida. Para este caso la reacción será hacer un post vía Twitter, alertando sobre una posible falla en el panel solar las cuales pueden ser una falla a partir de la relación entre corriente a cortocircuito e irradiancia solar, detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto y detección de falla a partir de la corriente a corto circuito.

Para esta alarma, es necesario activar una variable desde Matlab que se comuniquen con el canal donde se encuentran los datos recibidos. Se hizo una alarma para cada tipo de falla, como se evidencia más adelante. Se ha escogido Twitter como servicio de microblogging ya que es un servicio de fácil acceso, sin costo ni vencimiento de suscripción y el espacio de almacenamiento que necesita en un dispositivo móvil es de 71MBites.

9. Interfaz de Usuario

Se detectó la necesidad de crear una interfaz de usuario que permitiera al cliente ver el estado de sus paneles solares sin afectar de alguna manera los datos. De esta forma por medio del editor de texto Notepad++ y el lenguaje utilizado para el desarrollo de páginas web HTML (Lenguaje de marcas de hipertexto) se creó un *dashboard* el cual importa las gráficas desde Thingspeak de todas las variables tomadas y las actualiza en tiempo real igual que en el servidor (Anexo 7). Es importante contar con esta herramienta ya que el cliente puede tener conocimiento control y tomar las acciones necesarias para el mantenimiento inmediato de los paneles solares.

10. Protocolo de pruebas

Para el protocolo de pruebas se delinearon diferentes procedimientos a seguir para comprobar la validez de los algoritmos de detección de fallas, junto con la adquisición y envío de datos integrado en este proyecto. Al no tener los equipos necesarios para recrear cada falla, se debió buscar un método que permitiera simular el comportamiento del panel solar fotovoltaico sin exponer el mismo. Para validar cada falla se hacen mínimo diez pruebas por cada una, variando los diferentes valores de voltaje a circuito abierto, corriente a corto circuito e irradiancia solar, ya que, son las variables críticas que generan la notificación en el sistema.

Primero se comparará el estado normal del panel en dos rangos de tiempo diferentes, posteriormente se compara el panel en estado normal en un rango de tiempo y se procede a comparar con datos preestablecidos

donde se evidencia una falla de cada una de las detecciones que este sistema está teniendo en cuenta. A continuación, se explicará el protocolo de pruebas de cada falla.

10.1 Pruebas sensores

El protocolo de pruebas aplicado a los sensores consistió en verificar su correcto funcionamiento. Para esto fue necesario encontrar dispositivos de mayor resolución que pudieran verificar que la lectura de los sensores escogidos es confiable. Para esto se tomaron aproximadamente 40 datos para cada par de dispositivos y se procedió a calcular la desviación estándar de cada vector y su error relativo porcentual (**Ecuación 3**). Esto para garantizar que las medidas tomadas sean lo más parecido a la realidad.

$$Error_relativo_porcentual = \left| \frac{Valor_{real} - Valor_{aproximado}}{Valor_{real}} \right|$$

Ecuación 3. Error relativo porcentual.

En esta sección se demostró que para cada sensor el error que presentaba era bajo y aceptable si se comparaba con un instrumento de alta calidad. Con esto se comprueba la calidad de la adquisición de las señales.

10.1.1 Sensor de irradiancia solar

La primera comparación realizada fue la del sensor de irradiancia escogido y el piranómetro *Solar Power Meter TM-206* el cual tiene una precisión típica de +/- 5%. Se tomaron 47 datos provenientes de cada uno de estos dispositivos al mismo tiempo, en la Figura 11 se puede apreciar la gráfica resultante de esta toma de datos.

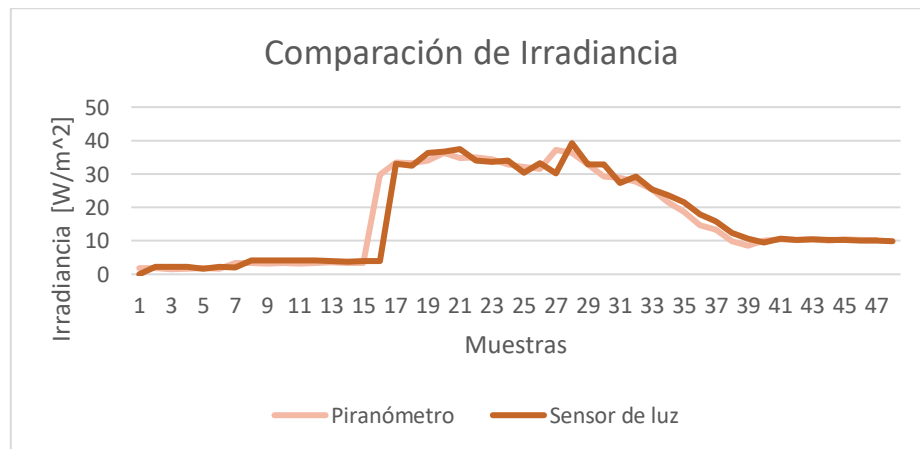


Figura 11. Comparación de Irradiancia solar, piranómetro vs sensor

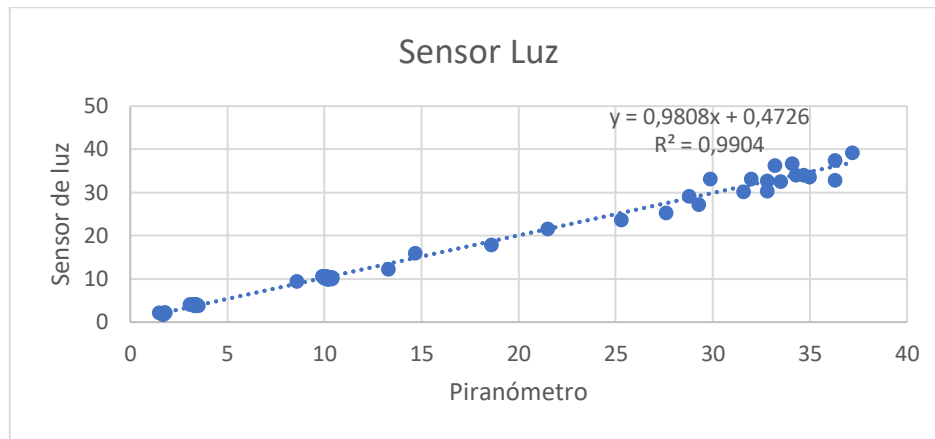


Figura 12. Sensor de luz vs piranómetro

A partir de los datos tomados se pudo calcular el error relativo porcentual entre los resultados de los dos dispositivos el cual es del 1,4458% para esta aplicación se consideró que para ser más estricta esta condición y descartar algún error por parte del sensor, este valor debería ser por lo menos del doble del porcentaje calculado, por esta razón se estableció 3% como el error máximo porcentual entre las dos mediciones al momento de realizar el análisis en la nube.

10.1.2 Sensor I-V

La segunda comparación realizada fue la del sensor de corriente y voltaje escogido y el *DVM Agilent 34450A* (*Digital Voltimeter*) por sus siglas en inglés, el cual tiene una precisión típica de $\pm 0.015\%$ [27]. Se tomaron 76 datos provenientes de cada uno de estos dispositivos al mismo tiempo, en la Figura 13 se puede apreciar la gráfica resultante de esta toma de datos.

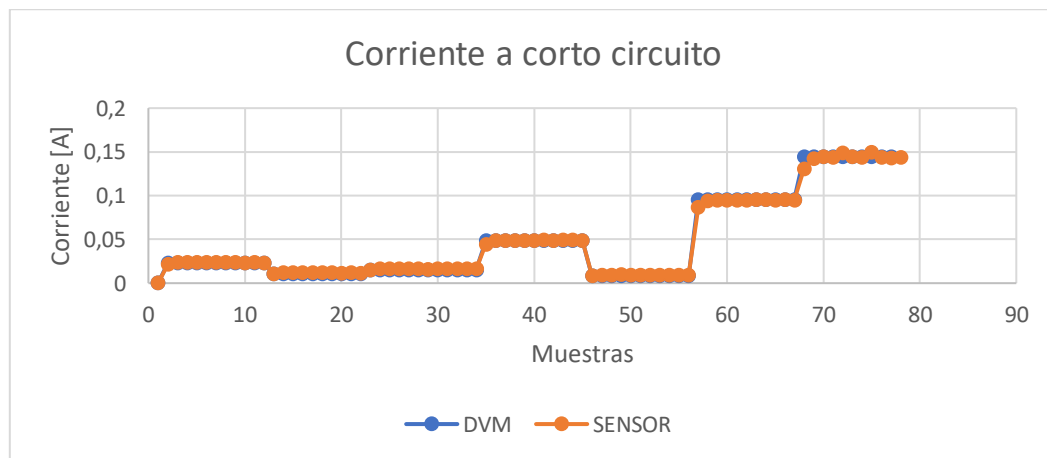


Figura 13. Medición de corriente a corto circuito

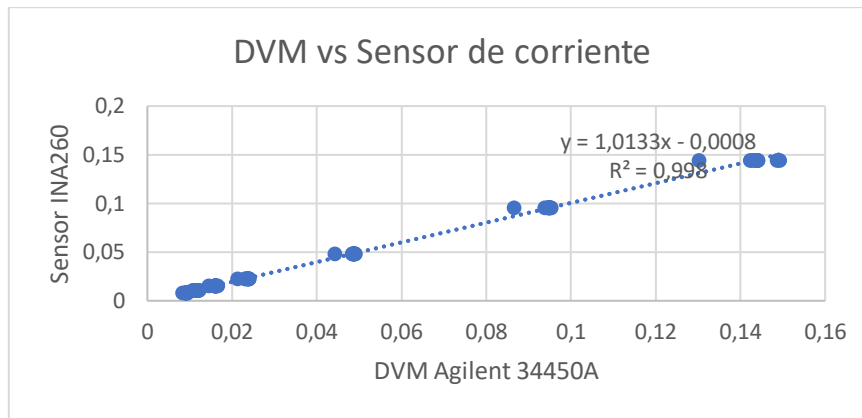


Figura 14. Comparación DVM vs Sensor.

Posteriormente se utilizó el mismo cálculo de la Ecuación 3 anteriormente presentado, a los datos tomados, dando un error del 1.4106% que en el algoritmo es utilizado con todas las cifras encontradas para tener una mayor precisión en la toma de la decisión en el algoritmo de análisis.

Método	Desviación estándar
DVM	0,048288655
Sensor	0,047607468
error relativo porcentual	1,410655654

Tabla 4 Cálculo error relativo porcentual entre el DVM y el sensor.

10.1.3 Sensor de temperatura

La tercera comparación realizada fue la del sensor de temperatura escogido y el termómetro digital Fluke 51 II (Ver Anexo 15). En la Figura 15 se puede observar la gráfica de la temperatura medida por medio de estos dos métodos, en esta se puede apreciar la gran similitud de las señales.

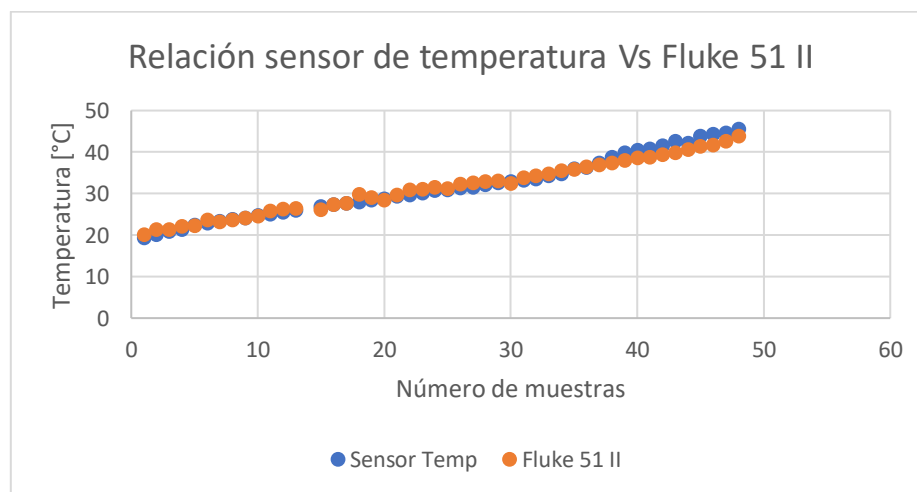


Figura 15. Relación entre el sensor de temperatura y el termómetro digital.

En la Tabla 5 se puede observar la desviación estándar con la que se calcula el error relativo porcentual entre las medidas tomadas por medio de los dos dispositivos, la cual fue de 12,8% aproximadamente. Este

error no tiene mucho efecto para esta aplicación, ya que, la temperatura es una variable que no tiende a presentar grandes cambios en el tiempo.

Método	Desviación estándar
Sensor Temperatura	7,365656115
Fluke 51 II	6,530383312
Error relativo porcentual	12,79056318

Tabla 5. Error relativo porcentual entre los métodos usados.

10.2 Prueba correspondencia de irradiancia solar con corriente a corto circuito

Esta prueba se realizó midiendo la corriente que genera el panel solar y cambiando la intensidad de irradiancia solar que le llegaba por medio de las lámparas de luz incandescente del laboratorio. Debido a que no se tenía una fuente de iluminación adicional, el rango de las mediciones fue restringido por lo que se hicieron varias combinaciones con las cuatro lámparas y sus diferentes intensidades, como se evidencia en la Figura 16. De esta forma se pudo comprobar la relación entre irradiancia solar y la corriente a corto circuito en un panel solar, mencionado en la sección de 7.3. Los datos encontrados se encuentran en los anexos.

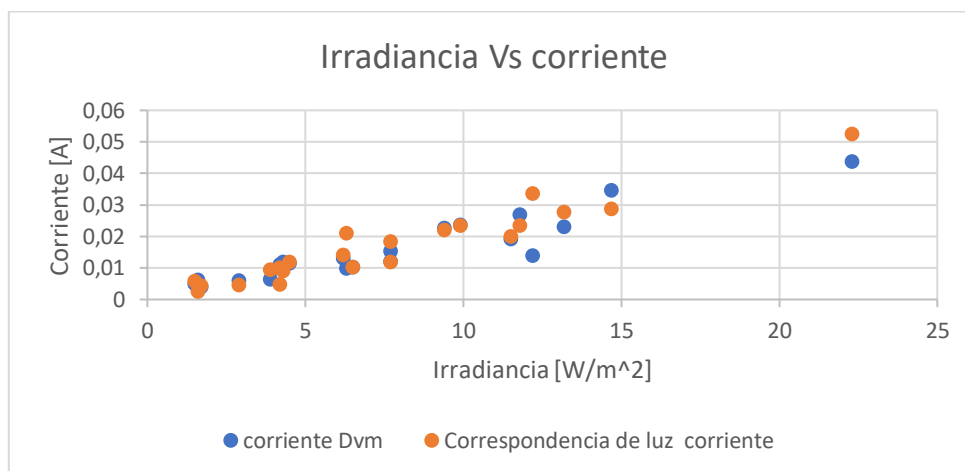


Figura 16. Irradiancia vs corriente.

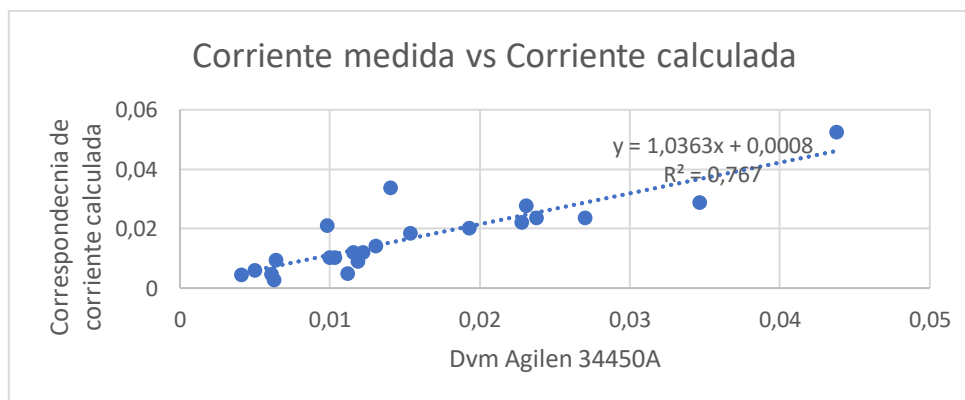


Figura 17. Corriente medida vs Corriente calculada

En la Tabla 6 se evidencia la desviación estándar de cada señal junto con su error relativo porcentual, este error fue el utilizado en el análisis en la nube para decidir si se presentó una falla o no dependiendo de la luz y la corriente a corto circuito.

Método	Desviación estándar
DVM	0.01010585
Correspondencia de corriente	0.011958053
error relativo porcentual	15.48917298

Tabla 6. Error relativo porcentual entre DVM vs corriente por correspondencia de irradiancia

10.3 Pruebas sistema de conmutación

Se realizó la prueba del funcionamiento de los pines *GPIO* para revisar el funcionamiento del esquemático de la Figura 3 teniendo ya el circuito impreso y corroborar su comportamiento con la Tabla 1. Esta prueba se realizó utilizando el equipo de laboratorio: la fuente de voltaje y el osciloscopio. De esta forma, se pudo verificar el correcto comportamiento por medio de la corriente exigida a la fuente por el circuito, ya que cuando se encontraba en configuración de corto circuito (1,1), la fuente entraba en protección, cuando los interruptores se encontraban en la configuración de voltaje abierto (0,1), la corriente pedida por la carga a la fuente era cero y finalmente, si la configuración de los interruptores era la de funcionamiento normal (0,0), la corriente solicitada eran 120mA.

10.4 Pruebas motor analítica (Correcta detección de fallas)

Para comprobar funcionamiento del análisis en el motor de analítica y de las fallas primero se probó cada función con vectores de prueba con valores que emularan el comportamiento de la función que se desea evaluar, ya sea corriente a cortocircuito, voltaje a circuito abierto o irradiancia solar. Los valores de los datos de estos vectores se hicieron teniendo en cuenta las señales que se van a encontrar en la vida real con el panel y los límites de las fallas ya establecidas.

Finalmente, se comprobó que se generaran las variables de aviso (banderas) necesarias según la falla y su correspondiente notificación en Twitter. Posteriormente, se procede a la toma de los datos con el panel, la emulación de las fallas y su posterior análisis.

10.4.1 Prueba detección de falla a partir de la corriente a corto circuito

La prueba de esta falla se realiza a partir de la simulación de corriente a corto circuito por medio de una fuente de voltaje. La limitación de corriente de esta fuente se ajustó en valores desde 1.23A en adelante para el desarrollo de estas pruebas.

Por medio de la implementación del circuito de la Figura 3 se realiza la conmutación que permite la conexión de los dos extremos del panel solar, sin embargo, en este caso se realiza el corto entre los dos extremos de la fuente de voltaje, ya que, hacerlo en el panel podría resultar en daños irreversibles para el mismo y la universidad no cuenta con el equipo necesario para emular esta falla de manera segura para el panel.

De esta forma, se tomarán diez datos de corriente a corto circuito en funcionamiento normal y al cumplirse la configuración de los pines *GPIO* para corto circuito, la fuente alcanzará su limitación de corriente. Como

consecuencia, el motor de analítica envió una notificación al usuario alertándolo sobre una posible falla en su panel solar. En la Figura 18 se puede observar la gráfica de corriente a corto circuito donde se comporta de acuerdo con lo esperado para la detección de esta falla.

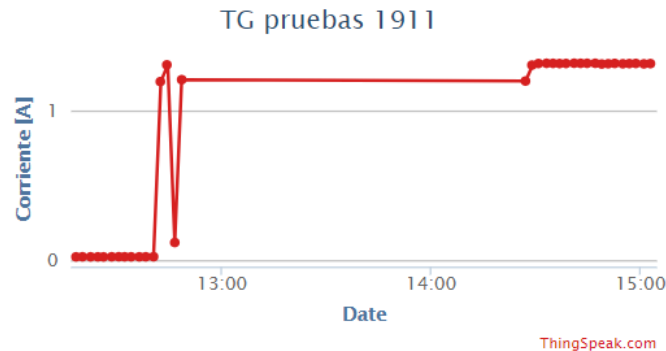


Figura 18. Gráfica de prueba detección de falla a partir de la corriente a cortocircuito.

En la Figura 19 se puede observar que la bandera *ShortCircuit* se activa después de un tiempo de haberse cumplido de la condición de detección de falla a partir de la corriente a cortocircuito.

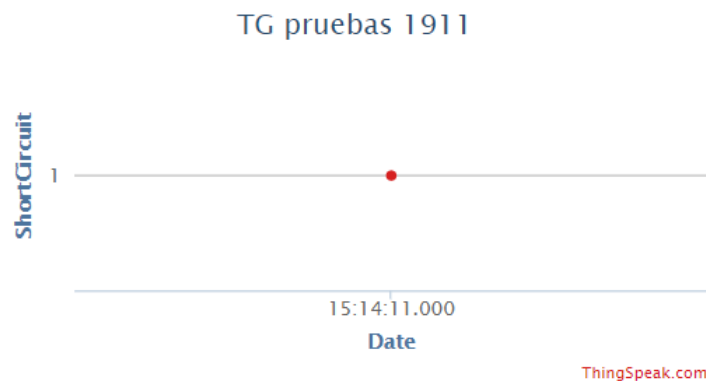


Figura 19. Activación de bandera *ShortCircuit* cuando se detecta una falla a partir de la corriente a corto circuito.

10.4.2 Prueba detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto

La prueba de esta falla se realiza a partir de la simulación de voltaje a circuito abierto, por medio de una fuente de voltaje. El voltaje de esta fuente se ajustó de 21.6V en adelante para el desarrollo de estas pruebas.

Por medio de la implementación del circuito de la Figura 3 se realiza la conmutación que permite la desconexión de la carga al panel, sin embargo, en este caso se realiza la desconexión de la fuente de voltaje a la carga.

De esta forma, se tomarán diez datos de voltaje en funcionamiento normal y al cumplirse la configuración de los pines *GPIO* para voltaje a circuito abierto, el voltaje en esta condición supera el valor dado por el datasheet, como consecuencia, el motor de analítica envió una notificación al usuario, alertándolo sobre una posible falla en su panel solar. En la Figura 20 se observa la gráfica del voltaje en el tiempo, de esta forma

se puede observar cuando los datos arrojan un comportamiento normal del panel en el voltaje y luego, cuando éste se eleva describe el comportamiento de voltaje a circuito abierto.

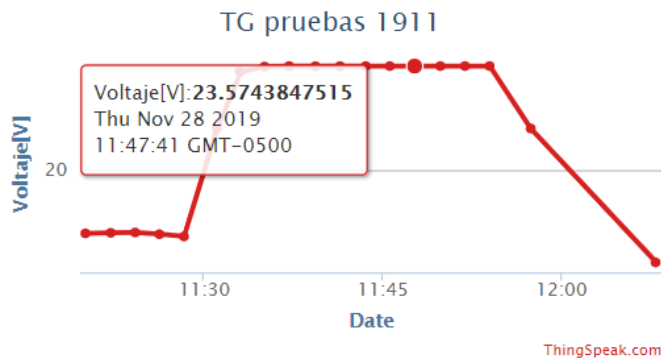


Figura 20. Gráfica de prueba de detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto.

En la Figura 21 se puede observar que la bandera VopenCircuit se activa después de un tiempo de haberse cumplido de la condición de detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto.

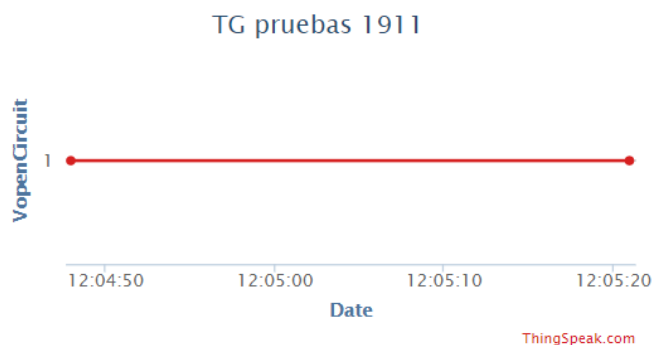


Figura 21. Activación de bandera VopenCircuit cuando se detecta una falla a partir del voltaje a circuito abierto.

10.4.3 Pruebas de detección de falla a partir de la relación entre corriente a cortocircuito e irradiancia solar

Para comprobar la falla de correspondencia de luz con corriente a cortocircuito, se realizó el siguiente procedimiento:

Primero se tomaron los datos del comportamiento del panel solar en condiciones normales con una irradiancia específica y que corresponda con la corriente que está generando el panel, es decir que la luz que reciba el panel sea la misma que recibe el sensor de luz. Lo anterior se debe a que, para emular la falta de correspondencia, sobre el sensor de irradiancia debe incidir una cantidad de luz diferente de la que está incidiendo sobre el panel.

Posteriormente, se procede a realizar el análisis en el motor de analítica. Para este análisis, se obtiene el promedio de todas las variables. Luego, se comprueba que no cumplan con ninguna de las fallas anteriormente mencionadas (corriente a cortocircuito y voltaje a circuito abierto) y se procede a realizar la derivada de la irradiancia, ya que, de ésta depende el cambio de la corriente. Para implementar esta derivada

se almacenan dos vectores de datos tomados en dos momentos de tiempo diferente X_n y X_{n-1} y se aplica la Ecuación 4 y se obtiene la diferencia entre cada uno de los vectores de datos.

$$Y_n = X_n - X_{n-1}$$

Ecuación 4. Derivada irradiancia solar.

Se realiza el cálculo de la derivada ya que se quiere ver que tanto cambio la variable en el tiempo con un cambio del 3%, este rango corresponde al doble del error encontrado mencionado en la sección 10.1.2 que se considera como un criterio que permite establecer que efectivamente si hay un cambio en la irradiancia.

Luego, si se encuentra que el valor supera este rango se procede a verificar si con la irradiancia y corriente previa, la irradiancia corriente actual corresponde a la corriente aproximada en +/-15%, método mencionado en la sección 10.2. Si se encuentra que le valor promedio pasa estos rangos se procede a cambiar la variable correspondiente y verificar que llegara la notificación a Twitter.

En la Figura 22 se observa la gráfica de la irradiancia solar tomada desde Thingspeak.

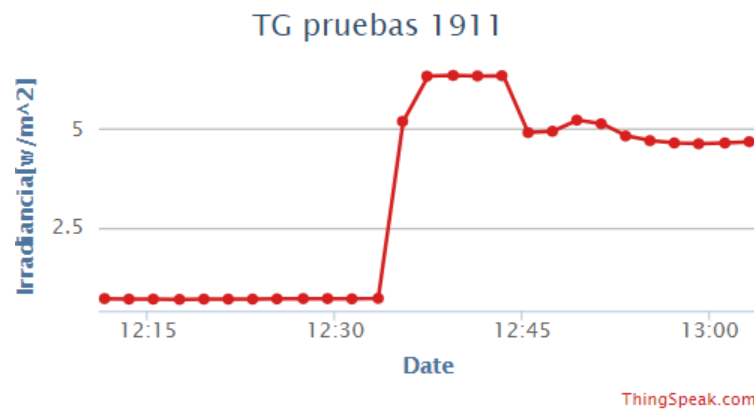


Figura 22. Gráfica de irradiancia solar tomada de la nube.

En la Figura 23 se observa la gráfica de la corriente a corto circuito en el panel solar tomada desde la nube. De esta forma se observa que el comportamiento de estas dos variables no se evidencia de la forma esperada, es decir, proporcionalmente. Cuando se presenta la mayor incidencia de irradiancia solar, la corriente a cortocircuito cae a los valores más bajos.

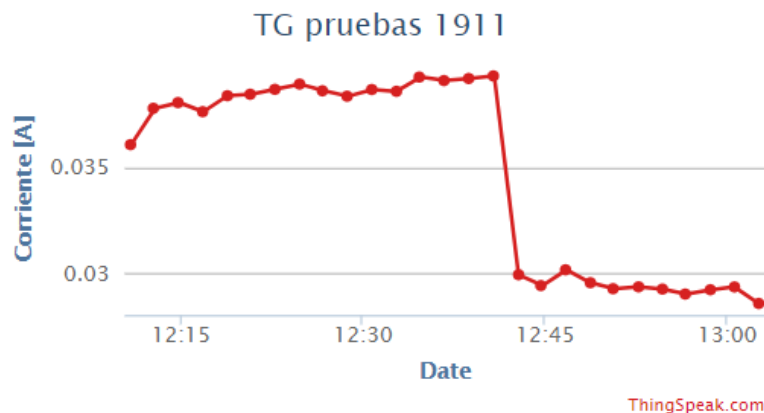


Figura 23. Figura 21. Gráfica de corriente tomada de la nube.

En la Figura 24 se puede observar que la bandera cc se activa después de un tiempo de haberse cumplido de la condición de detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto.

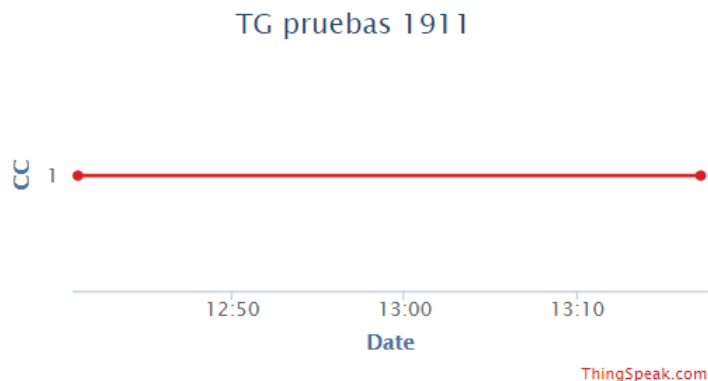


Figura 24. Activación de bandera cc cuando se detecta una falla a partir de la relación entre irradiancia y corriente a corto circuito.

10.5 Pruebas sistema de notificación al usuario

En esta sección se evalúa una correcta notificación vía Twitter al usuario. Las notificaciones que se prueban son:

- **Alerta por detección de falla a partir de la corriente de cortocircuito**

Para esta prueba se comprobó que después de que la bandera “ShortCircuit” fuera activada, el tweet fuera enviado al usuario alertándolo sobre una posible falla de corriente a cortocircuito en su panel solar. En la Figura 25 se puede observar la notificación generada vía Twitter.

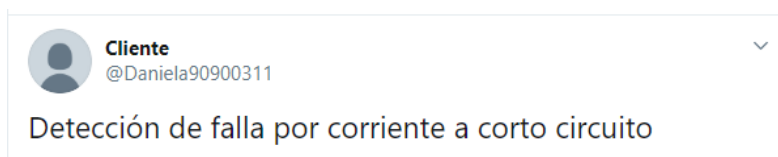


Figura 25. Notificación vía Twitter por detección de falla a partir de la corriente a corto circuito.

- **Alerta por detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto**

Para esta prueba se comprobó que después de que la bandera “VopenCircuit” fuera activada, el tweet fuera enviado al usuario alertándolo sobre una posible falla de corriente a cortocircuito en su panel solar. En la Figura 26 se puede observar la notificación generada vía Twitter.

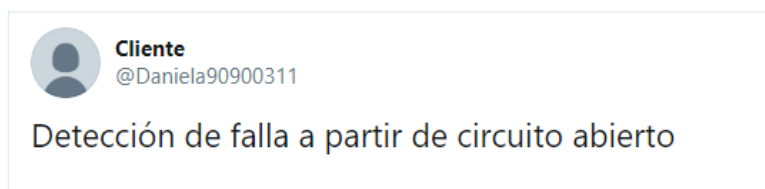


Figura 26. Notificación vía twitter - Detección de falla a partir del voltaje a circuito abierto.

- **Alerta por detección de falla a partir de la relación entre irradiancia solar y corriente a corto circuito**

Para esta prueba se comprobó que después de que la bandera “cc” fuera activada, el tweet fuera enviado al usuario alertándolo sobre una posible falla de relación entre irradiancia solar y corriente a cortocircuito en su panel solar. En la Figura 27 se puede observar la notificación generada vía Twitter.

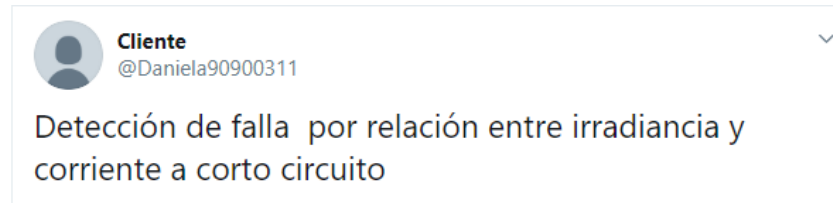


Figura 27. Detección de falla a partir de la relación entre irradiancia y corriente a corto circuito

- **Alerta por temperatura ambiente alta**

Para esta prueba se probó que al alcanzar los datos de la gráfica en la nube los 45°C , una alerta en Twitter se activa, avisando al cliente de condiciones ambientales extremas para la producción de energía. En la Figura 28 se puede observar la notificación generada vía Twitter.

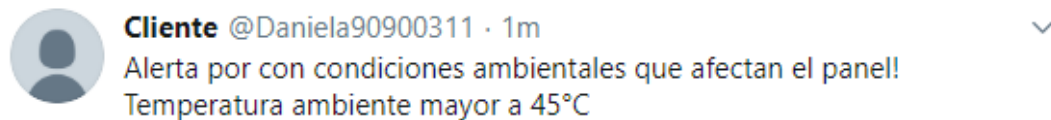


Figura 28. Alerta por temperatura ambiente mayor a 45°C

10.6 Pruebas Interfaz de interacción con el usuario

En esta sección se realiza una prueba para afirmar que toda la interfaz del usuario esté funcionando correctamente y que el motor de analítica conserve los datos ingresados. Para esto, se revisaron las gráficas en las dos plataformas y así comprobar que tuviesen los mismos datos transmitidos desde el microprocesador. En la Figura 29 se puede observar la interfaz de interacción con el usuario diseñada por medio del lenguaje HTML.

Trabajo de grado 19-11

En las siguientes gráficas se puede evidenciar el comportamiento del panel solar #1 así como algunas variables ambientales que lo afectan.

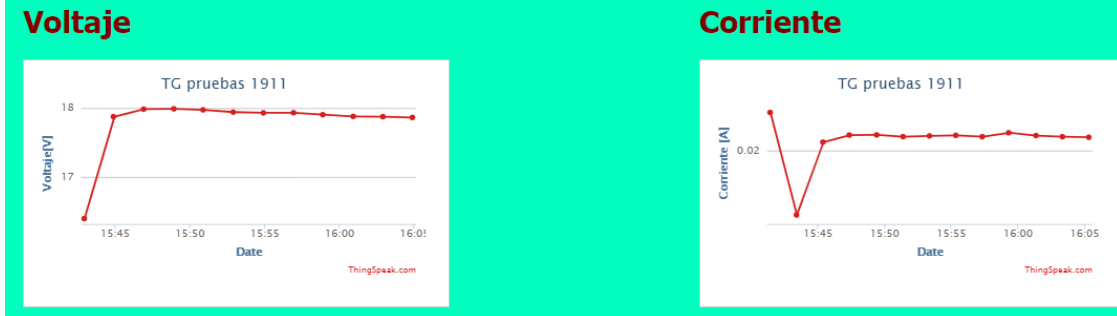


Figura 29. Interfaz de interacción con el usuario.

Este proceso se realizó para todas las señales adquiridas. En la Figura 30 se pueden observar las gráficas de voltaje y corriente y al compararlas con las de la Figura 29 se puede comprobar que son las mismas, ya que se actualizan en tiempo real.

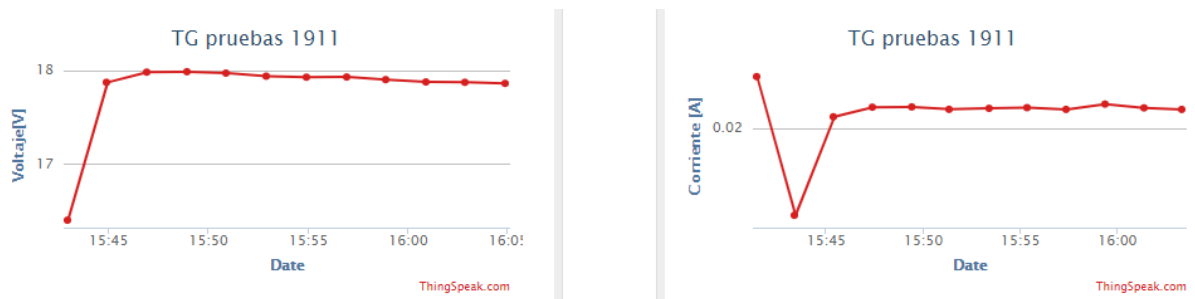


Figura 30. Graficas de V-I en la nube

11. Diseño – Base Presentación PCB

Para este trabajo de grado se diseñaron tres bases de presentación para los circuitos impresos por medio de la herramienta *Thinkercad*. Este es un programa gratuito de modelado 3D en línea que se ejecuta en un navegador web, conocido por su interfaz simple y facilidad de uso. Estos diseños se materializarán por medio de la técnica de corte láser sobre acrílico. Esto se hizo con motivo de dar una buena presentación física del prototipo. En el **Anexo 14** se puede encontrar cada diseño por separado.

12. Conclusiones

El presente trabajo de grado desarrolló un prototipo de sistema de monitoreo para paneles solares fotovoltaicos basado en la arquitectura IoT, de bajo consumo, el cual permite detectar fallas en estos dispositivos por medio del monitoreo de su corriente a corto circuito, voltaje a circuito abierto e irradiancia solar en el panel. De la misma manera, se realiza la transferencia de datos de los sensores al microprocesador por medio del protocolo I2C y del microprocesador al motor de analítica en la nube a través del protocolo *Wifi* 802.11 y el protocolo *HTTP*. Este servidor en la nube da una realimentación al usuario sobre alertas de detección de fallas en su panel solar. El consumo de este sistema en su total capacidad fue de 180mA. Según el protocolo de pruebas el sistema tiene un comportamiento de acuerdo con lo esperado y se puede comprobar que el prototipo cumple con los objetivos planteados.

Para el diseño de un sistema de monitoreo para paneles solares fotovoltaicos, es necesario hacer una investigación previa sobre las variables a medir, conocer las variables eléctricas y sus fenómenos físicos para realizar un correcto dimensionamiento del sistema, además, se debe realizar una búsqueda exhaustiva entre los sensores y los dispositivos electrónicos más adecuados para realizar este tipo de aplicación.

Es de suma importancia saber escoger el uso del microcontrolador pues para el desarrollo de este tipo de proyectos, es necesario conocer con cuál es el más adecuado pues otros microprocesadores son de mayor consumo, mayor precio, el tipo de comunicación que manejan, mayor tamaño o menor capacidad de procesamiento.

Conocer y comprender el funcionamiento de los diversos protocolos de comunicación es fundamental en el momento de realizar la lectura de la información y tener comunicación entre diferentes dispositivos que pueden llegar a usar el mismo canal, pues, si no se tiene claridad en dichos protocolos se puede perder recursos al no hacer uso apropiado del mismo.

Cuando el sistema está obteniendo los datos, es importante tener en cuenta a qué tasa de muestreo se va a realizar cada una de las mediciones para evitar errores de desincronización en la adquisición y el almacenamiento de datos.

Este prototipo puede ser implementado en lugares desde granjas solares hasta en hogares. Esto, con el fin de reducir pérdidas en la producción de energía que se traducen en pérdidas económicas, dándole una rápida solución a la falla que se haya presentado.

Como trabajo futuro, se plantea la implementación de un sistema de red inalámbrica como Sigfox o Zigbee para reducir el consumo de potencia y el costo de su despliegue, junto con la incorporación del circuito diseñado en la sección 5.5 Circuito para el ahorro de consumo y la detección de más tipos de fallas en el panel.

13. Anexos

En el siguiente enlace se puede encontrar la carpeta con todos los anexos posteriormente especificados:
<https://drive.google.com/open?id=1H6-QXiLpHVZEklf4oLJ1bmCgJPREVgAz>

Anexo 1

Datos de especificación Panel solar:

https://drive.google.com/open?id=1fGaBCVK2i08uy_O4k7HVA3DkB28MfpT0

Anexo 2

Circuito – Control de consumo:

<https://drive.google.com/open?id=1INitR8dIhyUn4QO5kkuTW3IYag61m6Ej>

Anexo 3

Datos de especificación del microprocesador:

<https://drive.google.com/open?id=1nnj4eG-Gk63aclBvBNOESV0QT4H34VQq>

Anexo 4

Datasheet sensor V-I:

<https://drive.google.com/open?id=1ldamm0fBRmG3jBjmq4a7wm-ePPaDtKtd>

Anexo 5

Datasheet sensor de temperatura:

https://drive.google.com/open?id=1e4NEBBfD2XDtQtZdy-VKtYSFtamMr8_4

Anexo 6

Datasheet sensor de Irradiancia solar:

https://drive.google.com/open?id=1ySJpYiy4HJqJZ8AvyKGa_--_WPVEQuKt

Anexo 7

Interfaz con el usuario HTML:

<https://drive.google.com/open?id=1yzbw6TMFUGueOWLrxeHEGnWGKEjohujd>

Anexo 8

Circuito - Conmutación:

https://drive.google.com/open?id=1A-ftZ08C0Zn2KZ_a4jArs7jqTETjBEfX

Anexo 9

Circuito - Principal:

<https://drive.google.com/open?id=1Z4-eDv8Qlv9fwMMtkLcUWQiVI9w1o0IE>

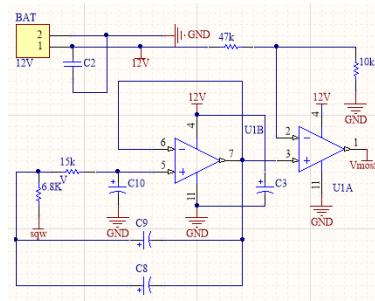
Anexo 10

Circuito – Irradiancia y Temperatura:

<https://drive.google.com/open?id=151jcmAYtYfzADBXXkxWu5ZMhsnhxYrY>

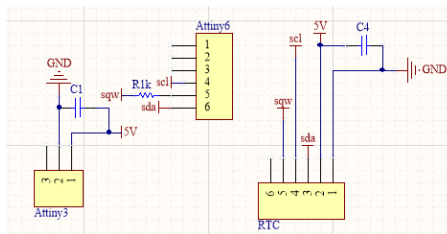
Anexo 11

Esquemático – filtro y circuito de promedio.



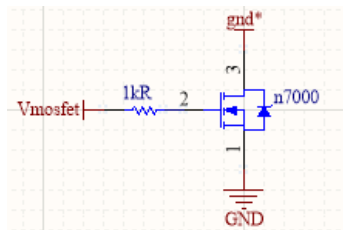
Anexo 12

Esquemático microcontrolador de bajo costo - RTC



Anexo 13

Esquemático - conmutación para encendido y apagado del procesador.



Anexo 14

Diseño Thinkercad – cajas pcb

https://drive.google.com/open?id=1-yqfbC_apfBI8QSDhPonyl-Rn-JP000

Anexo 15

Especificaciones - Termómetro digital Fluke 51 II

<https://www.fluke.com/es-co/producto/medicion-de-temperatura/termometros-infrarrojos/fluke-51-ii>

Anexo 16

Código implementado para en análisis en Thingspeak:

https://drive.google.com/file/d/1QFfPtAkWDbLsYEOf_513It66mqPGJoJg/view?usp=sharing

Anexo 17

Código implementado en el procesador Omega Onion 2:

https://drive.google.com/file/d/1g4cv0-cVCO-pXN_cHOz0Ae2UpgWmMlmd/view?usp=sharing

14. Bibliografía

- [1] Celsia, “Todo lo que debes saber sobre energía solar en Colombia.” [Online]. Available: <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>.
- [2] Celsia, “Energía solar en colombia asi es el panorama en cifras,” 2018. .
- [3] Y. Higuchi and T. Babasaki, “Classification of causes of broken solar panels in solar power plant,” *INTELEC, Int. Telecommun. Energy Conf.*, vol. 2017-Octob, pp. 127–132, 2017.
- [4] F. Delgado Ruiz, “Manual de mantenimiento - Planta solar fotovoltaica de 500kW sobre la cubierta de una nave industrial en la ciudad de Sevilla,” p. 57, 2017.
- [5] Revista Espacios, “No Title,” 2019. [Online]. Available: <http://www.revistaespacios.com/a19v40n18/a19v40n18p06.pdf>.
- [6] Chakray, “5 Requerimientos de una arquitectura IOT.” [Online]. Available: <https://www.chakray.com/es/5-requisitos-de-una-arquitectura-iot/>.
- [7] S. G. Hegde and Soumyalatha, “Study of IoT: Understanding IoT Architecture, Applications, Issues and Challenges,” *1st Int. Conf. Innov. Comput. Netw.*, no. January, pp. 477–482, 2017.
- [8] S. W. Lee, K. E. An, B. D. Jeon, K. Y. Cho, S. J. Lee, and D. Seo, “Detecting faulty solar panels based on thermal image processing,” *2018 IEEE Int. Conf. Consum. Electron. ICCE 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 1–2, 2018.
- [9] A. W.-L. Lo, W. Wang, R. W.-H. Lau, J. Zhang, H. S.-H. Chung, and A. C.-F. Liu, “Fault Diagnosis of Photovoltaic Panels Using Dynamic Current–Voltage Characteristics,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 1588–1599, 2015.
- [10] M. Aghaei, F. Grimaccia, C. A. Gonano, and S. Leva, “Innovative Automated Control System for PV Fields Inspection and Remote Control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 11, pp. 7287–7296, 2015.
- [11] A. S. Spanias, “Solar energy management as an Internet of Things (IoT) application,” *2017 8th Int. Conf. Information, Intell. Syst. Appl. IISA 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1–4, 2018.
- [12] Onion Omega, “Linux for Omega Beginners.” [Online]. Available: <https://docs.onion.io/omega2-docs/linux-for-omega-beginners.html>.
- [13] K. Features, P. Uses, P. O. Warranty, and W. Warranty, “RNG-20D RNG-20D.”
- [14] Zopefoundation, “DateTime.py.” [Online]. Available: <https://github.com/zopefoundation/DateTime/blob/master/src/DateTime/DateTime.py>.
- [15] Github, “Time Module.” [Online]. Available: <https://github.com/python/cpython/blob/master/Modules/timemodule.c>.
- [16] Github, “Onion GPIO Python Module.”
- [17] GitHub, “I2C Python Module.” [Online]. Available: <https://github.com/OnionIoT/Onion-Docs/blob/master/Omega2/Documentation/Reference/Libraries/I2C-Python-Module.md>.
- [18] Github, “SysModule.” [Online]. Available: <https://github.com/python/cpython/blob/master/Python/sysmodule.c>.
- [19] GitHub, “Python 2.7 - urllib2.” [Online]. Available: <https://github.com/enthought/Python-2.7.3/blob/master/Lib/urllib2.py>.

- [20] P. Org, “threading.” [Online]. Available: <https://docs.python.org/2/library/threading.html>.
- [21] P. D. C. I. C, “Preámbulo,” 2010.
- [22] Real Python, “An Intro to Threading in Python.” [Online]. Available: <https://realpython.com/intro-to-python-threading/>.
- [23] SciELO, “Desempeño de la calidad del servicio (QoS).” [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2011000100004http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2011000100004.
- [24] “Conectados a la Red Eléctrica Protección y seguridad,” pp. 1–36.
- [25] N. Flores and M. Domínguez, ““ Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio .,”” *Cent. Investig. en Mater. Av. S.C. Posgrados*, p. 84, 2017.
- [26] Keysight Technologies, “34450A Multimeter 5.5 Digit Dual Display, Benchtop DMM,” 2018.