

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

***“ALGORITMO DE FUSIÓN DE DATOS PARA EL
SENSADO INTELIGENTE EN LA SUPERVISIÓN DE
ARREGLOS FOTOVOLTAICOS”***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

***MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA***

PRESENTA:

VICENTE MEDINA RODRÍGUEZ

DIRECTOR DE LA TESIS:

DR. JAVIER VEGA PINEDA

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ RIVERA MEJÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MAYO 2023



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®





Chihuahua, Chih. 28 de abril de 2023

**C. VICENTE MEDINA RODRÍGUEZ
PRESENTE**

En cumplimiento con los requerimientos para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica y a propuesta de su Comité Tutorial, la División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede la autorización para imprimir la tesis titulada **"Algoritmo de fusión de datos para el sensado inteligente en la supervisión de arreglos fotovoltaicos"** dirigida por el Dr. Javier Vega Pineda con el siguiente contenido de capítulos:

- I Introducción
- II Revisión de literatura
- III Diseño de algoritmos de fusión de datos
- IV Implementación del sensor inteligente
- V Pruebas y conclusiones

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
"La Técnica por el Engrandecimiento de México"*

**ROGELIO ENRIQUE BARAY ARANA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

REBA/adcs





Chihuahua, Chih. 21 de abril de 2023

**ROGELIO ENRIQUE BARAY ARANA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE**

En cumplimiento con los requerimientos para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le notificamos que el documento de tesis del alumno **C. VICENTE MEDINA RODRÍGUEZ**, titulado **"Algoritmo de fusión de datos para el sensado inteligente en la supervisión de arreglos fotovoltaicos"** dirigido por el Dr. Javier Vega Pineda, ha sido aprobado y aceptado para su impresión.

Por lo anterior, proponemos le sea concedida la autorización de impresión correspondiente.

Agradeciendo la atención a la presente, quedamos de usted:

ATENTAMENTE

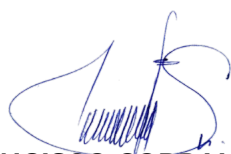
*Excelencia en Educación Tecnológica®
"La Técnica por el Engrandecimiento de México"*



**DR. JAVIER VEGA PINEDA
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL**



**DR. JOSÉ RIVERA MEJÍA
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL**



**DR. LUIS FRANCISCO CORRAL MARTÍNEZ
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL**



**DR. PEDRO RAFAEL ACOSTA CANO DE LOS
RÍOS
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL**





CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de Chihuahua el día 28 de abril de 2023, el que suscribe, C. VICENTE MEDINA RODRÍGUEZ con número de control G210603777, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, adscrita a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del el Dr. Javier Vega Pineda y cede los derechos del trabajo titulado "Algoritmo de fusión de datos para el sensado inteligente en la supervisión de arreglos fotovoltaicos", al Tecnológico Nacional de México y/o Instituto Tecnológico de Chihuahua para su difusión, divulgación, transmisión, reproducción, así como su digitalización con fines académicos y de investigación.

Vicente Medina Rodríguez

C. VICENTE MEDINA RODRÍGUEZ





DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

En la ciudad de Chihuahua el día 28 de abril de 2023, el que suscribe, C. VICENTE MEDINA RODRÍGUEZ de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, con número de control G21060377, adscrito a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, manifiesta que es autor intelectual de la tesis titulada "Algoritmo de fusión de datos para el sensado inteligente en la supervisión de arreglos fotovoltaicos" bajo la dirección el Dr. Javier Vega Pineda; que el contenido es original y que las fuentes de información consultadas para su fundamentación están debidamente citadas y referenciadas.

Vicente Medina Rodríguez

C. VICENTE MEDINA RODRÍGUEZ



Chihuahua, Chihuahua, mayo de 2023

María Elena Álvarez-Buylla Roces

Directora de Conacyt

Sirva la presente para saludarla e informarle que a la fecha he obtenido el grado de **Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica** en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, motivo por el cual agradezco todo el apoyo brindado por este Consejo que usted representa, con el otorgamiento de una beca que permitió dedicarme de manera exclusiva a la realización de mis estudios de posgrado y de esta manera lograr el objetivo principal del convenio establecido.

Sin otro particular quedo a sus órdenes no sin antes reiterar mi agradecimiento.

Atentamente

A handwritten signature in dark ink, reading "Vicente Medina Rodríguez". The signature is written in a cursive, flowing style.

Vicente Medina Rodríguez.

Agradecimientos

Al Dr. Javier Vega Pineda por su apoyo en la redacción de este documento y por el apoyo recibido para desarrollar de forma adecuada el proyecto de tesis.

Al Dr. José Rivera Mejía por siempre apoyar en múltiples aspectos del desarrollo del proyecto, por su guía y apoyo para presentar de forma adecuada los temas durante los comités y sobre todo sus palabras de aliento para seguir trabajando, además de nunca dejar de creer en mí.

Al Doctor Jesús Alfonso Medrano Hermosillo por su paciencia y ayuda, al Doctor Ricardo Eliú Lozoya Ponce por su enseñanza, ánimo y apoyo en la redacción de la propuesta del proyecto de tesis.

A mis compañeros de semestres mayores y menores del programa de maestría cuya amistad y consejos ayudaron a mejorar el proyecto.

Dedicatoria

En este punto donde se cierra un ciclo, es momento de agradecer a todo un conjunto de personas quienes estuvieron de cerca para apoyar en las distintas necesidades que se presentaron durante todo este ciclo de estudios, donde debo agradecer a mis padres por sus horas de trabajo y esfuerzo, quienes también me cuestionaban todo lo que aprendía y me hacían reflexionar lo aprendido. A las personas de los ranchos de los cuales provienen padres que me felicitaron y animaron a continuar con mis estudios y además dar gracias a Dios. Quisiera agradecer a todos mis compañeros de carrera, cuyas bromas y chistes hacían más amenos los ratos libres, ayudando a reducir la carga de estrés. Finalmente, a todas las personas involucradas en mi formación, desde maestros, compañeros, parientes, agradecer a todos ellos por lo que directa o indirectamente pudieron hacer para apoyarme y contribuir de alguna manera a mi formación.

RESUMEN

ALGORITMO DE FUSIÓN DE DATOS PARA EL SENSADO INTELIGENTE EN LA SUPERVISIÓN DE ARREGLOS FOTOVOLTAICOS

Ing. Vicente Medina Rodríguez
Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Chihuahua
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Chihuahua, Chih., 2023
Director de tesis: Dr. Javier Vega Pineda
Codirector de tesis: Dr. José Rivera Mejía

En los últimos años se han realizado esfuerzos en reducir la contaminación producida por las fuentes de generación de energía y formas de generación como la eólica o la solar han adquirido un uso considerable. Al ser la energía solar una energía disponible en muchos sitios del mundo, aspectos de mantenimiento, verificación e instalación han sido importantes al momento de evaluar la operación y generación de energía de los sistemas fotovoltaicos para maximizar su eficiencia. En el presente trabajo se desarrolla un sistema con el propósito de apoyar en esas tareas de mantenimiento, verificación e instalación mediante el diseño de un sistema de medición de parámetros del medio ambiente y eléctricos que permita evaluar la operación de los paneles fotovoltaicos.

Se plantean inicialmente las funcionalidades de sensores inteligentes con especial atención a la fusión de datos, se muestran sus beneficios, técnicas básicas y arquitecturas. Como tecnologías de apoyo se usan conceptos del internet de las cosas y la industria 4.0. Puesto que en el internet de las cosas existen bloques funcionales que son análogos a aspectos de sensores inteligentes, por lo que son tecnologías que pueden complementarse de buena manera, mientras que la industria 4.0, referente a la fábrica inteligente, tiene puntos relacionados que abordan aspectos de fusión de datos. Mediante el uso de múltiples herramientas se diseñaron dos algoritmos de fusión de datos que permiten evaluar la operación de los paneles fotovoltaicos o brindar una medida de su operación, estos algoritmos están basados en la lógica difusa y en las plantillas paramétricas. Para utilizar los algoritmos se manejan datos de radiación solar, la temperatura en la celda, la temperatura ambiente, el voltaje y corriente de un panel fotovoltaico o un arreglo. Se abordan los aspectos de

implementación de cada algoritmo. La técnica de fusión de datos seleccionada es un algoritmo con base en plantillas paramétricas y se basa en el cálculo de la probabilidad de que los valores medidos se encuentren dentro del rango esperado, se realiza mediante la regla de Simpson 3/8. El desempeño del algoritmo se comparó con respecto a resultados obtenidos con Matlab. Se desarrollaron experimentos donde se provocaban posibles fallas en los paneles fotovoltaicos y demostrar el funcionamiento del algoritmo.

Físicamente se implementó un sensor inteligente mediante el uso de un dispositivo SoC (*System on Chip*) con capacidad de conectividad USB, CAN, Ethernet y WiFi para la transmisión de datos hacia un concentrador que permita almacenar los datos de forma local y en la nube que sirva como medio para ver el funcionamiento de un panel o arreglo fotovoltaico desde cualquier parte del mundo. Finalmente se plantea de forma general cual sería la red apropiada de sensores para el monitoreo a gran escala de paneles fotovoltaicos.

Índice

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Energías Renovables y su Importancia.....	1
1.2 Sensores Inteligentes	2
1.3 Fusión de Datos	4
1.3.1 Aspectos asociados a la Fusión de Datos	4
1.3.2 Niveles de Fusión de Datos	6
1.3.4 Algoritmos y técnicas de Fusión de Datos	7
1.3.5 Arquitecturas de Fusión de Datos.....	11
1.4 IoT Internet de las Cosas	15
1.4.1 Bloques funcionales del IoT	16
1.4.2 Características de un sistema de IoT	17
1.5 Industria 4.0	18
1.5.1 Uso extensivo de Internet	18
1.5.2 Manufactura flexible.....	19
1.5.3 Comunicación, Virtualización y sistemas Ciber Físicos	20
1.6 Enfoque de este Trabajo	20
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	24
2.1 Celda Fotovoltaica.....	24
2.1.1 Beneficios de la Instalación de Celdas Fotovoltaicas.....	24
2.1.2 Modelado de una Celda Fotovoltaica	25
2.1.3 Aspectos de instalación de Paneles Fotovoltaicos.....	27
2.1.4 Problemas del uso de Celdas Fotovoltaicas.....	31
CAPÍTULO III. DISEÑO DE ALGORITMOS DE FUSIÓN DE DATOS	33
3.1 Algoritmo Difuso.....	33

3.1.1	Modelado básico de una Celda con Lógica Difusa	34
3.1.2	Desarrollo del comparador de Corriente Eléctrica	40
3.1.2	Desarrollo del sistema que evalúa las Características Ambientales	42
3.1.3	Balance de Sistemas Difusos	43
3.2	Algoritmo de Plantillas Paramétricas	43
3.2.1	Determinación y diseño de Plantillas Paramétricas.....	45
4.2.3	Cálculo de la Probabilidad.....	49
3.3	Pruebas Simuladas de los Algoritmos	51
CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR INTELIGENTE		55
4.1	Selección de Instrumentos	55
4.1.1	Dispositivo SoC seleccionado	55
4.1.2	Sensor de radiación.....	57
4.1.3	Medición de temperatura	60
4.1.4	Sensor de corriente eléctrica.....	63
4.1.5	Medición de voltaje	65
4.2	Almacenamiento en la Nube.....	65
4.2.1	Servicio de Datos “Dweet.io”.....	66
4.2.2	Protocolo de comunicación “MQTT”.....	66
4.2.3	SQL (<i>Structured Query Language</i>)	67
4.3	Implementación Física del Sensor Inteligente.....	68
4.4	Operación del Sensor Inteligente.....	72
4.5	Implementación de Algoritmos	74
4.5.1	Implementación del Algoritmo de Fusión Difuso	74
4.5.2	Implementación del Algoritmo de Fusión de Plantillas Paramétricas.....	78
4.5.3	Regla de Simpson 3/8 compuesta.....	79

CAPÍTULO V. PRUEBAS Y CONCLUSIONES	81
5.1 Pruebas de la Implementación del Algoritmo de Plantillas Paramétricas	81
5.3 Pruebas de la Operación del Sensor Inteligente	82
5.3 Conclusiones y Observaciones	84
5.4 Trabajo a Futuro	85
Referencias	88

Lista de figuras

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
Figura 1.1. Modelado físico de forma general.....	9
Figura 1.2. Fusion autónoma a nivel sensor.	12
Figura 1.3. Sistema de fusión centralizado.	13
Figura 1.4. Sistema de fusión híbrida.	14
Figura 1.5. Fusión distribuida.....	15
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	24
Figura 2.1. Circuito equivalente de una celda solar.	25
Figura 2.2. Resultados de simulación a radiación variable y a temperatura variable.....	27
Figura 2.3. Esquema genérico de uso de paneles fotovoltaicos.	28
Figura 2.4. Radiación global horizontal.	30
CAPÍTULO III. DISEÑO DE ALGORITMOS DE FUSIÓN DE DATOS.....	33
Figura 3.1. Esquema a bloques del algoritmo difuso.	34
Figura 3.2. Funciones de membresía de voltaje y radiación.	36
Figura 3.3. Funciones de membresía para la corriente esperada o medida y de salida. ...	41
Figura 3.4. Esquema genérico para el algoritmo de plantillas paramétricas.	44
Figura 3.5. Gráficas de los resultados del análisis de datos de los paneles fotovoltaicos.	46
Figura 3.6. Resultados obtenidos al analizar datos de distintos puntos del día.	47
Figura 3.7. Cálculo de la integral para la evaluación de un parámetro de corriente.	51
Figura 3.8. Diseño de experimentos para la selección del algoritmo.	52
CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR INTELIGENTE	55
Figura 4.1. Diagrama a bloques general del sensor inteligente.	55
Figura 4.2. SoC ESP32-S2-DevKit1M.....	57
Figura 4.3. Sensor de radiación Apogee SP-212.-SS.	58

Figura 4.4. Sensor de radiación BGT TBQ.	59
Figura 4.5. Forma física del sensor Rika.	60
Figura 4.6. Forma física del sensor DS18S20 en dos presentaciones.	61
Figura 4.7. Interfaz de conversión y termopar.....	62
Figura 4.8. Cámara infrarroja para medición de temperatura.....	62
Figura 4.9. Sensor de efecto Hall.	63
Figura 4.10. Sensor de efecto hall integrado para la medición de corriente eléctrica.....	64
Figura 4.11. Resistencia bobinada para la medición de corriente.	65
Figura 4.12. Diagrama a bloques del sistema implementado.	69
Figura 4.13. Ensamble de la tarjeta electrónica del sistema en operación.	70
Figura 4.14. Diseño base de la cápsula meteorológica para medición de temperatura ambiente.....	71
Figura 4.15. Instalación de arnés con resistencia de medición.....	72
Figura 4.16. Ejemplo de datos almacenados en valores separados por coma o csv.	73
Figura 4.17. Formato extendido de archivos separados por coma.	73
Figura 4.18. Diagrama de flujo del programa de prueba utilizando plantillas paramétricas.	79
CAPÍTULO V. PRUEBAS Y CONCLUSIONES	81
Figura 5.1. Simulación de fallas en los paneles fotovoltaicos.....	84
Figura 5.2. Arquitectura propuesta de un sistema para el monitoreo de un parque fotovoltaico.....	87
Referencias	88

Lista de tablas

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	24
CAPÍTULO III. DISEÑO DE ALGORITMOS DE FUSIÓN DE DATOS.....	33
Tabla 3.1. Características eléctricas del panel fotovoltaico a modelar NA-V128HR.	35
Tabla 3.2 Constantes para el modelado del panel fotovoltaico para radiación.	37
Tabla 3.3. Resultados del modelado de un panel fotovoltaico con radiación solar.....	38
Tabla 3.4. Cambio de los voltajes de salida en función de la temperatura.....	38
Tabla 3.5. Corrientes eléctricas de salida en base a la temperatura.....	39
Tabla 3.6. Resultados obtenidos del modelado de un panel fotovoltaico en base a la temperatura.	40
Tabla 3.8. Lógica que sigue el sistema de balance de sistemas difusos.	43
Tabla 3.9. Plantillas paramétricas y los datos que representan el comportamiento del panel fotovoltaico.....	49
Tabla 3.10. Resultados obtenidos a cada hora de los parámetros ambientales.	52
CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR INTELIGENTE	55
CAPÍTULO V. PRUEBAS Y CONCLUSIONES	81
Tabla 5.1. Resultados y comparaciones del cálculo de las integrales para voltaje.....	82
Tabla 5.2. Resultados y comparaciones del cálculo de las integrales para corriente eléctrica.....	82
Tabla 5.3. Resultados del sensor inteligente al simular fallas de los paneles fotovoltaicos.	831

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las energías renovables en tiempos recientes ha recibido bastante atención y se debe en gran parte a problemas medio ambientales como el calentamiento global, cambio climático, agotamiento de combustibles fósiles, etc. Entre las diferentes fuentes de energía renovables, la luz solar es un recurso abundante en la mayor parte del mundo que ha probado ser una opción viable para la generación de energía en ciertas condiciones. En años recientes se han instalado muchos parques fotovoltaicos a lo largo del mundo, los cuales consisten en cientos o miles de celdas fotovoltaicas conectadas juntas en un circuito. Se estima que actualmente en generación de energía renovable existe una capacidad de 3064 GW, donde un 28% de ese valor corresponde a solo energía solar y solo en el 2021 se instalaron casi 38 GW solo en Norteamérica. En el caso de México pasó de tener una capacidad instalada de energía solar fotovoltaica de 60 MW en 2012 a 4426 MW en 2019 [1]. Estos módulos fotovoltaicos son los componentes clave en un parque fotovoltaico puesto que la eficiencia de salida del parque fotovoltaico depende completamente de estos módulos. Desafortunadamente, las celdas solares están sujetas a muchos defectos con el paso del tiempo lo cual conlleva problemas adversos como una generación de potencia reducida.

1.1 Energías Renovables y su Importancia

Como es bien conocido, el consumo de energía eléctrica contribuye significativamente a las emisiones globales y al cambio climático. El avance de la industrialización, urbanización, la agricultura y múltiples aspectos del desarrollo de un país están íntimamente ligados a la energía eléctrica, pero un esfuerzo extra de las fuentes de energía convencionales es requerido para satisfacer la demanda eléctrica de múltiples sectores. El tratar de solventar la creciente demanda de energía con plantas eléctricas convencionales puede causar un gran aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, y más aún, los costos de los combustibles fósiles, se encuentran aumentando día a día, lo cual también aumenta el costo de producción de energía eléctrica. Las opciones para resolver estos problemas son por medio del uso de energías alternas como la solar, eólica, geotérmica, etc. La introducción de estas opciones de generación de energía ha traído consigo el desarrollo y maduración de sus tecnologías y al mismo tiempo son una forma confiable de

generación de energía, sin embargo, siguen existiendo mejoras. Los recursos más usados de forma general a lo largo del mundo son la energía solar, eólica, la biomasa, geotérmica, hidroeléctrica y la oceánica. Por su facilidad, simplicidad y alcance, la energía solar y eólica suelen ser algunas de las opciones más populares. Existen ciertos inconvenientes con el uso de otros métodos de generación de energía puesto que en el caso de la energía hidroeléctrica se requiere contar con recursos hídricos vastos y la construcción de embalses con turbinas, en el caso de la energía geotérmica se requiere contar con yacimientos geotérmicos y el caso más conocido de ellos son los géiseres, en el caso de la energía oceánica, los mares entregan la energía a través de diversos métodos como las corrientes marítimas o las olas del mar. Si bien las fuentes de energía previamente mencionadas resultan en opciones bastante viables y ecológicas, algunas de ellas no se encuentran al alcance de muchos países y son bastante costosas por lo requerido para la instalación de plantas eléctricas con esos métodos. Durante la última década, el desarrollo de las tecnologías solares y eólicas ha sido tal que el desarrollo de microrredes distribuidas ha sido una de las formas de interconexión para la generación de energía descentralizada más usadas [2].

1.2 Sensores Inteligentes

Entre las tecnologías que pueden ser un apoyo para mejorar la operación y funcionamiento de cualquier proceso es el uso de sensores inteligentes, esta tecnología busca proveer a un sensor común ciertas funcionalidades para tener mayores prestaciones y con ello minimizar los problemas y obtener datos confiables. La definición dada por la IEEE en el estándar IEEE-1451, define un sensor inteligente como un transductor que provee funciones más allá de lo necesario para generar una correcta representación de la variable medida o controlada. Esta tecnología típicamente simplifica la integración de un transductor en aplicaciones dentro de un ambiente de redes [3]. Dos aspectos caracterizan su función como sensor inteligente, uno es la TED (*Transducer Electronic Data Sheet*), la cual es una memoria no volátil donde se almacenan datos que describen al dispositivo dentro de la red, siendo un sistema de configuración automática. Esta capacidad de autoidentificación es necesaria para aspectos de mantenimiento, diagnóstico de fallas, reconfiguración, etc. Entre los datos más usuales son el nombre del fabricante, identificador numérico, tipo de dispositivo, número de serie,

además de los datos de calibración. Además, se encuentran aspectos del historial de mantenimiento u hoja de servicio y certificados de calibración que permiten tener un seguimiento del dispositivo, una fácil reconfiguración y también cumplir con aspectos de calidad y ser candidato de certificaciones internacionales.

El otro aspecto importante que define la operación de los sensores inteligentes son las funcionalidades que los definen y caracterizan referentes a los aspectos previamente mencionados, sus funciones son las siguientes [4]:

- Procesamiento
- Integración
- Compensación
- Validación
- Comunicación
- Fusión de datos

El **procesamiento** consiste en proveer de forma eficiente a una interfaz de comunicaciones la información más relevante. Dentro de esta función se encuentran aspectos de acondicionamiento de señales, conversión de señales, funciones lógicas, la reducción de datos, la toma de decisiones en conjuntos con señales de otros sensores, también se deben tomar en cuenta en esa funcionalidad los efectos de la varianza provocada por la manufactura, parámetros ambientales y el envejecimiento de los transductores.

La **integración** es referente a que el elemento de sensado, con las partes de procesamiento y comunicación se encuentren en un chip para eliminar las conexiones eléctricas entre componentes de forma externa y de esta manera reducir el tamaño del sensor completo, utilizar de forma óptima la energía eléctrica y reducir costos. De igual forma el uso de sensores de tamaño reducido incrementa la eficiencia del sistema y la confiabilidad de las mediciones.

La **compensación** es un método para mejorar las mediciones y tener una mayor precisión considerando los errores en el sistema, por ello, si los errores sistemáticos son conocidos, se pueden identificar y se puede mejorar el desempeño del sistema. Por lo regular esta función intenta corregir tres aspectos, la linealización en la relación entre entradas y salidas de un

transductor, reducir la dependencia de la temperatura en la respuesta de un transductor y la corrección de los efectos del envejecimiento de los transductores.

La **validación** es una funcionalidad que tiene el objetivo aumentar la confiabilidad de los sensores. La transmisión de datos incompletos o erróneos puede provocar un comportamiento inesperado o una falla de sistema sobre todo si se trata de un sistema de control, por ello un sensor inteligente debe ser capaz de evaluar los datos y realizar un autodiagnóstico para evitar la propagación de datos erróneos y advertir al usuario acerca de ello. Una alternativa puede ser mediante una red bastante grande de sensores que se validen entre ellos o la instalación de un sistema que incorpore conocimiento experto.

La **comunicación** es una función que intercambia información entre el sensor y el usuario o incluso permite la reconfiguración del sensor por parte del usuario para observar otros datos, por lo tanto, debe de ser bidireccional y la comunicación puede ser a través de cable, fibra óptica, inalámbrica o por un bus de campo.

La **fusión de datos** es el tópico central de este trabajo por lo que se trata con mayor detalle en la sección siguiente.

1.3 Fusión de Datos

El comité técnico de la Sociedad de Geociencia y sensado remoto de la IEEE define la fusión de datos como el proceso de combinar de forma espacial y temporal datos indexados provenientes de diferentes instrumentos y fuentes de información para mejorar el procesamiento e interpretación de los datos [5].

1.3.1 Aspectos asociados a la Fusión de Datos

De forma general la fusión de datos puede mejorar el desempeño del sistema en tres formas distintas:

- **Representación:** La información obtenida durante, o al final del proceso de fusión tiene un nuevo nivel de abstracción o de granularidad que cada fuente individual y

por lo tanto entrega información que tiene una semántica más rica, es decir, información con mayor significado.

- **Precisión:** La desviación estándar de los datos tras el proceso de fusión suele más pequeña que la desviación estándar dada por los datos obtenidos de las fuentes. Si los datos son ruidosos o erróneos, el proceso de fusión trata de reducir o eliminar estos efectos.
- **Complejidad:** El obtener nueva información al conocimiento existente de un ambiente trae consigo una visión más completa de los fenómenos que ocurren que se relacionan a él.

La definición de fusión de datos conlleva otros conceptos importantes a tratar, como lo son la asociación, correlación y combinación, los cuales son las tareas en las cuales se basa la fusión de datos, por lo tanto, seguido a esto se describen las funciones dentro de un procesador que fusiona datos [6].

Alineación: Debido a que se mencionaba la combinación de datos de forma espacial y temporal, el sistema de fusión de datos etiqueta los datos de un sensor a un tiempo y a una ubicación espacial, por ello, ciertos autores definen una medición como una observación, cuya notación se define a continuación:

$$O_i = \langle E_i, X_i, t_i, y_i, \Delta y_i \rangle \quad (1.1)$$

La ecuación (1.1) corresponde a una observación, en la cual se denotan parámetros que definen las características temporales, espaciales y de medición. Donde E_i corresponde a la variable física medida en sí misma. La ubicación espacial X_i es la localización de sensores dentro de la arquitectura del sistema. El tiempo t_i , corresponde al tiempo en que se efectúa la medición y en aplicaciones de tiempo real es más importante que la medición se realice de manera oportuna al valor mismo de la medición dada por y_i , que corresponde al valor obtenido. Δy_i define la incertidumbre de la medición, donde la incertidumbre se refiere a la falta de certeza en una medición que es atribuida a distintas condiciones ambientales y del instrumento.

Asociación: Esta tarea consiste en el uso de métricas para comparar trayectorias y datos medidos de diferentes sensores y así determinar candidatos para los procesos de correlación.

Correlación: El proceso de recombinar trayectorias y datos medidos que son semejantes para mejorar la detección, clasificación y seguimiento de objetos de interés.

Estimación: Una función común en un procesador de fusión de datos es predecir el valor futuro de una variable o la posición futura de un objeto mediante la actualización del vector de estado y las matrices de covarianza de errores utilizando los resultados del proceso de correlación.

Clasificación: En ocasiones los procesadores deben realizar toma de decisiones en varios cursos de acción, por lo tanto, realizar evaluaciones que permitan discriminar objetos y determinar objetivos, su letalidad y la amenaza que significa.

Seguimiento de pistas: Debido a los procesos antes descritos, en ocasiones los resultados de estos conducen a llevar una búsqueda más detallada, este caso es bastante usado y útil en la trata de falsos positivos o en el manejo de información que sea de carácter ambiguo o no concluyente.

1.3.2 Niveles de Fusión de Datos

Dentro de la fusión de datos, existen cinco niveles de procesamiento previo a la fusión, es decir que se realiza con los datos de manera previa. Los cinco niveles tienen metas distintas y se enfocan en distintas tareas, las cuales son explicadas de la siguiente forma [5]:

- Nivel 0: Consiste en el preprocesamiento de los datos provenientes de la fuente para realizar procesos de normalización, asignar formatos a los datos, ordenar en algún tipo, agrupar y en ciertos casos incluso su compresión.
- Nivel 1: Corresponde a una extracción de características, entre ellas a seguimiento de objetivos, estimación y discriminación de objetivos. Se desarrollan tareas de clasificación, predicción de trayectorias, obtención de bordes, líneas, áreas, círculos, formas específicas, o incluso trabajar en el dominio de la frecuencia los datos obtenidos. También es común trabajar con características relacionadas a la geometría,

la estructura de un objeto, la estadística, las características espectrales, los tiempos en que se dan las mediciones y los cambios entre ellas.

- Nivel 2: Se realizan funciones clave como la del trabajo entre objetos, donde se establece la relación entre objetos, proximidad geométrica, enlaces de comunicación y que exista dependencias entre funciones o píxeles dentro de una imagen. Incluso se realizan funciones en las que se establecen relaciones temporales entre diversas variables para identificar eventos o actividades con significados fuertes dentro del campo de aplicación. Dentro de este nivel existe el análisis de datos respecto al contexto o situación, incluyendo el clima, el terreno, el estado del mar, o las condiciones submarinas.
- Nivel 3: Se desarrollan sistemas que predicen y estiman el tamaño, localización, y capacidades de amenazas. Esto se efectúa mediante los resultados obtenidos en el nivel 2 de procesamiento. Intenta predecir los resultados de distintos casos hipotéticos basados en el ambiente.
- Nivel 4: El procesamiento llega a un punto donde el algoritmo de fusión se modifica a sí mismo para alcanzar resultados enriquecidos o mejorados refinando las estimaciones y evaluaciones y una forma es determinando si existe la necesidad de fuentes de datos adicionales. Debe de tener la capacidad de realizar evaluaciones al desempeño y efectividad del proceso de fusión.

Es visible que los niveles de fusión deseados en el sensor por sí solo son los que determinan en gran medida la arquitectura utilizada, puesto que el nivel 0 y 1, corresponden a una extracción de características, las cuales en caso de ser así pueden ser procesadas en niveles más altos en el mismo sensor, lo cual no resulta tan común.

1.3.4 Algoritmos y técnicas de Fusión de Datos

Las definiciones anteriores implican que la fusión de datos requiere de conceptos de varias disciplinas de las matemáticas, entre ellas se encuentran la inferencia Bayesiana, la inferencia Dempster-Shafer, la lógica difusa, el reconocimiento de patrones, las redes neuronales artificiales, la teoría de evidencia, la estadística robusta, los observadores de

estado, por mencionar algunos. En casos donde las técnicas no son aptas para el problema en cuestión se utilizan métodos heurísticos o métodos completamente desarrollados para la aplicación por si sola (Ad Hoc), siendo técnicas de fusión de datos que se encuentran sin madurar. Sin embargo, algunos de estos algoritmo o técnicas de fusión requieren conocimiento experto o información previa de la función de densidad de probabilidad, probabilidades a priori, intervalos de confianza, funciones de membresía o las reglas para el sistema de inferencia difuso. En algunos casos como los algoritmos de fusión de datos basados en datos, requieren muestras de datos grandes y de preferencia previamente filtradas para mejor operación del sistema. Otros algoritmos como los basados en el reconocimiento de patrones requieren que se asuman reglas u otros parámetros para su operación. Existen varios enfoques para clasificar los algoritmos de fusión de datos, pero en este caso, se presentan las tres categorías principales.

- Modelos físicos.
- Modelos de inferencia basados en características.
- Modelos basados en esquemas cognitivos.

Modelos físicos

Estos modelos se caracterizan por trabajar con aspectos dentro de los sistemas que son fácilmente observables, simulables o calculables. En este caso, regularmente se realizan extracciones de características donde se suele trabajar con aspectos geométricos, como bordes, líneas, arcos, círculos, formas específicas, etc. Otras características comunes son las estructurales que se refieren a superficies, una orientación de un objeto en una dirección específica horizontal o vertical. Las características estadísticas son importantes puesto que permiten conocer otros aspectos importantes como la media, la varianza, la función de probabilidad, la curtosis, la simetría de la función de probabilidad, son aspectos importantes dentro de las características de una señal, aunque también se suele trabajar con aspectos de color, temperatura o incluso en el dominio de la frecuencia obtener los coeficientes de Fourier e identificar otros aspectos importantes. Estos modelos estiman la clasificación e identidad de un objeto mediante el encuentro y comparación de datos provenientes de un modelado y los datos observados, la Figura 1.1 muestra de forma más directa este procedimiento.

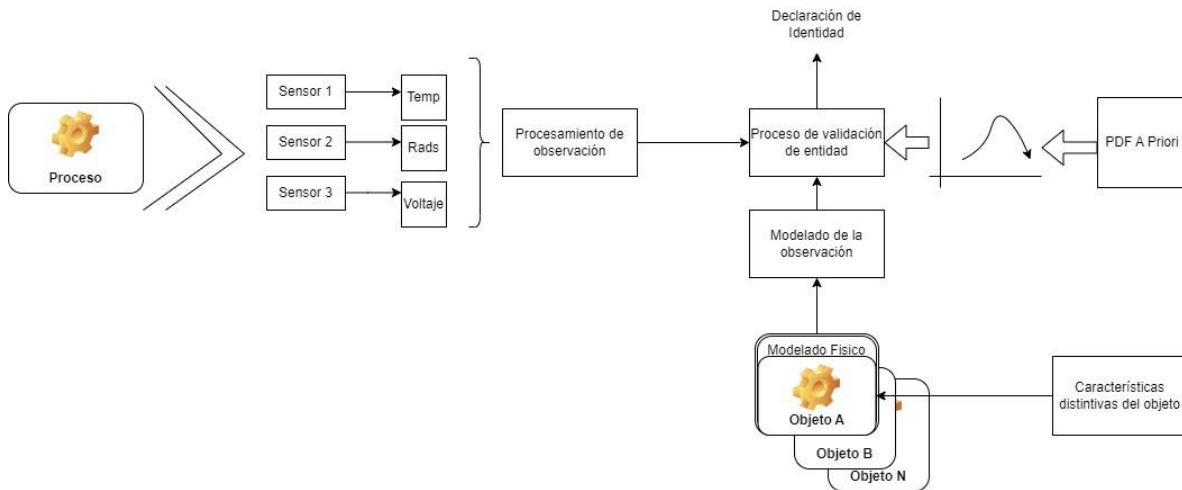


Figura 1.1. Modelado físico de forma general.

Las principales formas de modelado físico consisten en la simulación, estimación y en los métodos sintácticos. Usualmente la simulación es utilizada cuando las características físicas a medir pueden ser modeladas y predichas de forma precisa. Los procesos de estimación son útiles para realizar tareas de seguimiento y direccionamiento, esto debido a que se pueden correlacionar los datos y las trayectorias predichas.

Modelos de inferencia basados en características

Las técnicas de inferencia basadas en características realizan clasificaciones o identificaciones en base al conocimiento estadístico y como la extracción de características de un objeto conduce a la declaración de identidad. Estos modelos pueden ser divididos en dos grandes áreas siendo uno el modelo de características y otro que es el modelo basado en datos. Entre ellos modelos basados en características se encuentran:

- Inferencia clásica
- Inferencia Bayesiana
- Teoría Dempster-Shafer

El otro esquema de modelos basados en características consiste en los que se basan en información o datos, los cuales transforman datos o características en una declaración de

identidad. Todos estos métodos tienen un concepto similar y regularmente no se tratan de modelar aspectos estocásticos. Los métodos y técnicas más famosas se listan a continuación:

- Plantillas paramétricas
- Redes neuronales artificiales
- Los algoritmos de agrupamiento
- Los métodos de voto
- El reconocimiento de patrones
- Las medidas de correlación

Las **plantillas paramétricas**, consisten en el diseño de condiciones las cuales son comparadas con los datos obtenidos a lo largo del tiempo para determinar si las observaciones dadas por sensores contienen evidencia para identificar una entidad o realizar una evaluación. Esta técnica puede ser aplicada a la detección de eventos, evaluación de situaciones e identificación de objetivos.

Métodos cognitivos

Dentro de este tipo de métodos se encuentran los modelos basados en esquemas lógicos, los sistemas expertos, la lógica difusa, siendo todos ellos un intento por emular y automatizar la toma de decisiones desde un punto de vista cercano al de los humanos. Entre ellos existen técnicas como las siguientes:

- Los esquemas lógicos
- Teoría de conjuntos difusos
- Sistemas expertos

Los **esquemas lógicos**, consisten en patrones predeterminados y almacenados que son comparados con los datos observados para realizar inferencias con respecto a la observación o evaluar situaciones, sólo que, en este caso, los patrones almacenados son más encaminados al curso de acción que podría tomarse desde un análisis humano y no uno matemático. Las plantillas paramétricas mencionadas anteriormente pueden ser combinadas con esquemas lógicos mediante relaciones booleanas. La lógica difusa puede ser aplicada

cuando se comparan las plantillas para añadir incluso el trato a la incertidumbre en los datos observados o incluso a las relaciones lógicas usadas para definir un patrón.

Otra de las formas de modelos cognitivos es la **teoría de conjuntos difusos**, que abre el mundo físico a trabajar desde un aspecto de imprecisión. Se podría decir que evita utilizar aspectos rígidos, esto facilita enormemente el trabajar variables que deben ser clasificadas o controladas. Se dice que para el manejo de esta teoría deben de existir un conjunto de reglas basadas en la pertenencia de una variable a un conjunto, pero en este caso la pertenencia no es rígida, sino que las preposiciones dadas, tienen un valor de membresía de 0 a 1. La creación de reglas de este tipo está basada en la forma de estatutos IF-THEN, los cuales son diseñadas por un experto en el tema a tratar, representando las características importantes de la señal mediante la forma de la pertenencia de la entrada o la salida a algún conjunto difuso. Esto es útil debido a que permite añadir cierta incertidumbre al conocimiento o evitar rigidez total en la toma de decisiones.

1.3.5 Arquitecturas de Fusión de Datos

Visto de forma genérica, una arquitectura es una serie de componentes cuya estructura e integración permiten ejecutar funciones que los componentes individuales de otra manera no pueden realizar. Existen múltiples formas de asignar clasificaciones a las arquitecturas con respecto a la fusión de datos. Un enfoque que define la arquitectura está en función del nivel de procesamiento que existe individualmente en cada sensor, los productos que generan los sensores y la localización del proceso o procesos de fusión de datos. Se dice que la arquitectura se basa en la localización de los procesos de fusión, por lo tanto, existe la fusión híbrida, la fusión autónoma o fusión en sensor, la fusión distribuida, la fusión centralizada y la fusión individual postsensor, descritas cada una en los siguientes párrafos.

Fusión autónoma

Esta arquitectura permite que cada sensor tenga la capacidad de detectar, clasificar, identificar y estimar información de interés, de manera que exista un procesamiento de datos antes de entrar al sistema de fusión, el cual, procesa y combina la información de distintos

sensores para mejorar los datos obtenidos y obtener una imagen completa del proceso de interés. La Figura 1.2 muestra una aplicación simple de una fusión a nivel sensor o fusión autónoma.

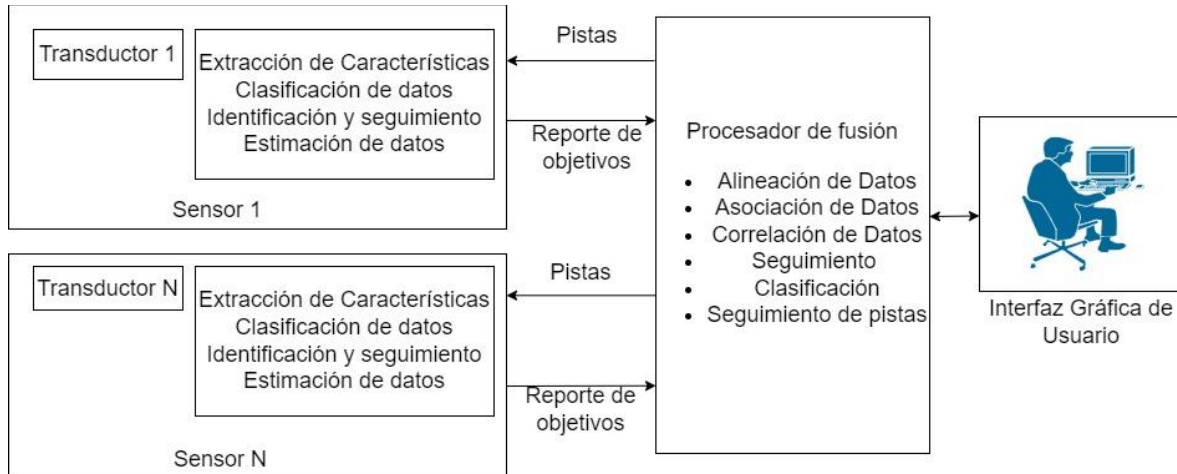


Figura 1.2. Fusión autónoma a nivel sensor.

Fusión centralizada

En este tipo de fusión durante varias tareas como el seguimiento, la clasificación o la identificación, los sensores proveen datos mínimamente procesados al procesador de fusión. Por mínimamente procesados se refiere a sólo realizar tareas de filtrado o estimación para alguna referencia. En procesos de estimación y seguimiento, en ocasiones se pueden transmitir al procesador de fusión, datos medidos y trayectorias o pendientes previas. Generalmente los algoritmos de fusión centralizada son más complejos y deben procesar datos a tasas más rápidas que en la fusión a nivel sensor, esto debido a que se deben procesar más los datos. La Figura 1.3 muestra de forma sencilla la fusión centralizada.



Figura 1.3. Sistema de fusión centralizado.

Fusión híbrida

En este caso, el sistema centralizado de fusión puede tener como apoyo algoritmos de procesamiento de señal que, al recibir la información de los sensores, realiza funciones de fusión a nivel sensor, de manera que se puede compilar toda la información previa en un procesador y se pueda crear un panorama mejorado. Esto permite tener los beneficios del seguimiento hecho por fusión centralizada, pero minimizando los recursos de sistema requeridos por el procesador principal. Uno de los problemas fuertes que tiene esta arquitectura, es que requiere sistemas de transmisión de datos de alta velocidad debido a la cantidad de información que se requiere recabar en el procesador de fusión a nivel sensor y la transmisión de sus resultados al sistema central de fusión. La Figura 1.4 muestra el concepto de fusión híbrida en bloques.

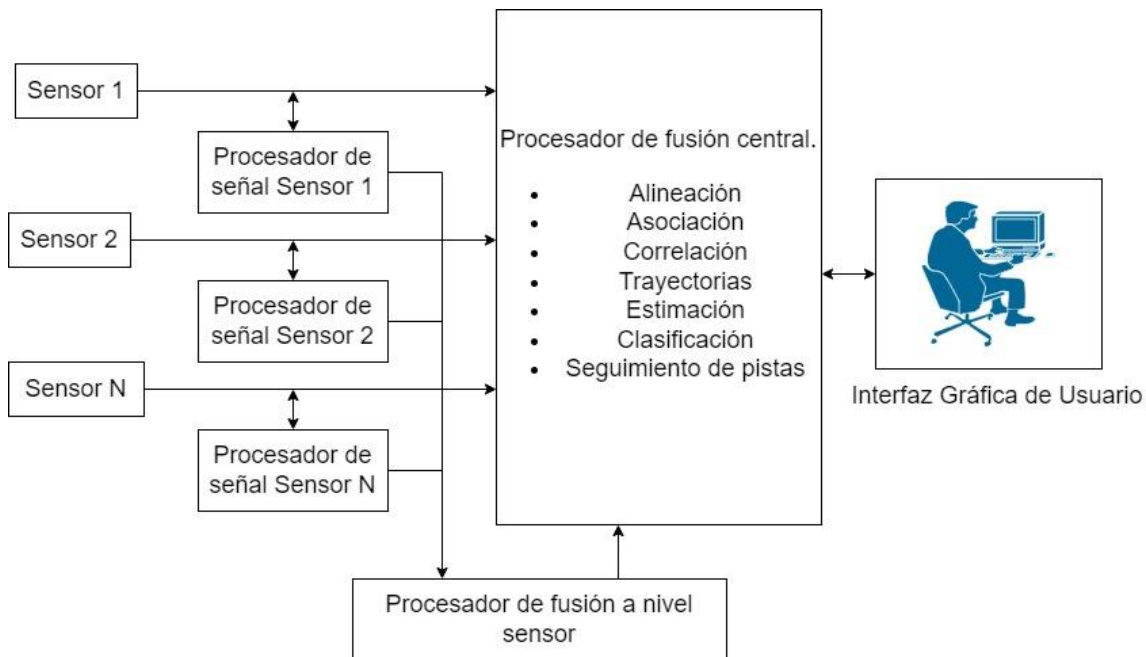


Figura 1.4. Sistema de fusión híbrida.

Puesto que se han denominado varios procesadores para los datos, se crea una jerarquía entre procesadores, donde los procesadores de señal en para los sensores resultan el nivel más bajo, puesto que transmiten la información a nodos de fusión con mayores niveles de procesamiento. Otro aspecto importante que nace a partir de la creación de varios nodos de fusión, es que la arquitectura puede caer en cierta forma en la desorganización, esto es, que existan múltiples nodos de fusión a nivel sensor, distintos y varios sensores y variados consumidores de información que generan problemáticas al tratar de concentrar la información de forma satisfactoria debido a la gran cadena que existe entre nodos de fusión, sensores y sus procesadores de datos, los cuales requieren un sistema de transmisión de datos de alta capacidad de información y alta velocidad. Es esta una arquitectura de fusión híbrida, llamada fusión distribuida, cuyo diagrama a bloques genérico se muestra en la Figura 1.5.

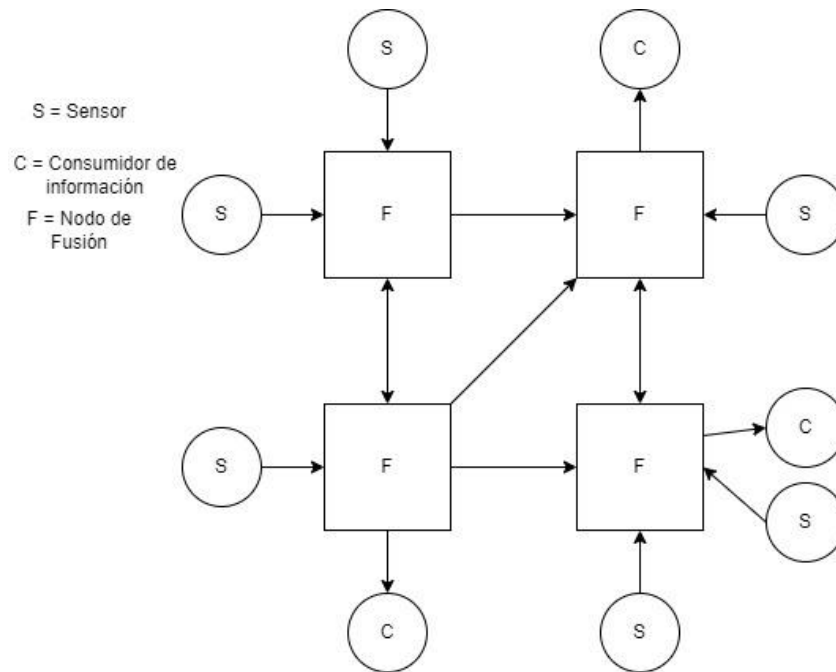


Figura 1.5. Fusión distribuida.

Al tener un aspecto de comunicación dentro de los sensores inteligentes, entra otro aspecto muy importante que puede ser un fuerte apoyo para mejorar el desempeño y añadir funciones especiales a los sensores inteligentes, el internet de las cosas.

1.4 IoT Internet de las Cosas

El internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es un complejo ecosistema de dispositivos conectados que intercambian datos a través de una red cableada o inalámbrica cuyo objetivo es proveer varios servicios entre humanos y máquinas [7]. Esta tecnología ha tenido un desarrollo rápido durante la última década y el número de dispositivos conectados crece cada año y cada vez más dominios de internet requieren soluciones o servicios del IoT. Se pronostica que los dispositivos conectados al IoT, pasará de 8.74 billones en 2020 a 25.4 billones para 2030 [8]. Un concepto dado es que el IoT es una red inteligente que conecta todas las cosas u objetos al internet con el propósito del intercambio de información a través de protocolos previamente acordados. El IoT, está conformado de objetos físicos etiquetados, los cuales pueden ser teléfonos, sensores, equipo de oficina, etc. Los datos generados por los dispositivos conectados son compartidos con servidores localizados en la nube o de forma

local (*On premise*), donde son procesados para realizar inferencias que apoyen en la toma de decisiones.

1.4.1 Bloques funcionales del IoT

Al momento de conectar un dispositivo a esta red, se clasifican los tipos de bloques funcionales en los cuales se puede encontrar un dispositivo, existen múltiples tipos y cada uno está encargado de un aspecto específico del IoT [9].

Identificación: Los dispositivos conectados a un sistema de IoT, son sistemas complejos compuestos de elementos físicos, como sensores, actuadores, componentes para manipular redes y elementos de software. Es esencial que cada elemento dentro del IoT sea distinguible de otro para tener capacidad de monitorear y comunicar elementos específicos.

Sensado: Los sistemas IoT, miden y transmiten datos de objetos inteligentes localizados en áreas específicas, estas pueden ser sensores individuales (sensores inteligentes, tecnología vestible o actuadores) o redes de sensores que ejecutan una función en conjunto.

Red de Contratos o Contactos: Debido a que los sistemas de IoT son una combinación de dispositivos inteligentes, tecnologías de comunicación y protocolos en conjunto para una aplicación específica y al ser tantos dispositivos los que pueden estar conectados en un solo sistema, deben de existir operaciones de codificación de datos, controles de transmisión y flujo de datos, secuenciación de los mismos y detección y corrección de errores.

Cómputo: El cómputo de los datos es realizado por el hardware y controlado completamente por el sistema operativo, pero este paradigma de trabajo no es muy útil en redes amplias de IoT, y por ello es necesario crear modelos de cómputo híbrido, esto es, aspectos de cómputo en la nube o en el borde.

Servicios: Consiste en invocar un sistema que realiza tareas específicas, como el almacenamiento de datos externos, el cálculo de la humedad relativa en el ambiente, el presentar de forma gráfica los datos, extraer la hora local de un servidor, etc. En muchos casos estos servicios se encuentran implementados dentro de la operación de los sistemas.

Análisis de datos: Los sistemas IoT generan un volumen de datos que tiene que ser almacenado y procesado posteriormente por algoritmos eficientes para extraer beneficios de estos datos. Es común el manejo de servicios de análisis de los datos almacenados.

1.4.2 Características de un sistema de IoT

Los bloques funcionales mencionados previamente describen de forma general las cuestiones operativas que puede realizar un sistema de IoT, pero en este caso estas características describen cualidades específicas con las que se debe contar [9].

Seguridad: Los sistemas de IoT presentan retos particulares en cuanto a seguridad debido a que están compuestos de un grande y diverso número de componentes, por ello se describen tres características principales de seguridad: disponibilidad, confidencialidad e integridad. Disponibilidad es referente a que el sistema está disponible y es utilizable por un elemento autorizado, estos pueden ser usuarios humanos u otros elementos que buscan servicio. Confidencialidad significa que la información no es transmitida o revelada a dispositivos, individuos o procesos no autorizados. La integridad asegura que los datos están completos y son precisos, esto es, que los datos no han sido alterados por dispositivos no autorizados o con la presencia de fallas, por elementos maliciosos o por causas ambientales.

Privacidad: Caracteriza aspectos de los datos referentes a su protección desde el nivel más bajo de un sistema de IoT hasta el más alto, esto es, desde el sensado, el almacenamiento de datos y su procesamiento. Este concepto se diferencia de la seguridad debido a que además de visualizar aspectos de seguridad de los datos, protege la información personal y se encuentra basado en el ISO29100, el cual recomienda técnicas para llevar a cabo la protección.

Interoperabilidad: También conocida como heterogeneidad, es la habilidad de los dispositivos de comunicarse y utilizar servicios entre sí. Esto se debe a que en un sistema IoT completo existen cruces dentro del sistema y típicamente es muy posible que unos elementos requieran de alguna información o proceso que se encuentre dentro del sistema.

Escalabilidad: Debido al potencial de esta tecnología, el crecimiento del número de sensores conectado a un sistema de IoT puede llegar a ser creciente e incluso puede modificar el

volumen de datos dentro del sistema, el volumen de datos almacenados en una base de datos, el número de dispositivos siendo manejados y la cantidad de servicios conectados y por ello es importante que el sistema IoT continúe funcionando efectivamente a pesar de su crecimiento. Se dice que existen tres escalabilidades, la escalabilidad funcional, que indica que una funcionalidad puede ser añadida, modificada o removida de un sistema de IoT sin alterar las actividades regulares. La escalabilidad de red es que se pueden añadir o remover nodos de red sin necesidad de reiniciar todo el sistema. Existe también la escalabilidad heterogénea, que describe la habilidad de añadir servicios o recursos externos al sistema IoT que apoyen su operación.

Estos conceptos buscan complementar aspectos relacionados con los sensores inteligentes ya que estas tecnologías son complementarias en el aspecto de producir agentes colaborativos dentro de un ambiente de comunicación, en el cual se puedan obtener mejoras y buscar un sistema en el cual se mantenga el uso de diversos conceptos y tecnologías.

1.5 Industria 4.0

Este es un concepto reciente referente a una cuarta revolución industrial y está enfocada en llevar a cabo la fábrica inteligente, en la cual se encuentran varios aspectos dentro que definen su operación y caracterizan su manejo.

1.5.1 Uso extensivo de Internet

Uno de los aspectos más comunes que se muestran de forma estética es la habilidad de controlar una máquina de forma remota por ejemplo mediante un teléfono inteligente, lo cual muestra de manera sencilla el profundo uso de internet, aunque la industria 4.0 debe de ir a más lejos que eso. Este es uno de los pilares de esta revolución y el uso de internet es un canal indispensable para la conexión de personas, máquinas, dispositivos y sensores, pero al mismo tiempo debe de ser un medio para la creación de nuevas funciones y características que permitan utilizar el internet como una fuente de información. En este aspecto el diagnóstico de fallas y el mantenimiento predictivo basado en la recolección de grandes muestras de datos provenientes de sensores de múltiples lugares y fábricas, puede reducir significativamente el costo de mantenimiento, mejorar la evaluación de problemas y crear

nuevos modelos de trabajo. El proceso de generar una muestra bastante grande de datos por hora y de miles de sensores y dispositivos y analizar la información obtenida tanto en tiempo real (*Big Data*), como en momentos futuros, es apoyo al momento de clasificar potenciales problemas que permitan generar mantenimiento predictivo, puede reducir enormemente de la misma forma la recolección de datos para diagnosticar problemas que de la misma forma a través de un esquema tradicional puede tomar tiempo y en el ambiente industrial el planificar servicios de mantenimiento es un aspecto importante puesto que los problemas repentinos pueden generar tiempos muertos que pueden tardar días en resolverse, o incluso aunque tengan función parcial, mejorar su desempeño [10].

1.5.2 Manufactura flexible

Uno de los aspectos atractivos dentro de la fábrica inteligente es la capacidad de trabajo en lotes pequeños o incluso sólo producir una unidad y esto es referente a programar la manufactura de lotes enormes o pequeños sin la necesidad de modificar líneas de producción, esto es, sin añadir secciones o modificar costos. Una de las tecnologías para llegar a ello es la impresión 3D o manufactura aditiva y su flexibilidad se encuentra en que existe un amplio rango de plásticos, metales, o materiales compuestos que pueden llevar al prototipado rápido y por ello esta tecnología está en auge. Inconvenientes de la manufactura aditiva es que el costo de manufactura es inicialmente alto, pero la inversión puede ser recuperada en altos lotes de producción. Otro aspecto importante dentro de la manufactura es la identificación de productos y su trazabilidad o seguimiento. Desde hace tiempo es usual la lectura de códigos de barras para caracterizar productos y también estar al margen con la legalidad de los productos manufacturados. El asignar un identificador único a cada componente manufacturado también es importante, puesto que permite manejar de forma individual cada elemento, siendo identificable durante todo su ciclo de vida esto para generar un proceso de producción más eficiente y dinámico, y tener acceso a información de su origen, almacenamiento, estado, materiales de su construcción y demás aspectos que pueden ser obtenidos al brindar un identificador [11].

1.5.3 Comunicación, Virtualización y sistemas Ciber Físicos

Dentro del mundo del consumidor se han logrado establecer estándares o formas de comunicación bastante normalizadas como el USB o el WiFi, de igual manera se han establecido protocolos estándar al trabajar con sistemas de comunicaciones dentro de la industria, donde se permita conectar bandas transportadoras, máquinas ensambladoras, sensores, etc., de manera que se permita definir sus funcionalidades y tratarlas como elementos virtuales, de tal manera que se crea un enlace entre procesos físicos y su representación virtual. Para ello se han establecido un conjunto de buses de campo que permiten transmitir información desde un elemento básico hasta una computadora de trabajo [12].

1.6 Enfoque de este Trabajo

Los conceptos previamente mencionados conllevan aspectos semejantes y sobre todo en cuanto al manejo de la información generada por sensores conectados en puntos importantes dentro de un sistema de interés y esto se debe principalmente a las cuestiones del análisis de datos mencionadas para la mejora en la operación de una fábrica o para entregar beneficios a un usuario de esas tecnologías. Se comenta un bloque funcional en el IoT (sección 1.4.1) para el análisis de datos y de igual forma se dice que existe un análisis de datos dentro de la industria 4.0 con el fin de ofrecer una mejora para el mantenimiento predictivo. De la misma manera, la fusión de datos representada por los sensores inteligentes funciona como un mecanismo de inferencia para mejorar la comprensión de los datos. Entonces, al conjuntar conceptos de estas tres tecnologías: IoT, Industria 4.0 y sensores inteligentes, se puede ofrecer un prototipo altamente capaz de ofrecer información que permita tener un mejor aprovechamiento de los equipos instalados. En nuestro trabajo se aplicaron los tres conceptos tecnológicos a la solución de problemas en instalaciones fotovoltaicas, como una herramienta de apoyo para el diagnóstico de fallas, mantenimiento predictivo y la verificación de instalaciones fotovoltaicas basada en un sistema inteligente.

La necesidad de mantenimiento predictivo puede determinarse por muchos métodos, entre los más usuales se encuentran el diagnóstico manual de problemas, en general un método de bajo costo y baja precisión al hacer diagnósticos. Un segundo método para realizar

diagnóstico de problemas es mediante un análisis modal de fallos y efectos, el cual consiste en evaluar fallos potenciales en un sistema en base a lo grave de los efectos de las fallas en el sistema, el uso de este tipo de análisis tiene una precisión media en comparación a la detección manual, aunque supone un costo más elevado debido a la cantidad de estudios necesarios para ofrecer un diagnóstico. Otras técnicas usadas con frecuencia sobre todo en la generación de energía solar, es el uso del aprendizaje de máquina, sistemas expertos, modelados matemáticos, etc., cuya finalidad es pronosticar la cantidad de energía que se va a generar en función de las características eléctricas dadas por el fabricante y las condiciones climáticas, es un método de diagnóstico de fallas bastante costoso debido a la integración de un sistema de medición de parámetros climáticos y a la cantidad de tiempo que se debe invertir para la selección del modelo de aprendizaje, la selección y generación de bases de datos útiles para su diseño, entrenamiento, validación e implementación final y su desempeño en la detección de fallas es bastante bueno en la mayoría de los casos. Existe una alternativa final y es el uso de una red de sensores en tiempo real, los cuales realicen las mediciones de puntos sensibles de un sistema fotovoltaico, lo cual ofrece en su mayor parte una detección de errores con alta precisión, sin embargo, la granularidad deseada incrementa considerablemente el costo, esto debido a que se desea una mayor cantidad de detalles del comportamiento del sistema y por lo tanto una mayor cantidad de sensores es necesaria.

De alguna manera se están conjuntando dos aspectos mencionados, los sensores en tiempo real y los elementos de pronóstico de generación de energía eléctrica basados en alguno de los esquemas de fusión de datos para ofrecer datos extra que resulten útiles para el mantenimiento predictivo y correctivo en un parque fotovoltaico a nivel panel o a nivel arreglo de paneles de forma que se puedan detectar fallas o mejorar el desempeño de un parque fotovoltaico, la generación doméstica, etc. todo esto con el fin de disminuir el consumo de energías provenientes de combustibles fósiles, reducir la contaminación y tener una herramienta más para el monitoreo de paneles solares. Como objetivos y metas del proyecto se plantean:

- Diseñar e implementar una arquitectura para el monitoreo y medición de voltaje, corriente eléctrica, temperatura y radiación para un panel fotovoltaico.

- Desarrollar una técnica de validación de paneles fotovoltaicos basada en la teoría de fusión de datos.
- Producir un prototipo de sensor inteligente que integre la fusión de datos y el monitoreo de parámetros del medio ambiente y parámetros eléctricos.

Durante el desarrollo del proyecto se añadió la distinción de la temperatura ambiente y la temperatura del panel fotovoltaico, por ello el primer objetivo cambió, además de ello entre las actividades finales existe una que consiste en plantear una arquitectura para el monitoreo y supervisión de arreglos fotovoltaicos a gran escala.

En cuanto a las metas, se planteó:

- Contar con un prototipo de sensor inteligente para el monitoreo del funcionamiento de paneles solares.
- El sensor inteligente contara con una forma de comunicación apropiada para su monitoreo en red
- El algoritmo de fusión de datos se seleccionará de acuerdo al mejor desempeño y a la mínima carga computacional

1.7 Presentación del Documento de Tesis

En el Capítulo I se trataron aspectos de las tecnologías utilizadas para mejorar el desempeño del sensor inteligente además de la importancia de los paneles fotovoltaicos en la generación de energía eléctrica.

En el Capítulo II se presenta la revisión de literatura enfocada a conceptos relacionados a los paneles fotovoltaicos, su modelado, reglas de instalación, normas relacionadas a su uso y problemas principales, entre otros.

En el Capítulo III están los algoritmos diseñados para la verificación de paneles solares, describe dos algoritmos, un algoritmo difuso basado en la predicción de la corriente eléctrica de salida en función de las condiciones climáticas y un algoritmo de plantillas paramétricas que realiza una predicción de los rangos de corriente y voltaje de salida en función de la radiación solar.

En el Capítulo IV se encuentran las cuestiones referentes a la selección de la instrumentación utilizada, del sistema de procesamiento, del sistema de almacenamiento de datos en línea y la instalación del sistema de monitoreo de paneles solares junto con la forma de conexión tanto al sensor como a la base de datos y los formatos de almacenamiento de archivos.

En el Capítulo V se muestran las pruebas con el sensor inteligente conectado a los paneles solares, se realizaron pruebas para comprobar el funcionamiento básico del algoritmo, la fusión realizada por el algoritmo y la capacidad para distinguir la pérdida de potencia del algoritmo. Se presenta la arquitectura a utilizar para la supervisión de un parque fotovoltaico, además de consideraciones que deberán tenerse en caso de querer implementar un sistema de fusión de datos a un parque fotovoltaico. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

Se tratan otros aspectos en cada capítulo como parte de la implementación ya sea del sistema de comunicación, de medición o de la simulación de los algoritmos.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Celda Fotovoltaica

Las celdas solares son dispositivos electrónicos que convierten la luz solar directamente a electricidad. Actualmente es una de las tecnologías renovables con más crecimiento y se dice que jugará un rol mayor en la generación de energía eléctrica. El efecto que genera la electricidad se produce cuando dos materiales semiconductores en contacto cercano producen una corriente eléctrica cuando se les expone a la luz. La luz provee los electrones con la energía necesaria para dejar sus límites y cruzar la unión entre los materiales. Este efecto ocurre más en una dirección que en otra, siendo la de la carga negativa, así se genera una corriente directa. Las celdas solares trabajan con luz directa o incluso la que ha atravesado un difusor, con capacidad de generar electricidad incluso en días nublados, aunque tiene una producción eléctrica reducida afectada directamente por la radiación solar [13].

2.1.1 Beneficios de la instalación de Celdas Fotovoltaicas

Entre los beneficios se encuentran:

- La luz solar es una fuente de energía renovable disponibles en cualquier lugar del mundo.
- Las celdas solares son pequeñas y modulares, además de que pueden ser utilizadas donde sea, en contraste con otras tecnologías de generación de energía.
- Las celdas solares no requieren ningún tipo de combustible y el mantenimiento es bajo con respecto a sistemas convencionales de generación de energía como los basados en gas, carbón, derivados del petróleo o nucleares. Por lo tanto, la generación de energía basada en celdas solares no está sujeta de forma directa al costo del petróleo.

2.1.2 Modelado de una Celda Fotovoltaica

Debido a que la celda solar está basada en un principio de semiconductores y que depende directamente de la radiación solar se han propuesto modelos matemáticos en la literatura para predecir el comportamiento de un sistema fotovoltaico a distintas condiciones de operación. Un modelo apropiado para esto es un circuito equivalente con un diodo semiconductor simple con fuente de corriente, se muestra en la Figura 2.1. Con este modelo, se puede obtener una ecuación de la salida de potencia del sistema y su dependencia con la radiación, la temperatura y el voltaje (con carga colocada).

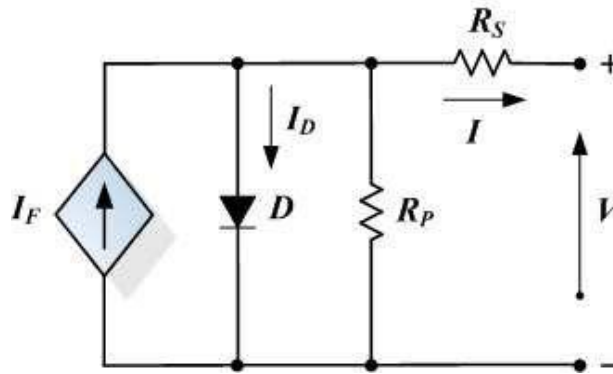


Figura 2.1. Circuito equivalente de una celda solar.

Para el uso de este modelo es necesario conocer el valor de la resistencia en paralelo (R_P), la resistencia en serie (R_S) y las características del diodo semiconductor, esto debido a que la salida del sistema estado por (2.1):

$$I = I_F - I_D - I_{R_P} \quad (2.1)$$

Para obtener las corrientes que componen la corriente de salida I , primero es necesaria la ecuación de Shockley, la cual permite aproximar el comportamiento del diodo en su mayoría de aplicaciones, se define en (2.2):

$$I_D = I_S(T) \left(e^{\frac{V_D \cdot q}{n \cdot K_B \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

donde $I_S(T)$ es la corriente de saturación del diodo, V_D corresponde al voltaje del diodo, K_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura de la unión p-n, q es la carga del electrón y n corresponde a un factor de idealidad del diodo, en caso de ser de germanio se toma como

1 y si es de silicio se toma como 2. En el caso de la fuente de corriente I_F , se modela en función de varios parámetros como se muestra en (2.3):

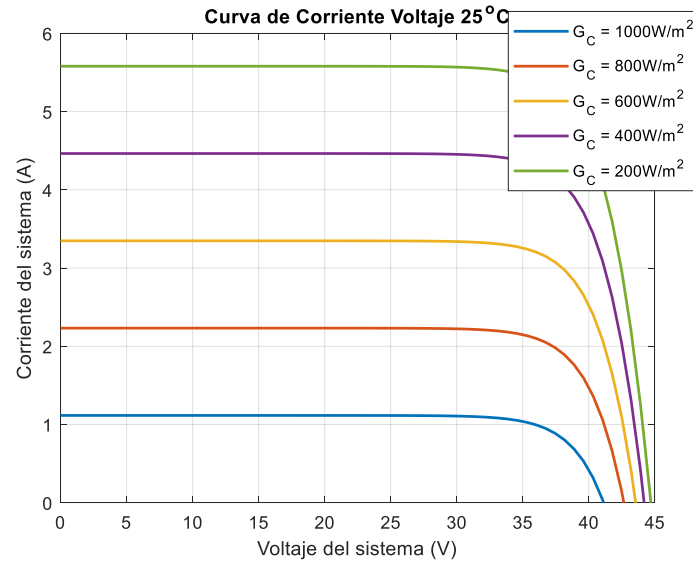
$$I_F = [I_{L,Ref} + \alpha(T_C - T_{C,Ref})] \frac{G_i}{G_{Ref}} \quad (2.3)$$

donde $I_{L,Ref}$ es la corriente de salida de la fuente de corriente que produce la radiación y se encuentra dada por la corriente de salida a una referencia dada, α es un parámetro de pérdidas por temperatura y multiplica la diferencia entre $T_{C,Ref}$ la temperatura de referencia y T_C la temperatura actual, las cuales están dadas en unidades Kelvin, y finalmente G_i la radiación actual y G_{ref} la radiación de referencia la cual regularmente es de 1000 W/m^2 . La corriente I_{Rp} se calcula mediante la ley de tensiones de Kirchhoff, se resta del voltaje de salida la caída en R_S y se divide entre el valor de R_P ,

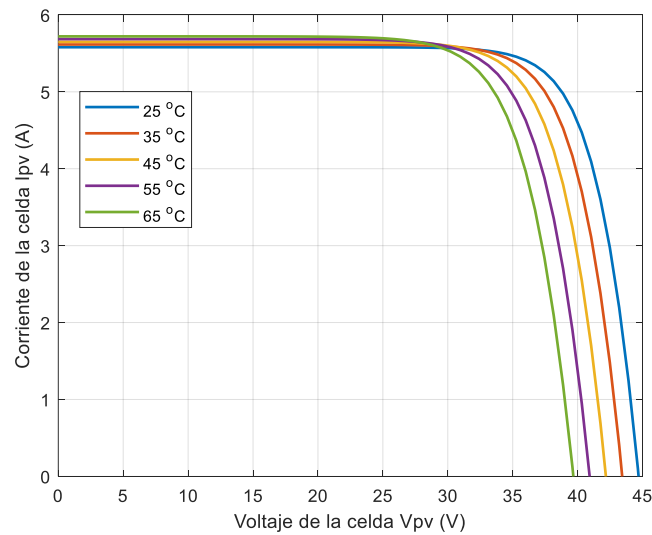
$$I_{Rp} = \frac{V - IR_S}{R_P} \quad (2.4)$$

En algunos casos a la resistencia en paralelo se le llama resistencia Shunt. Debido al desconocimiento de muchas de las variables dentro de las ecuaciones en el modelado de un panel solar, se puede aplicar un algoritmo numérico con el cual se puede calcular el valor de salida de la corriente eléctrica a distintas radiaciones y temperaturas y la opción de aplicar el método de Newton-Rhapson suele ser utilizada para obtener el comportamiento de la celda a distintas condiciones [14].

El propósito de obtener un modelo es para la comparación de los resultados de una celda solar instalada, además de comparar también sirve para corroborar los datos dados por el fabricante, la Figura 2.2 muestra gráficas con los resultados del modelado mediante la teoría de circuitos.



a)



b)

Figura 2.2. Resultados de simulación a) Radiación variable b) Temperatura variable.

2.1.3 Aspectos de instalación de Paneles Fotovoltaicos

Cuando se agrupan varias celdas en algún tipo de arreglo, se dice que se ha formado un panel solar, el agrupamiento de paneles solares genera arreglos fotovoltaicos y al tener múltiples arreglos fotovoltaicos, se tiene un parque fotovoltaico o generador fotovoltaico, sin embargo, además de los paneles fotovoltaicos se requiere un convertidor de potencia, siendo

regularmente un inversor o convertidor DC-AC, la Figura 2.3 muestra un esquema genérico de una instalación fotovoltaica.

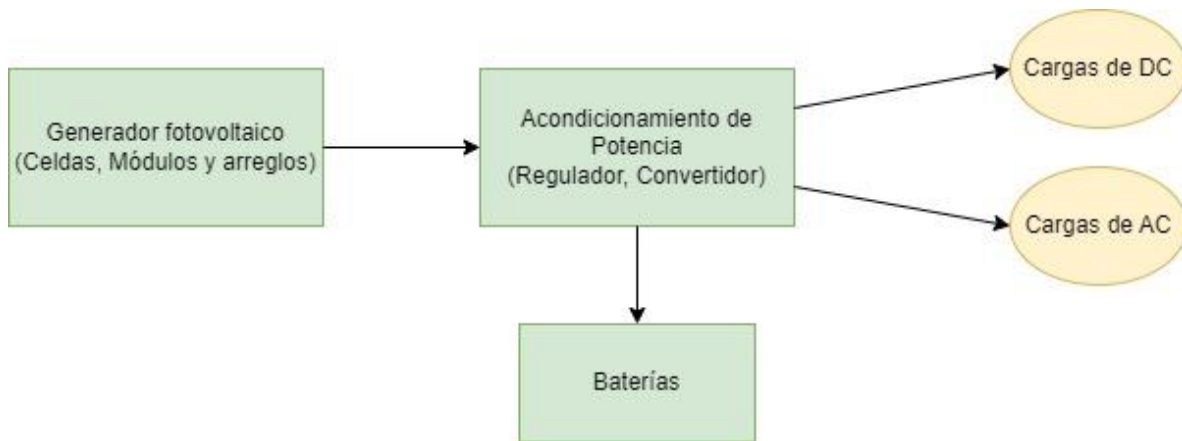


Figura 2.3. Esquema genérico de uso de paneles fotovoltaicos.

En cuanto a las cargas de DC, pueden ser muy variadas, entre las más regulares son las celdas que tienen calculadoras pequeñas, en el caso de AC es común que en el sector doméstico se utilicen paneles solares para reducir el consumo eléctrico de su proveedor de energía eléctrica. En ocasiones también es posible que se desee almacenar la energía generada de alguna forma y esto es debido a que las celdas convencionales sólo producen energía durante el día, por ello, durante la noche es necesario depender del proveedor de energía eléctrica o almacenar la energía sobrante generada durante el día.

El convertidor de potencia simplemente realiza alguna regulación o acondicionamiento para que de forma eficiente se utilice la energía producida por los paneles, por lo regular suelen ser convertidores DC-DC o DC-AC. Para la instalación de estos generadores fotovoltaicos se reúnen en conexiones serie o paralelo de varios paneles, para aumentar el voltaje y la corriente eléctrica, incrementando el voltaje en función de la cantidad de paneles en serie y la corriente eléctrica en función cuantos paneles están en paralelo. Es importante remarcar que para el voltaje de salida de un sistema existen varios estándares para el máximo voltaje en un sistema fotovoltaico. El voltaje máximo del sistema es un dato dado por el fabricante basado en el estándar al cual estén sujetos, siendo uno de ellos la comisión electrotécnica internacional (IEC), la cual define en el estándar 61730 que el máximo voltaje en un sistema fotovoltaico es de 1000 V. El código nacional eléctrico estadounidense (U.S.

NEC) define 600 V para un sistema fotovoltaico. Además de los estándares de voltaje también se fijan las normas que se utilizan para la instalación de paneles fotovoltaicos. En México quien rige estos aspectos es la norma oficial mexicana, para instalaciones eléctricas la NOM-001-SEDE-2018, que en su artículo 290 se tratan todos los aspectos importantes para la instalación de sistemas fotovoltaicos y en su sección 7 define que para un sistema doméstico el voltaje máximo de operación deberá no ser mayor a 600 V. En el caso de ser un edificio de otro tipo es posible tener un voltaje no mayor a los 1000 V y es importante mencionar que esto es para una temperatura de 40 °C [15].

Existen múltiples aspectos que influyen en el desempeño de las celdas solares que no se encuentran asociados a normatividad de forma directa sino a un grupo de características de la zona donde se encuentran instalados. Entre los aspectos asociados a su instalación, pueden encontrarse [16]:

- Zona geográfica: La radiación solar no es completamente igual en todo el planeta y existen zonas que tienen pocas horas de sol al año o la radiación solar no es redituable para colocar sistemas fotovoltaicos, regularmente la latitud es el parámetro que define de gran manera la cantidad de radiación incidente sobre el panel solar, siendo esto la distancia al ecuador. Para esto se realiza una medición de cuantos kWh/m^2 existen en la zona, es decir realizar un estudio de la radiación solar en la zona de instalación, esto para tener una idea de la energía que podría ser capaz de suministrar un sistema fotovoltaico en ese sitio. La Figura 2.4 muestra un mapa de la radiación a nivel mundial y es necesario mencionar la intensidad aumentada que se ve cerca del trópico de cáncer [17].

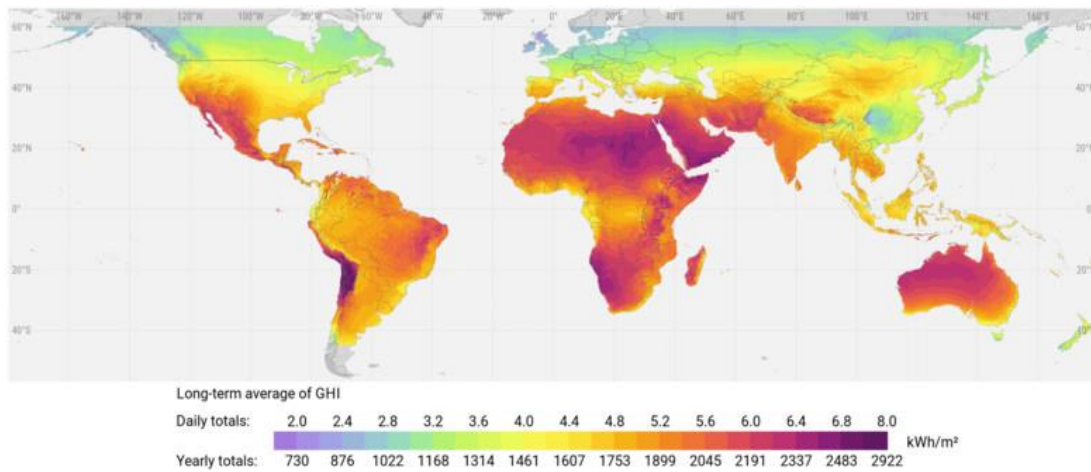


Figura 2.4. Radiación global horizontal.

- **Orientación e inclinación:** Pueden existir variaciones del desempeño de un sistema fotovoltaico en función de la orientación al sol y la inclinación que tienen los paneles, esto debido a que la inclinación permite un mayor aprovechamiento de las horas de sol. La orientación de los paneles está en función de la latitud, esto es, la distancia al ecuador, y desde la perspectiva del punto de inicio apuntar hacia el norte debajo del ecuador y hacia el sur por encima del ecuador. En cuanto a la inclinación, la única afectación provocada por esto es un aumento en el aprovechamiento de las horas de sol, es decir, la inclinación hace que exista mayor incidencia de radiación antes de que el sol se encuentre en su punto más alto, y de esa forma todas las celdas dentro de un panel puedan aprovechar la radiación.
- **Sombras en el panel:** El que objetos que se encuentran a mayor altura del panel provoquen que la radiación no incida correctamente en algunas de sus celdas disminuye la eficiencia y la potencia producida por el sistema, estas sombras pueden deberse a las aves que puedan existir cerca de los paneles, la contaminación que

producen, hojas de árboles que obstaculizan la radiación, tuberías, chimeneas, antenas parabólicas, etc.

- Efectos de temperatura: Entre las características dadas por el fabricante se encuentra el factor de pérdidas de potencia eléctrica asociado a la temperatura, dentro del cual se dan coeficientes de pérdida de potencia, de la corriente de corto circuito I_{SC} y el voltaje de circuito abierto V_{OC} , donde (2.5), (2.6) y (2.7) modelan estos parámetros y cómo es que se utiliza el coeficiente, en las cuales el cambio de temperatura está dado por la temperatura actual del panel menos la temperatura de referencia, que es una temperatura dada por el fabricante para los parámetros calculados en condiciones controladas, regularmente 25 °C, los cuales para el manejo de estas ecuaciones tienen que ser convertidos a Kelvin [18],

$$I_{SC} = I_{SC-J_{tref}} [1 + \alpha_{SC} \Delta T] \quad (2.5)$$

$$V_{OC} = V_{OC-J_{tref}} [1 + \beta_{OC} \Delta T] \quad (2.6)$$

$$P_{Pmax} = P_{Pmax-J_{tref}} [1 + \gamma_{Pmax} \Delta T] \quad (2.7)$$

Un detalle que surge debido a la carga asociada es que se produce una curva de corriente vs voltaje en la cual se define el comportamiento del sistema y se puede caracterizar con cuatro puntos: el voltaje de circuito abierto (2.6), la corriente de corto circuito (2.5), el voltaje de potencia máxima V_{Pmax} y la corriente de potencia máxima I_{Pmax} . Estos datos son proporcionados por el fabricante y definen la región de operación de una celda o un panel en función de la carga conectada [18].

2.1.4 Problemas del uso de Celdas Fotovoltaicas

Existen múltiples problemas asociados al uso de paneles fotovoltaicos, se pueden dar por diversos factores y se pueden resumir en cuatro tipos [16]:

Celdas cortocircuitadas: En ocasiones una mal función de la celda o un mantenimiento deficiente puede provocar que una celda dentro de un arreglo se cortocircuite y su voltaje se

reduzca, lo cual produce un voltaje de salida menor y una corriente más alta, reduciendo la eficiencia total del arreglo de celdas.

Celdas con circuito abierto: En ocasiones ocurre que las celdas se dañan dentro de un arreglo debido a los diodos de protección internos para celdas en paralelo y, por lo tanto, la corriente eléctrica de salida se ve reducida en la salida del arreglo de celdas. Esto también puede suceder en arreglos de paneles fotovoltaicos que se encuentran en paralelo, igualmente por las protecciones que llevan como fusibles y diodos, por lo tanto, la potencia esperada también se ve reducida.

Fallas misceláneas temporales: Al estar expuestos los paneles fotovoltaicos a los elementos de la naturaleza, existen múltiples factores que pueden reducir la eficiencia de los paneles en función de su gravedad estos pueden ser muy variados y pueden ser las condiciones climáticas, como las nubes, el índice de claridad, el polvo que trae el viento, nevadas, etc. Las fallas previamente mencionadas están asociadas al clima, pero también las existen en función del entorno, como lo puede ser la fauna, sobre todo las aves y los árboles que algún punto puedan generar un sombreado parcial del panel.

Fallas misceláneas permanentes: Cuando un panel fotovoltaico tiene mucho tiempo en operación y tiene un mantenimiento deficiente o no se le da el trato adecuado, este puede padecer de diversos problemas como las celdas calientes dentro de un arreglo (*Hotspot*), o incluso los daños dentro del encapsulado de la celda dentro de un panel, como su agrietamiento, decoloración o corrosión [19].

Existen más fallas que pueden ocurrir dentro de los paneles, una de ellas es por el acoplamiento de los paneles fotovoltaicos con el inversor visto como impedancia desde los paneles lo cual impide que el inversor extraiga la mayor cantidad potencia posible de los arreglos fotovoltaicos, otro tipo de fallas están asociadas a los aspectos de instalación deficiente y van más asociados a la sección de corriente alterna y la conexión del sistema fotovoltaico con el sistema de AC del usuario [20].

CAPÍTULO III. DISEÑO DE ALGORITMOS DE FUSIÓN DE DATOS

En las clasificaciones de fusión de datos existentes, según Lawrence Klein *et al* [5] existen tres vertientes:

- Los modelos físicos, con propiedades medibles, calculables o simulables, con ejemplos como el filtro de Kalman, los observadores de estado, etc.
- Los modelos basados en información, donde se encuentran las redes neuronales artificiales, los algoritmos de agrupamiento, la inferencia bayesiana, la inferencia clásica y las plantillas paramétricas.
- Los modelos cognitivos, donde se encuentran los sistemas expertos, la lógica difusa y la teoría de creencia.

Para efectos de este proyecto se evalúan y desarrollan dos técnicas de fusión de datos: un algoritmo de lógica difusa y un esquema de plantillas paramétricas, pero sólo el esquema de plantillas paramétricas es implementado en el sensor inteligente de forma práctica.

3.1 Algoritmo Difuso

La lógica difusa permite analizar situaciones desde un punto de vista de imprecisión o dar un tratamiento matemático desde un enfoque vago a las variables de entrada de un sistema donde un experto diseña las reglas de inferencia y desarrolla los conjuntos del sistema.

Antes de iniciar en la descripción de los algoritmos difusos, se definen dos tipos de sistemas de inferencia difusa [21]:

- **Mandami:** Este tipo de sistema de inferencia difuso tiene como salidas conjuntas difusos, y por ello la salida de un sistema Mandami es la defusificación del área resultante de la agregación del grado de satisfacción de cada regla.
- **Sugeno:** Este sistema de inferencia difuso en cambio, la salida es el promedio ponderado de las reglas, en ese promedio se toman en cuenta el grado de satisfacción de cada regla y el valor de salida de esa regla que puede ser una función lineal o una constante.

Se desea algo semejante a lo mostrado en la Figura 3.1, para ilustrar la operación de forma genérica, en la cual se muestran cinco variables de entrada al sistema.

- Radiación solar
- Corriente eléctrica del panel
- Voltaje del panel
- Temperatura Ambiente
- Temperatura en la celda

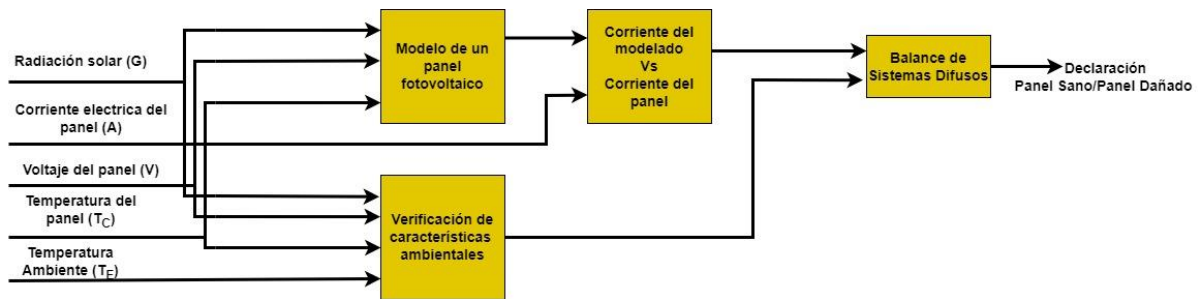


Figura 3.1. Esquema a bloques del algoritmo difuso.

Se genera una salida única que representa la declaración dada por el sistema con respecto a la operación del panel fotovoltaico, esto es si está en buenas condiciones o tiene algún posible daño. Los cuatro bloques que conforman el algoritmo difuso serán explicados más adelante (Secciones 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4).

3.1.1 Modelado básico de una celda con lógica difusa

En la Figura 3.1 se encuentra un bloque que representa el modelado de un panel fotovoltaico, su función es obtener la corriente eléctrica de salida de un panel fotovoltaico con el voltaje, la radiación y la temperatura como entradas. Para iniciar con el desarrollo de un algoritmo de fusión con lógica difusa comienza con el modelado de un panel fotovoltaico a través de características dadas por el fabricante del panel a utilizar. Para este caso se modeló el panel No.: NA-V128HR, que se utilizó para la realización de pruebas, para ello los parámetros eléctricos necesarios para modelar la salida del panel solar se listan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características eléctricas del panel fotovoltaico a modelar NA-V128HR.

NA-V128HR	
Característica	Valor
Voltaje de circuito abierto (V_{OC})	238 V
Corriente de corto circuito (I_{SC})	0.846 A
Voltaje a máxima potencia (V_{PMax})	186 V
Corriente de máxima potencia (I_{PMax})	0.688 A

Es importante mencionar que los parámetros mostrados se obtienen a una radiación de 1000 W/m^2 y temperatura en el panel de 25°C , el fabricante da un margen de error de $\pm 10\%$, por tanto, es posible observar una pequeña variabilidad al momento de conectar de manera práctica los paneles fotovoltaicos.

Primero es necesario obtener datos del comportamiento de la celda a distintas radiaciones y temperaturas. Un buen método para ello es el modelado de la celda aplicando la teoría de circuitos eléctricos vista en el Capítulo II. Para el modelado de un panel fotovoltaico con lógica difusa con la radiación solar como entrada, se requieren las radiaciones a probar y de forma general se seleccionan cinco radiaciones, 1000, 800, 600, 400 y 200 W/m^2 . Para obtener la corriente de salida es necesario el voltaje el cual puede ser clasificado en tres comportamientos: voltaje de corto circuito, voltaje de máxima potencia de salida y voltaje de circuito abierto, dos de ellos se encuentran registrados en la hoja de datos del fabricante y además a distintas radiaciones y en algunos casos también a una temperatura distinta, típicamente 40°C o 45°C . El Voltaje de circuito abierto a 1000 W/m^2 se encuentra en 238 V, pero a una radiación de 800 W/m^2 se reduce a 216.17 V, por lo tanto, al diseñar el conjunto difuso de este parámetro debe tener una dispersión un poco alta según el tipo de función de membresía seleccionada. En este caso se selecciona una función de membresía tipo S, con un inicio en 186 V y final en 210 V. El voltaje de máximo punto de potencia a 1000 W/m^2 de radiación es de 186 V, pero a una radiación menor como 800 W/m^2 se reduce el valor del voltaje a 164.93 V. Así, se selecciona una función de membresía tipo gaussiana con centro en 195 V y una dispersión de 15 V. Finalmente, se selecciona para el voltaje de circuito abierto una función de membresía tipo Z y como la corriente de salida es prácticamente la misma para los voltajes desde el voltaje de circuito abierto hasta el voltaje

de máxima potencia, se toma como un solo conjunto difuso con parámetros de Z que en 0 V es máxima membresía, pero decae completamente a cero en 170 V. La Figura 3.2 muestra de forma directa el aspecto general de los conjuntos difusos.

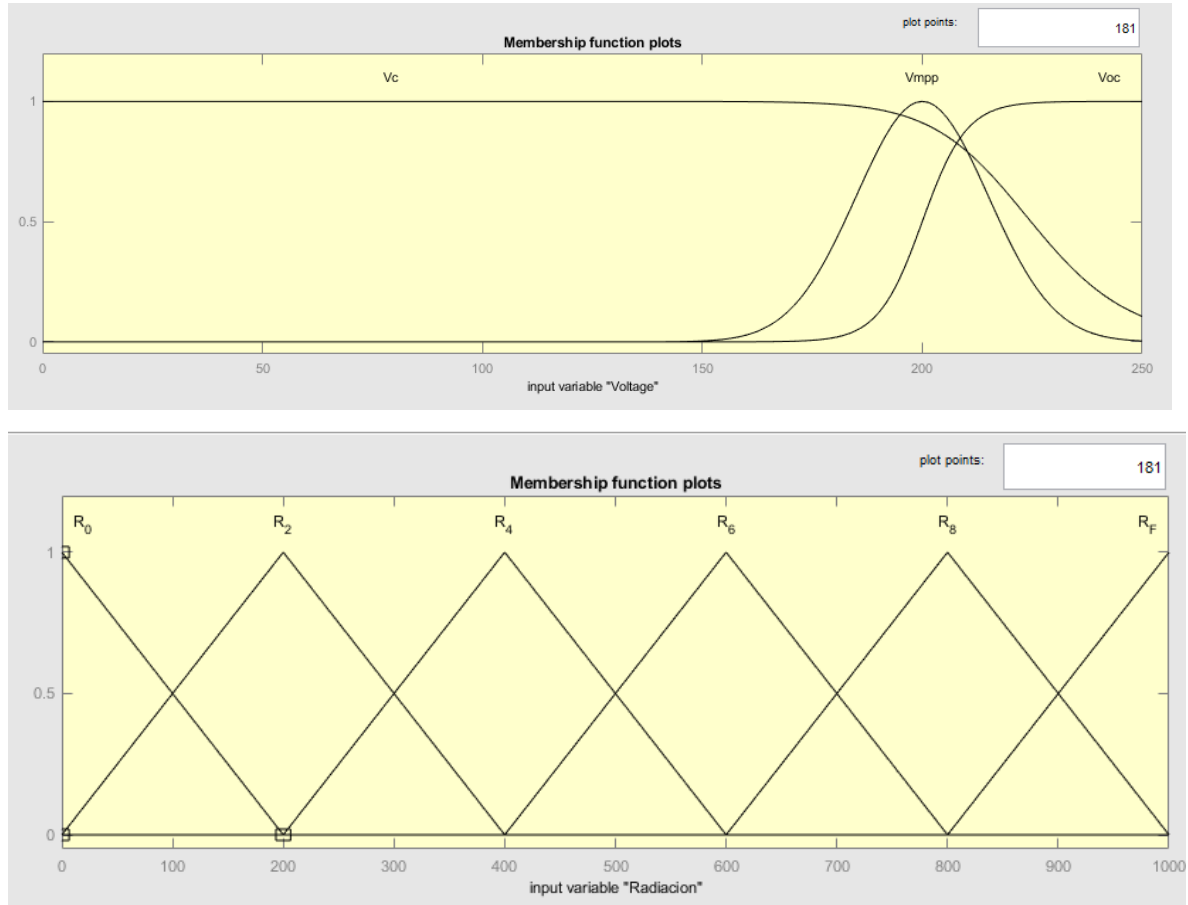


Figura 3.2. Funciones de membresía de voltaje y radiación.

Para la selección de las funciones de membresía de la radiación se seleccionaron funciones triangulares, cada una con su punta en múltiplos de 200 W/m^2 , con los vértices izquierdo y derecho a 100 W/m^2 , esta descripción es más visible en la Figura 3.2.

Al ser un sistema tipo Sugeno, las salidas no se modelan como conjuntos difusos, sino como constantes y por lo tanto se tienen que seleccionar las constantes para cada radiación y voltaje, se formula la Tabla 3.2 con datos provenientes del modelado con celdas solares.

Tabla 3.2 Constantes para el modelado del panel fotovoltaico para radiación.

Radiación (W/m^2)	I_{SC} (A)	I_{MPP} (A)
1000	0.846	0.688
800	0.6768	0.5504
600	0.5076	0.4128
400	0.3384	0.2752
200	0.1692	0.1376

A través de los datos de la Tabla 3.2, se puede constituir un sistema Sugeno en el cual se pueden colocar como salidas estos valores y para la construcción de reglas se realiza de manera simple, en la cual se tienen los tres casos de voltaje existentes y se asocian cada uno con una corriente y una radiación. Un ejemplo simple es que el voltaje de corto circuito con una radiación de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ corresponde a una corriente de salida de 0.846 A, en caso de que fuera el voltaje de máxima potencia a una radiación de $200 \text{ W}/\text{m}^2$, la salida de corriente es de 0.1376 A, esto sería como:

IF Voltage Is V_C AND Radiation Is 1000W THEN I_O IS I_{SC1}

IF Voltage Is V_C AND Radiation Is 800W THEN I_O IS I_{SC2}

IF Voltage Is V_{MPP} AND Radiation Is 1000W THEN I_O IS I_{MPP1}

IF Voltage Is V_{MPP} AND Radiation Is 400W THEN I_O IS I_{MPP4}

IF Voltage Is V_{oc} AND Radiation Is 1000W THEN I_O IS 0

IF Voltage Is V_{oc} AND Radiation Is 200W THEN I_O IS 0

Una vez generadas las gráficas (Figura 2.2), estas pueden ser comparadas contra las obtenidas con la teoría de circuitos y generar una medida de desempeño contra el modelado con la teoría de circuitos generando la Tabla 3.3 con los rendimientos mostrados.

Tabla 3.3. Resultados del modelado de un panel fotovoltaico con radiación solar.

Radiación (W/m²)	Error cuadrático medio de la recta de voltaje vs corriente
1000	0.0062
800	0.0010
600	0.0012
400	0.0070
200	0.0166

La salida de corriente con respecto a la temperatura es diferente debido a las ecuaciones vistas previamente (Ec. 2.5, 2.6, 2.7) que modelan el cambio de la corriente eléctrica, el voltaje de circuito abierto y la pérdida de potencia en función de la temperatura, esto es, que a mayor temperatura el voltaje de circuito abierto es menor y aunque la corriente eléctrica de salida del panel es la misma, al ser más bajo el voltaje de circuito abierto, también es más bajo el voltaje de máxima potencia y por lo tanto, existe una reducción en la potencia que deberá ser prevista.

Se seleccionan las temperaturas a probar donde de igual forma se evalúan las que los fabricantes otorgan como información en sus hojas de datos. Las temperaturas para el caso particular del panel 4 Series 185 W de BP Solar son 0, 25, 40 y 70°C. En cada caso se extraen los valores necesarios para conformar los conjuntos difusos y las salidas del modelado con la teoría de circuitos para el panel NA-V128HR, los valores se concentran en la Tabla 3.4

Tabla 3.4. Cambio de los voltajes de salida en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	Voltaje de circuito abierto (V)	Voltaje de máxima potencia (V)
0	260.89	229.67
25	238	186
40	224.52	173.48
70	211.22	160.96

Los valores de voltaje para cada temperatura en la Tabla 3.4 son a una radiación de 1000 W/m^2 , pero en cada caso las corrientes eléctricas son muy semejantes entre sí (Tabla 3.5), sin embargo, el voltaje a estas temperaturas es el más afectado y también se reduce la potencia eléctrica final incluso en los voltajes de máxima potencia. En este caso también se define la Tabla 3.5 de corriente eléctrica en función de la temperatura, es muy poco el cambio de la corriente eléctrica entre los valores mostrados y es importante mencionar que existe un coeficiente combinado de la pérdida de la potencia máxima extraíble del panel solar, pero se manejan por separado para la evaluación y diseño del sistema de inferencia difusa que modela la corriente en base a la temperatura.

Tabla 3.5. Corrientes eléctricas de salida en base a la temperatura.

Temperatura (°C)	Corriente de corto circuito (A)	Corriente de máximo punto de potencia (A)
0	0.831	0.675
25	0.846	0.688
40	0.859	0.699
70	0.8709	0.711

Para este caso se crean conjuntos difusos que describan el voltaje del panel a distintas temperaturas puesto que el punto que corresponde a máxima potencia de una curva es el corto circuito en una curva de mayor temperatura. Si bien en la mayor parte de las celdas solares se tienen coeficientes positivos en la corriente, siempre la pérdida de potencia de salida o el punto de potencia máxima tiene un coeficiente de pérdidas negativo en muchos casos y las ecuaciones (2.5), (2.6) y (2.7), son las que describen el comportamiento de estas variables. En este caso para las distintas temperaturas se obtienen los rendimientos mostrados en la Tabla 3.6.

Estos modelados son con la intención de generar un modelado total del panel solar que sea útil para la comparación entre la corriente eléctrica esperada y la corriente eléctrica medida del panel solar. Es posible generar un modelado total para el panel fotovoltaico, pero esto supone un problema y consiste en que generar medidas de desempeño del algoritmo

puede ser complicado puesto que no se ha encontrado en la literatura modelados totales del panel fotovoltaico para ambas variables.

Tabla 3.6. Resultados obtenidos del modelado de un panel fotovoltaico en base a la temperatura.

Temperatura (°C)	Error cuadrático medio de la recta de voltaje contra corriente
0	1.3167
25	0.1162
40	0.5081
70	0.1409

3.1.2 Desarrollo del comparador de corriente eléctrica

En la Figura 3.1 existe un bloque que contiene “Corriente esperada Vs Corriente medida”, su función es comparar la corriente medida con el dato obtenido del modelado difuso del panel fotovoltaico, lo que se busca es tener resultados semejantes. Para ello, es necesario definir las fallas o las pérdidas de potencia para ofrecer un valor de 0 al 100% de semejanza entre los valores medidos siendo el valor de referencia el que genera el modelado matemático. Por tanto, es necesario diseñar conjuntos difusos que permitan comparar la corriente eléctrica y en este tipo de sistemas es necesario normalizar las entradas para que también estén por defecto en un rango de 0 a 100% o visto de otra manera puede ser de 0 a 0.886 A, en el caso de uno de los paneles tratado.

Para la normalización es necesario extraer los valores de corriente eléctrica máximos en función de las variables de radiación y temperatura, esto no es problemático puesto que se pueden obtener fácilmente de los modelados previamente realizados. Por tanto, las entradas de este sistema de inferencia difusa se particionan en intervalos del 10% con una salida que muestra la diferencia entre uno y otro en porcentaje, la Figura 3.3 muestra de forma gráfica las funciones de membresía.

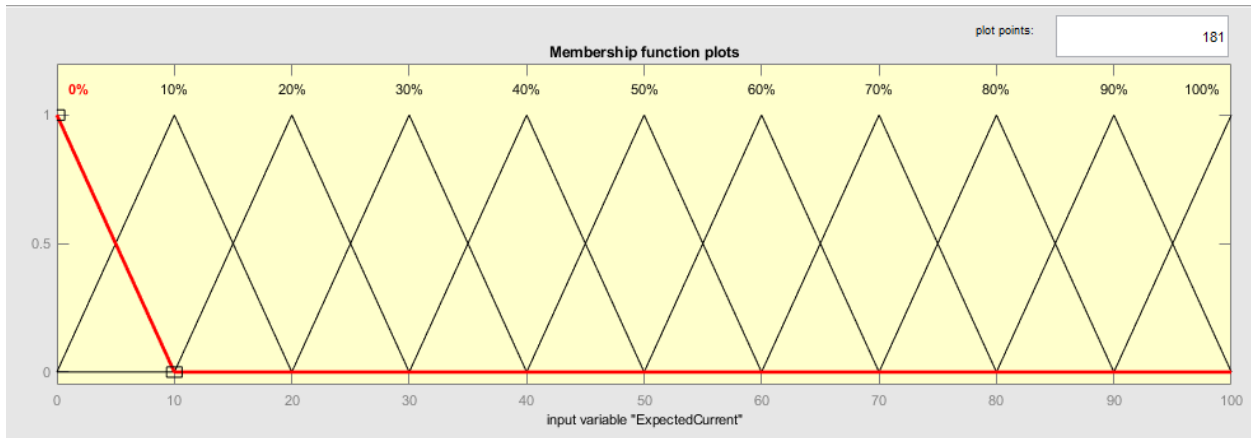


Figura 3.3. Funciones de membresía para la corriente esperada o medida y de salida.

Para la construcción de la salida, se conforma de la misma manera un conjunto de funciones triangulares de cero al 100% y en este caso en función de la diferencia entre la corriente eléctrica esperada basada en el modelado con lógica difusa de un panel solar con radiación y temperatura como variables de entrada. Se muestran las reglas que conforman el sistema para realizar este sistema en el cual se utilizan únicamente funciones AND. Lo que se intenta realizar es obtener la semejanza entre las intensidades de corriente o una forma de medir su diferencia, para ello se crean 100 reglas para definir la operación del sistema, se muestran algunas de ellas a continuación:

IF ExpectedCurrent Is 100% AND MeasuredCurrent Is 100% THEN Likeness IS 100%

IF ExpectedCurrent Is 100% AND MeasuredCurrent Is 90% THEN Likeness IS 90%

IF ExpectedCurrent Is 80% AND MeasuredCurrent Is 90% THEN Likeness IS 80%

IF ExpectedCurrent Is 70% AND MeasuredCurrent Is 70% THEN Likeness IS 100%

IF ExpectedCurrent Is 80% AND MeasuredCurrent Is 70% THEN Likeness IS 90%

IF ExpectedCurrent Is % AND MeasuredCurrent Is 100% THEN Likeness IS 100%

No se muestran todos los casos posibles, sólo algunos para ejemplificar de forma inicial como es que trabaja este sistema y se muestre que incluso para cada porcentaje existe un nivel de semejanza en función de la diferencia entre la corriente medida y la esperada en base al modelado. Para hacer efectiva la salida de este sistema es necesario realizar una evaluación del porcentaje obtenido del índice de confianza y este porcentaje de aceptación,

umbral o límite está en función de la aplicación, la carga conectada y lo estricto que se desea ser con la evaluación de los paneles, por lo tanto, a partir del límite definido y el porcentaje obtenido se obtiene una primera evaluación simple para definir si funcionan correctamente.

Esto es definir un porcentaje mínimo de potencia, un ejemplo podría ser que para un 15% de pérdida de potencia en algunos casos podría no ser representativo por la carga conectada de los paneles, la capacidad de mantenimiento o incluso el criterio de un usuario o experto.

3.1.2 Desarrollo del sistema que evalúa las características ambientales

En el caso del sistema de inferencia difuso que aparece como verificación de características ambientales, es un método para que cuando la corriente eléctrica esperada llegase a ser distinta a la medida, exista una segunda forma de verificar al panel fotovoltaico mediante la evaluación de que las condiciones ambientales sean buenas para la generación de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos. Lo anterior se resume en cuatro aspectos:

- Radiación en niveles mayores a los 200 W/m^2 , ya que para radiaciones menores en muchas ocasiones los paneles fotovoltaicos sufren una reducción de la eficiencia.
- Temperatura en la celda menor a los 50°C , esto porque si bien los paneles pueden calentarse a temperaturas muy elevadas y es parte de su operación nominal, es necesario que la temperatura se mantenga en cierto intervalo debido a que una mal función detectada por el comparador de corrientes puede atribuirse a la temperatura en la celda y este sistema difuso lo identificaría.
- Voltaje en máximo punto de potencia, si bien en general un panel puede tener conectada cualquier carga eléctrica y técnicamente estar entregando la potencia eléctrica en función de la carga conectada, en muchas ocasiones la carga no es la adecuada para extraer la mayor cantidad de potencia que tiene disponible el panel fotovoltaico, esto también puede ser detectado por el comparador de corrientes, pero de la misma manera esto es una segunda evaluación
- Temperatura ambiente en valores entre los 10°C y 35°C , esto se debe a que la mayor parte de elementos semiconductores presentes en el inversor o convertidor y los mismos diodos de protección dentro de los paneles fotovoltaicos tienen un mayor tiempo de vida y una operación adecuada en este intervalo de temperatura.

3.1.3 Balance de Sistemas Difusos

En la Figura 3.1 se encuentra un último bloque llamado “Balance de Sistemas Difusos”, este bloque tiene la función de funcionar como un punto de votación, esto consiste en que los sistemas anteriores votan o dan un veredicto en función de sus entradas y la lógica es determinar si el sistema fotovoltaico está dañado, para ello genera una tabla de entradas y salidas, la cual con pura lógica binaria desarrolla este último sistema bloque, la lógica detrás de este balance se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.7. Lógica que sigue el sistema de balance de sistemas difusos.

Resultado de Diferencia de corrientes	Resultado de parámetros ambientales	Modo de operación
Corrientes diferentes	Condiciones ambientales no óptimas	Sistema funcionando correctamente
Corrientes diferentes	Condiciones ambientales óptimas	Sistema con presencia de falla
Corrientes semejantes	Condiciones ambientales no óptimas	Sistema con presencia de falla
Corrientes semejantes	Condiciones ambientales óptimas	Sistema funcionando correctamente

La lógica de salida es bastante simple y se le asemeja de cierta manera a una compuerta XNOR, se desarrolla la lógica de esta manera debido a que en la primera regla es fácil que exista discrepancia entre las corrientes eléctricas y esto se debe en gran manera a que en ausencia de radiación y siendo las corrientes tan bajas es fácil que la diferencia sea alta.

3.2 Algoritmo de Plantillas Paramétricas

Como se planteó previamente, las plantillas paramétricas son útiles para la distinción de anomalías a través del almacenamiento de los valores esperados de un fenómeno y eso suele usarse mediante el uso de las características distintivas del fenómeno a analizar. Los parámetros analizables comunes son la media, distribución de probabilidad normal, coeficientes de Fourier o armónicas específicas, coeficientes “wavelet”, textura o bordes en imágenes, entre otros.

Para aplicar este método, es necesario extraer alguna característica que defina los valores esperados del sistema y definir el método para comparar la característica esperada contra la obtenida. Una forma de determinar el tipo de característica a seleccionar para modelar de forma más fiel el comportamiento y obtener los valores esperados es mediante el análisis de datos obtenidos del fenómeno de interés con condiciones similares que permita tener repetibilidad para determinar el comportamiento de las variables con respecto a otras.

Inicialmente, la hora del día parecía ser una variable válida para caracterizar mediante el promedio y la desviación estándar la corriente eléctrica, el voltaje, la radiación solar, la temperatura en el panel y la temperatura ambiente. Sin embargo, debido a lo extremo que pueden ser los cambios de condiciones climáticas en una hora de observación y aunque se puede trabajar con observaciones con tiempo inferiores, en muchas ocasiones resultaba en dispersiones altas para los parámetros de salida.

Las variables medidas para mostrar este efecto se presentan en la Figura 3.4, en ella está el comportamiento del panel fotovoltaico a las 16:00 Hrs. con los rangos de operación de las variables que definen el comportamiento del panel a esa hora.

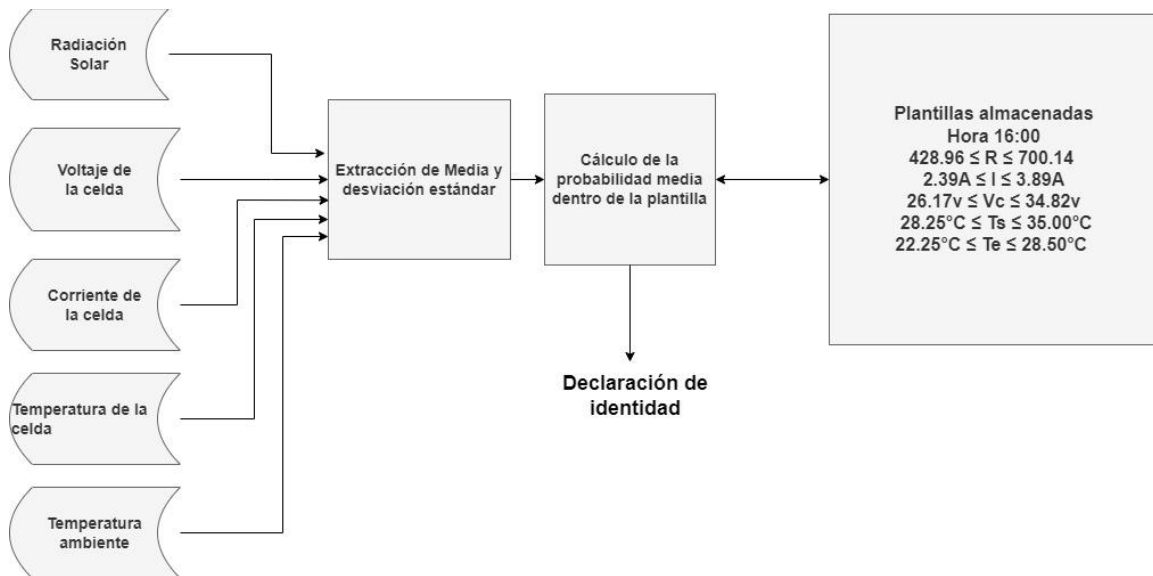


Figura 3.4. Esquema genérico para el algoritmo de plantillas paramétricas.

3.2.1 Determinación y diseño de plantillas paramétricas

Para determinar si un panel se encuentra en los parámetros esperados primeramente es necesario desarrollar un modelado que permita obtener los rangos de trabajo esperados. Inicialmente se hizo en base a la hora del día, pero al realizar el análisis no se obtuvieron resultados utilizables para desarrollar un sistema de diagnóstico, por lo que en lugar de la hora se utilizó la radiación para modelar el voltaje y la corriente eléctrica con una segunda evaluación en la temperatura en caso de que se desee mayor seguridad en el diagnóstico ofrecido. En este caso, modelar la corriente y el voltaje en función de la radiación solar resulta más útil, debido a que son altamente dependientes de la radiación solar.

Si bien la hora es un indicador de la radiación solar, en muchas ocasiones puede ser muy variable de un día a otro a la misma hora y se debe principalmente a que la radiación es un parámetro no controlable que se selecciona como variable base para el inicio de la fusión. Por ello es necesario evaluar en puntos específicos del día que permitan modelar, pero en un sentido diferente la corriente y el voltaje contra la radiación solar presente.

Al aplicar la evaluación antes mencionada se obtienen las gráficas de los valores promedio y los límites superior e inferior entre $\pm 3\sigma$ a los cuales pueden llegar las variables de radiación solar, con un 99.7 de confianza para el voltaje y corriente eléctrica en un periodo de 30 días entre las 11:00 y las 12:00 h de manera que estos resultados sean significativos. Para obtener los datos de corriente, voltaje y radiación, se instaló un sistema de medición provisional para obtener los datos de esos días, cuya variabilidad se muestra en la Figura 3.5.

En este caso se grafica el promedio y los límites superiores e inferiores obtenidos durante 30 días para el panel fotovoltaico. Sólo es para entre las 11:00 y 12:00 h, aunque para el caso del modelado ya no se utilizará de forma directa la hora sino la radiación solar presente para caracterizar la corriente eléctrica y su operación, esto es, dividir la radiación presente en un intervalo que permita caracterizar el voltaje y la corriente. Se deben tomar en cuenta múltiples puntos del día para tener suficiente información que permita caracterizar el sistema. De la misma manera también se generaron gráficas del comportamiento diario para entre las 9:00 y 10:00 h y entre las 13:00-14:00 h, los resultados se muestran en la Figura 3.6.

Estos datos tienen un aspecto interesante a comentar, las condiciones medioambientales son un factor que depende de muchos aspectos, pero uno de los más importantes o que modifica de forma sustancial estas condiciones es la época del año, se debe a los efectos del sol en puntos extremos del año como el solsticio de invierno o de verano. Por lo que si se hace el mismo ensayo a las mismas horas en época de verano es posible que se obtengan valores de radiación distintos a las horas revisadas y por lo tanto valores distintos en las corrientes y voltajes de salida.

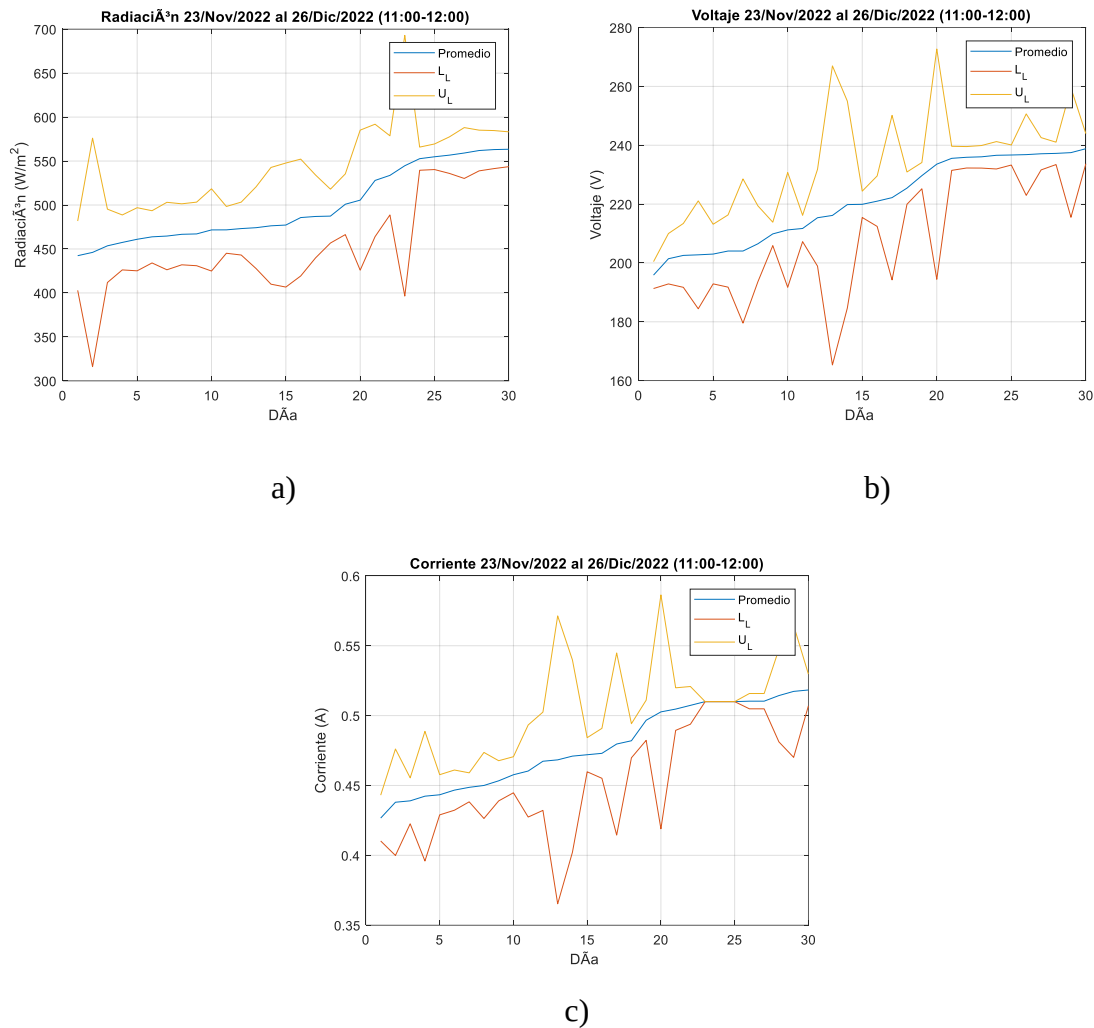
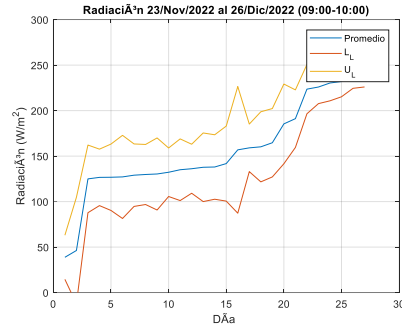
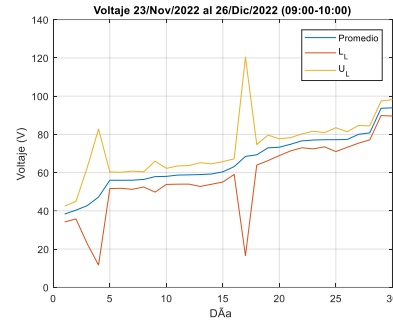


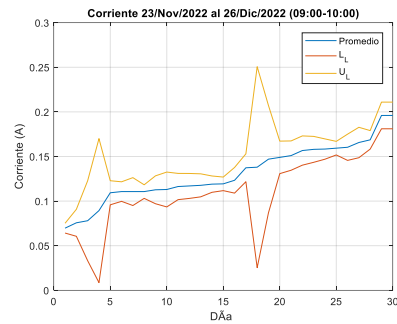
Figura 3.5. Gráficas de los límites superiores (U_L), límites inferiores (L_L) y promedios de cada día de 11:00-12:00 h del 23/Nov/22 al 26/Dic/22 a) Radiación b) Voltaje c) Corriente.



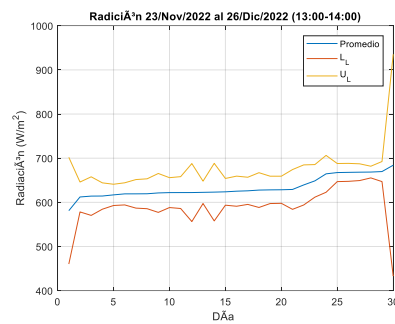
a)



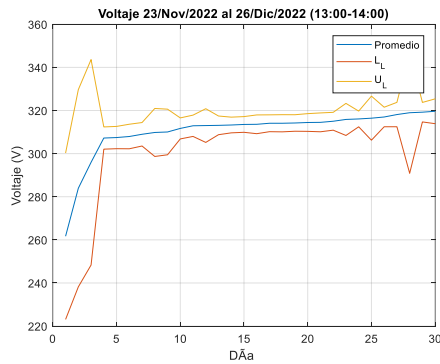
b)



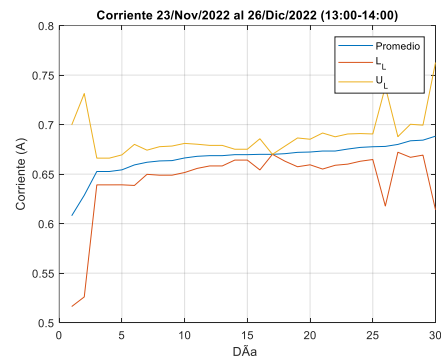
c)



d)



e)



f)

Figura 3.6. Gráficas de los límites superiores (U_L), límites inferiores (L_L) y valores promedio al analizar datos del 23/Nov/22 al 26/Dic/22 a) Radiación solar de 9:00-10:00 h. b) Voltaje de 9:00-10:00 h. c) Corriente eléctrica de 9:00-10:00 h. d) Radiación solar de 13:00-14:00 h. e) Voltaje de 13:00-14:00 f) Corriente eléctrica de 13:00-14:00

Cada punto en las imágenes mostradas representa una plantilla, un ejemplo en la plantilla 5 la radiación entre 87 W/m^2 y 162 W/m^2 , los límites de voltaje y corriente se establecen entre 22 V y 62 V y para el caso de la corriente se encontrará entre 0.03316 A y 0.1228 A. Esta plantilla fue diseñada para una radiación media de 125 W/m^2 , pero se puede repetir para cada radiación conocida con intervalos de separación de una radiación de 20 W/m^2 o mayor de forma que se puedan generar intervalos para diferenciar corrientes y voltajes en función de la radiación, los intervalos deberán tener una dispersión baja para que exista un traslape reducido entre las plantillas y evitar que se hagan asociaciones erróneas.

El proceso de agrupar las radiaciones en incrementos escalonados de radiación puede conformar una tabla en la cual se encuentren las medias y desviaciones estándar de cada parámetro con los incrementos realizados que permitan describir la operación del sistema a múltiples radiaciones. La Tabla 3.9 muestra datos de las plantillas y la construcción básica de las plantillas.

No se muestran todas debido a lo extenso que puede ser representar todos los elementos que conforman los valores de radiación y sus salidas. Ahora bien, con los datos de la Tabla 3.9 se puede describir la operación del algoritmo de modo que se pueda determinar si el panel se encuentra sano o se encuentra dañado. Es importante notar que la Tabla 3.9 está diseñada para valores de radiación tomados durante la mañana, se dice esto debido a que el análisis de datos de distintos puntos del día para conformar estas plantillas arrojó un aspecto adicional. Al analizar por la mañana una radiación entre 100 W/m^2 y 120 W/m^2 y se obtiene su media en las salidas de corriente y voltaje, se obtiene de media de voltaje 40 V y de corriente eléctrica 0.07365 A, mientras que para los mismos valores de radiación durante la tarde, se tiene una media de voltaje de 94.57 V y en la corriente eléctrica una media de 0.1965 A. Este efecto puede deberse a múltiples factores, pero para la solución de ello se opta por utilizar la hora como referente, puesto que solo es un indicador de donde buscar la plantilla, pero la radiación es el parámetro que define la plantilla seleccionada de forma final.

Tabla 3.9. Plantillas paramétricas y los datos que representan el comportamiento del panel fotovoltaico.

No. plantilla	Radiación media (W/m ²)	Desviación estándar de la radiación (W/m ²)	Voltaje medio(V)	Desviación estándar del voltaje (V)	Corriente media(A)	Desviación estándar de la corriente (A)
1	2.7631	0.9158	37.6	4	0.0023	0.00000773
2	8.3097	2.4967	40.1	2.2	0.0070	0.0021
3	22.3839	6.0283	50.4	3	0.0189	0.0051
4	54.0081	12.8547	60	5	0.0456	0.0108
5	116.7320	14.1123	59.22	2	0.078	0.016
6	124.9887	3.2020	118.4987	9.12	0.2522	0.019
7	167.9171	7.3250	130.9077	1.3985	0.2794	0.0022
8	225.9608	9.5477	76.22	1.33	0.1567	0.0054
9	247.2	7.0333	80.01	1.54	0.1657	0.0056
10	356.0742	5.81	213.8381	1.23509	0.4598	0.0013
11	391.8251	7.1729	191.3	4	0.4103	0.0053
12	419.3106	7.3772	163.01	1.517	0.3506	0.0018
13	475.2758	18.9725	203.4043	7.1814	0.4401	0.0142
14	513.7363	8.4255	287.0383	1.6481	0.6116	0.0037
15	560.5541	8.7742	235.9901	1.2384	0.5101	0.0012
16	608.6062	7	283.9949	1.4701	0.6527	0.0045
17	622.2586	8.3402	311.7275	1.3326	0.6622	0.0042
18	643.4925	8.1625	285.8707	1.6458	0.6127	0.0045
19	667.9163	6.5392	291.2799	0.6698	0.6698	0.0012

4.2.3 Cálculo de la probabilidad

El aspecto más importante o el más destacable es que para verificar el porcentaje de datos que se encuentran dentro de la plantilla seleccionada, o cual es la probabilidad de que los valores se encuentren dentro de los límites de la plantilla, x . Se realiza mediante el cálculo de una integral en la cual los límites de integración corresponden a $\mu + 3\sigma$ y $\mu - 3\sigma$, donde los valores de media μ y desviación estándar σ , se obtienen de las plantillas previamente diseñadas, Ec. (3.8),

$$f(x; c, s) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\mu-3\sigma}^{\mu+3\sigma} e^{\frac{-(x-c)^2}{2s^2}} dx \quad (3.1)$$

donde c es la media y s la desviación estándar ambas obtenidas de los cálculos realizados de datos leídos durante la operación del sensor inteligente. El propósito del cálculo es conformar con los datos obtenidos una función gaussiana y verificar que tanto de los datos se encuentran dentro de los límites establecidos previamente. Lo anterior para tener una medida más confiable de que los valores se encuentren dentro de los límites.

Un ejemplo del análisis sería, tener una media calculada de corriente de 0.5037 A y una desviación estándar de 0.0051 A, al evaluar estos datos en la plantilla 15, que tiene por datos de corriente 0.5101 A de media y 0.0012 A de desviación estándar, la Figura 3.8 ilustra el sombreado de la función gaussiana dentro de estos límites.

El propósito de la evaluación de esta integral es obtener que cantidad de los valores medidos durante la operación del sensor están dentro de los límites establecidos previamente. Por ello es necesario definir un porcentaje mínimo de datos (umbral) que defina a partir de qué momento un panel deja de estar sano y se le puede considerar como un panel dañado (Figura 3.8, el valor 0.26654 en el resultado de la integral)

El valor del umbral estará en función de las tolerancias del panel solar, su degradación anual, la potencia del panel, lo estricto que se desee ser con la operación de los paneles, etc.

Una vez realizado este análisis del umbral de la cantidad de datos que caen dentro de la plantilla puede decirse que la fusión de datos se ha efectuado, el discernir si los paneles están dañados o no, estará en función del porcentaje de datos de la función gaussiana dentro de los límites.

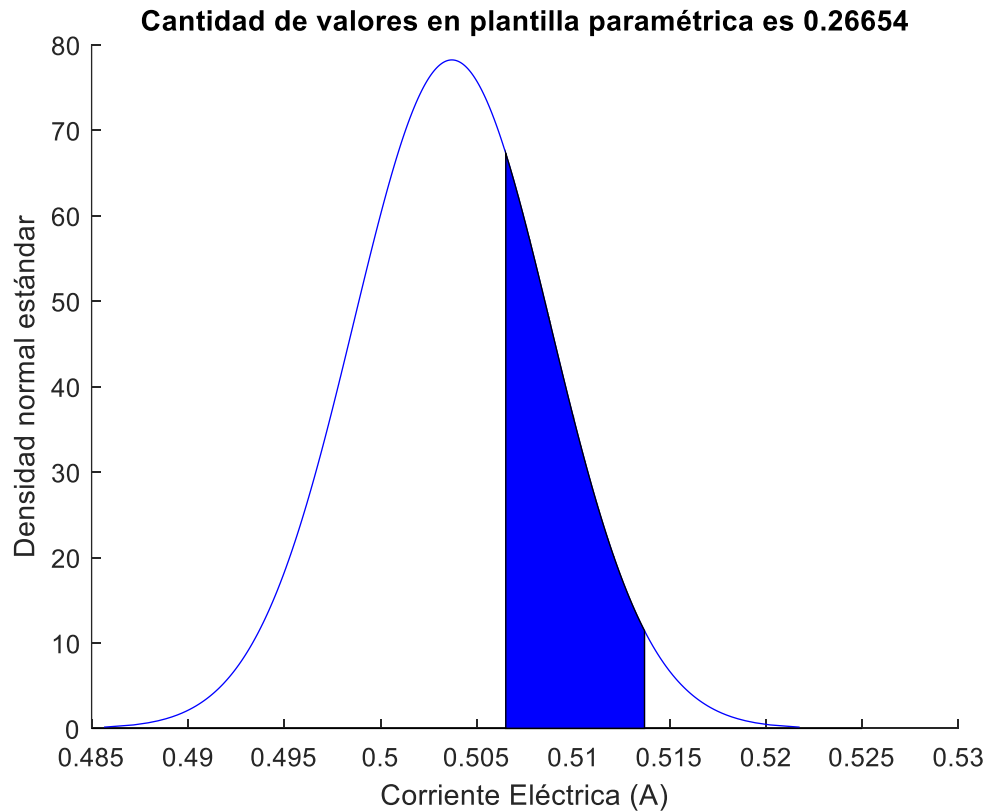


Figura 3.7. Cálculo de la integral para la evaluación de un parámetro de corriente.

3.3 Pruebas Simuladas de los Algoritmos

Las pruebas simuladas tienen el propósito de analizar que el algoritmo desarrollado tiene la capacidad de distinguir las fallas que pudieran ocurrir en la operación de la celda fotovoltaica. La idea central detrás de la experimentación realizada es la construcción de datos simulados en base a mediciones, esto para tener una mayor cercanía con lo real y demostrar de una mejor manera la correcta operación de los algoritmos. La Figura 3.8 muestra la metodología seguida para los experimentos.

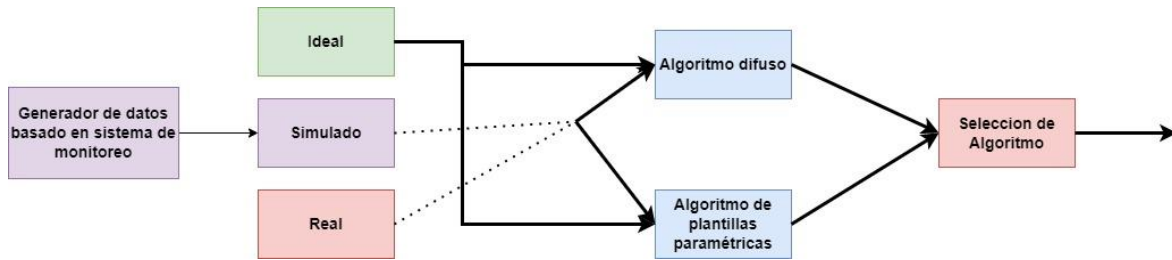


Figura 3.8. Diseño de experimentos para la selección del algoritmo.

Para realizar las pruebas, se tomaron datos de 30 días, estos se debían adquirir en condiciones similares, por lo tanto, las mediciones se tomaron en el mismo horario desde las 7 AM a las 7 PM en intervalos de dos horas. A los datos se les extrae su valor medio y su desviación estándar, lo cual permite obtener el rango de salidas que se tienen disponible. Mediante la aplicación del modelado matemático se obtiene la respuesta de los paneles. Para representar el comportamiento y variabilidad de los valores que se obtienen se muestra la Tabla 3.10 en la cual se encuentran la media y desviación estándar obtenida de cada variable.

Tabla 3.10. Resultados obtenidos a cada hora de los parámetros ambientales.

Hora del día	Radiación media (W/m^2)	Desviación estándar de la radiación (W/m^2)	Temperatura en la celda media ($^{\circ}C$)	Desviación estándar de la temperatura ($^{\circ}C$)
7	0.0317	0.4254	19.2779	0.8720
9	142.5170	48.6109	20.2413	1.1282
11	438.8883	142.6227	22.1968	1.2644
13	595.0326	138.1667	25.5433	1.4846
15	474.4177	123.9843	26.5628	1.2941
17	157.7131	63.4480	24.8947	0.9435
19	0.0142	0.5889	22.3678	0.5711

La Tabla 3.10, permite conocer las condiciones climatológicas del lugar donde se encuentran las celdas en distintos puntos del día de modo que con estos datos se pueden generar datos de corriente y voltaje mediante los modelados previamente mostrados. Para esto se requieren puntos de radiación y temperatura, se genera un arreglo de datos que cubra

todo el rango del arreglo que cubre toda la dispersión existente y se utiliza para generar un dato de corriente y otro de voltaje.

En algunos casos los datos generados de corriente eléctrica se van a sustituir con valores característicos de celdas dañadas, para esto es necesario definir un porcentaje de pérdida de potencia aceptable, el cual ha sido comentado previamente y para ello se toman en cuenta los siguientes aspectos:

- La potencia de los paneles simulados es de 170 W, pero su tolerancia de potencia es de -5%/+10% y el fabricante asegura un 96% de la potencia tasada de los paneles de forma inicial.
- La degradación anual que sufre la potencia de salida de los paneles es de 0.3333%, es decir cada año el panel perderá 0.4499 W de potencia de salida.
- Es una aplicación de baja potencia y la carga es estática.

Inicialmente al adquirir estos paneles se esperarían alrededor de 163W en su conexión inicial a 1000 W/m^2 y una temperatura de 25°C , pero tras unos 10 años en uso perderían un 3.33% de potencia dando como resultado una espera de 153 W como máximo tras ese tiempo de operación. Se proponen diez años de envejecimiento debido a que muchas de las instalaciones fotovoltaicas en México tienen esa edad. Estos factores producen que la pérdida de potencia aceptable es del 10%, por lo tanto, cualquier valor que indique una pérdida mayor deberá ser considerado como un panel dañado y este proceso se le aplicará a una porción de los datos de entrada de los algoritmos.

En el caso del algoritmo difuso, de forma inicial ofrece el siguiente desempeño:

- Este algoritmo realiza declaraciones correctas un 72% de las veces.
- Este algoritmo realiza declaraciones incorrectas un 28% de las veces.
 - Con datos de un panel sano, clasificó un 81% de las veces el panel como bueno (19% de error).
 - Con datos de un panel con falla, clasificó un 91% de las veces los datos como panel dañado (9% de error).

Para este experimento se usaron 210 valores de radiación, corriente, voltaje y temperatura de la celda, donde 70 de ellos correspondían a valores de potencia de paneles defectuosos, esto debido a que en este caso este algoritmo tendría una declaración para cada entrada dada.

En el caso del algoritmo de plantillas paramétricas, este ofreció el siguiente desempeño:

- El algoritmo realiza clasificaciones correctas un 83% de las veces.
- El algoritmo realiza clasificaciones incorrectas un 17% de las veces.
 - Al recibir datos de un panel sano el 9 % de las veces clasificó el panel como bueno (5% de error).
 - Al recibir datos de un panel defectuoso el 88% de las veces los clasificó como defectuoso (12% de error).

Se usaron 900 valores de radiación, corriente, voltaje y temperatura de la celda, donde 300 de ellos correspondían a valores de potencia de paneles defectuosos. En este caso, para tener seguridad de que el algoritmo se encuentra realizando correctamente las declaraciones, los datos de paneles defectuosos deben encontrarse en grupos de 30 por la cantidad de información que requiere el algoritmo para operar y también se debe a que en caso de que se encuentren mezclados con datos de paneles solares sanos, el algoritmo tendrá mucha más dificultades para identificar estos problemas y los datos podrían ser característicos de fallas temporales rápidas más que de fallas importantes que requieran mantenimiento.

CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR INTELIGENTE

Para la implementación del sensor inteligente, se requieren elementos tanto físicos como virtuales o de software, por lo que en este capítulo se explican las alternativas existentes para la medición de cada variable y los elementos seleccionados. Se encuentra la lista de restricciones para un microcontrolador y se presenta la selección de métodos de almacenamiento en la nube. En la Figura 4.1 se encuentra el diagrama a bloques del sensor inteligente de forma general con los elementos de hardware necesarios para la medición de variables.

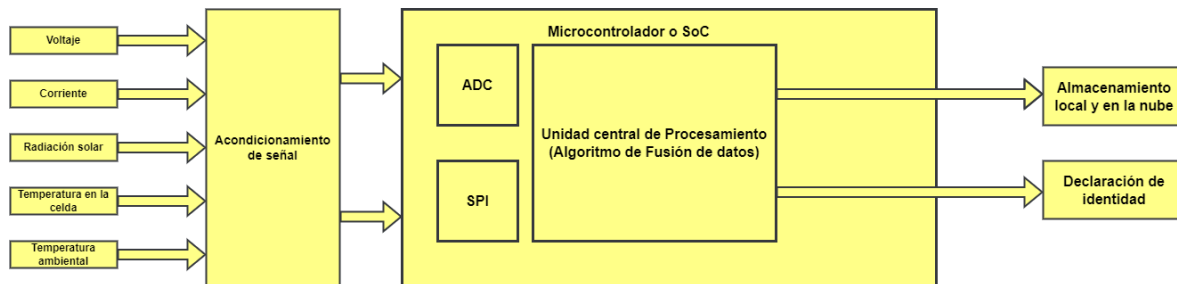


Figura 4.1. Diagrama a bloques general del sensor inteligente.

4.1 Selección de Instrumentos

Dentro de los aspectos necesarios para iniciar con la construcción del sensor inteligente, es necesario seleccionar los elementos como son, el sistema de cómputo, los transductores o sensores para la medición de las distintas variables y además de ello evaluar los métodos de transmisión de datos existentes para enviar y almacenar los datos en un sistema de cómputo que tenga como finalidad mostrar la información relevante.

4.1.1 Dispositivo SoC seleccionado

En este caso fue necesario seleccionar un microcontrolador que cumpliera con ciertas características:

- Bajo costo
- Bajo consumo de energía
- Capacidad de memoria de programa

- Contar con convertidores analógico – digital (ADC)
- Comunicación SPI, I²C
- Comunicación UART
- Comunicación WiFi, Ethernet, CAN, USB
- Desarrollo de programación en C/C++
- Poder computacional suficiente y velocidad de procesamiento alta para el algoritmo de fusión

Además de cumplir con las características mencionadas, se exploró sobre la conectividad mediante algún protocolo que permitiera concentrar la información en una computadora de propósito general donde se mostrara la recolección y almacenamiento de datos y con transmisión en línea.

Para la aplicación resultó útil y conveniente utilizar el SoC ESP32, con las características siguientes:

- Procesador de 32 bits
- Módulo de conexión WiFi integrado
- Velocidad máxima de reloj de 240 MHz
- Memoria de programa de 4 MB
- Dos módulos ADC de 13 bits con 10 canales cada uno
- Dos puertos SPI (en realidad son 4, pero dos de ellos almacenan el programa)
- Un bloque I2S para transmisión de audio digital
- Dos módulos I²C
- Dos puertos DAC de 8 bits
- Modulo TWAI, una nueva versión del protocolo CAN
- 37 puertos de propósito general

Su aspecto físico se muestra en la Figura 4.2.

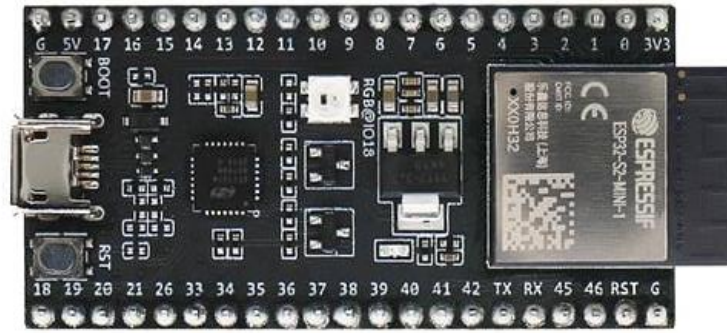


Figura 4.2. SoC ESP32-S2-DevKit1M.

Por disponibilidad se utilizó la tarjeta de desarrollo ESP32-S2-DevKit1M, pero para una mejor implementación del sensor inteligente se recomienda la ESP32-S2-MINI-1, Figura 4.2. La tarjeta de desarrollo cuenta solo con la circuitería funcional del SoC, esto debido a que en la tarjeta de desarrollo se encuentran diversos elementos cuya utilidad es el desarrollo rápido del sensor (reguladores, convertidor USB-UART, leds, interruptores de control de programa, etc.). En cambio, al utilizar el chip por si solo se omiten esos elementos y se puede desarrollar una tarjeta adaptada totalmente a la celda solar, reduciendo el tamaño y el costo. Se considera al ESP32 más que un microcontrolador debido a la cantidad de recursos de los que dispone y por lo tanto pasa a ser un sistema en chip, o SoC [22].

4.1.2 Sensor de radiación

La radiación es una variable de carácter ambiental que corresponde a un conjunto de ondas electromagnéticas de distintas longitudes de onda provenientes en este caso del sol, en este caso las longitudes de onda de interés son aquellas que afectan las celdas solares, las cuales se encuentran entre los 360 y los 1300 nm y dependiendo del material de la celda solar se tiene una respuesta más favorable a ciertas longitudes de onda [23].

Sensor de radiación Apogee SP-212-SS

Este sensor incorpora un fotodiodo de celda de silicio, sus aplicaciones comunes son la medición de radiación en aspectos de agricultura, predicción climática y ecología. Entre sus características principales está la medición de radiación en un rango de 0 hasta 2000 W/m² que genera una señal de salida de 0-2.5 V, lo cual equivale a 0.8 W/m² por milivolt. Otras características destacables son su incertidumbre a 1000 W/m² es menor al 3%; su variación con respecto a la temperatura es menor al $\pm 2\%$ desde -10 °C hasta 50 °C. Cuenta

con certificado de calibración y el laboratorio recalibra sus instrumentos cada dos años en el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) en Davos, Suiza, en base a las referencias estándar calibradas bajo la referencia radiométrica mundial (WRR).

Para su uso es necesario un convertidor analógico digital y con una alimentación de 5 - 24 V, la Figura 4.3 muestra el sensor.



Figura 4.3. Sensor de radiación Apogee SP-212.-SS.

Existen ciertas consideraciones que deben tomarse en cuenta, una de ellas es la curva de operación que tienen y se debe utilizar la Ec. (4.1) para su uso,

$$R = 0.8 * (V_{ADC} \frac{2620}{2^{13}}) \quad (4.1)$$

donde R es la radiación, V_{ADC} es el valor digital de salida del ADC, el origen de las constantes en (4.1) proviene tanto del fabricante del sensor como de las características propias del microcontrolador seleccionado, siendo 2620 el valor en milivolts más alto con la atenuación seleccionada, 2^{13} es el valor digital más alto que puede alcanzar el convertidor y la constante 0.8 corresponde a un valor dado por el fabricante por la recta formada debido a su operación de 0-2.5 V, correspondiente a 0 – 2000 W/m² [24].

Sensor de radiación BGT-TBQ

Es un sensor de radiación cuyo principio de operación es distinto al anterior, trabaja mediante el uso de una termopila bobinada recubierta de un elemento negro de alta tasa de absorción lo cual provoca que la unión de termopares dentro de ella genere una salida proporcional a la radiación solar, teniendo un rango de 7-14 $\mu V/W/m^2$, por lo tanto se requiere de un patrón de medición o de algún tipo de referencia para corregir la recta de operación del sensor. Otros aspectos importantes son un rango de medición de 0 – 2000

W/m^2 , y según el tipo de salida deseada es la alimentación requerida la cual puede ser 5, 12 y 24 V, para salidas de tipo RS485, RS232, 0 - 5 V y 4 - 20 mA.

Tres aspectos negativos de este sensor son que debido a su principio de operación su tiempo de respuesta es elevado, reportando un tiempo mínimo de 35 s, otro aspecto es la necesidad de circuitería adicional de acondicionamiento como en el caso de las interfaces RS485 y RS232, y no reporta la dependencia de la medición con respecto a la temperatura [25]. La Figura 4.4 muestra el aspecto físico del sensor.



Figura 4.4. Sensor de radiación BGT TBQ.

Sensor de radiación Rika RK200-04

Es un sensor de radiación cuyo principio de medición consiste en una celda de silicio, con un tiempo de respuesta menor a 5 s, y también cuenta con tres valores de alimentación, 5, 12 y 24 V, esto dependiendo del tipo de salida que tenga el sensor, puede ser 0 - 5, 4-20 mA y RS485, con un rango de 0 – 1500 W/m^2 , rango reducido en comparación a los otros dos sensores anteriores, y otro aspecto negativo de este sensor es su dependencia de la temperatura de 0.03%/C, su aspecto físico se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.5. Forma física del sensor Rika.

Selección del sensor

Uno de los principales factores que condujo a la selección del sensor Apogee, es la trazabilidad, es decir que existe forma de seguir sus procesos de calibrado, por lo tanto, existe una garantía de que sus mediciones son confiables. Los costos de cada sensor de forma individual son bastante similares.

4.1.3 Medición de temperatura

En este caso la temperatura es una variable de interés debido a que reduce en cierta medida la eficiencia de los paneles solares. La reducción de eficiencia se da en el incremento de la temperatura en la unión de silicio de las celdas o del material en uso. Por lo tanto, la temperatura de interés es la superficial y la del encapsulado de las celdas solares. La temperatura ambiente tiene efectos en su operación, pero son menos notorios en comparación a los que provoca la temperatura del encapsulado.

Sensor de temperatura DS18S20

Es un sensor de tipo semiconductor, por lo tanto, su rango de medición es apropiado para la medición de temperatura, el cual es de -55°C a 120°C . Es un sensor completamente integrado para su operación y por ello puede usarse en distintos encapsulados y algunos optimizados para la medición de temperatura en superficies. Su uso es mediante el protocolo *OneWire*, el cual provee de funciones que permiten el uso del sensor a distancia y el manejo de múltiples sensores. El protocolo provee un valor digital de 9 bits, pero en realidad son 16 bits debido a que es una cuenta con signo y utiliza el complemento a dos para su

representación. El bit menos significativo define la precisión del sensor a 0.5°C. El fabricante define una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ entre -10°C a 85°C y su aspecto físico en dos tipos de encapsulado se muestra en la Figura 4.6.

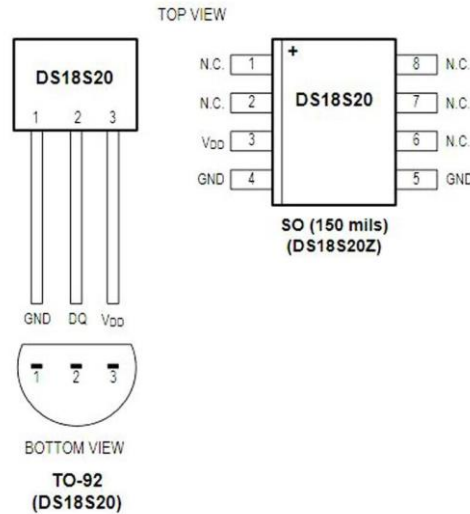


Figura 4.6. Forma física del sensor DS18S20 en dos presentaciones.

Termopares

Los termopares son sensores de temperatura ampliamente utilizados debido a sus altos rangos de medición de temperatura y por ser bastante robustos en cuanto su presentación mecánica común. Existen diversos tipos de termopares, cada uno con su rango y sensibilidad específica. Debido al tipo de variables existentes en las celdas solares y los intervalos de temperatura presentes, se planteó un termopar tipo K con una interfaz de conversión de datos y compensación de unión fría, para este caso el MAX6675. El MAX6675 es una interfaz de conversión termopar (analógico) a valores digitales bajo el protocolo SPI, en este caso la salida es de 12 bits, con una resolución de 0.25 °C por bit. El rango de medición de un termopar tipo K es de -200°C a 1260°C , pero la interfaz de conversión sólo trabaja en el rango de 0°C a 1023.75°C , si bien cuenta con un bit de signo este se encuentra permanentemente en cero, se debe a que existen variaciones de esta interfaz de conversión que pueden medir temperaturas bajo cero y la usada es para temperaturas por encima de cero [26]. El aspecto físico del termopar y la interfaz de conversión se muestran en la Figura 4.7.

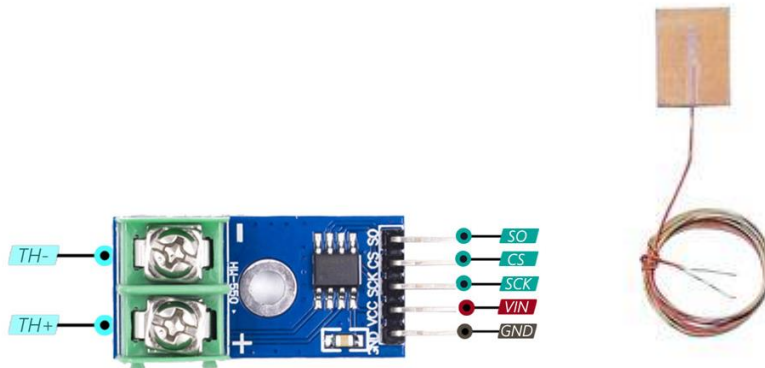


Figura 4.7. Interfaz de conversión y termopar.

Sensor de temperatura infrarrojo

La alternativa más utilizada y que resulta más útil en este caso es la del sensor infrarrojo, esto principalmente a que es un método de medición sin contacto. Estos sensores están compuestos internamente por una termopila, es decir un arreglo de termopares y un arreglo de lentes para enfocar la energía infrarroja reflejada en el objeto, la cual, al ser absorbida, se obtiene un voltaje proporcional a la temperatura del objeto. En la Figura 4.8 se muestra un sensor de temperatura infrarrojo genérico.



Figura 4.8. Cámara infrarroja para medición de temperatura.

En la selección del sensor adecuado entran varios aspectos que inhiben la adquisición de algunos de estos sensores, en el caso del sensor DS18S20, es principalmente el tiempo de entrega en la compra. En el caso de las cámaras térmicas, existen aspectos que limitan su uso en aplicaciones prácticas, uno de ellos el costo, debido a que las condiciones requeridas para su uso en exteriores tal como se encuentran los paneles solares de forma habitual, hace

necesario un aislamiento alto de los elementos, en este caso polvo y agua son los más importantes y considerando las diferentes formas descritas para la medición de temperatura se optó por el termopar tipo K debido a su simpleza.

4.1.4 Sensor de corriente eléctrica

La corriente eléctrica es una variable vital al tratar de determinar el comportamiento real de la celda solar debido a que es parte de la potencia eléctrica entregada por las celdas y esta es altamente dependiente de la radiación solar, por lo tanto, esta variable es importante para determinar el estado de un panel.

Sensor de efecto Hall

El sensor de corriente CSLS6B60 mide corriente de -60 A a 60 A, con una salida de 8 a 16 V de directa y requiere 5 V de alimentación para su operación. Consiste en un núcleo cerrado en el cual fluye corriente eléctrica por el cual tiene que pasar el cable bajo medición, por lo cual no se requiere una conexión eléctrica entre la corriente que se desea medir y el circuito de medición. En este caso la salida de voltaje con respecto al campo magnético es de 640 Gauss a 10 V [27], en la Figura 4.9 se muestra el sensor de efecto hall mencionado.



Figura 4.9. Sensor de efecto Hall.

En el diseño de un medidor de corriente utilizando el sensor de efecto Hall es necesario conocer el campo magnético, B , del sensor para definir la conversión de campo a corriente, Ec. (4.2),

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} \quad (4.2)$$

donde μ_0 es la permeabilidad magnética del medio, μ_r es la permeabilidad relativa del aire, I es la corriente del conductor y r es el radio del conductor.

Con el valor de la corriente eléctrica I en (4.2) se puede medir la corriente, sin embargo, es necesario tomar en cuenta aspectos como el aire que existe entre el cable y el sensor, el radio del conductor y el grosor del sensor de efecto hall [28].

Sensor de efecto Hall integrado

Existen sensores que tienen integrada la circuitería necesaria para la medición de corriente eléctrica y solo requiere abrir el circuito que se desea medir y el sensor entrega una señal proporcional a la corriente eléctrica. El sensor de corriente ACS758LCB-050B, entrega 40 mV por ampere de medición y requiere alimentación de DC de entre 3 y 5.5 V, por operación tiene una resistividad interna de 0.0001Ω [29], la Figura 4.10 muestra el aspecto del sensor de efecto Hall integrado.



Figura 4.10. Sensor de efecto hall integrado para la medición de corriente eléctrica.

Resistencia eléctrica

Una de las formas más básicas para la medición de corriente eléctrica es mediante el uso de una resistencia de medición, esto es, utilizar una resistencia de valor bajo que no afecte las propiedades eléctricas del circuito original. Aplicando la ley de Ohm, medir la caída de voltaje en la resistencia de medición y al dividir el voltaje medido entre el valor de la resistencia se tiene la medición de corriente eléctrica. La ventaja del método es que existen resistencias de múltiples tolerancias y valores de potencia de forma que se pueden realizar

mediciones de forma confiable con un bajo costo. En la Figura 4.11 se muestra una resistencia de medición de 1Ω con el número de parte 805F1R0E de 1% y 5W [30].



Figura 4.11. Resistencia bobinada para la medición de corriente.

La selección del método de medición en este caso obedece a dos aspectos, el bajo costo con respecto a los sensores de efecto hall que en el caso del núcleo cuesta trece USD y en el caso del sensor de corriente integrado cuesta alrededor de 8 USD, y una resistencia eléctrica de medición de un valor como el descrito previamente cuesta alrededor de 6 USD. El otro aspecto que dificulta utilizar las otras alternativas son los tiempos de entrega de proveedores confiables por lo que se optó por la resistencia de medición.

4.1.5 Medición de voltaje

Para la medición de voltaje se utilizó el convertidor analógico digital que contiene el microcontrolador seleccionado. Este convertidor tiene múltiples rangos de medición voltaje de entrada, el seleccionado para la medición de voltaje es de 0-1120mV y para facilitar la medición de 1000V, se realizó un divisor de voltaje de 1000 a 1 debido a que la norma oficial mexicana NOM-001-SEDE, sobre instalaciones eléctricas, define 600 V como el máximo voltaje de un sistema fotovoltaico y el NEC (Código Nacional Eléctrico de los EEUU) define como voltaje máximo 1000 V, además de que la NOM autoriza instalaciones fotovoltaicas de 1000 V en edificios no domésticos como fábricas. [31].

4.2 Almacenamiento en la Nube

Otro aspecto para la implementación del sensor inteligente es el método para el almacenamiento en línea de la información para ser vista a la distancia desde cualquier dispositivo, entonces es necesario analizar alternativas para manejar la información. Para ello fue necesario analizar los requerimientos del proyecto, los cuales son:

- Almacenamiento por día
- Almacenamiento por panel
- Almacenamiento datos de cada hora, minuto, segundo, con datos como el número de panel, radiación, voltaje, corriente eléctrica, temperatura en el panel y temperatura ambiental
- Seguridad e integridad de los datos almacenados
- Copias de seguridad de los datos

4.2.1 Servicio de Datos “Dweet.io”

Este servicio es una alternativa interesante, tiene múltiples beneficios debido a que es un protocolo simple para la suscripción y publicación de mensajes provenientes de máquinas, sensores, dispositivos, robots, etc. En este protocolo se transmiten mensajes y es útil para permitir que una máquina o sensor tenga la capacidad de que sus datos sean vistos desde internet. Permite realizar aplicaciones de forma rápidas o compartir datos, con transmisiones permitidas de hasta 2000 caracteres. Inconvenientes, cualquiera puede acceder a los mensajes transmitidos y sólo bajo ciertas circunstancias se puede tener una mayor seguridad, esto es, contactando directamente a los desarrolladores. Pero, además, la información sólo es retenida por cinco horas, por lo tanto, no puede existir un registro en periodos considerables de tiempo, si se desea un almacenamiento de más información y tiempo es posible entrar en contacto con los desarrolladores de la plataforma [32].

4.2.2 Protocolo de comunicación “MQTT”

El protocolo de comunicación “MQTT”, *Message Queuing Telemetry Transport* es un protocolo de comunicación basado en mensajes para su transmisión a través de un sistema de tópicos o temas y suscriptores a esos tópicos, siendo los suscriptores los que se encuentran analizando los mensajes recibidos y al mismo tiempo también se encuentran dispositivos que están encargados de la publicación de los mensajes. Para el servicio, es necesario un servidor llamado *Broker*, este redirige los mensajes publicados a los suscriptores. Resulta útil para dispositivos con un ancho de banda corto y con conectividad a internet intermitente o no confiable, esto se realiza con la finalidad de tener un cierto nivel de garantía en la transmisión de mensajes y con la idea de ser un protocolo ideal para el IoT [33].

4.2.3 SQL (*Structured Query Language*)

SQL más que un protocolo es un lenguaje que permite trabajar con bases de datos, las cuales son colecciones de datos provenientes de alguna cuestión física o contable. En el manejo de una SQL existe la capacidad de crear estructuras de datos, realizar tareas de mantenimiento de datos (añadir, borrar, modificar) y realizar operaciones complejas que transforman datos crudos a información. Es un lenguaje que sólo requiere un procesador de texto, puesto que sólo trabaja con una base de datos que almacena datos en un formato de tabla, con renglones y columnas, donde los campos formados son los que contienen la información o datos. Suele utilizarse para cuestiones repetitivas como el análisis de costos de productos en tiendas, el número de control, nombre y promedio de estudiantes, etc. [34].

En el caso de cómo mantener un servidor visible desde cualquier lugar geográfico, existen tres proveedores de servicios que a la fecha son los más reconocidos: Azure, un proveedor de diversos servicios en la nube de Microsoft; Amazon, que provee servicios de almacenamiento en la nube y Oracle, que también vende servicios de almacenamiento en línea.

Para la selección del método de almacenamiento en la nube se determinan tres características necesarias:

- Almacenamiento de información de años
- Almacenamiento de datos por panel o arreglo
- Seguridad e integridad de datos

Se hace hincapié en la seguridad e integridad de los datos debido a que un aspecto importante que evita que se adopten tecnologías de este tipo es la seguridad electrónica. En el caso de Azure acompañado de SQL se tienen la mayor parte de estos beneficios, mientras que *Dweet* (Sección 4.2.1) tiene el grave inconveniente de los datos de más de 5 horas de antigüedad son eliminados y son visibles para cualquiera, además de que desde el SoC ESP32 no puede realizarse el envío de mensajes a menos de que éste sea programado mediante MicroPython. Puede resultar una gran alternativa en caso de sólo desear mostrar datos en tiempo real.

Si bien de forma directa en MQTT los servidores o *Brokers* no retienen mensajes, se puede realizar el almacenamiento a través de los suscriptores y que estos puedan reenviar los mensajes previos al usuario que desee analizar un historial de operación lo cual resulta en un trabajo extra.

SQL permite tener múltiples bases de datos en las cuales se pueden realizar diversas modificaciones de su contenido y manipular los datos de forma directa, la principal desventaja que tiene es el modo de almacenamiento, acceso y formato de las bases de datos. Según el proveedor utilizado el formato es diferente y es necesario un software distinto según sea el caso. Otro inconveniente en el manejo de SQL es que el ESP32 no puede guardar de forma directa los datos que crea en una base de datos, por tanto, se tiene que realizar a través de una PC. No es un inconveniente si en ella se encuentra la concentración de datos y la visualización de ellos y entonces el manejo de una SQL resulta tener menos inconvenientes al momento de implementar el sistema de medición.

En cuanto al proveedor que tendrá almacenado el conjunto de datos para ser vista a la distancia se opta por Azure debido a dos grandes beneficios, uno es que los requerimientos desde *Windows* son mínimos y además ofrece un año gratuito para estudiantes para probar sus servicios y puede resultar útil para este proyecto.

Los servicios de Oracle para el almacenamiento de la base de datos en AWS o Amazon, no se utilizan debido a el tipo de formato de almacenamiento está basado en MySQL, el cual no es muy conveniente debido que almacena de forma local todas las bases de datos y de alguna forma las hace visibles y editables desde el exterior.

4.3 Implementación Física del Sensor Inteligente

La Figura 4.12 muestra el diagrama eléctrico del sistema de supervisión de paneles fotovoltaicos el cual conjunta la instrumentación seleccionada. En el diagrama eléctrico de este sensor inteligente se aprecian los dos sensores de temperatura, el sensor de radiación, el sensor de corriente y el sensor de voltaje. Complementan al sistema el dispositivo de procesamiento (ESP32) y el elemento de comunicación a la nube.

Dentro de las características destacables del sistema son los capacitores a las entradas de los canales del ADC. Estos se añaden por recomendación del fabricante [35] debido a que

se tiene una ligera inestabilidad al utilizar atenuación dentro del chip y en función de la atenuación es el valor del capacitor. Cuando la atenuación es cero, se utiliza un capacitor de 100 nF, para atenuaciones mayores se requiere uno de 10 μ F.

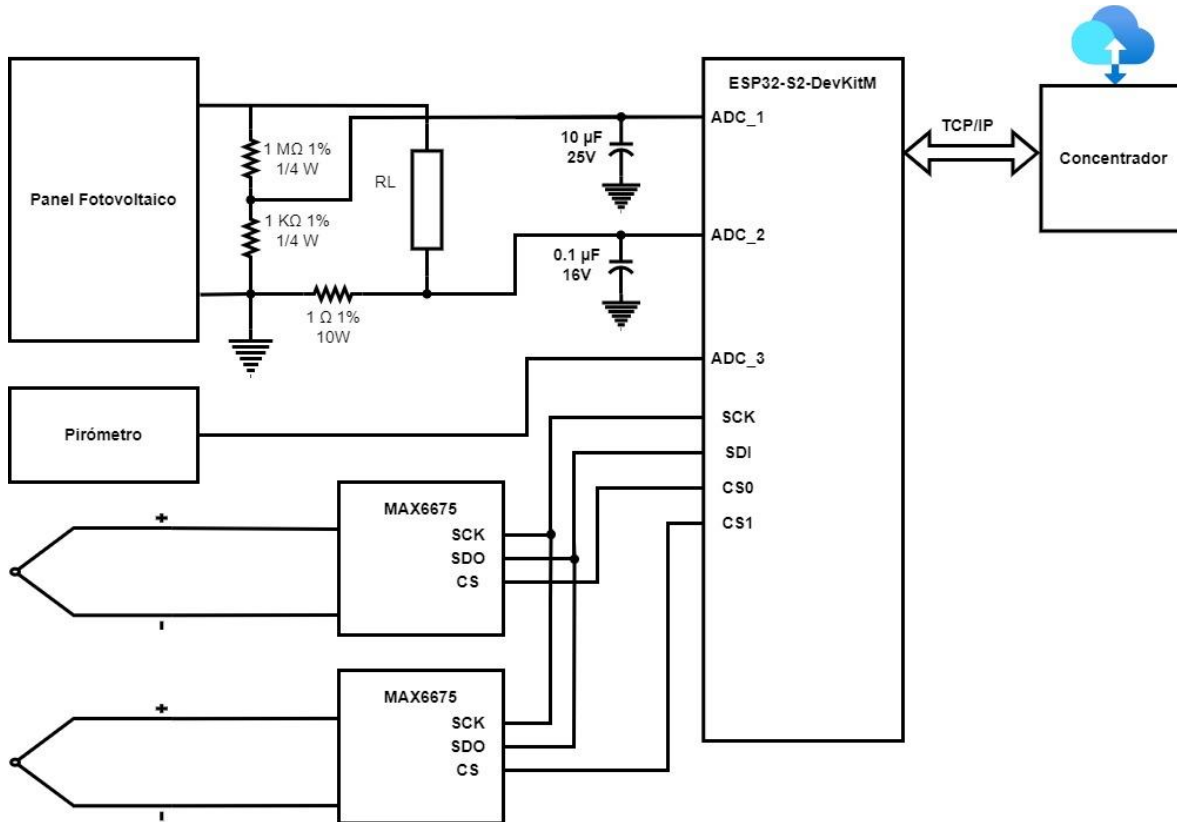


Figura 4.12. Diagrama a bloques del sistema implementado.

Los termopares tipo K en la parte inferior de la Figura 4.12 son para la medición de temperatura ambiente y la temperatura en la celda. El concentrador es un procesador Raspberry Pi 3B+, se le seleccionó debido a varios factores, su facilidad de programación a través de Python, la capacidad de instalar múltiples programas auxiliares para manejo de la hora con relojes de tiempo real, el almacenamiento en SQL, la facilidad para utilizar una dirección IP fija o estática, el acceso a archivos a través de FTP para rápida lectura a nivel local y la visualización rápida de los valores de respuesta. Si bien se puede realizar todo esto de igual manera en una computadora común, el uso de una computadora embebida trae algunos beneficios, uno de los principales es el no mantener equipos de cómputo completos encendidos por largos periodos de tiempo para mantener el almacenamiento de datos local y

en línea, cuando una computadora embebida puede realizarlo por una fracción de la potencia requerida.

Otro aspecto es que para la comunicación de forma directa se utiliza un enlace TCP/IP, protocolo de transmisión de mensajes que permite enviar cadenas de caracteres que contienen la información de interés y para el envío y recepción de datos se requiere solamente crear un servidor y un cliente. El servidor sólo debe declarar en que puerto se crea el servidor TCP y el cliente requiere la dirección IP del servidor y el puerto donde se encuentra el servidor TCP, con ello definido se puede realizar un intercambio de información entre estos elementos [36].

Para la comunicación se diseña un protocolo relativamente simple en el cual el concentrador mantiene una dirección IP estática o fija, para este caso la “192.168.0.120” con el puerto 80, se le programa al ESP32 para tener un acceso rápido al buscar el servidor que recibirá los datos. Es importante mencionar que en el ESP32 existen algunos puertos reservados para aplicaciones específicas, como ejemplos está el puerto 21 que se suele utilizar para la transmisión de archivos o el 22 que es usado para las consolas de comandos remotas. En la Figura 4.13 se muestra la tarjeta electrónica donde se encuentra todo el acondicionamiento de señales, el SoC ESP32 y sus conexiones externas.

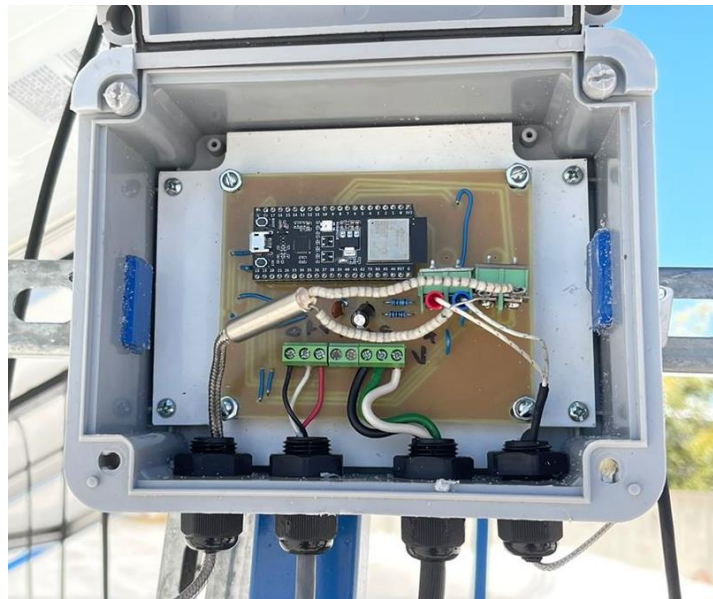


Figura 4.13. Ensamble de la tarjeta electrónica del sistema en operación.

En la tarjeta desarrollada se encuentran las conexiones eléctricas necesarias para su alimentación, para la medición de voltaje y corriente, la medición de radiación, la medición de temperatura ambiente y la medición de temperatura en la superficie interior del panel fotovoltaico. Otro aspecto importante es la medición de temperatura ambiente, la cual, por el tipo de sensor seleccionado se requiere un elemento de protección al sol y permita el paso del aire a través del sensor de manera que se pueda medir de forma correcta la temperatura ambiental.

Se desarrolló una cápsula meteorológica para la medición de temperatura y protección del sensor tal como se muestra en la Figura 4.14. Es importante mencionar que la cápsula es de sólo 5 discos y esto se debe a la corta longitud del sensor instalado para la medición de temperatura ambiente, esto es, la cantidad de discos está en función de la longitud del sensor en su mayor parte.

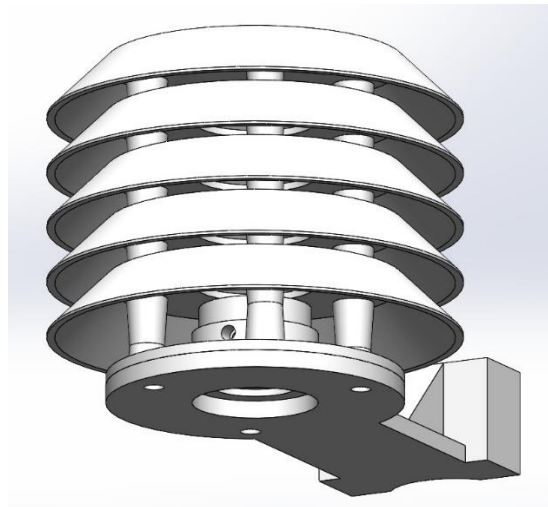


Figura 4.14. Diseño base de la cápsula meteorológica para medición de temperatura ambiente.

En el caso de la medición de corriente eléctrica, se desarrolló un arnés con la resistencia para la medición de corriente que cuenta con los elementos necesarios para la medición de corriente y voltaje en un solo elemento. Trabaja con terminales MC4 y en él se encuentran tres conexiones las cuales corresponden a conectar el punto de mayor potencial del arreglo de paneles o del panel, el punto de menor potencial y el punto donde se encuentra conectada la resistencia de medición. De esta forma el arnés se conecta a tres bornes de la tarjeta electrónica y para su implementación se utiliza un cable de uso rudo calibre 18AWG,

la estructura en que se encuentra la resistencia de medición y sus conexiones se muestra en la Figura 4.15.

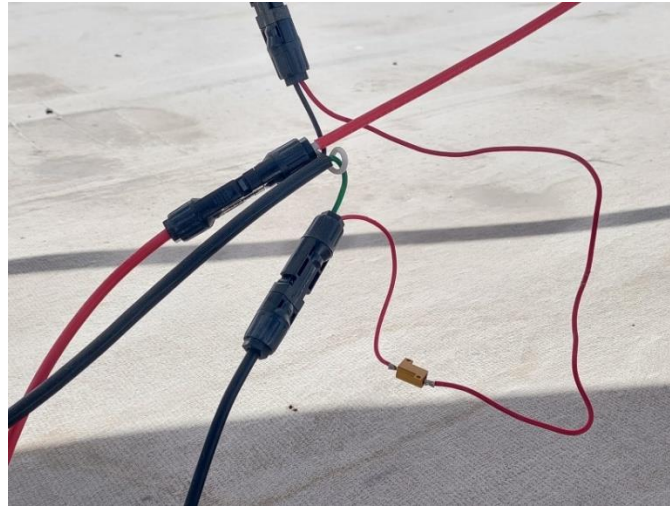


Figura 4.15. Instalación de arnés con resistencia de medición.

4.4 Operación del Sensor Inteligente

Entre los aspectos importantes en la implementación del sensor inteligente destacan que requiere 30 muestras para realizar el cálculo de la media y la desviación estándar con un 99.7 de confianza de los parámetros eléctricos de los paneles fotovoltaicos. Se genera una muestra por segundo para después de 30 s realizar una evaluación de los paneles fotovoltaicos y así tener una evaluación representativa del comportamiento del panel fotovoltaico en el tiempo. Al contar con el cálculo de las medias y desviaciones estándar, se realiza la fusión a través del cálculo de la integral que evalúa la probabilidad de que los datos medidos se encuentren en los límites definidos en función de la radiación solar presente, por tanto, cada 30 s se tiene una evaluación del panel solar.

Para el almacenamiento de los datos se manejan dos métodos, uno es local, mediante archivos con datos separados con coma, debido a que es un formato fácil de manejar y editar a través de Excel, un ejemplo de los datos generados se muestra en la Figura 4.16.

El formato de los datos en la Figura 4.16 está conformado por la fecha, hora, la radiación, el voltaje, la corriente eléctrica, la temperatura ambiente, la temperatura en el panel y el resultado de la fusión. Sobre este último, el 1 representa que el panel está sano.

```

24,12,2022,13,01,00,594.62,290.11,0.63,12.00,22.25,1
24,12,2022,13,01,01,588.73,292.05,0.63,12.00,22.25,1
24,12,2022,13,01,02,589.76,292.05,0.62,12.00,22.25,1
24,12,2022,13,01,03,573.12,290.11,0.63,12.00,22.25,1
24,12,2022,13,01,05,583.62,290.11,0.62,12.00,22.25,1
24,12,2022,13,01,06,604.85,289.14,0.62,12.00,22.25,1
24,12,2022,13,01,07,591.80,293.99,0.63,12.00,22.25,1

```

Figura 4.16. Ejemplo de datos almacenados en valores separados por coma o csv.

La verificación de un panel para considerarlo sano o dañado se determina mediante la revisión de que el voltaje y la corriente eléctrica, que se encuentren dentro de los límites establecidos en un 85% o más. Sin embargo, debido a que este porcentaje de semejanza puede ser variable en función de varios factores. (la aplicación, la importancia de la carga colocada o incluso el criterio del usuario) en lugar de definir un porcentaje mínimo, se modifica el formato de impresión y se muestran los resultados de las integrales en función de la radiación seleccionada. Por lo cual, no sólo transmite los valores crudos de las mediciones, también se incluyen valores de media y desviación estándar de los datos obtenidos de manera que se pueda apreciar de mejor manera la operación de los paneles fotovoltaicos. Por tanto, los nuevos archivos contienen información más específica acerca del comportamiento de los paneles fotovoltaicos y un formato diferente se utiliza para los datos transmitidos de acuerdo a la Figura 4.17.

```

27,01,2023,11,24,33,494.36,253.01,0.47,17.00,28.75,1,492.22,252.95,3.84,0.47,0.001,0.94,0.92
27,01,2023,11,24,34,488.01,256.55,0.47,17.00,28.75,1,492.22,252.95,3.84,0.47,0.001,0.94,0.92
27,01,2023,11,24,35,499.47,254.95,0.47,17.00,28.75,1,492.22,252.95,3.84,0.47,0.001,0.94,0.92
27,01,2023,11,24,36,493.00,250.54,0.47,17.00,28.50,1,492.22,252.95,3.84,0.47,0.001,0.94,0.92
27,01,2023,11,24,37,480.98,251.11,0.47,17.00,28.50,1,494.57,251.20,4.28,0.47,0.001,0.91,0.92
27,01,2023,11,24,38,493.33,250.91,0.47,17.00,28.50,1,494.57,251.20,4.28,0.47,0.001,0.91,0.92
27,01,2023,11,24,39,504.21,249.75,0.46,17.00,28.50,1,494.57,251.20,4.28,0.47,0.001,0.91,0.92
27,01,2023,11,24,50,481.55,254.29,0.46,17.00,28.50,1,494.57,251.20,4.28,0.47,0.001,0.91,0.92

```

Figura 4.17. Formato extendido de archivos separados por coma.

El formato de la Figura 4.17 tiene la forma inicial de los datos igual al formato anterior (Figura 4.16), pero añade la radiación media, que sirve como referente para la plantilla seleccionada, el voltaje medio, la desviación estándar del voltaje, la corriente eléctrica media, su desviación estándar y los resultados de las integrales con los datos de media y desviación estándar calculados en las 30 muestras anteriores de datos, lo cual resulta útil para rápidamente evaluar la operación del sistema.

Otro aspecto importante es el almacenamiento de datos en la nube. Tal como ya se mencionó, se seleccionó previamente a Azure como servicio de almacenamiento y servidor. Para lograr la comunicación el concentrador debe tener implementado el código necesario para el almacenamiento en línea. El conjunto de datos necesarios para conectarse se lista a continuación:

- Servidor: labicitch.database.windows.net (la página del servidor)
- Nombre de la base de datos: Data Fusion
- Usuario: DataFusion
- Contraseña: Electron.1

Con los datos antes mencionados cualquier usuario se puede conectar si su dirección IP se encuentre dada de alta en el servidor. Sólo se le da acceso a un número limitado de usuarios y se tiene control de estos así se evitan problemas con accesos no autorizados para la lectura de la base de datos o su modificación.

4.5 Implementación de Algoritmos

Dentro de los aspectos previamente mencionados durante el proceso del diseño de los algoritmos de fusión se utilizó el concepto de una integral definida, para implementarla es necesario analizar un poco los algoritmos de integración numérica (Figura 3.8). También se utilizaron varios sistemas de inferencia difusa conformados por varios tipos de funciones de membresía, cada una tienen su propia función matemática y parámetros, los cuales son explicados más adelante.

4.5.1 Implementación del algoritmo de fusión difuso

En el desarrollo del algoritmo de fusión, si se desea implementar en un lenguaje con una menor cantidad de recursos, se deben tomar en cuenta varios elementos, entre ellos:

- Implementación de las funciones de membresía utilizadas
- Desarrollo del método de agregación
- Método de defusificación

Se puede decir que esos son los tres pasos que se ejecutan al aplicar un sistema de inferencia difuso.

Funciones de membresía

En la implementación de estos sistemas, es necesario contabilizar el número de ocasiones que se utiliza una misma función de membresía y la fórmula matemática. Esto es sumamente importante porque un concepto llamado “grado de satisfacción” se obtiene en función de la pertenencia de la entrada a un conjunto difuso.

La función triangular se utiliza en 35 ocasiones y la Ec. (4.3) define como implementar la función de membresía, donde los parámetros a, b y c representan los tres vértices del triángulo, esto es, a representa el punto donde la función de membresía deja de ser cero y se inicia la pendiente lineal, b es referente al pico del triángulo en membresía igual a uno,

$$f(x, a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (4.3)$$

En (3.1) se encuentran dos operadores cruciales dentro de la lógica difusa, Max y min que indican de una lista de membresías la del valor máximo o la del valor mínimo, lo cual de forma análoga representan las funciones AND y OR de la lógica binaria. Esta función puede ser definida en rangos, puesto que si se presenta un $x < a$ o si se presenta un $x > b$ la membresía de la variable de entrada es cero [37].

La función trapezoidal se utiliza en cinco ocasiones y se define mediante la Ec. (4.4), cuenta con cuatro parámetros (a, b, c, d) que representan los vértices donde se desea colocar el trapecio, en este caso existen dos vértices que definen los puntos de máxima pertenencia del conjunto difuso [38].

$$f(x, a, b, c, d) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right) \quad (4.4)$$

Esta función matemática puede calcularse en forma simplificada mediante otro método consistente en definir los rangos de la función cuando $x < a$ y $x > d$, puesto que la membresía en esos casos es cero y cuando $b < x < c$ la membresía es uno. Por ello solo se utilizan las funciones internas a la ecuación general cuando el universo de discurso se encuentra en las rectas creciente y decreciente que conforman el trapecio.

La función de membresía sigmoideal se utiliza una vez, esta es una función exponencial creciente cuyos parámetros son a y c , donde a puede tener un signo positivo o negativo lo cual indica la dirección del crecimiento de la función y su valor absoluto controla el ancho de la zona de transición de la función, mientras que el parámetro c desplaza de lugar el punto central de la zona de transición a lo largo de todo el universo de discurso, la Ec. (4.5) define a esta función de membresía [39].

$$f(x, a, b) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (4.5)$$

La función de membresía gaussiana es bastante parecida la función de distribución normal, la diferencia es que no existe el factor $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$. Sus parámetros de entrada son exactamente los mismos que los de la distribución normal, la media y la desviación estándar. Para efectos como función de membresía resultan ser el centro donde se ubicará la gaussiana y la dispersión deseada, su función matemática se muestra en la Ec. (4.6) [40].

$$f(x, \mu, \sigma) = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.6)$$

La función de membresía tipo campana se utiliza solo una vez en todo el algoritmo de fusión y se le llama tipo campana debido a la forma que adquiere con la modificación de sus parámetros, entre ellos se encuentran el parámetro c que define el centro donde se encontrará, el parámetro a que define el ancho de la función de membresía y b el cual define la curva en los laterales de la función donde un valor más elevado da origen a una forma más cuadrada y cuanto más bajo más puntiaguda se vuelve la función en su punto máximo, la Ec. (4.7) muestra su fórmula matemática [41].

$$f(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (4.7)$$

Método de agregación

Dentro de la agregación se realiza el cómputo de áreas de los grados de satisfacción obtenidos a lo largo de la aplicación de todas las reglas. Por lo regular, el método de agregación más utilizado es el Max, se dice que es una sumatoria de los grados de satisfacción de cada regla y esto genera un área final, por lo tanto, entre más grande es el sistema de inferencia difuso en cuanto a la cantidad de reglas que contiene, mayor es la cantidad de operaciones requeridas [21].

Defusificación

En el caso Mandami, una vez se tiene el área resultante de la agregación se tiene que convertir esa área a un valor constante que sea útil, para esto se tiene que aplicar algún método que permita convertir del dominio difuso al rígido. Para este caso se utilizará el cálculo del centroide del área, la Ec. (4.8) es la que se utiliza para este proceso, donde se utilizan los valores de la función de membresía y los valores evaluados del universo de discurso,

$$Centroide = \frac{\sum_i \mu(x_i)x_i}{\sum_i \mu(x_i)} \quad (4.8)$$

La forma en que se realiza el cómputo de la salida en el caso de sistemas tipo Sugeno tipo cero como los utilizados en los modelados en base a la temperatura y la radiación solar, es un poco distinto, esto porque las salidas en sistemas Sugeno son constantes, mientras que en Mandami son otros conjuntos difusos. En este caso los grados de satisfacción son colocados en un promedio ponderado de todas las reglas del sistema de inferencia difuso, esto es, la constante de salida de la regla por el grado de satisfacción de la regla, entre la sumatoria de los grados de satisfacción, tal como se muestra en la Ec. (4.9), donde w representa los pesos de cada regla iguales al grado de satisfacción de la regla y z representa la constante de salida seleccionada para la regla [21].

$$Z = \frac{\sum_1^n w_n z_n}{\sum_1^n w_n} \quad (4.9)$$

4.5.2 Implementación del Algoritmo de Fusión de Plantillas Paramétricas

El algoritmo de fusión basado en plantillas paramétricas se basa en 4 etapas: la primera es el cálculo de la media y la desviación estándar de cada variable del sistema, tras ello para la selección de la plantilla se evalúa que la hora del día sea previa a las 11 de la mañana para seleccionar las plantillas de la mañana y para seleccionar la de la tarde se revisa que la hora sea posterior a las 16 horas, tras ello se compara la media de la radiación con las plantillas de la hora asociada, donde se selecciona la más cercana. Al seleccionar la plantilla en base a la radiación solar presente, junto con esa plantilla vienen los límites de la corriente eléctrica y el voltaje, los cuales se utilizan para calcular la probabilidad de que los valores medidos se encuentren dentro de los límites y en qué porcentaje se encuentran dentro, por ello es necesaria la definición de un umbral o límite el cual defina el punto donde un panel está sano o está dañado, este umbral es dependiente de varios aspectos, la carga, la rigurosidad deseada del usuario para evaluar los paneles, la degradación anual de la potencia producida por los paneles etc. Este es un límite en el que se hace la clasificación de la operación del panel.

La Figura 4.18 muestra el diagrama de flujo del programa realizado para la evaluación de los paneles fotovoltaicos mediante plantillas paramétricas.

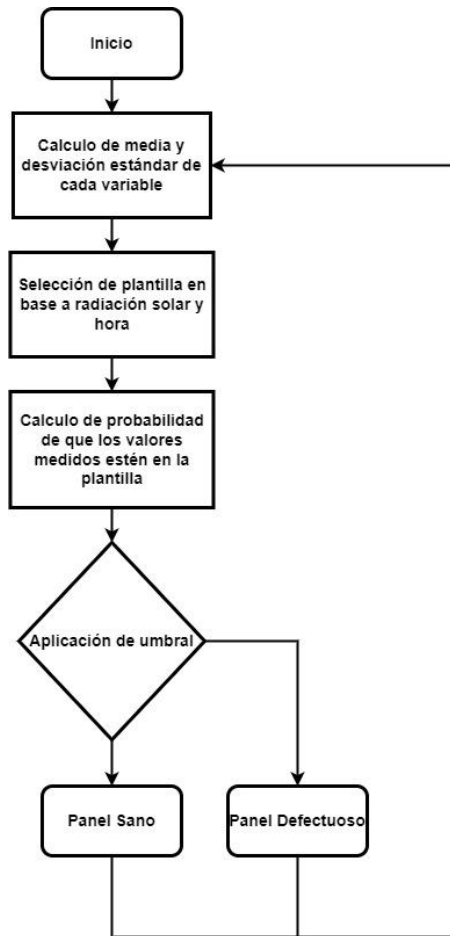


Figura 4.18. Diagrama de flujo del programa de prueba utilizando plantillas paramétricas.

4.5.3 Regla de Simpson 3/8 compuesta

El método consiste en ajustar un polinomio de Lagrange de tercer grado a 4 puntos, para este caso esos 4 puntos son reajustados a sumatorias para su implementación computacional, este método crea una función cubica entre puntos y evalúa su área la cual se acumula. Se dividen los límites de integración en subintervalos, lo cual se define en la Ec. (4.10).

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{3}{8}h \left[f(x_0) + 3 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n/3-1} f(x_{3i}) + f(x_n) \right] \quad (4.10)$$

Los límites de integración corresponden a $b = \mu + 3\sigma$ y $a = \mu - 3\sigma$, por lo tanto, la variable independiente x , estará en función de estos límites, para el caso de la función $f(x)$ corresponde a la Ec. (4.11). El parámetro h se define en la Ec. (4.4),

$$h = \frac{b - a}{n} \quad (4.11)$$

donde n , es la cantidad de subintervalos para la aplicación de la integral y está en función de la precisión deseada en los resultados de las integrales. En cuanto a $f(x_0)$ y $f(x_n)$, corresponden a los valores iniciales y finales de la integral, es decir, la función en su límite superior e inferior. Los valores de las sumatorias corresponden al barrido de todos los valores de x . El límite inferior de la primer sumatoria $i = 1 \ 3|i$, significa que esta sumatoria se realiza para los valores cuyo residuo al dividir i entre tres sea cero [42].

.

CAPÍTULO V. PRUEBAS Y CONCLUSIONES

En los párrafos siguientes se describen las acciones realizadas para comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo de plantillas paramétricas, donde se comprueba que la función de integración se realiza correctamente y una vez implementado, también el algoritmo logra determinar si existe una falla o muestra donde se encuentra el voltaje y la corriente eléctrica con respecto a las plantillas paramétricas.

5.1 Pruebas de la Implementación del Algoritmo de Plantillas Paramétricas

Para evaluar la operación del sistema primero se seleccionaron datos de un día para realizar el cálculo de las integrales que calcula el dispositivo con respecto a un algoritmo de Matlab que realiza el cálculo de la integral de una media y desviación estándar dentro de un parámetro dado, lo cual se muestra en la siguiente función:

```
Normspec([specs], mu, sigma)
```

Esta función en el argumento de especificaciones se encuentran los límites de integración para la función y el resto de los parámetros consiste en la función que se desea probar dentro de esos límites y estos valores se deben extraer de una muestra de datos que se obtiene en el tiempo que el sistema esté operando.

El propósito de este experimento es comprobar que el algoritmo implementado ejecuta los cálculos correctamente, por lo tanto, se deja en operación normal para verificar que seleccione las radiaciones correctas y también los límites de corriente y voltaje asociados a las radiaciones seleccionadas, para lo cual se generan las Tablas 5.1 y 5.2 que muestran la operación y desempeño del algoritmo de la integral de Simpson comparado contra la función que Matlab contiene por defecto. Es necesario distinguir entre los valores del voltaje obtenido al realizar las mediciones y los límites definidos previamente, es necesario remarcar que, para el cálculo de las integrales, se divide el intervalo de integración en 900 subintervalos, se seleccionó este valor debido a que se obtuvo una cercanía alta con respecto al valor que genera el algoritmo de Matlab sin la necesidad de ejecutar una cantidad alta de operaciones matemáticas.

Tabla 5.1. Resultados y comparaciones del cálculo de las integrales para voltaje.

Radiación (W/m ²)	Límites del voltaje		Valores del voltaje		Resultado del sensor inteligente	Resultado de Matlab
	L _L	U _L	$\bar{X}$	σ		
134	53.22	65.22	58.64	1.89	0.9976	0.9974
468	199.71	207.09	209.11	6.07	0.9959	0.9953
559	214.45	257.53	260.30	1.49	0.9835	0.9832

Tabla 5.2. Resultados y comparaciones del cálculo de las integrales para corriente eléctrica.

Radiación (W/m ²)	Límites de la corriente		Valores de la corriente		Resultado del sensor inteligente	Resultado de Matlab
	L _L	U _L	$\bar{X}$	σ		
134	0.03	0.126	0.1167	0.0048	0.9742	0.9737
468	0.3975	0.4827	0.4571	0.0101	0.9944	0.9944
559	0.5426	0.5870	0.5648	0.0051	1	1

Con la cercanía entre valores de los resultados del sensor inteligente y el algoritmo de Matlab, se comprueba que el algoritmo funciona en cuanto al cálculo de la integral y los cálculos que realiza internamente, lo cual indica que el algoritmo está correctamente implementado.

5.3 Pruebas de la Operación del Sensor Inteligente

Para realizar este tipo de pruebas es necesario simular algún tipo de falla con el propósito en esta ocasión de comprobar que el algoritmo distingue correctamente la pérdida de potencia generada y que, a pesar de seleccionar el parámetro correcto de radiación, se encuentran probabilidades bajas o los límites de corriente y voltaje se encuentran muy alejados del valor esperado. Para realizar estas pruebas se cubrieron los paneles solares con cartulinas, para bloquear la radiación solar y verificar si el algoritmo implementado en el sensor inteligente puede detectar esta falla y así comprobar su operación total. El panel tiene una dimensión de 97.3 cm de ancho y 135 cm de largo, por ende, cada panel tiene un área de 1.3301 m² y al ser dos paneles el área total es de 2.6602 m². El panel está compuesto de 1080

celdas de silicio amorfo las cuales se encuentran organizadas en cuatro cuadrantes de 6 ramas de 45 celdas en serie cada rama. La cartulina tiene dimensiones de 65 cm de largo y 50 cm de ancho, lo cual supone un área de 0.325 m². Se registraron datos para 7 experimentos en los cuales se cubrió progresivamente una mayor área de los paneles fotovoltaicos:

- Experimento 1. Operación normal de los paneles fotovoltaicos
- Experimento 2. Se cubre un 12.21% del área de los paneles fotovoltaicos
- Experimento 3. Se cubre un 24.42% del área de los paneles fotovoltaicos
- Experimento 4. Se cubre un 36.63% del área de los paneles fotovoltaicos
- Experimento 5. Se cubre un 48.63% del área de los paneles fotovoltaicos
- Experimento 6. Se cubre un 61.05% del área de los paneles fotovoltaicos
- Experimento 7. Se cubre un 73.26% del área de los paneles fotovoltaicos

Evaluando 3 minutos en cada caso, esto es, 6 evaluaciones del algoritmo se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Resultados del sensor inteligente al simular fallas de los paneles fotovoltaicos.

No. de experimento	Promedio de la probabilidad del voltaje dentro de los límites definidos	Promedio de la probabilidad de la corriente dentro de los límites definidos
Experimento 1	97.71%	97.71%
Experimento 2	96.55%	95.99%
Experimento 3	88.45%	82.11%
Experimento 4	80.22%	81.02%
Experimento 5	67.08%	69.84%
Experimento 6	55.49%	52.77%
Experimento 7	17.22%	21.58%

En este caso es necesario mencionar varios aspectos de la experimentación. Se evaluaron por 3 minutos debido al tiempo de respuesta de los paneles fotovoltaicos, debido a que tras colocar y asegurar la cartulina el observar el efecto en la corriente y el voltaje en los paneles, toma un tiempo entre 20 y 40 segundos. Por lo anterior, es necesario mantener el mismo experimento durante varias fusiones de forma que se puedan analizar en un tiempo prolongado las fallas provocadas y que el comportamiento de los resultados del algoritmo de fusión sean consistentes. La Figura 5.2 muestra la progresión en la cual se colocaron las

cartulinas para provocar la falla y como se encontraban ubicadas al momento de realizar los experimentos.



Figura 5.1. Simulación de fallas en los paneles fotovoltaicos.

Otro aspecto importante de la simulación de las fallas es que debido a que son dos paneles fotovoltaicos en serie se espera de alguna forma que la pérdida de potencia no sea lineal, esto debido a que internamente en cada panel hay muchos arreglos de celdas en paralelo y en serie. Con este experimento se confirmó completamente que el algoritmo puede distinguir satisfactoriamente las pérdidas de potencia, si bien en este caso fueron fallas provocadas, en algunos casos se pueden presentar condiciones similares que afectan fuertemente la operación de los paneles solares.

5.3 Conclusiones y Observaciones

Uno de los principales inconvenientes encontrados en la literatura revisada con respecto a los sistemas de monitoreo o diagnóstico para paneles fotovoltaicos es que en su mayor parte están hechos únicamente para desarrollar los modelos de predicción de potencia eléctrica en base a características ambientales. Regularmente no se invierte tiempo en desarrollo de un sensor específico para celdas fotovoltaicas y a menudo se realiza mediante

equipos comerciales de costo alto que, si bien resuelven problemáticas asociadas a calibración e incertidumbre, no es conveniente para un diagnóstico de celdas el uso de estas herramientas.

En los aspectos tratados en el documento, se hace énfasis en el diseño de sistemas con capacidad de análisis de datos que trabajen en ambientes de redes y cumplan con aspectos de seguridad e integridad de datos, se logró conjuntar múltiples tecnologías y conceptos para crear un sistema holístico que cumpla con múltiples estándares y pueda ser usado en aplicaciones prácticas que pudieran determinar en parques fotovoltaicos fallas potenciales.

Se diseñó y probó un sensor inteligente para el monitoreo y funcionamiento de arreglos de paneles fotovoltaicos con las funciones de procesamiento, comunicación y fusión de datos. El sensor inteligente tiene la capacidad de comunicarse por medio de USB, CAN, Ethernet o WiFi, lo cual facilita el desarrollo de redes de sensores.

Se desarrolló un sensor inteligente que genera información de radiación, voltaje del panel, corriente eléctrica del panel, temperatura del panel y temperatura ambiente. Esta información se puede almacenar en archivos locales o en la nube como se mostró en el desarrollo. Con los elementos actuales se puede desarrollar una interfaz gráfica de acuerdo a las necesidades del usuario. Todas las funcionalidades del sensor inteligente son importantes, pero se resalta la fusión de datos, la cual determina el funcionamiento de un panel o arreglo fotovoltaico en un rango del 0 % al 100 %, con un error bajo en sus cálculos.

Se presentó un artículo en un congreso del IEEE ya publicado [43].

La aplicación del método de fusión de datos basado en plantillas paramétricas puede ser aplicada y adaptada a cualquier proceso.

Los objetivos iniciales del proyecto fueron cumplidos satisfactoriamente.

Las metas fueron cumplidas, se plantean algunos aspectos adicionales del monitoreo de paneles solares en gran escala en la siguiente sección.

5.4 Trabajo a Futuro

Existe una actividad importante, planteada en la Sección 1.6 que consiste en el desarrollo de una red de comunicación apropiada para el monitoreo de paneles fotovoltaicos

a gran escala, porque un parque fotovoltaico se encuentra conformado por cientos de paneles. Pero más que la selección del protocolo, un enfoque que debería recibir es el trato que se le debe de dar a los datos generados por tantos dispositivos. Inicialmente se plantea una red como la mostrada en la Figura 5.3, la cual contiene una arquitectura genérica para el manejo de una red amplia de sensores.

Se propone una arquitectura de fusión de datos centralizada, cuyos elementos base estarían basados en el microcontrolador PIC18F2680, se selecciona por su conectividad con el protocolo CAN [44]. Se propone el protocolo CAN debido a su tolerancia a fallas, los pocos recursos necesarios para su implementación y la cantidad de nodos que pueden ser conectados.

Se plantea como trabajo a futuro el diseñar todo el sistema de intercambio de datos, de forma que sea posible transmitir desde un nodo esclavo o sensor base los datos de voltaje y corriente del panel, las medias del voltaje y corriente y las desviaciones estándar de cada variable. Además, determinar en qué casos es necesario el medir la temperatura del panel en caso de que los arreglos fotovoltaicos sean extensos.

Implementar el algoritmo de fusión de datos en el ESP32 y adaptarlo para la fusión de datos de cada panel o arreglo. Otros aspectos para la definición de la operación de la red total de sensores incluyen definir la granularidad, es decir, determinar el nivel de detalle máximo deseado de datos en función de la capacidad instalada del parque fotovoltaico.

Es necesario desarrollar interfaces gráficas de usuario amigables que permitan revisar de forma rápida los resultados de la fusión de datos, las variables eléctricas y los parámetros medio ambientales. Una propiedad que deben tener estas interfaces de usuario es que sean multiplataforma, es decir, que el código base de la interfaz pueda darse desde una computadora o desde un móvil de manera que el acceso a la información pueda ser desde cualquier dispositivo y desde cualquier lugar del mundo

Un proyecto viable sería el desarrollo de un sensor inteligente que de forma automática cree las plantillas paramétricas conforme mide las variables eléctricas y ambientales, el propósito es que al igual que lo hacen otros paradigmas de fusión de datos

basados en datos, exista algo parecido a un entrenamiento, pero que se realice de forma dinámica.

Los rendimientos iniciales del algoritmo difuso pueden mejorarse, y por eso otro proyecto sería dar continuidad al algoritmo presentado, mejorar su desempeño e implementar un sensor inteligente con este algoritmo.

Por último, también sería conveniente el desarrollar una estructura dentro de la base de datos para determinar qué tiempo es el adecuado para el almacenamiento de datos en la base de datos y que tantos de esos datos es necesario almacenar.

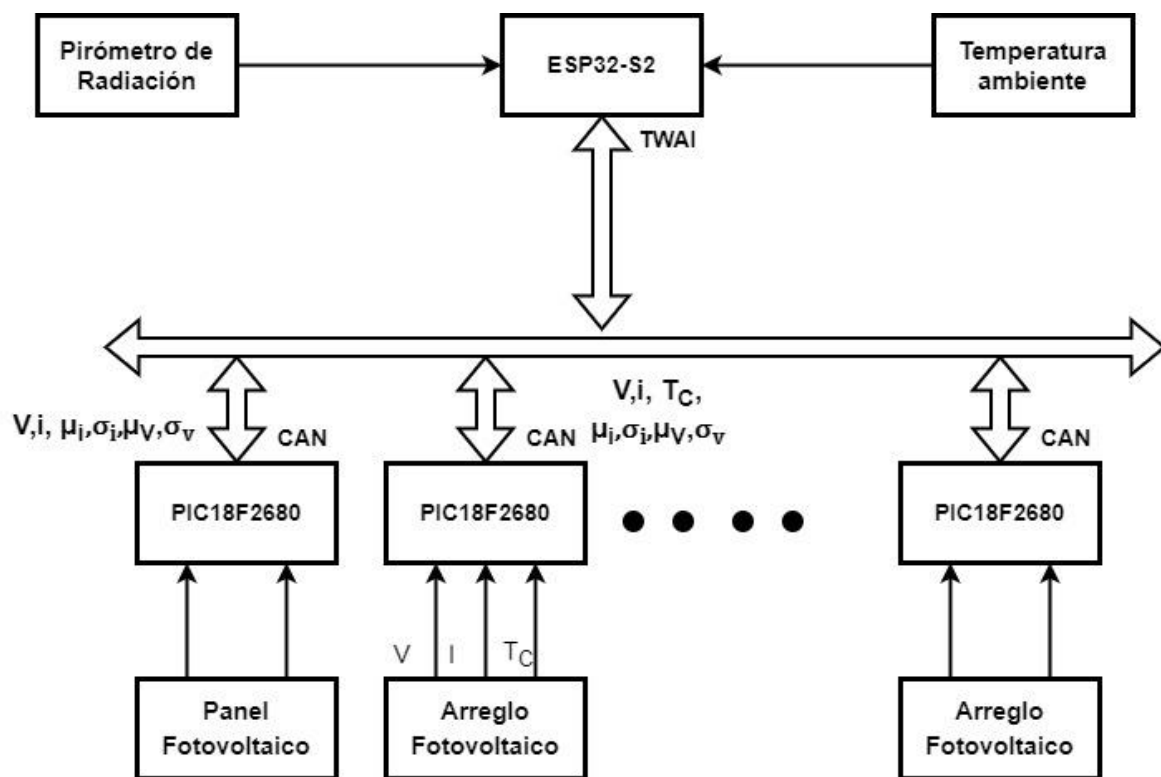


Figura 5.2. Arquitectura propuesta de un sistema para el monitoreo de un parque fotovoltaico.

Referencias

- [1] IRENA, Renewable Energy Statistics 2022 The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022.
- [2] Osinergmin, Energías Renovables: Experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética. Organismo Supervisor de la inversión en energía y minería, Perú, 2019.
- [3] "IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuator - Wireless Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats," IEEE Std 1451.5-2007, pp. 1-225, DOI: 10.1109/IEEESTD.2007.4346346, 5 Oct. 2007.
- [4] Mekid S., "Further Structural Intelligence for Sensors Cluster Technology in Manufacturing," Sensors, DOI: 10.3390/s6060557, 5 Oct. 2007.
- [5] Klein, L., "Sensor and data fusion: A tool for information assessment and decision making," 2nd Ed., SPIE Press, Washington, DOI: 10.1117/3.928035, 2012.
- [6] Mitchell, H., "Multi-sensor Data Fusion - An Introduction," 2nd Ed., Springer, DOI: 10.1007/978-3-540-71559-7, 2007.
- [7] Stankovic, J Research Directions for the Internet of Things. *Internet of Things Journal*, DOI: 10.1109/JIOT.2014.2312291, 2014.
- [8] "Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2021, with forecasts from 2022 to 2030", [www.statista.com](https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/), 2021, <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> (Visto en julio 2022).
- [9] Paolone G., et al, "A Holistic Overview of the Internet of Things Ecosystem," IoT, 3, pp. 398-434, <https://doi.org/10.3390/iot3040022>, 2022.
- [10] Internet of Things (IoT) – Reference Architecture, ISO/IEC30141, International Electrotechnical Commission (IEC), Ginebra, Suiza, Agosto 2018.
- [11] Bassi L., "Industry 4.0: Hope, hype or revolution?," 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI), Modena, Italia, pp. 1-6, DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065927, 2017.

- [12] Imkamp D., et al, “Challenges and trends in manufacturing measurement technology – the Industry 4.0 concept,” *Journal of Sensors and Sensors Systems*, Vol. 5, pp. 325–335, DOI: 10.5194/jsss-5-325-2016, 2016.
- [13] International Renewable Energy Agency, *Solar Photovoltaics*, Vol. 1: Power sector, issue 4/5, 2012.
- [14] Mishra B. y Kar B. K., *Matlab Based Modeling of Photovoltaic Array Characteristics*, Bachelor dissertation, Dept. Elect. Ing., National Institute of Technology, Rourkela India, 2012.
- [15] NOM-001-SEDE-2018. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2018, *Instalaciones Eléctricas (utilización)* 2018.
- [16] *Guide to the Installation of Photovoltaic Systems*, Microgeneration Certification Scheme, Londres, 2012.
- [17] ESMAP. *Global Photovoltaic Power Potential by Country*. Washington, DC: World Bank. 2020. [En Línea] URL:
<https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/466331592817725242/global-photovoltaic-power-potential-by-country>
- [18] Djamila R. y Ernest M., “Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control,” DOI:10.1007/978-1-4471-2403-0, 2012.
- [19] Mehrdad D. y Abdelhamid R., *Comprehensive Modulation and Classification of Faults and Analysis Their Effect in DC Side of Photovoltaic System*, *Energy and Power Engineering*, pp. 230-236, DOI:10.4236/epe.2013.54B045, 2013.
- [20] Basnet B., Chun H. y Junho Bang, "An Intelligent Fault Detection Model for Fault Detection in Photovoltaic Systems," *Journal of Sensors*, Article ID 6960328, 11 páginas, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6960328>.
- [21] Tsoukalas L y Robert U., “*Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*,” Wiley, 1997.
- [22] “SoC with Xtensa Single-Core 32-bit LX7 Microprocessor supporting IEEE 802.11b/g/n (2.04 GHz Wi-Fi, ESP32-S2 Series Datasheet”, Rev. 1.5, 2023, [En línea] Disponible en:

- https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s2_datasheet_en.pdf).
- [23] Field H., "Solar cell spectral response measurement errors related to spectral band width and chopped light waveform," *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997*, Anaheim, CA, USA, 1997, pp. 471-474, DOI: 10.1109/PVSC.1997.654130.
- [24] *Pyranometer owner manual, Models SP-212 and SP-215*, Rev A, Apogee Instruments Inc, 2022. [En línea] Disponible en: <https://www.apogeeinstruments.com/content/SP-212-215-manual.pdf>.
- [25] "BGT-TBQ rastreador Solar sensor de radiación global, medidor de energía solar para agricultura," Aliexpress.com, <https://es.aliexpress.com/item/1005001496679749.html>, (última vez consultado 18 de febrero de 2023).
- [26] "Cold-Junction Compensated K thermocouple to digital converter (0 °C to +1024 °C), MAX6675," Rev 3, Maxim Integrated, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/MAX6675.pdf>.
- [27] "Miniature Open Loop Current Sensors," CSLS Series, Rev B, Honeywell, 2005. [En línea] Disponible en: <https://www.farnell.com/datasheets/1836282.pdf>.
- [28] Dewi, Sasti & Panatarani, Camellia & Joni, I Made, "Design and development of DC high current sensor using Hall-Effect method," DOI: 10.1063/1.4941871, 2015.
- [29] "Thermally Enhanced, Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 100 $\mu\Omega$ Current Conductor," ACS758xCB, Rev 18, Allegro Microsystems, 2022. [En línea] Disponible en: <https://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/acs758-datasheet.ashx>.
- [30] "Metal-Mite Aluminum Housed Axial Terminal Wire wound," 1% Tolerance, 89 Series, Rev A, Ohmite, 2022. [En línea] Disponible en: <https://www.farnell.com/datasheets/2025674.pdf>.
- [31] NOM-001-SEDE-2018. (2018). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2018, Instalaciones Eléctricas (utilización)].

- [32] Dweet.io Questions?," Dweet.io, <https://dweet.io/faq>, (Última vez visto enero 23, 2023).
- [33] "MQTT FAQ," mqtt.org, <https://mqtt.org/faq/>, (Última vez visto enero 23, 2023).
- [34] Oppel A. y Sheldon R., "Fundamentos de SQL," McGraw Hill, 2010.
- [35] "ESP32 Reference Manual," Rev. 4.8, 2022. [En línea] Disponible en:
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf.
- [36] "Protocolos TCP/IP," Documentación IBM, 2021. [En Línea]. Disponible en:
<https://www.ibm.com/docs/es/aix/7.2?topic=protocol-tcpip-protocols>.
- [37] "Triangular Membership Function", mathworks.com,
<https://la.mathworks.com/help/fuzzy/trimf.html>, (Última vez visto 6 de febrero de 2023).
- [38] "Trapezoidal Membership Function", mathworks.com,
<https://la.mathworks.com/help/fuzzy/trapmf.html>, (Última vez visto 6 de febrero del 2023).
- [39] "Sigmoidal Membership Function", mathworks.com,
<https://la.mathworks.com/help/fuzzy/sigmf.html>, (Última vez visto 6 de febrero del 2023).
- [40] "Gaussian Membership Function", mathworks.com,
<https://la.mathworks.com/help/fuzzy/gaussmf.html>, (Última vez visto 6 de febrero del 2023).
- [41] "Bell Shaped Membership Function", mathworks.com,
<https://la.mathworks.com/help/fuzzy/gbellmf.html>, (Última vez visto 6 de febrero del 2023).
- [42] Chapra S. y Canale R., "Métodos numéricos para ingenieros," McGraw Hill, 2006.
- [43] J. Rivera-Mejía., V. Medina-Rodríguez, R. E. Quiñonez-Moreno, J. Vega-Pineda, "PV Fuzzy Model Based on V-I Curves to be Implemented in an Intelligent Sensor," 2022 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), Houston, TX, USA, 2022, pp. 74-79, DOI: 10.1109/GreenTech52845.2022.9772031.
- [44] "28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with ECAN Technology 10-bit A/D", PIC18F2585/2680/4585/4680, Rev D, Microchip, oct. 2018