



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE SINALOA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CONTROL Y EVALUACIÓN DE UN SEGUIDOR  
SOLAR DE UN EJE**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS**

**PRESENTA**

**Ing. PEDRO IBARRA ENRÍQUEZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**Dr. MIGUEL MORALES RODRÍGUEZ**

**CODIRECTOR DE TESIS**

**Dr. MARCOS ÁNGEL GONZÁLEZ OLVERA**

**Mazatlán, Sinaloa, enero 2021.**

# ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS



## UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE SINALOA



### ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

Mazatlán, Sinaloa a 11 de diciembre de 2020

Los miembros del Comité de Tesis avalada por la Coordinación de la Maestría en Ciencias Aplicadas de la Universidad Politécnica de Sinaloa, en virtud de que el Alumno Ing. Pedro Ibarra Enríquez con matrícula 2018031046, aspirante de Grado de Maestro en Ciencias Aplicadas, satisface los requisitos señalados por las disposiciones del reglamento vigente, y aprueban la liberación de la Tesis de Grado titulada:

**“Control y Evaluación de un Seguidor Solar de un Eje”**

EL COMITÉ DE TESIS

Dr. Miguel Morales Rodríguez

Dr. Marcos Ángel González Olvera

Dr. Rogelio Mendoza Pérez

Dr. Alejandro Lizárraga Lizárraga



*"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria".*



Carretera Municipal Libre Mazatlán Higueras Km. 3, Col. Genaro Estrada, C.P. 82199. Mazatlán, Sin. Tel (669) 1800695 y 96  
[www.upsin.edu.mx](http://www.upsin.edu.mx)

# CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS



## UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE SINALOA



### CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de **Mazatlán, Sinaloa** el día **08** del mes de **enero** del año **2021**, el que suscribe **Pedro Ibarra Enríquez**, alumno del Programa de Maestría en Ciencias Aplicadas con número de matrícula **2018031046**, adscrito a la Universidad Politécnica de Sinaloa, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Miguel Morales Rodríguez** y cede los derechos del trabajo intitulado **“Control y Evaluación de un Seguidor Solar de un Eje”**, a la Universidad Politécnica de Sinaloa para su difusión, con fines académicos y de investigación. Así mismo, se hace constar, que ni los datos experimentales ni el texto han sido usados para obtener otro grado académico en el país o en el extranjero. Cualquier colaboración o cita textual fue declarada y reconocida en el documento.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la dirección de correo electrónico [mca@upsin.edu.mx](mailto:mca@upsin.edu.mx). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Pedro Ibarra E.

Pedro Ibarra Enríquez



Carretera Municipal Libre Mazatlán Higuera Km. 3, Col. Genaro Estrada. C.P. 82199. Mazatlán, Sin. Tel (669) 1800695 y 96  
[www.upsin.edu.mx](http://www.upsin.edu.mx)



## **DEDICATORIA**

Dedico la presente tesis a mis padres y hermanos, por formar parte esencial en cada una de las etapas de este proceso académico. De igual manera, a mis abuelos, que sé se encuentran orgullosos de mí por estar formándome como un profesionalista, tal como ellos siempre lo anhelaron.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado una beca para poder llevar a cabo la realización de mis estudios, con número de registro **935618**, y al INAPI por haberme beneficiado con un apoyo monetario para la realización de una movilidad nacional en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM). De igual manera, al Dr. Manuel Antonio Pineda Domínguez, presidente municipal del Rosario, Sinaloa, por ayudar monetariamente con los viáticos para la movilidad académica a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Por otro lado, agradezco infinitamente a mis directores de tesis por el apoyo académico y emocional brindado durante la duración de mi formación académica. A su vez, agradezco al Dr. Rogelio Mendoza Pérez por su cordial recibimiento y todo el conocimiento compartido durante mi estancia en la UACM, especialmente en el Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables y al Dr. Alejandro Lizárraga Lizárraga, por sus excelentes sugerencias para un correcto desarrollo de la línea de investigación. De igual manera, un agradecimiento a la Universidad Politécnica del Valle de México por las facilidades brindadas para la elaboración del proyecto, al Laboratorio de Control e Instrumentación y al proyecto UACM PI-CCyT-2019-09 por el empleo del equipo requerido y espacio de trabajo proporcionado y al proyecto 263488 “Diseño e instalación de un laboratorio de pruebas y certificación para colectores solares destinados al calentamiento de agua” del fondo CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética.

Respecto a trámites académico-administrativos, reitero mi agradecimiento al Dr. Israel Benítez García, Dr. Jesús Aarón Salazar Leyva y a la Lic. Argelia Catalina Jiménez Martínez, Coordinador de Maestría en Ciencias Aplicadas, Director de Investigación y Posgrado y Asistente de Dirección de Investigación y Posgrado, respectivamente.

## Contenido

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS .....	ii
CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE ECUACIONES.....	xii
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I .....	1
I INTRODUCCIÓN.....	1
II ESTADO DEL ARTE .....	3
1. Energía y Medio Ambiente.....	3
2. Matriz Energética Global.....	4
3. Matriz Energética en México.....	4
4. Tecnologías para la Generación de Energía en México .....	5
4.1 Tecnologías Convencionales .....	5
4.2 Tecnologías Limpias.....	6
5. Pronósticos para Generación de Energía bajo Tecnologías Limpias en México .....	7
5.1 Hidroeléctrica .....	7
5.2 Solar Fotovoltaica.....	7
6. Características del Recurso Solar en México.....	8
7. Ventajas de la Energía Solar .....	8
8. Desventajas de la Energía Solar .....	9
9. Energía Solar Fotovoltaica.....	9
10. Generalidades de un Panel Fotovoltaico .....	10
11. Efecto Fotovoltaico .....	10
12. Conexión de Sistemas Fotovoltaicos.....	11
12.1 Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red .....	11
12.2 Sistema Fotovoltaico sin Conexión a la Red Eléctrica .....	12
13. Eficiencia de un Panel Fotovoltaico.....	13
14. Factores que Afectan el Rendimiento de un Panel Fotovoltaico .....	15

15. Seguidores como Alternativa para Aumentar el Rendimiento de Paneles Fotovoltaicos .....	16
15.1 Generalidades de un Seguidor Solar .....	16
15.2 Tipos de Seguidores Solares .....	17
15.3 Ventajas y Desventajas.....	19
16. Sistema de Control para el Seguimiento de la Trayectoria Solar .....	20
16.1 Objetivo de los Sistemas de Control .....	21
17. Técnicas Implementadas en los Sistemas de Control en Seguidores Solares.....	21
17.1 Lógica Difusa.....	23
III ANTECEDENTES .....	26
1. Propuestas Existentes para Superficies Terrestres .....	26
2. Aplicaciones de Sistemas de Seguimiento Solar para Sistemas Dinámicos .....	38
IV PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA O JUSTIFICACIÓN .....	39
V HIPÓTESIS.....	40
VI OBJETIVOS.....	41
1. Objetivo General .....	41
2. Objetivos Específicos.....	41
CAPÍTULO II .....	42
VII MATERIALES Y MÉTODOS .....	42
1. Sistema de Generación de Energía Fotovoltaica.....	44
2. Valoración del Recurso Solar.....	45
3. Sistema de Control Difuso .....	46
4. Secuencia Lógica.....	48
5. Diseño de prototipos.....	50
5.1 Prototipos Pruebas Parciales.....	50
5.2 Prototipos Pruebas Finales y Evaluación Energética .....	50
6. Implantación del Sistema .....	52
7. Diseño de Tarjetas Electrónicas .....	53
8. Evaluación Energética .....	54
CAPÍTULO III .....	56
VIII RESULTADOS .....	56
1. Condiciones de Operación .....	56
2. Resultados Experimentales .....	56
2.1 Pruebas Preliminares.....	56

2.2 Pruebas Finales.....	61
2.3 Evaluación Energética .....	64
3. Técnica de Filtrado de Datos.....	69
4. Discusión .....	72
CAPÍTULO V .....	74
IX CONCLUSIONES .....	74
CAPÍTULO VI .....	76
X REFERENCIAS.....	76
XI ANEXOS .....	80
1. Técnicas de Filtrado.....	80



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Emisiones de CO <sub>2</sub> por sector 2016 [4].....	4
Figura 2: Porcentaje de generación de energía por tecnología en 2018 [6]. .....	5
Figura 3: Recurso solar en México [9].....	8
Figura 4: Componentes de un módulo fotovoltaico [12]. .....	10
Figura 5: Efecto fotovoltaico [14].....	11
Figura 6: Sistema fotovoltaico conectado a la red [16].....	12
Figura 7: Sistema fotovoltaico sin conexión a la red [16].....	13
Figura 8: Curva de potencia y curva I-V [18]. .....	14
Figura 9: Seguidor solar 1 eje horizontal [24].....	17
Figura 10: Estructura sistema de control [27]. .....	20
Figura 11: Número de artículos sobre técnicas MPPT publicados por año [31]. .....	22
Figura 12: Técnicas MPPT para seguidores solares [32]. .....	23
Figura 13: Etapas de la Lógica Difusa [33].....	24
Figura 14: Comparación potencia generada por sistema fijo y sistema móvil [38]. .....	30
Figura 15: Metodología.....	43
Figura 16: Esquema de relación entre componentes de sistema móvil y fijo .....	44
Figura 17: Curvas I-V módulos implementados. ....	45
Figura 18: Modelo de sistema de control difuso. ....	47
Figura 19: Esquema general de control.....	47
Figura 20: Función de pertenencia triangular.....	48
Figura 21. Adquisición parámetro voltaje.....	49
Figura 22: Diagrama de flujo de secuencia lógica. ....	49
Figura 23: Sistema Fijo y Móvil, respectivamente para pruebas parciales. ....	50
Figura 24: Estructura panel fijo y móvil para evaluación energética. ....	51
Figura 25: Sistema de transmisión. ....	52
Figura 26: Módulo RTC.....	53
Figura 27: Esquema de conexión: Comparación niveles de radiación incidente, voltaje, corriente y control de tiempos. ....	54
Figura 28: Variables del sistema. ....	56
Figura 29: Gráfica de corriente con carga de 1.05 k $\Omega$ 15/dic/2019. ....	57
Figura 30: Gráfica de potencia con carga de 1.05 k $\Omega$ 15/dic/2019.....	58
Figura 31: Gráfica de corriente con carga de 1.05 k $\Omega$ 22/dic/2019. ....	58
Figura 32: Gráfica de potencia con carga de 1.05 k $\Omega$ 22/dic/2019.....	59
Figura 33: Gráfica de corriente con carga de 1.05 k $\Omega$ 19/abr/2020.....	59
Figura 34: Gráfica de potencia con carga de 1.05 k $\Omega$ 19/abr/2020.....	60
Figura 35: Gráfica de corriente con carga de 270 $\Omega$ 21/abr/2020.....	60
Figura 36: Gráfica de potencia con carga de 270 $\Omega$ 21/abr/2020.....	61
Figura 37: Montaje SFV.....	62
Figura 38: Potencia generada 30 agosto 2020.....	62
Figura 39: Potencia generada 02 de septiembre 2020.....	63
Figura 40: Potencia generada 03 de septiembre.....	63
Figura 41: Evaluación energética.....	66
Figura 42: Voltajes SFV móvil y fijo.....	67

Figura 43: Corrientes SFV móvil y fijo. ....	68
Figura 44: técnica de filtrado 15/ene/2019 CDMX cada 5 min. ....	71
Figura 45: técnica de filtrado 15/mar/2019 CDMX cada 5 min.....	71
Figura 46: Técnica de filtrado Mazatlán 01/may/2020 cada 5 min.....	72
Figura 47: Técnica de filtrado Mazatlán 01/may/2020 cada 2 min.....	72
Figura 48: Técnica de filtrado 01/nov/2019 CDMX cada 5 min.....	80
Figura 49: Técnica de filtrado 15/dic/2018 CDMX cada 5 min.....	80
Figura 50: Técnica de filtrado 31/ene/2019 CDMX cada 5 min. ....	81
Figura 51: Técnica de filtrado 01/feb/2019 CDMX cada 5 min. ....	81
Figura 52: Técnica de filtrado 01/mar/2019 CDMX cada 5 min. ....	82
Figura 53: Técnica de filtrado 31/mar/2019 CDMX cada 5 min. ....	82
Figura 54: Técnica de filtrado 01/abr/2019 CDMX cada 5 min. ....	83
Figura 55: Orientación 08:00 a.m.....	82
Figura 56: Orientación 12:00 p.m. ....	83
Figura 57: Orientación 14:30 p.m. ....	84

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Comparación entre seguidores solares por tipo de movimiento. ....	19
Tabla 2: Comparación entre seguidores según su algoritmo de control.....	19
Tabla 3: Características de módulo implementado. ....	26
Tabla 4: Energía generada.....	27
Tabla 5: Parámetro de panel fotovoltaico.....	28
Tabla 6: Propiedades del módulo empleado.....	28
Tabla 7: Características de MF utilizado.....	30
Tabla 8: Orientaciones. ....	31
Tabla 9: Comparación entre distintos sistemas de seguidores solares activos. ....	32
Tabla 10: Parámetros del MF implementado. ....	34
Tabla 11: Resultados de simulación para SFV de 3000 W. ....	34
Tabla 12: ISPM UACM y UPSIN (KWh/m <sup>2</sup> ) .....	46
Tabla 13: Características de MF para evaluación energética. ....	55
Tabla 14: Comparación sistema móvil vs sistema fijo.....	66
Tabla 15: Comparación parámetros ambos SFV.....	68

## **LISTA DE ECUACIONES**

- [1]: Punto de máxima potencia.
- [2]: Eficiencia del MF.
- [3]: Ecuaciones función tipo triangular.

## RESUMEN

El trabajo de investigación hace énfasis en la implementación de un sistema de control en un seguidor solar de un eje, con la finalidad de aumentar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos en el proceso de generación de potencia eléctrica. Para la medición de la radiación solar incidente en el sistema fotovoltaico (SFV), se hace uso de sensores lumínicos, los cuales son fundamentales para llevar a cabo un control de posición en lazo cerrado. Se propone realizar el control del sistema mediante lógica difusa en un sistema embebido, buscando aprovechar lo mejor posible el recurso solar junto con un bajo consumo energético del sistema de posicionamiento. Se hace uso de dispositivos electrónicos de reloj en tiempo real como herramienta indispensable para la bitácora electrónica que permite obtener los datos para evaluar el aprovechamiento del recurso.

**Palabras clave:** *Radiación solar, Fotorresistencia, Seguidor Solar, Sistema de Control, lógica difusa.*

## ABSTRACT

This research work emphasizes the implementation of a control system in a single axis solar tracker, with the aim of increasing the performance of photovoltaic panels in the process of generating electrical power. For the measurement of the incident solar radiation in the photovoltaic system (SFV), light sensors are used, which are essential for carrying out a closed-loop position control. The control of the system is proposed to be carried out by means of diffuse logic in an embedded system, searching to make the best use of the solar resource together with a low energy consumption of the positioning system. Real time clock electronic devices are used as an indispensable tool for the electronic register that allows to obtain the data to evaluate the use of the resource.

**Key words:** *Solar radiation, Photoresistance, Solar Tracker, Control System, Fuzzy Logic.*

# CAPÍTULO I

## I INTRODUCCIÓN

El modelo de obtención de energía convencional emplea como fuente principal los combustibles fósiles, (tales como el carbón, petróleo y gas natural). Sin embargo, la implementación de estas fuentes ha provocado alteraciones en el medio ambiente. En adición, la tecnología empleada para convertir el combustible fósil en energía requiere altos costos, lo cual representa uso de tecnología no accesible, situación que no les favorece a los países en vías de desarrollo [1]

Las fuentes renovables son una alternativa para reducir los efectos negativos causados al medio ambiente por la quema de combustibles fósiles. Su implementación busca lograr un desarrollo sostenible. Dentro de este tipo de energías renovables podemos mencionar la energía solar; misma que a su vez se clasifica en energía solar térmica y energía solar fotovoltaica. En México, el auge en la generación de energía a través de este tipo de tecnología se observó a partir del año 2010, pasando de un total de 39 GWh a un total de 190.3 GWh en 2015 [2].

El dispositivo encargado de generar energía solar fotovoltaica recibe el nombre de panel fotovoltaico. Desarrollo tecnológico, de bajo costo de fabricación, lo cual la vuelve una tecnología accesible para países en vías de desarrollo.

En el proceso de generación de energía, la radiación incidente sobre las celdas solares que componen el panel juega un papel importante; por lo tanto, el interés principal consiste en el desarrollo de técnicas que incrementen la captación de radiación por el panel fotovoltaico. Como herramienta para incrementar los niveles de radiación incidente sobre los

módulos fotovoltaicos surge la implementación de nuevos materiales en las tecnologías de fabricación (tales como, cobre molibdeno, telurio de zinc, telurio de cadmio y cloruro de cadmio) y el desarrollo de seguidores solares. Estos últimos, son equipos mecánicos que a través de sistemas de control son capaces de orientar al panel fotovoltaico de forma perpendicular al sol durante el transcurso del día. México es un país con altos índices de radiación, por lo tanto, la implementación de seguidores solares resulta importante, pues contribuye a mejorar la obtención de energía limpia a través de esta fuente.



## **II ESTADO DEL ARTE**

### **1. Energía y Medio Ambiente**

Uno de los principales problemas que enfrenta la sociedad en la actualidad es el cambio climático, entendido como un cambio previsible en el clima terrestre provocado por la acción humana que da lugar al efecto invernadero y al calentamiento global [3].

La generación de energía mediante combustibles fósiles representa un grave problema en el medio ambiente y la salud humana. Dos de los principales sectores en la emisión de gases de efecto invernadero son el sector de generación termoeléctrica y el sector del transporte. Datos provenientes de la Agencia Internacional de Energía (IEA) revelan que por la quema de combustible las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2016 fueron de 31.31 GtCO<sub>2</sub>. Como se observa en la figura 1, aproximadamente una cuarta parte del total de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global fueron emitidas por el continente asiático para la generación de electricidad y calor. En el continente de América, el total de emisiones de CO<sub>2</sub> fue de 7 GtCO<sub>2</sub>. Siendo el sector de transporte el que genera mayores índices de emisiones con un total de 2.49 GtCO<sub>2</sub> [4].

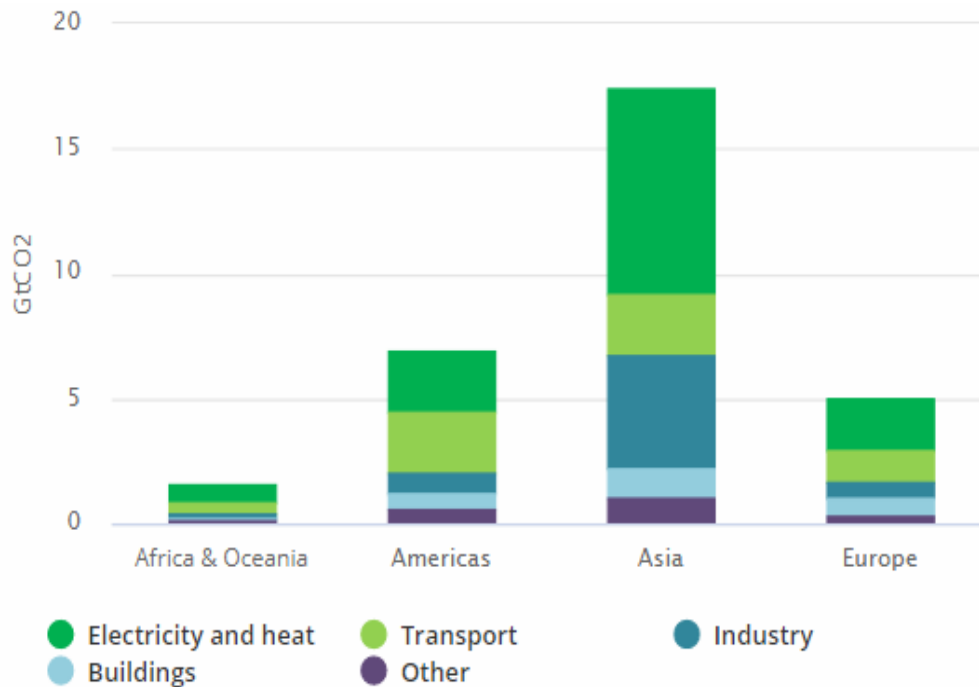


Figura 1: Emisiones de CO<sub>2</sub> por sector 2016 [4].

## 2. Matriz Energética Global

De acuerdo a datos proporcionados por la IEA en “*World Energy Balances*”, la producción a nivel mundial de energía que se tuvo en 2016 fue de 13,760.81 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep), mostrando una disminución del 0.3 % con respecto al año 2015; siendo China, Estados Unidos, Rusia y Arabia Saudita los países con mayor participación (50.1 %). Por su parte, México se posicionó en el lugar número 16 con 1.3 % de la energía producida en el mundo [5].

## 3. Matriz Energética en México

En 2018, la generación total de energía eléctrica fue de 317,278 GWh. De las fuentes de energía limpia, la hidroeléctrica es la que representa un mayor porcentaje de generación (10.2 %) de un total de 23.2 % que estas representan [6]. En la figura 2 se observa el porcentaje de generación de energía eléctrica por los distintos tipos de tecnología:

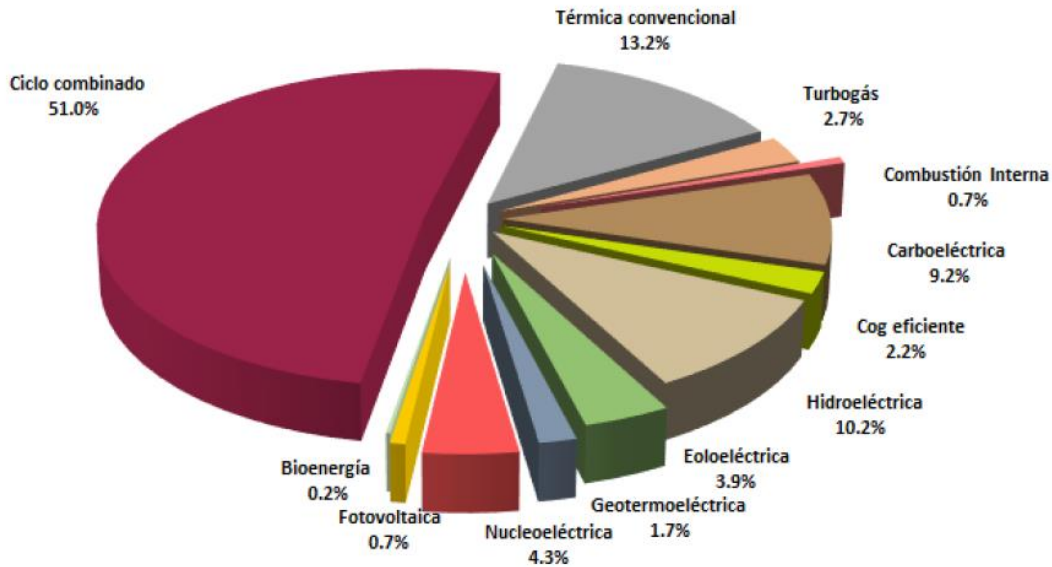


Figura 2: Porcentaje de generación de energía por tecnología en 2018 [6].

El balance nacional de energía por entidad federativa en 2017, identifica a Guerrero y Colima como las entidades con los mayores excedentes de energía. Por otro lado, Aguascalientes y Quintana Roo son identificadas como las entidades que presentan el mayor déficit energético; al igual que estas dos entidades, Ciudad de México se encuentra en déficit energético [7].

#### 4. Tecnologías para la Generación de Energía en México

Actualmente, se implementan dos modalidades para la generación de energía eléctrica en nuestro país. El umbral para la consideración de una tecnología de generación de energía como limpia, consiste en que las emisiones de CO<sub>2</sub> durante el proceso de generación sean inferiores a 100 kg por cada MWh generado [7]. A continuación, son mencionadas las distintas tecnologías pertenecientes a cada grupo:

##### 4.1 Tecnologías Convencionales

En este grupo, destacan de las siguientes tecnologías:

- Carboeléctrica
- Combustión Interna
- Termoeléctrica Convencional
- Turbogás
- Ciclo Combinado

Esta última tecnología es la que predomina para la generación eléctrica en nuestro país. México cuenta con un total de 83 centrales en operación, las cuales representan una capacidad instalada de 28,084 MW equivalente al 37 % del total de la capacidad instalada en el año 2017 [7].

#### **4.2 Tecnologías Limpias**

México posee la posibilidad de incrementar los niveles de generación de energía a partir de tecnologías limpias, debido a sus condiciones geográficas y climáticas. Dentro de las tecnologías limpias que son implementadas en nuestro país para la generación de energía, destacan las siguientes:

- Nucleoeléctrica
- Eólica
- Geotérmica
- Bioenergía
- Hidráulica
- Solar

A pesar de que México es un país con buenos niveles de radiación solar, este tipo de fuente renovable representó muy poco en la generación de energía a nivel nacional al cierre del

2017. El porcentaje de aportación de este tipo de tecnología fue de 0.7 % del total de generación, gracias a las 23 centrales con las que cuenta nuestro país [6]. Los principales estados que aportan a la generación de energía eléctrica a través de esta tecnología son Baja California Sur, Durango, Chihuahua y el Estado de México.

## **5. Pronósticos para Generación de Energía bajo Tecnologías Limpias en México**

Gracias al desarrollo de tecnologías orientadas a la mejora del proceso de generación de energía bajo la implementación de fuentes renovables y a políticas de apoyo a este sector energético, se ha logrado una reducción considerable en los costos que implica su aplicación. Por lo tanto, resultado viable la generación de energía mediante este tipo de fuentes [2].

### **5.1 Hidroeléctrica**

Teniendo presente la necesidad de cubrir la demanda de electricidad en algunas regiones del territorio mexicano, se tiene en consideración la adición de 4,491.8 MW de capacidad de energía en el periodo que comprende de 2016-2030, pasando así de una capacidad de 12,551.1 MW en 2016 a un total de 16,975.8 MW en 2030.

### **5.2 Solar Fotovoltaica**

México es un país con alto potencial para la generación de energía solar fotovoltaica. Por esta razón y con la finalidad de incentivar la implementación de fuentes de energías limpias, se contempla un incremento de 12,140.4 GWh en el periodo 2016-2030, logrando registrar un total de 12,697.1 GWh al final del periodo antes mencionado; siendo los años 2025, 2026 y 2027 aquellos en los cuales se espera tener un mayor incremento.

## 6. Características del Recurso Solar en México

El sol es la fuente más importante de energía para el desarrollo de los procesos biológicos de nuestro planeta. Como se observa en la figura 3, el territorio mexicano cuenta con altos niveles de radiación solar, lo cual lo hace destacar a nivel mundial por sus índices de recurso solar. Presenta una irradiación solar de 4.4 KWh/m<sup>2</sup> por día en la zona centro del país y valores de hasta 6.3 KWh/m<sup>2</sup> por día en la zona norte [8] [9].



Figura 3: Recurso solar en México [9].

## 7. Ventajas de la Energía Solar

En la actualidad, este tipo de energía representa una de las alternativas más prometedoras para lograr cubrir los objetivos del desarrollo sostenible que se tienen [8]. Dentro de las ventajas que hacen destacar a este tipo de fuente de generación se enlistan las siguientes: [10].

- Fuente inagotable de energía

- Bajo impacto ambiental
- Fácil implementación
- Bajos costos de mantenimiento.
- Generación de energía en zonas aisladas.

## **8. Desventajas de la Energía Solar**

Al igual que cualquier forma de generación de energía, este tipo de tecnología presenta algunas desventajas, algunas de ellas ocasionadas por las instalaciones finales y otras por las tecnologías de fabricación de sus componentes principales [10]. Los principales aspectos negativos para este tipo de fuente de obtención de energía son:

- La puesta en marcha de grandes instalaciones ocupa extensas superficies.
- Requiere implementación de sistemas de almacenamiento debido a la naturaleza de la fuente principal.
- Los módulos fotovoltaicos (MFV) desechados representan problemas para la salud y el medio ambiente.
- La inversión demora en recuperarse.
- Eficiencia de equipos de energía solar fotovoltaica en vías de desarrollo.

## **9. Energía Solar Fotovoltaica**

Este tipo de fuente consiste en la generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar incidente sobre dispositivos semiconductores, llamados celdas solares. Los dispositivos utilizados en este tipo de tecnología son los MFV, los cuales se componen de un conjunto de celdas solares interconectadas. En México, el auge de este tipo de tecnología se presentó a partir del año 2011, esto gracias a la puesta en marcha de la primera central fotovoltaica de gran escala; logrando pasar de 38.9 GWh en 2011 a 58.4 GWh en 2012 [2]. Durante el año

2018, la generación mediante esta fuente renovable represento el 0.7 % del total de energía generada a nivel nacional [6].

## 10. Generalidades de un Panel Fotovoltaico

A partir de la unión de varias celdas solares se construye un panel fotovoltaico. Como se observa en la figura 4, un panel fotovoltaico está formado por un conjunto de células, conectadas entre sí, encapsuladas y montadas sobre una estructura de soporte o marco. Este tipo de dispositivos proporcionan en su salida un voltaje en corriente directa [11] [12].

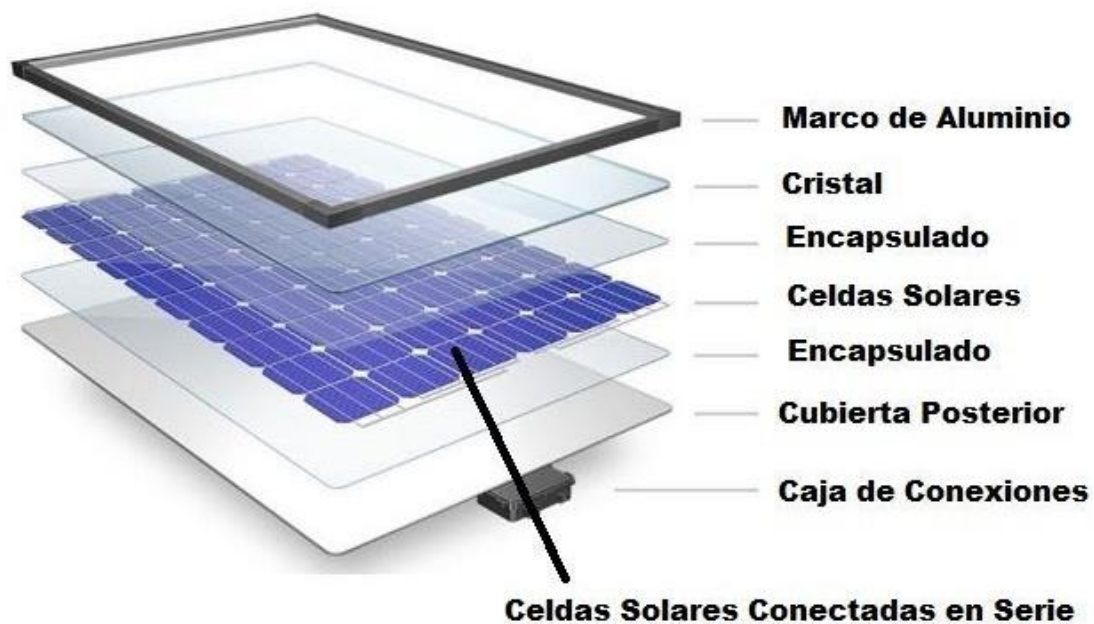


Figura 4: Componentes de un módulo fotovoltaico [12].

## 11. Efecto Fotovoltaico

El proceso de transformación de radiación solar en electricidad recibe el nombre de conversión fotovoltaica y es resultado del efecto fotovoltaico. Dicho efecto ocurre en las celdas del material semiconductor (silicio, Teluro de cadmio, antimonio, zinc, etc.) conectadas en serie o paralelo (según los requerimientos) que componen el panel



fotovoltaico. Cuando estos dispositivos logran absorber la radiación solar, es generado de manera instantánea un voltaje en corriente directa [13] [14]. Este proceso de conversión se representa en la figura 5.

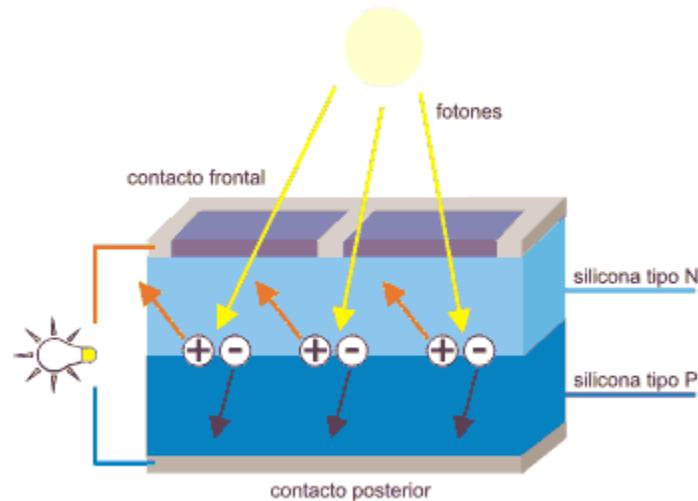


Figura 5: Efecto fotovoltaico [14].

## 12. Conexión de Sistemas Fotovoltaicos

En la actualidad, una de las ventajas principales en la energía solar fotovoltaica es que genera la posibilidad de producir electricidad en zonas apartadas, o simplemente, en lugares donde la red de distribución no llega o cuenta con una cobertura insuficiente para cubrir las necesidades de la población. Un sistema fotovoltaico puede estar o no estar conectado a la red de distribución [15]

### 12.1 Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red

La principal característica de este tipo de sistemas es que funcionan como una fuente de energía complementaria, la cual es instalada con la finalidad de lograr una reducción en el gasto de electricidad. Este tipo de sistemas se encuentra compuesto principalmente por el conjunto de paneles fotovoltaicos y el inversor, donde el último es el encargado de convertir

la energía en corriente continua generada por los paneles a energía en corriente alterna, para poder alimentar los equipos de las viviendas. Para este tipo de sistemas es necesario que la vivienda cuente con un medidor de flujo bidireccional [15] [16]. En los últimos años se ha implementado técnicas que buscan que el arreglo de MF entregue la potencia máxima a la red de distribución [17]. En la figura 6 se muestra el esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red, en el cual se puede observar que no se requiere de un banco de baterías para almacenar la energía generada.

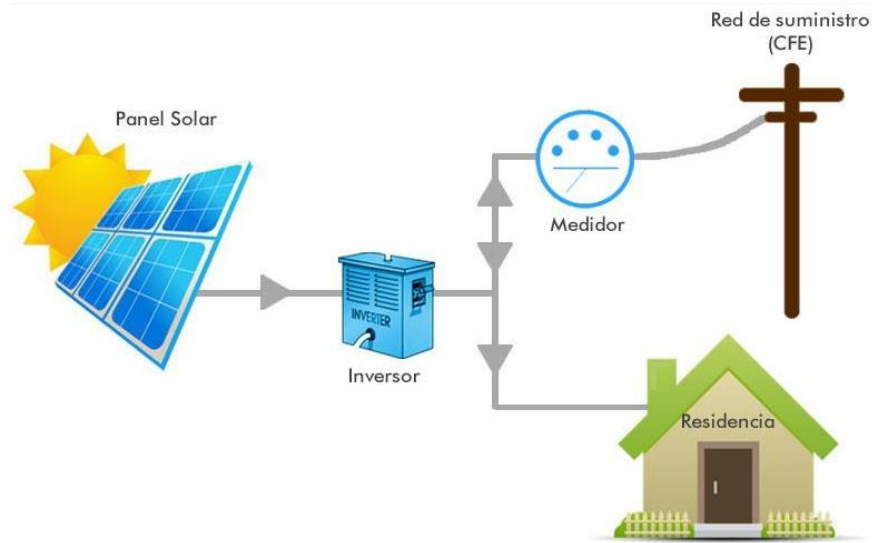


Figura 6: Sistema fotovoltaico conectado a la red [16].

## 12.2 Sistema Fotovoltaico sin Conexión a la Red Eléctrica

También llamados sistemas aislados. Este tipo de sistemas funciona como la principal fuente de energía local. Con frecuencia este tipo de sistemas son implementados en zonas rurales donde la red eléctrica es inexistente o de muy baja calidad [15]. Las principales componentes de este tipo de instalación son los siguientes:

- Paneles fotovoltaicos
- Controlador de carga

- Batería
- Inversor

En la figura 7 se puede observar que este tipo de conexión no requiere de un medidor bidireccional, sino de un banco de baterías que almacena la energía generada y la suministra cuando es requerido.

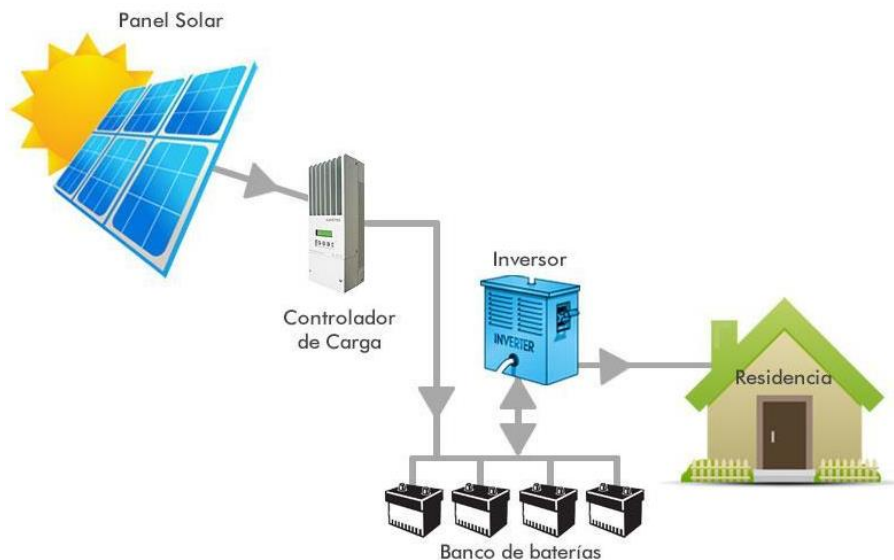


Figura 7: Sistema fotovoltaico sin conexión a la red [16].

### 13. Eficiencia de un Panel Fotovoltaico

En el caso de energía fotovoltaica, el término eficiencia hace referencia a la relación que existe entre producción de energía de la celda solar y la energía solar incidente sobre esta. La eficiencia con la que cuentan los paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino, ronda entre el 14 y 20 % en condiciones reales.

Dentro de las técnicas para determinar la eficiencia de un panel fotovoltaico, se encuentra la **eficiencia por factor de forma** y la **eficiencia en la conversión de energía**, ambas requieren el conocimiento del punto de potencia máxima, este punto corresponde al momento

en el cual el panel entrega su máxima potencia, es decir, cuando el voltaje y la corriente alcanzan sus valores máximos de forma simultánea [18].

Este valor se determina implementado la siguiente ecuación:

$$P_{mp} = (V_{mp})(I_{mp}) \quad [1]$$

Donde:

$P_{mp}$ - Punto de potencia máxima.

$V_{mp}$ - Voltaje de máxima potencia.

$I_{mp}$ - Corriente de máxima potencia.

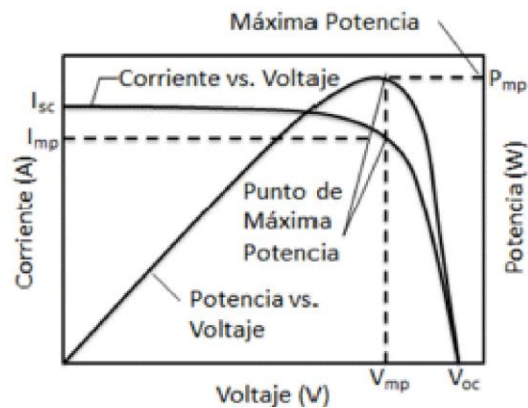


Figura 8: Curva de potencia y curva I-V [18].

Una vez obtenido el punto de máxima potencia, se procede al cálculo de la eficiencia del MF. En el caso del método de eficiencia en la conversión de energía, se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{(E)(Ac)} \quad [2]$$

Donde:

$E$  = Nivel de radiación sobre la superficie del panel ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), bajo condiciones estándar.

$A_c$  = Superficie del panel fotovoltaico ( $\text{m}^2$ ).

Para determinar la eficiencia de un MF, estos son puestos a prueba bajo condiciones estándar (Standar Test Conditions - STC). Actualmente, se especifica una temperatura de  $25^\circ\text{C}$  y una irradiación de  $1,000 \text{ W}/\text{m}^2$  (STC, 2017).

#### **14. Factores que Afectan el Rendimiento de un Panel Fotovoltaico**

La eficiencia y potencia entregada por un panel fotovoltaico son condiciones que se ven afectadas, principalmente debido a ciertos aspectos ambientales, de instalación, e incluso, a tecnologías implementadas en su fabricación [19]. Algunos de los factores que afectan principalmente el rendimiento de estos dispositivos (máxima potencia, eficiencia y factor de llenado) son la radiación solar y la temperatura.

Existe otra serie de factores que pueden afectar el rendimiento de las instalaciones fotovoltaicas (tales como, ángulo de inclinación de los módulos, velocidad del viento, suciedad y sombreado en la superficie del panel) [20]. Estos factores, al igual que los anteriores, afectan los parámetros mencionados, pero en menor medida. En el caso particular de la velocidad del viento, esta puede contribuir tanto de manera positiva como negativa en el rendimiento de los MF, puesto que contribuye a la reducción de la temperatura del MF, pero también puede llegar a generar suciedad en la superficie del panel fotovoltaico.

## **15. Seguidores como Alternativa para Aumentar el Rendimiento de Paneles Fotovoltaicos**

Para lograr mayor generación de energía eléctrica, tanto centros de investigación como empresas dedicadas a la instalación de sistemas fotovoltaicos implementa medidas de mejora. Una de ellas consiste en realizar mejoras en los procesos de fabricación de la celda solar (mediante el perfeccionamiento de los procesos de fabricación y/o la implementación de nuevos materiales). Otra alternativa, misma que es abordada en este documento, consiste en aumentar los niveles de radiación solar incidente sobre el módulo fotovoltaico [21]. Logrando unir de manera satisfactoria estas técnicas al momento de poner en marcha una instalación fotovoltaica, serán obtenidos los mejores resultados.

### **15.1 Generalidades de un Seguidor Solar**

Este tipo de dispositivos cumplen la finalidad de aumentar la radiación solar que incide sobre las celdas solares que componen un panel fotovoltaico. En la figura 9 se muestra la estructura de un seguidor solar, el cual consiste en un dispositivo mecánico automatizado que sigue la posición del sol y mantiene al MF en el ángulo que produce la mayor potencia eléctrica [22]. Cuenta con una superficie de captación, en la cual se coloca el panel, que debe permanecer perpendicular al sol durante el día [23] [24].

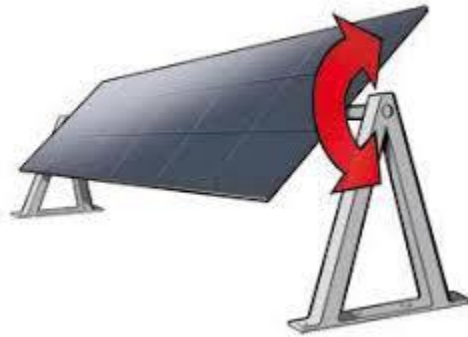


Figura 9: Seguidor solar 1 eje horizontal [24].

Los seguidores solares se componen de dos sistemas: el sistema mecánico y el sistema electrónico. Dentro de los componentes que lo integran, destacan:

- Sistema de transmisión mecánica
- Motores eléctricos.
- Sistema de almacenamiento en caso de ser sistema aislado.
- Sensores de posicionamiento.
- Algoritmo de control.
- Sensores de diversos aspectos ambientales (temperatura, suciedad, etc.).

## 15.2 Tipos de Seguidores Solares

Los seguidores solares se clasifican de acuerdo al tipo de movimiento que realizan, según el algoritmo de seguimiento y de acuerdo a los componentes que lo integran [23][25].

### 15.2.1 Según su tipo de movimiento

- **Seguidores de un eje:** Este tipo de seguidores presentan solamente un grado de libertad en su movimiento, este puede ser sobre el eje vertical u horizontal. Este tipo

de sistemas aumentan la producción de energía eléctrica aproximadamente en un 30 %.

- **Seguidor solar de dos ejes:** Poseen dos grados de libertad en su movimiento. Debido a esa característica pueden realizar un seguimiento solar completo. Es decir, pueden seguir el acimut y la altura solar, a diferencia del seguidor de 1 eje que solo puede realizar uno de los dos seguimientos. Este tipo de sistemas aumentan la producción de energía eléctrica aproximadamente en un 40 %.

#### 15.2.2 Según su algoritmo de seguimiento

- **Seguidor con programación astronómica:** A través de un lenguaje de programación, son capaces de determinar en qué punto se encuentra el sol a cada hora para posicionarse en esa dirección. Algunos de los parámetros que considera este tipo de seguidor son la altura solar, tiempo solar verdadero, declinación y el ángulo azimutal.
- **Seguidor solar por punto luminoso:** Este tipo de seguidor cuenta con sensores que le indican cuál es el punto de cielo más luminoso. Mediante la determinación de ese punto y con base en la programación, el seguidor es direccionado a tal punto.

#### 15.2.3 Según sus componentes

- **Activo:** Son aquellos que implementan motores y engranajes para posicionar al módulo fotovoltaico [26].
- **Pasivo:** Trabajan con base en el principio de expansión térmica. Este tipo de seguidores solares no cuentan con un sistema de control que automatice su operación.



### 15.3 Ventajas y Desventajas

Existen diversos factores que se deben considerar al momento de implementar seguidores solares en instalaciones fotovoltaicos. Dichos factores van desde el lugar de la instalación, el recurso solar de la zona, la inversión con la que se cuenta, entre otros [23]. Por lo tanto, resulta fundamental conocer las principales ventajas y desventajas que representan la implementación de seguidores solares. En la tabla 1 se muestra una comparación entre los seguidores solares de acuerdo a su tipo de movimiento, se puede observar que el mayor costo y mayor consumo energético puede representar una desventaja para los seguidores de dos ejes.

Tabla 1: Comparación entre seguidores solares por tipo de movimiento.

<b>Seguidor solar según su tipo de movimiento</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<i>Seguidor de 1 eje</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mínimo grado de complejidad.</li> <li>• Menor costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguimiento solar incompleto.</li> </ul>
<i>Seguidor de 2 ejes</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguimiento solar completo.</li> <li>• Mayor precisión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor costo.</li> <li>• Mayor consumo energético.</li> </ul>

Tabla 2: Comparación entre seguidores según su algoritmo de control.

<b>Seguidor solar según su algoritmo de seguimiento</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<i>Programación astronómica</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Independencia a condiciones climáticas.</li> <li>• Mayor certeza.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor dificultad de operación.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robusto.</li> </ul>	
<i>Punto luminoso</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor facilidad de operación.</li> <li>• Menor costo.</li> <li>• Menor consumo energético.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor fiabilidad.</li> <li>• Captación de menor radiación.</li> </ul>

## 16. Sistema de Control para el Seguimiento de la Trayectoria Solar

Se define como sistema de control a la interacción de elementos que forman una configuración denominada sistema, de tal manera que el arreglo resultante es capaz de controlarse por sí mismo. En los sistemas de control, la salida se debe a la interacción de la entrada con el sistema o proceso [27]. En la figura 10 se representa la estructura general de un sistema de control.



Figura 10: Estructura sistema de control [27].

La función principal de todo sistema de control consiste en seleccionar y ajustar un conjunto específico de elementos (entrada) tal que, al interconectarse, el sistema resultante se comporte de una manera específica.

En el caso de los sistemas fotovoltaicos (SFV) con seguidores solares, la función principal de un sistema de control consiste en mantener el SFV perpendicular a la luz solar a cualquier hora del día, ya sea en un sistema de lazo cerrado o abierto [28]. Esto se hace con la finalidad

de obtener la mayor cantidad de energía posible pese a cualquier condición climatológica [29].

### **16.1 Objetivo de los Sistemas de Control**

Los sistemas de control son utilizados en múltiples procesos que se llevan a cabo en distintos ámbitos, dentro de los objetivos que estos buscan alcanzar, destacan los siguientes:

[30]

- Ser sistemas estables y robustos frente a perturbaciones y errores.
- Ser capaces de mantener la estabilidad en las condiciones deseadas.
- Llevar el proceso a nuevas condiciones de operación en respuesta a cambios del valor deseado.
- Ser eficiente de acuerdo a un criterio preestablecido.
- Automatizar procesos.

### **17. Técnicas Implementadas en los Sistemas de Control en Seguidores Solares**

El seguimiento del punto de máxima potencia, MPPT por sus siglas en inglés, es un método que ha sido desarrollado e implementado para lograr incrementar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos con respecto a los sistemas fijos [31]. La figura 11 muestra el avance que ha tenido esta técnica en el lapso 1968-2005.

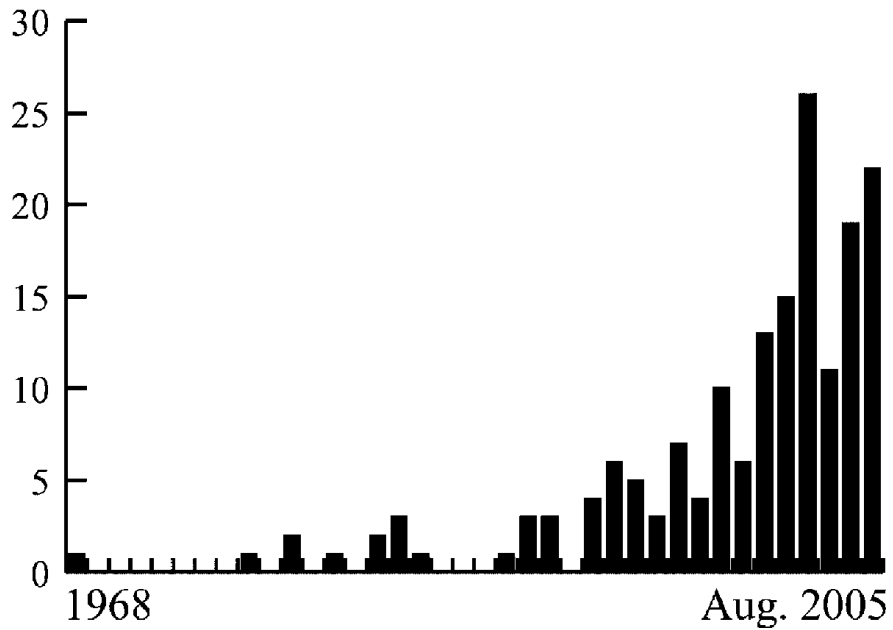


Figura 11: Número de artículos sobre técnicas MPPT publicados por año [31].

Existen diversas técnicas para el desarrollo de este método. Las cuales presentan diferencias entre ellas, que van desde el grado de complejidad, la cantidad de sensores a implementar, el costo y el grado de eficiencia. Dentro de estas técnicas, destaca la lógica difusa, la cual ha sido implementada en los últimos años, mostrando resultados favorables. En la figura 12 se muestran algunas de las técnicas que se realizan para implementar este método [31] [32].

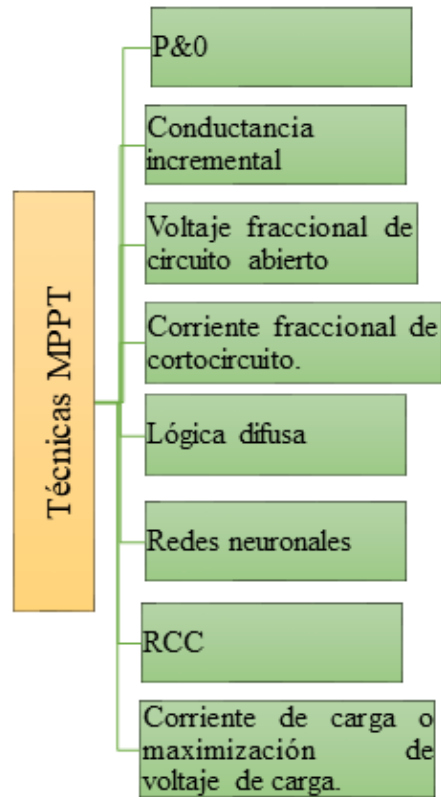


Figura 12: Técnicas MPPT para seguidores solares [32].

Existen diversos aspectos que deben ser considerados al momento de determinar la técnica que se desea implementar en el algoritmo de control. Dentro de los principales aspectos destaca el recurso solar de la zona [33] [34]. Las principales técnicas que se implementan en los algoritmos, son el método de Perturbación y Observación (P&O), Redes Neuronales y Lógica Difusa. Esta última posee las siguientes características:

### 17.1 Lógica Difusa

Este tipo de sistema de control es una teoría de conjuntos, donde cada una de las variables lingüísticas tiene un número infinito de grados de pertenencia, cuyos valores se encuentran entre 0 y 1. Dentro de las ventajas de este tipo de control se encuentra la posibilidad de trabajar con situaciones ambiguas, complejas o con cierto grado de dificultad para modelar

matemáticamente [32]. Las etapas que integran la lógica difusa (LD) se pueden observar en la figura 13:

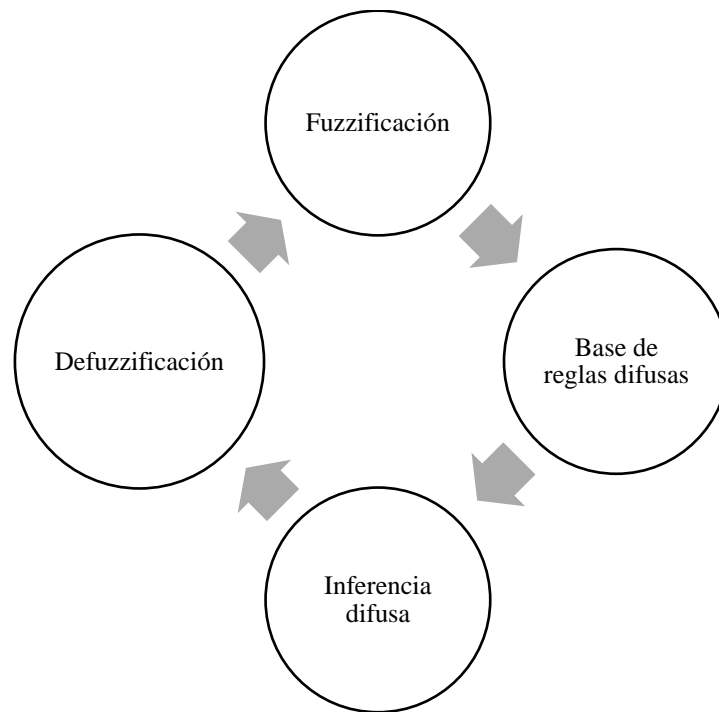


Figura 13: Etapas de la Lógica Difusa [33].

#### 17.1.1 Fuzzificación

Consiste en convertir los valores numéricos de las variables lingüísticas de entrada en términos de grados de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que integran al sistema.

#### 17.1.2 Base de reglas difusas

Se refiere al conjunto de reglas (las cuales combinan uno o varios conjuntos difusos de entrada) del sistema que permiten establecer una relación del tipo SI (if)... ENTONCES (then)... entre cada una de las variables del sistema.

### 17.1.3 Inferencia difusa

En esta etapa de todo sistema de control mediante lógica difusa, se lleva a cabo la determinación de la salida o acción que será realizada, ya sea mediante nuestros actuadores. En esta parte del proceso, la acción aún se encuentra como un dato difuso.

### 17.1.4 Defuzzificación

Esta es la etapa encargada de convertir el valor difuso de salida del sistema a un término que significa una acción real para el sistema en el cual se está implementando la LD.

Estas 4 etapas pueden ser implementadas en cualquiera de los dos métodos que componen la LD, los cuales son el método Mamdani y Sugeno. Este último presenta tres ventajas sobre el Mamdani, las cuales se mencionan a continuación [34]:

- Computacionalmente eficiente.
- Ideal para optimización y técnicas de adaptación.
- Conveniente para análisis matemático.

### III ANTECEDENTES

#### 1. Propuestas Existentes para Superficies Terrestres

Existen diversas técnicas de seguimiento que se implementan en los seguidores solares, todas tienen un objetivo en común, sin embargo, difieren un tanto en las condiciones en las cuales serán implementadas

Actualmente, han sido desarrolladas diversas investigaciones sobre sistemas de seguimiento de la trayectoria solar, destacando los siguientes hallazgos y/o sistemas implementados.

En [35] se realiza una evaluación energética para un sistema de dos ejes por programación astronómica, con un sistema de control en lazo abierto. Dicho experimento fue realizado en Malasia donde se implementó un MF de 38 W, los demás parámetros (tales como, corriente máxima, voltaje máximo, etc.) se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Características de módulo implementado.

Potencia máxima	38 W
Corriente máxima	2.29 A
Voltaje máximo	16.60 V
Corriente corto circuito	2.59 A
Voltaje circuito abierto	22.20 V

El experimento determinó un consumo energético del 5.89 % del total de energía generada por el sistema. Respecto a la generación de potencia, los resultados obtenidos muestran una mayor generación por parte del seguidor solar durante días soleados. En la tabla 4 se puede



observar que los sistemas se evaluaron bajo distintas condiciones (días soleados, nublados y lluviosos) generando mayor potencia el sistema móvil en cada una de las condiciones atmosféricas. Cabe destacar que el consumo energético para el seguimiento de la trayectoria solar fue el mismo en cada condición de operación.

Tabla 4: Energía generada.

Condición atmosférica	Energía Generada (Wh)	
	Sistema Fijo	Sistema Móvil
Soleado	61.49	147.90
Nublado	27.83	70.18
Lluvioso	10.80	15.89

En días soleados, la mayor diferencia en los niveles de generación de energía se observa en el lapso 08:00 AM – 13:00 PM. Por su parte, en días nublados esta diferencia se observa de 08:30 AM – 11:30 AM.

En [36] se realizó la comparación entre diversas técnicas de seguimiento de trayectoria solar haciendo uso de PSIM y Simulink. Para el desarrollo de esta simulación se implementó un convertidor Boost DC/DC con las siguientes características:

- Frecuencia: 30 KHz
- Inductancia: 1 mH
- Capacitor: 47  $\mu$ F
- Batería: 24 V

Y un panel fotovoltaico cuyos parámetros se muestran en la tabla 5:

Tabla 5: Parámetro de panel fotovoltaico.

Potencia	60 W
Corriente máxima potencia	3.5 A
Voltaje máxima potencia	17.1 V
Corriente corto circuito	3.8 A
Voltaje circuito abierto	21.1 V

Los resultados indican que la técnica con mejor respuesta a variaciones repentinas del recurso solar es la técnica de lógica difusa, seguida de la técnica de perturbación y observación (P&O).

En [37] es llevada a cabo una comparación entre los niveles de energía generada y consumo energético por un sistema móvil de dos ejes con respecto a un sistema fijo. La experimentación se llevó a cabo en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, en el municipio de Texcoco, Estado de México. Los índices de radiación solar promedio en la región son de 5.5 KWh/m<sup>2</sup>/día. Las propiedades de los MF implementados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Propiedades del módulo empleado.

Potencia	45 W
Corriente máxima potencia	2.5 A
Voltaje máxima potencia	18.0 V
Corriente en corto circuito	2.73 A
Voltaje en circuito abierto	22.3 V

Peso	5.0 Kg
------	--------

La experimentación consistió en orientar el sistema móvil en distintos periodos (cada 60, 30 y 5 min). Los resultados muestran que el sistema presenta mejores resultados cuando su cambio de posición es cada 60 min. Generando 27.98 % más energía que el sistema fijo con un consumo energético para su funcionamiento del 1.3 % de la ganancia final de energía.

En [38] se indica que una de las alternativas para tener una reducción en los niveles de consumo de energía en los sistemas de seguimiento de la trayectoria solar es la implementación de motores paso a paso, puesto que este tipo de motores trabajando en conjunto con dispositivos de reloj en tiempo real, pueden realizar cambios en la posición del sistema en intervalos de tiempo, reduciendo el consumo energético que representa el seguimiento continuo de los sistemas de seguimiento convencionales. En este trabajo, realizado en India, se utiliza un motor a pasos modelo 17PM4054 (ángulo de paso de  $1.8^\circ$ ) para cambiar de posición al MF  $7.2^\circ$  cada 30 minutos. Para el sistema móvil, la corriente máxima alcanzada por el panel implementado (peso de 500 gr y voltaje máximo de 12v) fue de 39.10 mA a la 13:00 PM. Por otra parte, un módulo fijo, de las mismas propiedades, alcanzó una corriente máxima de 35.50 mA a las 11:00 AM. En la fig. 14 se observa la curva de potencia del sistema fijo y el sistema móvil en el lapso 06:00 AM – 18:00 PM. Durante el lapso de operación el SFV fijo presentó un voltaje promedio de 8.96 V con una desviación estándar de 0.81 V. Por su parte, el SFV móvil alcanzó un voltaje promedio de 9.81 V con una desviación estándar de 0.39 V.

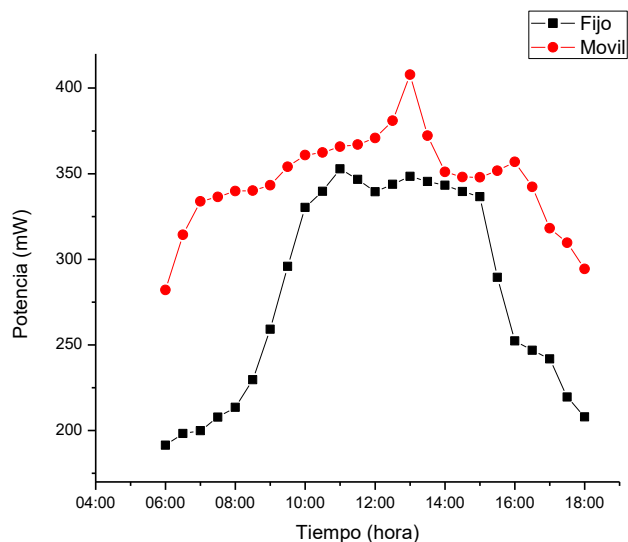


Figura 14: Comparación potencia generada por sistema fijo y sistema móvil [38].

En [39] se implementa una caracterización experimental de un módulo fotovoltaico bajo la radiación solar incidente en Mazatlán, Sinaloa, cuyas características se observan en la tabla 7. Las pruebas se desarrollan bajo diferentes niveles de radiación, sombreado y ángulos de inclinación. Los resultados obtenidos durante el mes de mayo de 2017 demuestran que con un ángulo de inclinación de  $16^\circ$  y orientación ENE se alcanzan los niveles más altos de radiación incidente (medido con un piranómetro) y de corriente. Se demuestra que la corriente máxima disminuye en promedio 0.54 A por cada  $10^\circ$  que se aumentan en la inclinación del módulo. Dichos ángulos se muestran en la tabla 8:

Tabla 7: Características de MF utilizado.

Potencia	250 W
Voltaje máxima potencia	31.45 V
Corriente máxima potencia	7.98 A
Voltaje circuito abierto	37.9 V

Corriente corto circuito	8.65 A
Número de celdas	60

Tabla 8: Orientaciones.

<b>Orientación</b>	<b>Inclinación</b>	<b>Corriente (A)</b>
ENE	16°	7.92
Sur	0°	7.06
Sur	10°	6.71
Sur	20°	6.41
Sur	25°	6.23
Sur	30°	6.0
Sur	40°	5.52
Sur	50°	4.78
Sur	60°	3.80

En [22] se desarrolla una investigación donde se resumen los principios y mecanismos de los SFV con seguimiento de la trayectoria solar para la determinación de la mejor orientación del MF. En la tabla 9 se observa que la principal desventaja de los sistemas activos de seguimiento solar, mismos que implementan diversas técnicas y/o tecnologías (tales como, lógica difusa, redes neuronales y lazo cerrado) radica en que la mayoría se queda únicamente en simulación, o en su caso, las pruebas se realizan durante periodos cortos.

Tabla 9: Comparación entre distintos sistemas de seguidores solares activos.

<b>Tecnología</b>	<b>Características</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
LDR + Matlab. 2013.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de servomotores</li> <li>• Sistema de 2 ejes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento de un 30-40 % de potencia de salida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementan únicamente 3 días.</li> </ul>
Microcontrolador PIC. 2014.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de 1 eje.</li> <li>• uso de motor DC.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Económico</li> <li>• Mejora del 28%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No disponible en malas condiciones climáticas.</li> <li>• Alto consumo energético (11 W)</li> </ul>
LDR + Arduino 2009.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comparado con seguidor de un eje.</li> <li>• Seguidor solar de dos ejes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor consumo de energía.</li> <li>• Ganancia del 40 %.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementado en prototipo</li> </ul>
Fuzzy Logic controller 2016.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema inteligente</li> <li>• Simulación en Matlab.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce el tiempo en cambio de posición.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesita base de datos para posicionarse a lo largo del día.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de dos ejes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento de 36 % de potencia.</li> </ul>	
Redes neuronales 2017.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema inteligente</li> <li>• Predice la radiación solar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto porcentaje de acierto.</li> <li>• Reduce pérdidas de consumo energético.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliza base de datos.</li> <li>• Extenso tiempo de procesamiento.</li> </ul>
Redes neuronales/Lógica difusa 2015.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema inteligente</li> <li>• Utilización de convertidor DC-DC buck-boost.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectivo para generación de energía</li> <li>• Elimina la limitación de sombras parciales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complejo.</li> <li>• Demasiados cálculos y procesos.</li> </ul>
Lazo cerrado 2014.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de dos ejes.</li> <li>• Comparado con otros modelo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barato.</li> <li>• Incremento de eficiencia entre 15-20%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende totalmente de LDR's.</li> </ul>

En [32] se propone un modelado de una instalación fotovoltaica de 12 MF con una capacidad total de 3 kW en Matlab® implementando distintas técnicas de MPPT (lógica difusa, conductancia incremental y P&O). Los parámetros de los MF considerando una temperatura de 25°C y una irradiación de 1000 W/m<sup>2</sup> se muestran en la tabla 10.

Tabla 10: Parámetros del MF implementado.

Potencia	250 W
Corriente corto circuito	8.61 A
Voltaje circuito abierto	37.41 V
Resistencia en serie	0.22 Ohm
Resistencia en paralelo	415 Ohm
Número de celdas en serie	60
Factor de diodo ideal	1.3

Los resultados obtenidos muestran que la lógica difusa requiere menor tiempo para alcanzar el punto de máxima potencia (MPP) y a su vez, representa mayor generación de potencia. Los resultados se obtienen mediante variaciones de irradiación incidente (1000 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 400 W/m<sup>2</sup>, 200 W/m<sup>2</sup> y 100 W/m<sup>2</sup>) con una duración de 100 ms y una temperatura constante de 25°C. En la tabla 11, se observan los valores de máxima potencia, voltaje máximo, corriente máxima y tiempo de seguimiento alcanzados por cada una de las MPPT implementadas.

Tabla 11: Resultados de simulación para SFV de 3000 W.

Parámetro	P&O	Cond. Incremental	Lógica Difusa
Potencia máxima	2886.95 W	2886.95 W	2887.55 W



Voltaje de máxima potencia	181 V	181 V	181.06 V
Corriente de máxima potencia	15.95 A	15.95 A	15.948 A
Tiempo de seguimiento	98 ms	98 ms	8 ms

Dentro de los principales avances y desafíos en el desarrollo de sistemas de seguimiento solar presentes al año 2018, destacan [40]:

- El promedio de energía consumida por los sistemas de seguimiento solar oscila entre el 2 y 5 % del total de la energía generada. En zonas con altos niveles de radiación solar promedio, la ganancia anual de energía mediante seguidores solares de 2 ejes oscila entre el 30 y 40%.
- El desarrollo de un seguidor solar de un eje mediante un PLC presentó un incremento del 20 % en la energía diaria generada con respecto a un sistema fijo.
- Existe un experimento desarrollado en Matlab® que consiste en un seguidor solar inteligente capaz de cambiar de modo de operación (1 eje, 2 ejes o fijo) según la zona donde sea implementado.
- En promedio, los seguidores solares activos (1 eje y 2 ejes) logran incrementar la eficiencia en un 29.37 % aproximadamente utilizando microcontroladores o PLC para su control. Sin embargo, se pueden alcanzar valores superiores al 30 % si el sistema se optimiza.

A pesar de que los seguidores solares de 2 ejes presentan mayor generación de energía, su implementación se encuentra justificada únicamente si esa mayor generación se compensa con el costo del equipo, energía consumida por el sistema y costos de puesta en marcha [41].

En [42] se realiza una comparación entre la eficiencia alcanzada por un sistema con seguimiento solar de dos ejes con respecto a un sistema fijo. Para la realización de las pruebas se implementaron dos MF (65 W) durante 29 días (14 feb- 15 mar 2017) en el estado de Jalisco. Para determinar el punto con mayor incidencia de radiación solar y lograr un seguimiento adecuado, se utilizaron cuatro celdas solares (6 V, 110 mA, 0.6 W). Para la medición de los parámetros de voltaje (V) y corriente (A) se diseñó un sistema de adquisición de datos con una tarjeta de Arduino Nano 3.0, un RTC DS3231 y dos sensores de corriente ACS712.

Los resultados de esta experimentación, demuestran que la eficiencia promedio durante los 29 días de prueba alcanzada por el seguidor solar fue de 33 %. Resultando ser aproximadamente 7 % más eficiente que el sistema fijo.

En [43] se muestra la comparación de la eficiencia alcanzada por un seguidor solar de dos ejes con respecto a un seguidor de un eje. Se utilizaron dos MF de las mismas características (10 W, corriente de máxima potencia 0.59 A, voltaje máxima potencia 17 V, peso de 1.2 kg). Para determinar el sentido de giro del motor DC implementado (10 RPM, torque 5kg-cm) se compararon los voltajes de los sensores (LDR's).

La experimentación se realizó durante un día soleado de 07:00 AM- 01:00 PM en Kalyan, Maharashtra, India. Los resultados determinan que el seguidor de dos ejes es 25 % más

eficiente que el de un eje. El lapso en el cual se observa la mayor diferencia de potencia generada es de 08:00 AM - 10:00 AM.

En [44] se reporta una comparación entre la eficiencia alcanzada por un sistema fijo, seguidor de un eje y un seguidor de dos ejes en Malasia. Los experimentos fueron llevados a cabo los días 22, 24, 27 y 30 de abril de 2018 en un lapso de 07:00 AM – 07:00 PM. La plataforma de Arduino ® fue utilizada para realizar el sistema de control. La experimentación consistió en realizar una comparación entre los niveles de voltaje de cada uno de los sensores de intensidad de la luz (LDR's) colocados en el sistema fijo y en los seguidores solares. Los resultados demuestran que el seguidor solar de dos ejes representa un incremento de 5.74 % en la captación de recurso solar con respecto al seguidor de un eje, y un 10.34 % con respecto al SFV fijo.

La diferencia de la experimentación entre [44] y lo propuesto mediante el tema de tesis “control y evaluación de un seguidor solar de un eje” se encuentra en la referencia para evaluar los SFV, puesto que la propuesta desarrollada en este documento realiza la comparación a partir de la potencia generada por el MF del sistema móvil con respecto al del sistema fijo.

En [45] se realiza la simulación de un seguidor solar de dos ejes en lazo cerrado, en Indonesia, utilizando Matlab®-Simulink. Para la determinación del punto de mayor incidencia de radiación solar no se implementa ningún tipo de sensor. En este trabajo se propone integrar un seguidor solar por programación astronómica y un control de lógica difusa con respecto a la salida del MPPT para determinar el ángulo en el que se debe orientar el MF. La simulación arroja un incremento en la eficiencia del MF móvil de 23.23 % con

respecto a un sistema fijo. Los resultados de esta simulación mejoran en un 0.25 % la eficiencia alcanzada por los seguidores solares integrados reportados en la literatura.

En [46] se implementa un sistema de control electrónico en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México para evaluar la generación adicional de energía de un seguidor solar de un eje con respecto a un SFV fijo. Para la experimentación se implementan 2 MF de 10 W de potencia, dos LDR's como herramienta que identifica el punto con mayor incidencia de radiación solar, un motor a pasos bipolar modelo ST35ST28-0534 (torque: 0.0980 N·m), microcontrolador (PIC16F887) y una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009. Los resultados muestran un incremento del 13% en la potencia eléctrica generada por el SFV móvil.

## **2. Aplicaciones de Sistemas de Seguimiento Solar para Sistemas Dinámicos**

El desarrollo de sistemas de control para el seguimiento de la trayectoria solar se encuentra en vías de desarrollo en el sector marítimo [47].

El incremento de energía generada por los MF utilizados en las instalaciones, se puede lograr mejorando la eficiencia de las celdas solares y/o realizando un seguimiento de la trayectoria solar. En el caso de los sistemas marítimos, hasta el momento resulta más conveniente realizar mejoras en la eficiencia de las celdas que son implementadas. Esto se debe principalmente a que la realización del seguimiento de la trayectoria mientras se navega se vuelve difícil y cuenta con poca área disponible para una instalación fotovoltaica, lo que genera un alto consumo de energía por parte de los dispositivos que se encargan de cambiar de posición al módulo implementado. Las técnicas de seguimiento serían convenientes en los puertos de anclaje [48].

#### **IV PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA O JUSTIFICACIÓN**

Hoy en día, la energía juega un papel de suma importancia en el desarrollo de una sociedad. Por lo tanto, resulta de vital importancia buscar técnicas de generación que contribuyan al desarrollo sostenible. Por ejemplo, la implementación de sistemas de control mediante lógica difusa, con lo cual se obtiene un buen aprovechamiento del recurso solar a pesar de su variación inherente. Por tal motivo, el estudio de parámetros como el tiempo de sensado en conjunto con un control difuso en el proceso de generación de energía fotovoltaica mediante la implementación de seguidores solares, resulta muy útil puesto que permite que el proceso sea mejor en condiciones donde el recurso solar presenta variaciones durante el transcurso del día; con lo cual se logra generar la mayor cantidad de energía posible asegurando tener el menor consumo de energía por parte del sistema de posicionamiento.

## **V HIPÓTESIS**

La implementación de un sistema de control en un conjunto de dispositivos enfocados al seguimiento solar de un panel contribuye a la mejora en la energía generada y a un mejor aprovechamiento del recurso solar. La implantación de los algoritmos de control mediante lógica difusa contribuye a compensar las incertidumbres inherentes a la variabilidad del propio recurso.

## **VI OBJETIVOS**

### **1. Objetivo General**

- Implementar un sistema de control que permita que el aprovechamiento de recurso solar con el panel fotovoltaico sea máximo con el menor consumo de energía.

### **2. Objetivos Específicos**

- Identificar el punto con mayor radiación solar incidente.
- Determinar el tiempo de sensado adecuado.
- Obtener las curvas características de los paneles fotovoltaicos.
- Evaluar y comparar la potencia eléctrica del panel fotovoltaico fijo con la obtenida por el panel fotovoltaico con el seguidor solar de un eje.
- Llevar a cabo una bitácora electrónica del aprovechamiento del recurso solar con la implementación del sistema de control.
- Implementar el sistema de control embebido mediante el acoplamiento de sus diversos componentes para seguimiento solar.
- Evaluar la eficiencia energética de sistema.

## CAPÍTULO II

### VII MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de la parte experimental que comprende hasta la etapa de pruebas parciales, se realiza en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) bajo la dirección del Dr. Marcos Ángel González Olvera. La parte que corresponde a pruebas finales y evaluación energética se desarrolla en la Universidad Politécnica de Sinaloa (UPSIN). Por lo tanto, los datos de radiación que fueron utilizados para las técnicas de filtrado corresponden a los niveles de radiación de la UACM ( $19^{\circ}18'40.5''N$   $99^{\circ}03'36.0''W$ ) y de la UPSIN ( $23^{\circ}15'54.4''N$   $106^{\circ}22'35.0''W$ ). A su vez, las gráficas que se muestran como resultados parciales corresponden a datos adquiridos en el Laboratorio de Control e Instrumentación de la UACM. En la figura 15 se puede observar la metodología general del proyecto de investigación, la cual parte de una valoración del recurso solar presente en las instituciones académicas anteriormente mencionadas, posteriormente la unificación del sistema de control difuso en Matlab® y el sistema de adquisición y procesamiento de datos de Arduino. Una vez diseñados e impresos los prototipos y realizado el acoplamiento de los componentes (tales como, sensor de voltaje, sensor de corriente, tarjeta SD, RTC, entre otros) se procede a la realización de las pruebas parciales implementando los MF cuyas características se observan en la figura 17. Para la realización de la evaluación energética del prototipo final [49], [50], [51], desarrollada en Mazatlán, Sinaloa, se implementan los MF correspondientes a la etapa de pruebas finales, cuyas características se encuentran en la tabla 13.

El desarrollo de la metodología propuesta, permite llevar a cabo un análisis del aprovechamiento del recurso solar presente en una zona de estudio, en este caso, UACM y UPSIN. Partiendo de la obtención de los niveles de radiación solar en la zona de estudio y



culminando en una evaluación energética de un sistema fotovoltaico. Las etapas que se encuentran entre los puntos anteriormente mencionados, hacen posible el desarrollo e implementación de un sistema de control apto para responder adecuadamente a la variación propia del recurso solar, llevando a cabo un registro electrónico cuya finalidad es facilitar el manejo e interpretación de los datos generados por los MF implementados en el sistema.

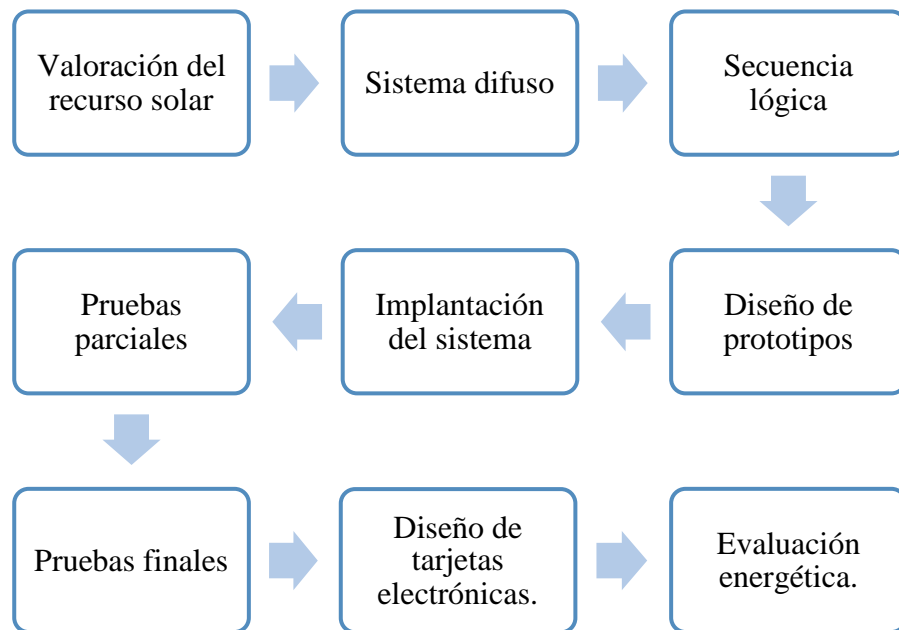


Figura 15: Metodología.

En la figura 16 se muestran los componentes que integran el SFV fijo y móvil de este proyecto de investigación. Se puede asumir que el sistema fijo no requiere de la implementación de un control de posicionamiento (sistema de control, sensor de luminosidad, actuador, sistema de transmisión y microcontrolador). Sin embargo, al igual que el seguidor solar, requiere de sensores de voltaje y corriente para la generación de la bitácora electrónica (BE) para registrar aprovechamiento del recurso solar.

El microcontrolador (Arduino) en conjunto con la tarjeta SD y los sensores de voltaje y corriente, llevan a cabo la BE, misma que facilita la interpretación y análisis de datos correspondientes a ambos MF. Para dicha bitácora se implementa una tarjeta SD y 4 sensores (2 de voltaje y 2 de corriente).

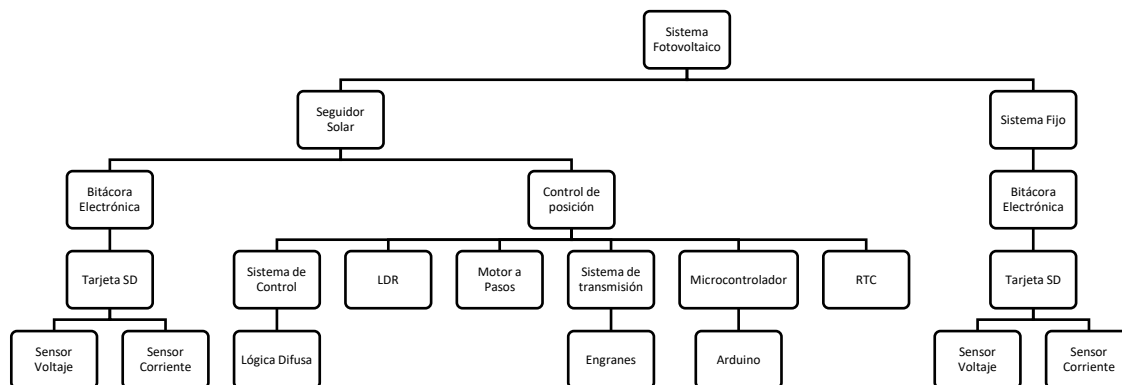


Figura 16: Esquema de relación entre componentes de sistema móvil y fijo

## 1. Sistema de Generación de Energía Fotovoltaica

Para el desarrollo de las pruebas llevadas a cabo a lo largo del proyecto en la etapa de pruebas parciales, fue necesaria la implementación de dos módulos con las mismas características, esto con la finalidad de que la evaluación entre el sistema móvil y fijo sea lo más confiable posible. Fueron adquiridos dos MF (voltaje 6V, potencia 1W, corriente 0-200 mA), mismos que fueron analizados en un simulador solar certificado Oriel-Newport clase 3A del Laboratorio de Ciencias y Tecnología Sustentable “LACYTES” de la UACM bajo la dirección del Dr. Rogelio Mendoza Pérez. Dicho simulador nos arrojó las siguientes curvas características bajo STC. Como se puede observar en la figura 17, los módulos presentan una similitud entre los parámetros de  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  y  $\eta$ . Además de presentar una diferencia inferior al

5% en su área bajo la curva; por lo tanto, sus características son aceptables para establecer una comparación entre ellos.

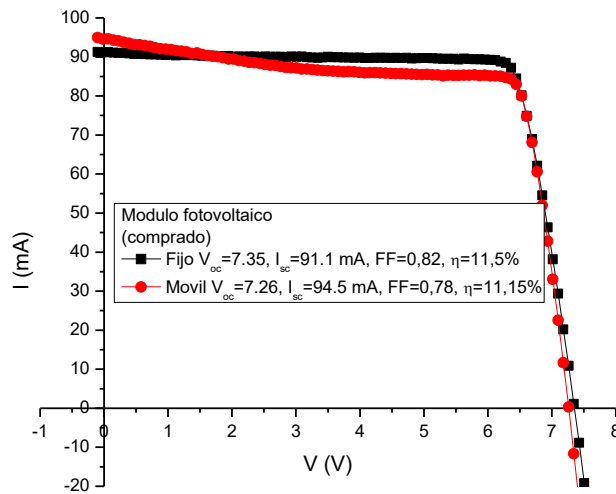


Figura 17: Curvas I-V módulos implementados.

## 2. Valoración del Recurso Solar

Para la realización de un sistema de control de seguimiento de la trayectoria solar, es un elemento central conocer los niveles de radiación incidentes sobre la zona de estudio. En el lapso jun-2019 may-2020, observando las condiciones de recurso solar presente en la UACM y UPSIN, podemos asumir ambas instituciones académicas cuentan con altos niveles de recurso solar. En la tabla 12 se muestran los valores de irradiación solar promedio mensual (ISPM) con datos tomados de “Power Data Access Viewer, 2019”, donde se puede observar que los meses en los que se presenta el promedio más alto de recurso solar es marzo y mayo, cuyos valores se representan en color negro en negritas; mientras que aquellos que presentan el promedio más bajo son octubre y noviembre, cuyos valores se pueden observar en color rojo en negritas.

Tabla 12: ISPM UACM y UPSIN (KWh/m<sup>2</sup>)

Mes	Año	ISPM UACM	ISPM UPSIN
Junio	2019	5.28	7.36
Julio	2019	5.26	6.40
Agosto	2019	5.96	5.82
Septiembre	2019	5.03	5.46
Octubre	2019	<b>4.63</b>	5.26
Noviembre	2019	4.68	<b>4.13</b>
Diciembre	2019	4.71	4.27
Enero	2020	4.64	4.17
Febrero	2020	5.62	5.18
Marzo	2020	<b>6.46</b>	5.97
Abril	2020	6.37	7.36
Mayo	2020	6.09	<b>7.55</b>

### 3. Sistema de Control Difuso

El sistema de control difuso que se muestra en la figura 18 fue desarrollado en Matlab ®, dando como resultado un sistema de control con 2 variables de entrada, definidas en este trabajo como LDR1 y LDR2, las cuales son dependientes del recurso solar, un sistema de reglas difusas con base en el método Takagi-Sugeno y una salida del sistema, la cual indicaría el posicionamiento deseado del sistema fotovoltaico móvil [33].

La figura 19 muestra el esquema general del sistema de control en lazo cerrado. Las variables de entrada al sistema de control difuso son los voltajes de los sensores de

luminosidad LDR1 y LDR2 (Variables lingüísticas) del sistema de control, mismos que se encuentran en el MF móvil con la finalidad de realizar un seguimiento de la trayectoria solar. El universo de discurso (valor análogo de sensor de luminosidad) se segmenta mediante un grupo de conjuntos difusos, en este caso, implementando la función de pertenencia tipo triangular. Una vez que se determina el grado de pertenencia (a cada conjunto difuso) del valor sensado de cada LDR, el sistema, mediante el conjunto de reglas difusas, determina la posición adecuada para obtener la mayor generación de energía [34].

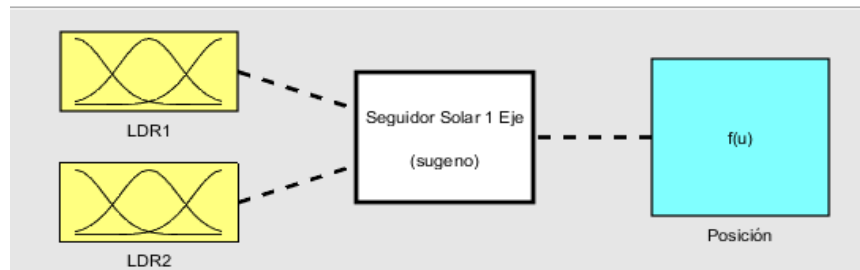


Figura 18: Modelo de sistema de control difuso.

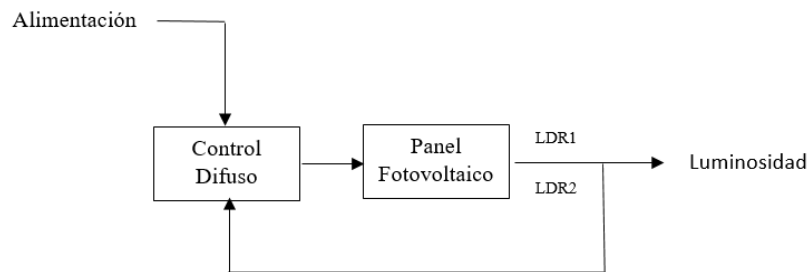


Figura 19: Esquema general de control.

El sistema de control difuso implementado se compone de diversos conjuntos difusos (los cuales segmentan los valores sensados de los sensores luminosos), cada uno de ellos implementa la función de pertenencia tipo triangular, la cual se representa en la figura 20. El conjunto de fórmulas para determinar el grado de pertenencia implementando dicha función se muestran en lo que se denomina ecuación 3, la cual se muestra a continuación:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{para } a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{para } m < x \leq b \\ 0 & \text{para } x > b \end{cases} \quad [3]$$

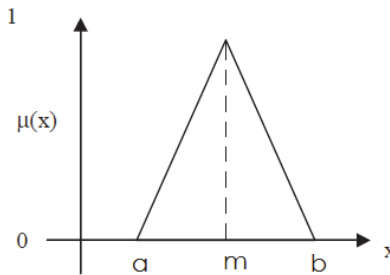


Figura 20: Función de pertenencia triangular.

#### 4. Secuencia Lógica

Esta etapa es de vital importancia para el desarrollo del proyecto, pues consiste en el código de programación desarrollado en Arduino capaz de determinar la posición que permite la mayor generación de potencia eléctrica. Para poder determinar la orientación que proporciona mayor potencia, se unifica el código generado en Matlab® y Arduino. Parte importante del código hecho en Arduino es la adquisición de los parámetros de voltaje y corriente de cada MF. En la figura 21 se muestran las líneas que permiten la adquisición del parámetro correspondiente al voltaje.

```

//LECTURA DE VOLTAJE 1
String dataString = "";
float voltaje1=analogRead(A3)*25.0/1023.0;
Serial.print("voltaje: ");
Serial.print(voltaje1,2);
Serial.print("\t");
dataString += String(voltaje1);
dataString+="\t";

```

Figura 21. Adquisición parámetro voltaje.

Una vez que se unifican los códigos, los sensores luminosos (LDR) permiten determinar en qué punto incide mayor radiación solar. Partiendo de esto, el sistema lleva a cabo una comparación entre los voltajes de cada LDR (mayor voltaje=mayor radiación incidente), y en caso de tener una diferencia considerable, gira en el sentido necesario para igualar dichos valores. En la figura 22 se puede observar el razonamiento lógico para determinar si es necesario un cambio de orientación en el MF implementado en el sistema móvil [49] [50] [51] [52].

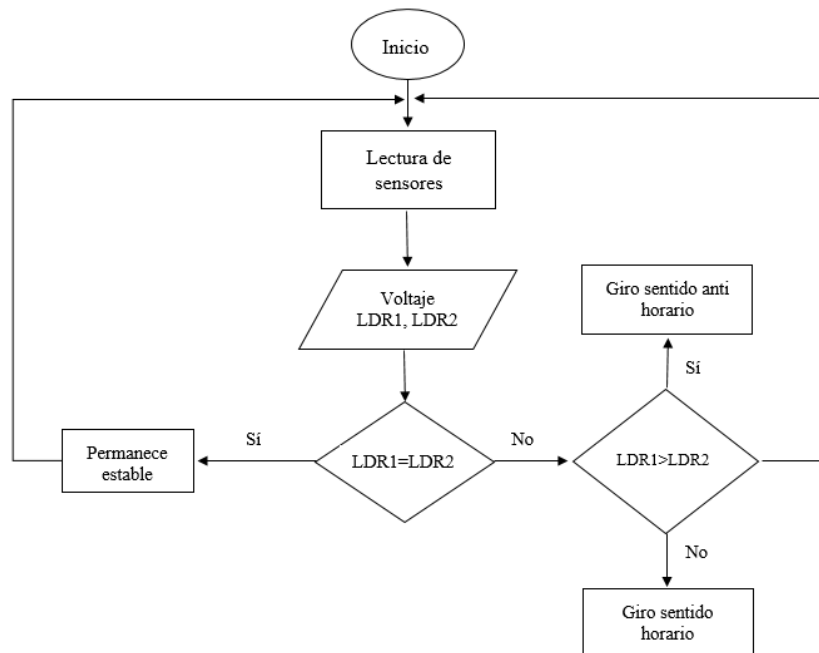


Figura 22: Diagrama de flujo de secuencia lógica.

## 5. Diseño de prototipos

### 5.1 Prototipos Pruebas Parciales

Se diseñan dos estructuras con el mismo ángulo de inclinación con la finalidad de realizar una comparación entre la potencia generada por MF de características similares. Se implementa el software Solid Edge 2020 para el diseño de dos prototipos, uno correspondiente a un SFV fijo y otro para un SFV móvil, este último fue diseñado e impreso en dos ocasiones ( $20^\circ$  y  $23^\circ$  de inclinación), puesto que el ángulo óptimo de inclinación debe coincidir con la latitud del lugar (UACM y UPSIN) para alcanzar una mayor captación del recurso [53]. Para la impresión, se utilizó una impresora 3D de la marca MakerMex, modelo MM1. En la impresión de ambos prototipos se utilizó el software Ultimaker Cura 4.3.0.

Para realizar un cambio de posición en el SFV móvil, se implementa un motor a pasos bipolar modelo 28byj-48 (voltaje de operación 5v, razón de reducción 1/64, ángulo por paso 0.008789 y par nominal de 0.03 N·m)

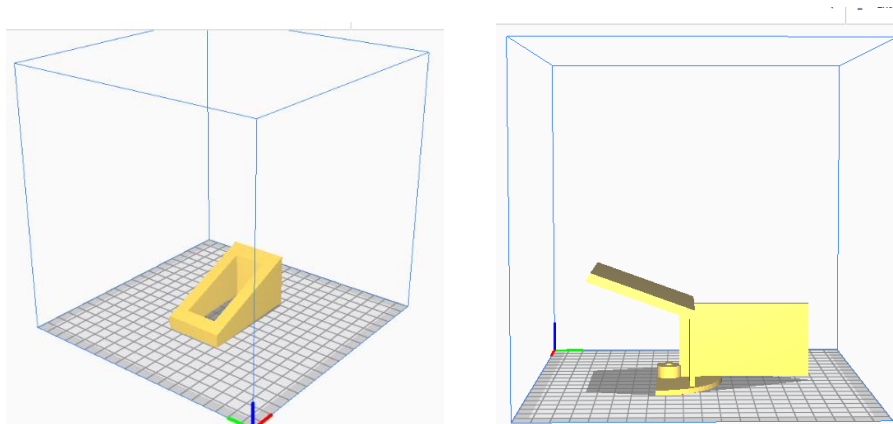


Figura 23: Sistema Fijo y Móvil, respectivamente para pruebas parciales.

### 5.2 Prototipos Pruebas Finales y Evaluación Energética

Al igual que en la realización de las pruebas preliminares, se utilizan dos estructuras (una para el sistema fijo y una para el sistema móvil), las cuales se muestran en la figura 24, con



un ángulo de inclinación correspondiente a la latitud de la zona de estudio ( $23^\circ$ ). Para la realización de estas pruebas experimentales fueron implementados dos módulos cuyas características se muestran en la tabla 13.

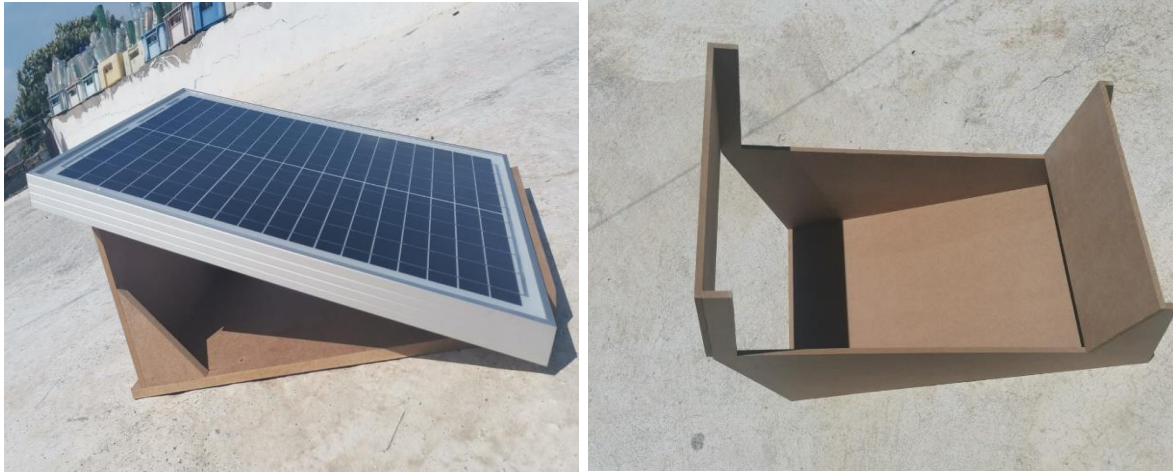


Figura 24: Estructura panel fijo y móvil para evaluación energética.

Puesto que el torque mínimo necesario para mover el MF implementado es de  $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$  y el torque proporcionado por el motor a pasos implementado (28byj-48) es de  $0.03 \text{ N}\cdot\text{m}$ , se diseñó un sistema de transmisión mecánica mediante engranes con una relación resultante de 1:11. Dicha transmisión se muestra en la figura 25 y está compuesta por 4 engranes (dos de 40 dientes y dos de 12 dientes). La razón por la cual no se implementan únicamente 2 engranes, se debe a que para alcanzar la relación que haga posible mover al MF sería necesario un engrane con un diámetro mayor al del área de trabajo proporcionada por la impresora 3D implementada.

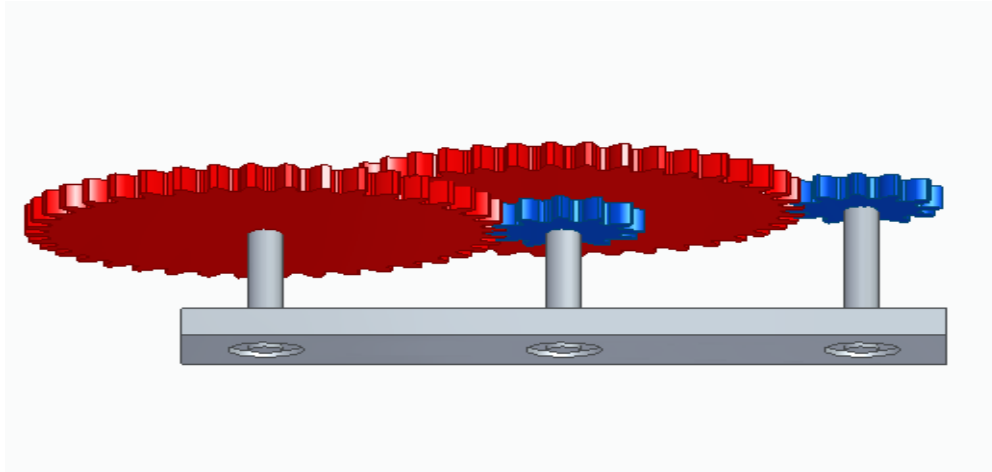


Figura 25: Sistema de transmisión.

## 6. Implantación del Sistema

Consiste en llevar a cabo el acoplamiento de diversos componentes, dentro de los cuales destacan el reloj en tiempo real (RTC) y una tarjeta SD incorporada al sistema para crear una bitácora electrónica de generación de potencia eléctrica de cada uno de los MF. En conjunto, forman un sistema de adquisición y procesamiento de datos; encargado de adquirir los valores de los sensores implementados en cada MF. Para este sistema, es necesario la implementación de los siguientes sistemas de medición para obtener los valores de voltaje generado y corriente demandada por la carga acoplada al sistema de generación, dichos sistemas son:

- Sistema de medición de voltaje (Fz0430);
- Sistema de medición de corriente (ACS712).

Los datos obtenidos mediante estos componentes serán procesados y enviados a nuestra tarjeta de datos únicamente en los tiempos en los que el programador lo determine [38]. Esta función es llevada a cabo mediante el uso de un módulo RTC como el que se muestra en la figura 26.



Figura 26: Módulo RTC.

## 7. Diseño de Tarjetas Electrónicas

Una vez realizada la parte experimental del sistema y obteniendo resultados adecuados, se procede a la realización de las tarjetas electrónicas del sistema, las partes que componen la tarjeta son la medición de voltaje y corriente de ambos MF en tiempo real y el envío de datos a la tarjeta SD (bitácora electrónica). El diseño de tarjetas comprende la comparación de niveles de radiación incidente sobre el módulo, la medición de voltaje y corriente de cada uno de los módulos y el almacenamiento de datos. Para el diseño de tarjetas se realiza el software Proteus 8. En la figura 27 se muestra el diagrama de conexión para la comparación de los niveles de radiación incidente en ambos MF (LDR1 y LDR2), el control de tiempos (RTC) y la medición del voltaje y corriente generados por el sistema móvil y el fijo.

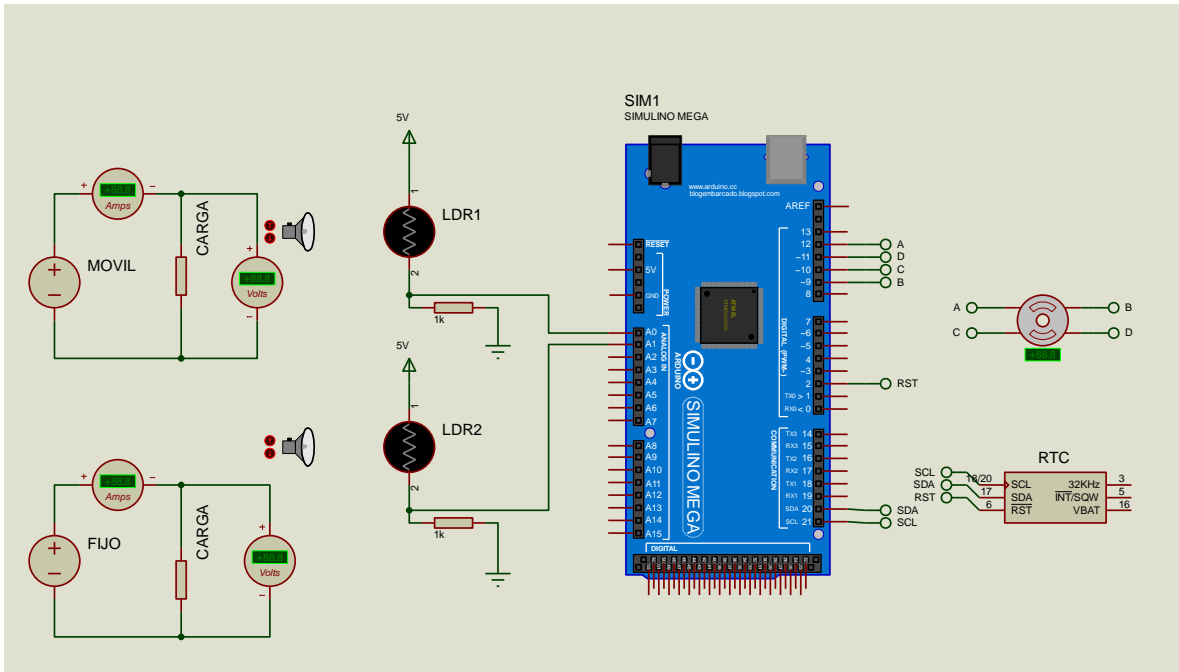


Figura 27: Esquema de conexión: Comparación niveles de radiación incidente, voltaje, corriente y control de tiempos.

## 8. Evaluación Energética

La evaluación energética nos permite determinar la funcionalidad de un sistema de control mediante lógica difusa que integra dispositivos de RTC en seguidores solares. Para poder implementar una evaluación energética a un sistema fotovoltaico, se requiere el uso de MF de mayor potencia. Por esta razón, los MF implementados en las pruebas preliminares dejan de ser utilizados y se hace uso de dos MF de la compañía Movimiento Solar, cuyas propiedades se muestran en la tabla 13:

Tabla 13: Características de MF para evaluación energética.

Potencia	25 W
Voltaje a máxima potencia	17.4 V
Corriente a máxima potencia	1.44 A
Voltaje circuito abierto	21.6 V
Corriente corto circuito	1.58 A
Eficiencia ( $\eta_m$ )	12.60 %
Peso	2.5 Kg
Dimensiones	550×360×25 mm

## CAPÍTULO III

### VIII RESULTADOS

#### 1. Condiciones de Operación

Previamente a reflejar los resultados obtenidos en la etapa de pruebas preliminares, en la figura 28 se muestran las variables que fueron consideradas en el desarrollo del sistema de control (SC) para la obtención de datos de aprovechamiento del recurso solar.

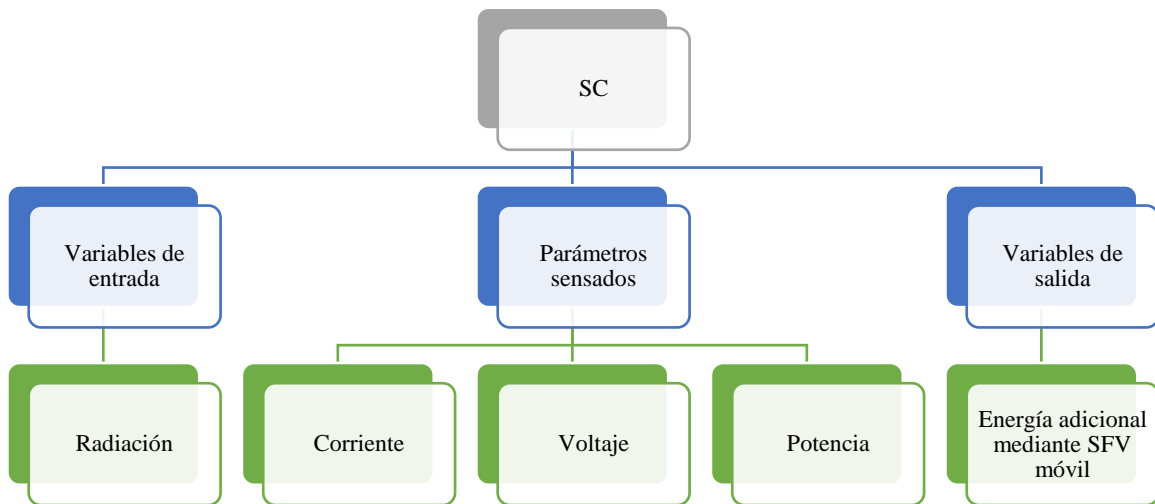


Figura 28: Variables del sistema.

#### 2. Resultados Experimentales

##### 2.1 Pruebas Preliminares

Se realizaron diversas pruebas, llevando a cabo registro de valores de potencia, voltaje y corriente generados por los MF. Los valores de potencia se obtienen a partir del producto del voltaje y corriente, los cuales son obtenidos mediante la implementación de los sensores antes mencionados y almacenados en una bitácora electrónica con registros en tiempo real. Los valores de potencia obtenidos se muestran en las figuras 30, 32, 34 y 36, en las cuales, durante

algunos lapsos la generación de potencia es mayor en el caso del prototipo con seguimiento solar de un eje. En la figura 30 se observa que la mayor diferencia entre los niveles de potencia generada entre el sistema fijo y móvil ocurre después de las 04:00 p.m.

En la figura 34 se puede observar que los niveles de potencia generados por ambos MF son similares en el lapso 01:00 p.m. – 01:45p.m. En los lapsos 11:30 a.m. – 01:00 p.m. y 02:00 p.m. – 05:00 p.m. existe una diferencia entre la potencia generada por el SFV móvil con respecto al SFV fijo, siendo el SFV móvil el de mayor generación.

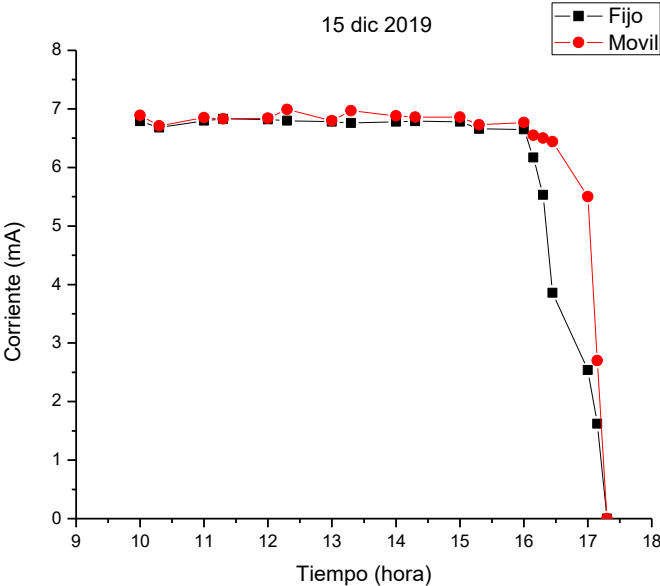


Figura 29: Gráfica de corriente con carga de 1.05 kΩ 15/dic/2019.

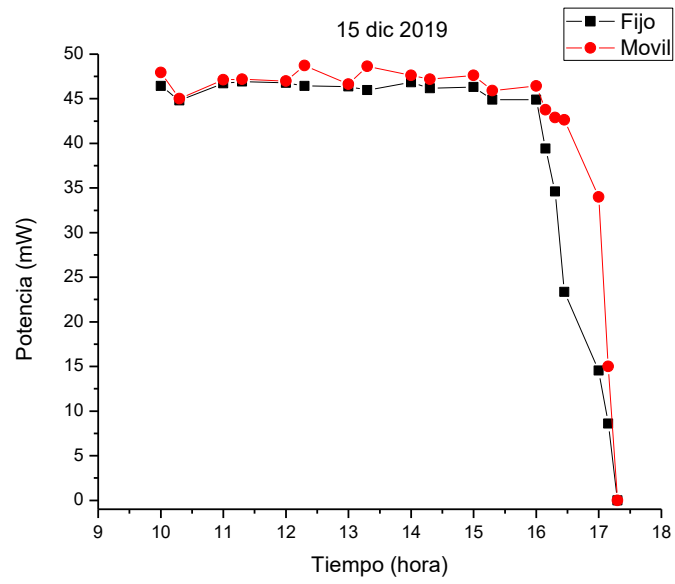


Figura 30: Gráfica de potencia con carga de 1.05 kΩ 15/dic/2019.

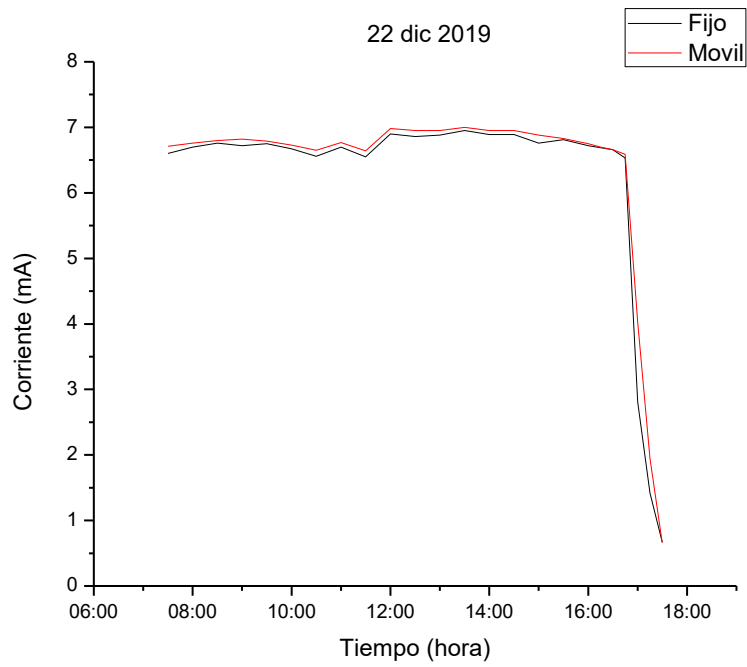


Figura 31: Gráfica de corriente con carga de 1.05 kΩ 22/dic/2019.



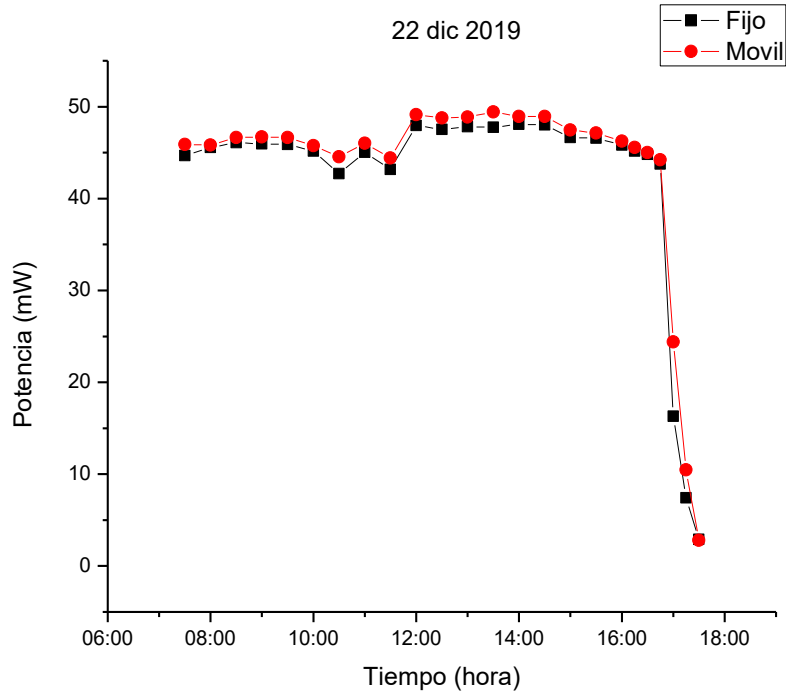


Figura 32: Gráfica de potencia con carga de 1.05 kΩ 22/dic/2019.

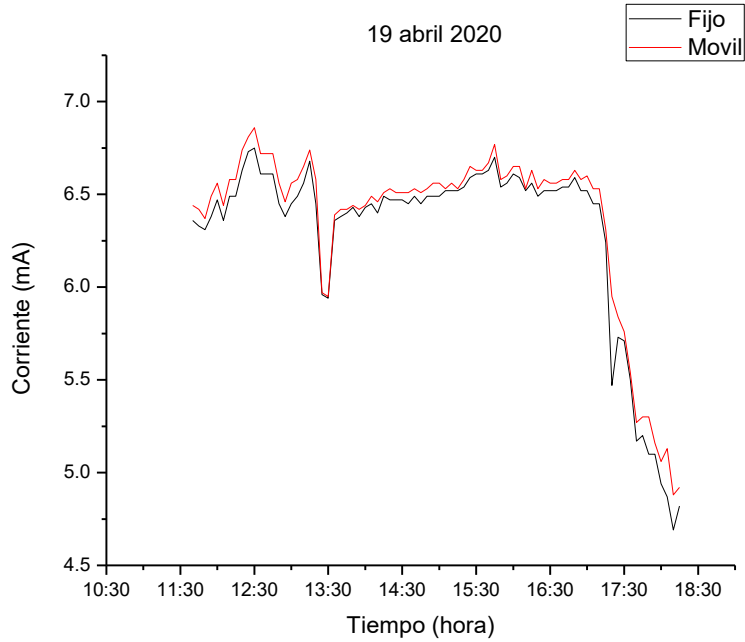


Figura 33: Gráfica de corriente con carga de 1.05 kΩ 19/abr/2020.

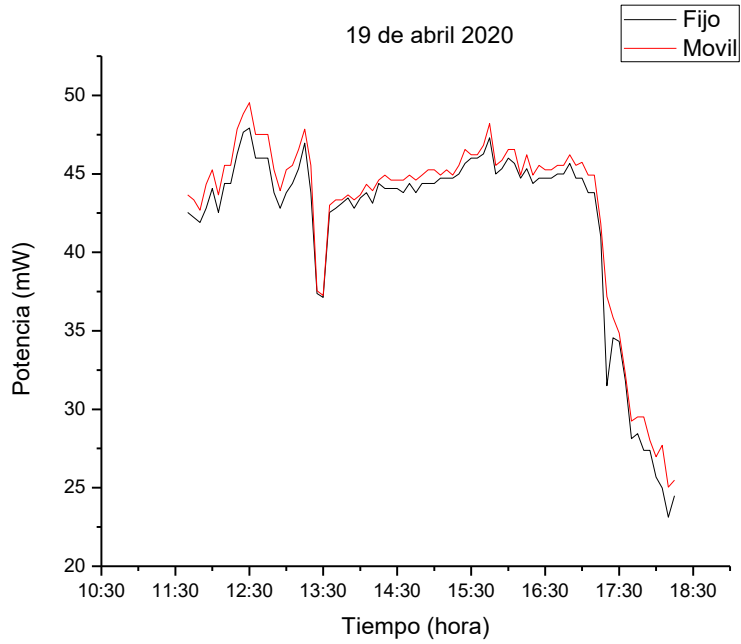


Figura 34: Gráfica de potencia con carga de 1.05 kΩ 19/abr/2020.

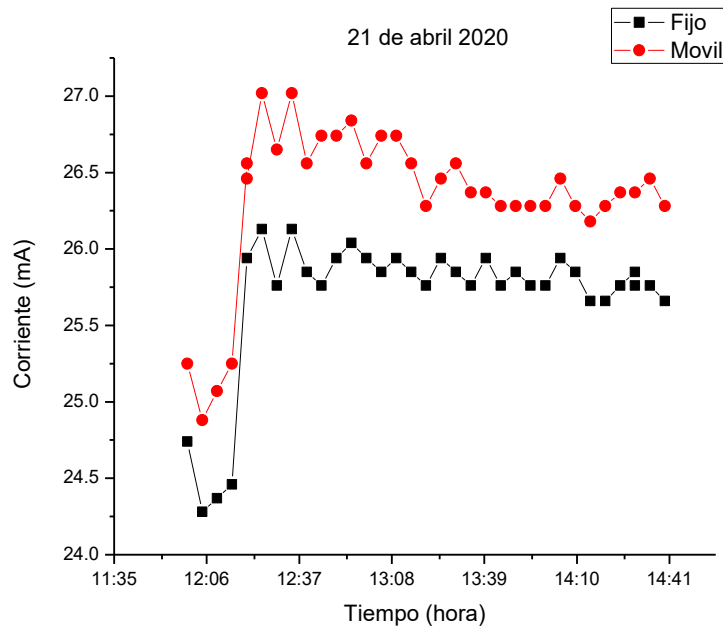


Figura 35: Gráfica de corriente con carga de 270Ω 21/abr/2020.

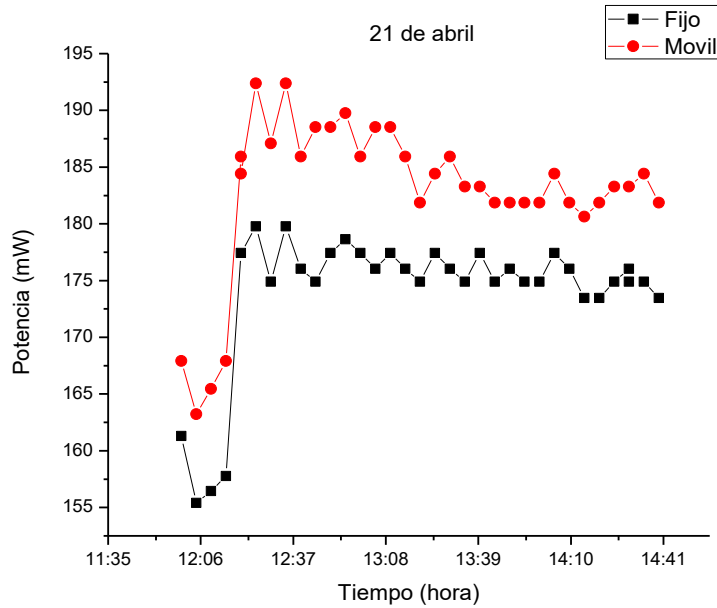


Figura 36: Gráfica de potencia con carga de  $270\Omega$  21/abr/2020.

## 2.2 Pruebas Finales

Para la realización de las pruebas finales, se implementaron las estructuras que se muestran en la figura 24 y 2 MF cuyas características se enlistan en la tabla 13. Las pruebas se llevaron a cabo en Mazatlán, Sinaloa los días 30 de agosto, 02 y 03 de septiembre de 2020. El 30 de agosto la experimentación se realizó en un horario de 12:50 p.m. – 05:05 p.m. con coordenadas  $23^{\circ}14'01.2''N$   $106^{\circ}25'26.9''W$ . El 02 y 03 de septiembre las pruebas se realizaron en la UPSIN ( $23^{\circ}15'54.4''N$   $106^{\circ}22'35.0''W$ ) en un horario de 08:00 a.m. – 06:00 p.m. En la figura 37 se puede observar la forma en que fueron montados los SFV en la UPSIN. Dicha imagen corresponde al día 03 de septiembre de 2020 en un horario de 05:00 p.m.



Figura 37: Montaje SFV.

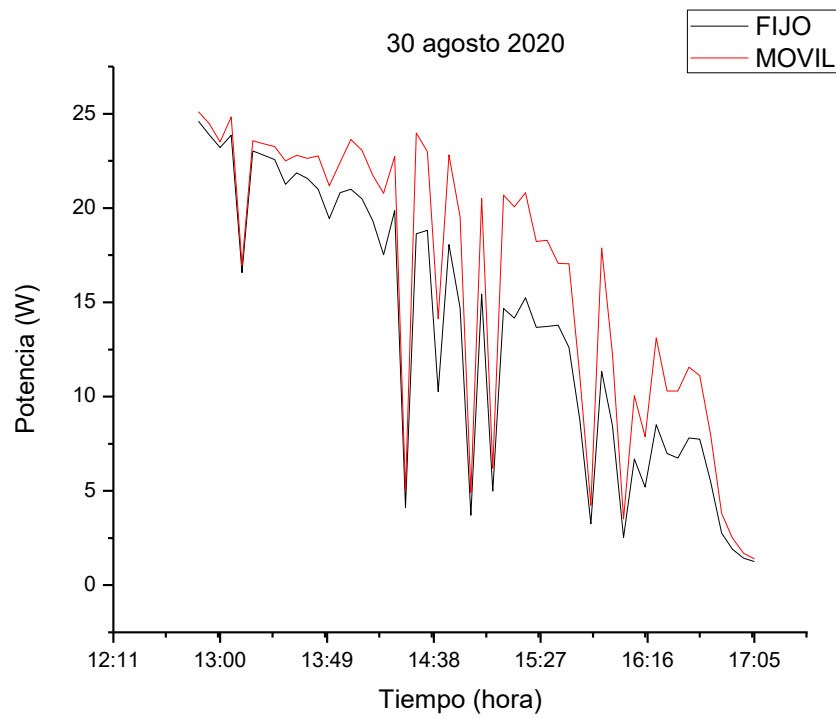


Figura 38: Potencia generada 30 agosto 2020.

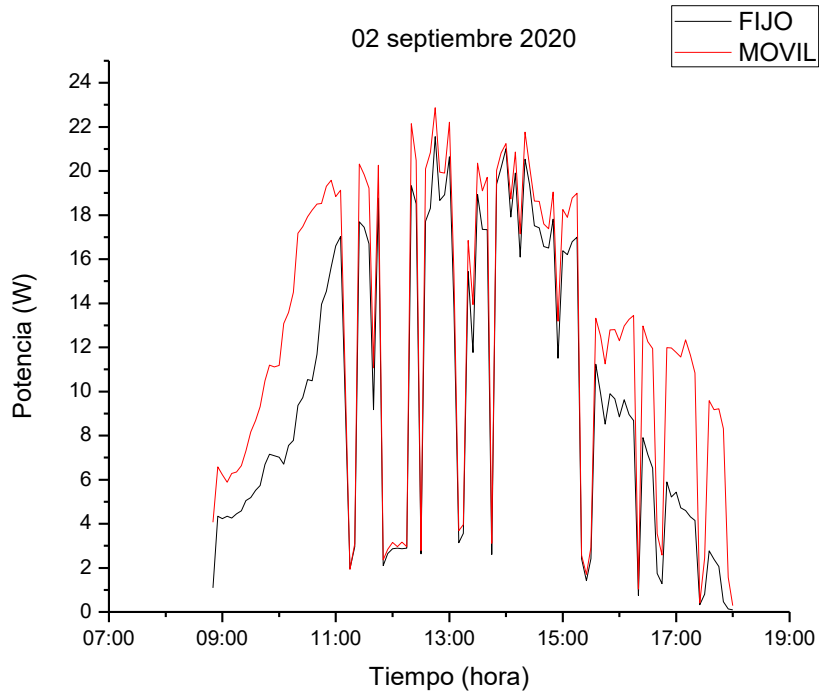


Figura 39: Potencia generada 02 de septiembre 2020.

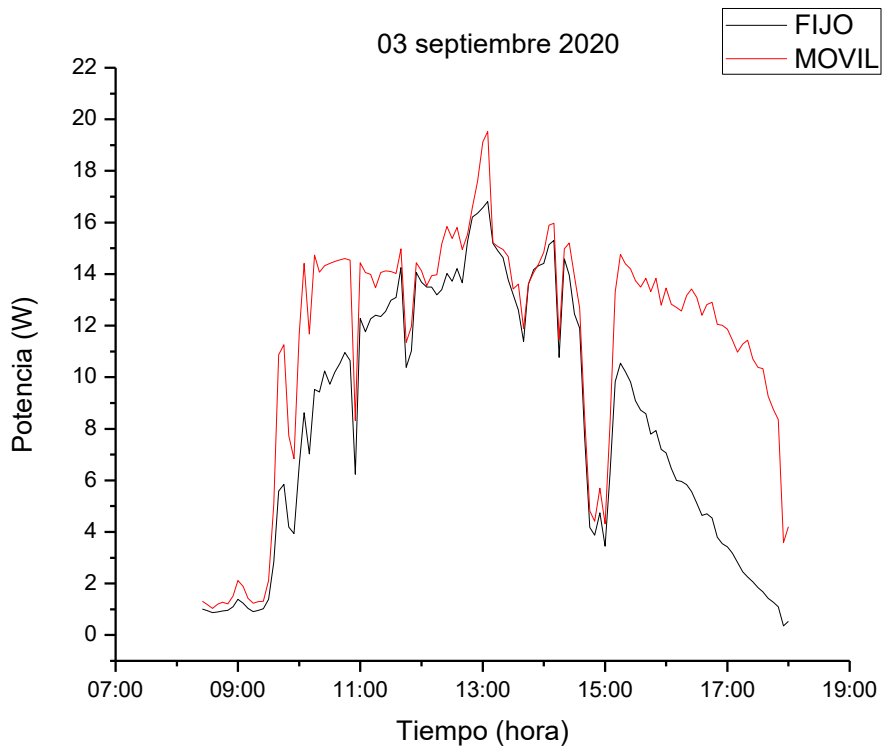


Figura 40: Potencia generada 03 de septiembre.

En la figura 38 se observa una comparación entre los niveles de potencia generados el 30 de agosto de 2020 por el sistema móvil y el fijo. El día fue mayormente soleado, con pocos lapsos en los que estuvo nublado (particularmente 14:25, 14:55, 15:05, 15:50 y 16:05 p.m.). Los niveles de potencia generada por el sistema móvil fueron superiores al sistema fijo, presentando el mayor nivel de potencia generada por ambos MF a las 12:50 p.m.

La gráfica correspondiente al día 02 de septiembre (figura 39) muestra los niveles de potencia generada por los MF en la UPSIN en un día nublado, donde el recurso solar presentó variaciones a lo largo del día. La mayor diferencia entre los niveles de energía generada se observa a partir de las 15:30 p.m. Ambos sistemas registraron su máximo nivel de potencia generada a las 12:45 p.m.

Los datos obtenidos a partir de la experimentación realizada el día 03 de septiembre, presentan un comportamiento similar, puesto que el sistema móvil registra una ganancia de 365 W con respecto al sistema fijo. Para este día, la mayor diferencia entre la potencia generada por los MF se observa a partir de las 15:10 p.m. Registrando ambos sistemas su mayor generación a las 13:05 p.m. De acuerdo a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos UNAM, estación MZT, los niveles máximos de radiación para el 03 de septiembre ocurrieron en el lapso 12:30 p.m. – 01:00 p.m.

### **2.3 Evaluación Energética**

Esta etapa del proyecto de investigación fue llevada a cabo en Mazatlán, Sinaloa. Su objetivo principal consiste en evaluar dos factores del proyecto de investigación (niveles de potencia generada por ambos sistemas fotovoltaicos y consumo energético por parte del sistema móvil). Para estimar el consumo energético por parte del sistema de posicionamiento del seguidor solar de un eje mediante lógica difusa, se implementó una batería portátil (1200

mAh, 5V) con una energía total almacenada de 6 Wh. A partir del primer y último registro del aprovechamiento del recurso solar almacenado en la bitácora electrónica, se tiene una aproximación del consumo promedio por parte del sistema móvil. La batería logró alimentar al sistema de posicionamiento durante 6 hr, con lo cual se concluye que el consumo promedio por parte del sistema móvil es igual a 1 Wh. La figura 41 muestra las diferencias entre los niveles de potencia generados por cada MF. Como ya se mencionó, el MF móvil alcanza niveles superiores. En la tabla 14 se muestran los valores promedio de voltaje (V), corriente (A) registrados por ambos MF el día 01 de diciembre (figura 41) en el lapso 09:00 a.m. – 17:00 p.m., al igual que la suma total de los valores de energía generada. Respecto a la generación de energía, se presenta un 22.22 % más de generación de energía mediante el sistema móvil con respecto al fijo. Para el día 02 de septiembre de 2020 (figura 39) la diferencia fue de un 28.0 % durante el lapso 08:50 a.m. – 18:00 p.m.

Los valores de la tabla 14 correspondientes a energía total, son obtenidos a partir de los valores de potencia registrados en la bitácora electrónica. Para convertir el parámetro de potencia (W) a energía (Wh), se multiplica el valor de potencia registrado por el tiempo (hr) transcurrido entre cada muestra (valor registrado).

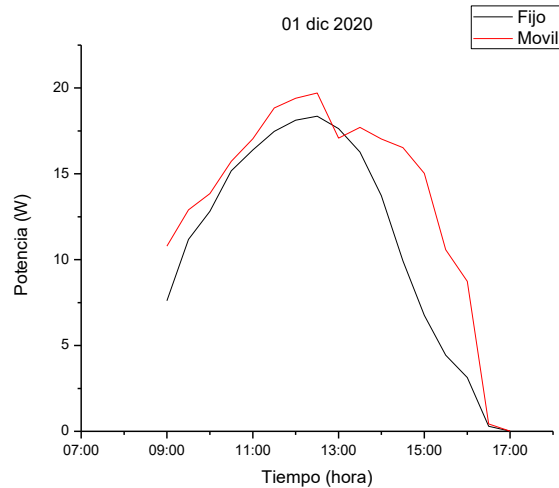


Figura 41: Evaluación energética.

Tabla 14: Comparación sistema móvil vs sistema fijo.

Sistema Móvil			Sistema Fijo		
Voltaje promedio	Corriente promedio	Energía total	Voltaje promedio	Corriente promedio	Energía total
12.88 V	0.94 A	115.70 Wh	11.40 V	0.83 A	94.66 Wh

Las figuras 42 y 43 corresponden a los valores de voltaje y corriente, respectivamente, generados por ambos SFV sin una carga conectada durante el día 02 de diciembre de 2020. El registro inició a las 08:00 a.m. para ambos MF. En el caso del voltaje, ambos MF presentan valores similares, los cuales presentan poca variación en el transcurso del día. Por su parte, la corriente generada por ambos módulos, la cual se puede observar en la figura 43, presenta valores más altos para el MF móvil, particularmente después de la 01:00 p.m. Esto sucede porque el MF móvil se posiciona automáticamente perpendicularmente al sol durante el transcurso del día.

En la tabla 15 se muestran los parámetros necesario para determinar la energía generada por ambos MF. Es decir, corriente (A), Voltaje (V) y potencia (W). A partir los valores de



energía generada por ambos sistemas, se puede inferir que la implementación de un seguidor solar de un eje representa un 24.7 % de ganancia en la generación de energía eléctrica con respecto a un sistema fotovoltaico fijo con un consumo del 3.98 % y una ganancia final del 19.75 %.

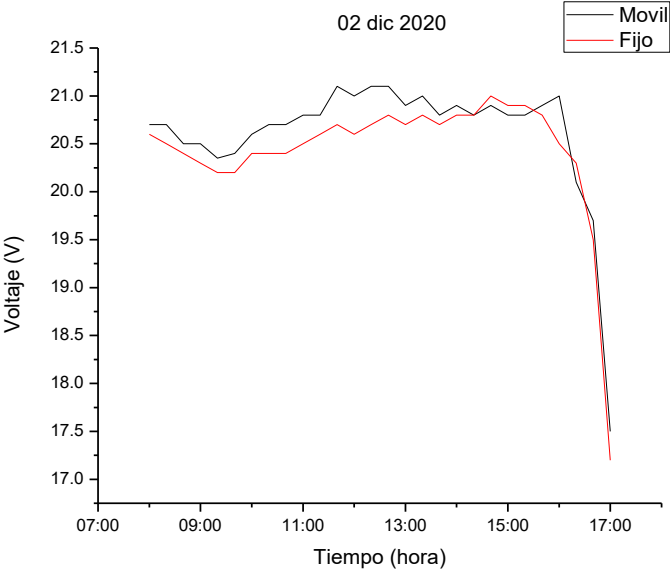


Figura 42: Voltajes SFV móvil y fijo.

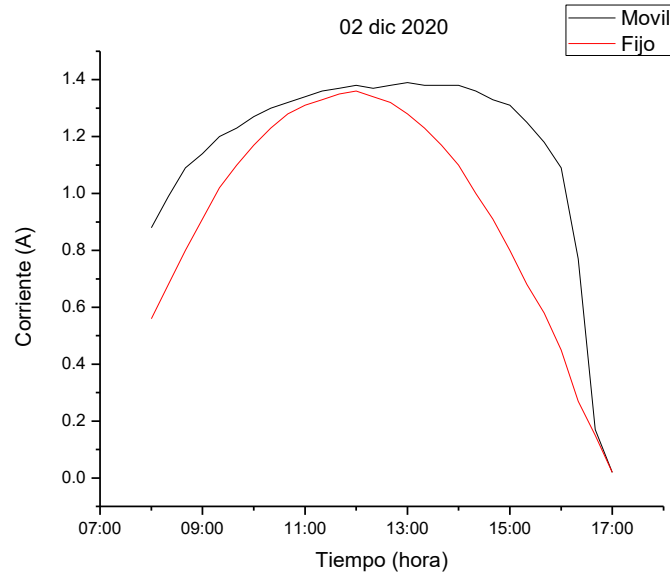


Figura 43: Corrientes SFV móvil y fijo.

Tabla 15: Comparación parámetros ambos SFV.

Móvil				Fijo				Fecha y Hora
Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Energía (Wh)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Energía (Wh)	
20.7	0.88	18.216	6.072	20.6	0.56	11.536	3.84533	08:00:00 a. m.
20.7	0.99	20.493	6.831	20.5	0.68	13.94	4.64667	08:20:00 a. m.
20.5	1.09	22.345	7.448	20.4	0.8	16.32	5.44000	08:40:00 a. m.
20.5	1.14	23.37	7.790	20.3	0.91	18.473	6.15767	09:00:00 a. m.
20.35	1.2	24.42	8.140	20.2	1.02	20.604	6.86800	09:20:00 a. m.
20.4	1.23	25.092	8.364	20.2	1.1	22.22	7.40667	09:40:00 a. m.
20.6	1.27	26.162	8.721	20.4	1.17	23.868	7.95600	10:00:00 a. m.
20.7	1.3	26.91	8.970	20.4	1.23	25.092	8.36400	10:20:00 a. m.
20.7	1.32	27.324	9.108	20.4	1.28	26.112	8.70400	10:40:00 a. m.
20.8	1.34	27.872	9.291	20.5	1.31	26.855	8.95167	11:00:00 a. m.

20.8	1.36	28.288	9.429	20.6	1.33	27.398	9.13267	11:20:00 a. m.
21.1	1.37	28.907	9.636	20.7	1.35	27.945	9.31500	11:40:00 a. m.
21	1.38	28.98	9.660	20.6	1.36	28.016	9.33867	12:00:00 p. m.
21.1	1.37	28.907	9.636	20.7	1.34	27.738	9.24600	12:20:00 p. m.
21.1	1.38	29.118	9.706	20.8	1.32	27.456	9.15200	12:40:00 p. m.
20.9	1.39	29.051	9.684	20.7	1.28	26.496	8.83200	01:00:00 p. m.
21	1.38	28.98	9.660	20.8	1.23	25.584	8.52800	01:20:00 p. m.
20.8	1.38	28.704	9.568	20.7	1.17	24.219	8.07300	01:40:00 p. m.
20.9	1.38	28.842	9.614	20.8	1.1	22.88	7.62667	02:00:00 p. m.
20.8	1.36	28.288	9.429	20.8	1	20.8	6.93333	02:20:00 p. m.
20.9	1.33	27.797	9.266	21	0.91	19.11	6.37000	02:40:00 p. m.
20.8	1.31	27.248	9.083	20.9	0.8	16.72	5.57333	03:00:00 p. m.
20.8	1.25	26	8.667	20.9	0.68	14.212	4.73733	03:20:00 p. m.
20.9	1.18	24.662	8.221	20.8	0.58	12.064	4.02133	03:40:00 p. m.
21	1.09	22.89	7.630	20.5	0.45	9.225	3.07500	04:00:00 p. m.
20.1	0.77	15.477	5.159	20.3	0.27	5.481	1.82700	04:20:00 p. m.
19.7	0.17	3.349	1.116	19.5	0.15	2.925	0.97500	04:40:00 p. m.
17.5	0.02	0.35	0.117	17.2	0.02	0.344	0.11467	05:00:00 p. m.
<b>Total</b>			<b>226.01</b>				<b>181.21</b>	

### 3. Técnica de Filtrado de Datos

Partiendo del análisis de datos de radiación solar proporcionados por la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM, se puede inferir que el recurso solar de la Ciudad de México y de Mazatlán, Sinaloa presentan fluctuaciones considerables; por lo tanto,

es necesario implementar ciertas técnicas de filtrado de datos con una media móvil para poder así determinar periodos en los cuales sea o no conveniente realizar un movimiento en nuestro sistema móvil.

Con ayuda del software Origin ®, se realizó el procesamiento de los datos generados mediante la técnica de filtrado promediador, con la finalidad de tener un panorama más claro para poder determinar los tiempos de sensado más eficientes para la implementación de nuestro sistema. Se hizo un análisis de los días 1, 15 y 30 en los meses del año 2019 (enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre). En las figuras 44 y 45 se pueden observar los resultados obtenidos con técnicas de filtrado cada 5 minutos para los días 15 de enero y 15 de marzo en Ciudad de México. Por su parte, las figuras 46 y 47 corresponden al día 01 de mayo en Mazatlán, Sinaloa cada 5 y 2 minutos, respectivamente. A diferencia de las figuras 44, 45 y 46, la figura 47 no refleja una estabilización en el recurso al momento de una variación, factor que en la figura 45 se disminuye al momento de presentarse (12:00 p.m. – 14:00 p.m.). Esto se debe a la implementación de la técnica de filtrado cada 2 min no es suficiente para estabilizar las fluctuaciones presentes en el recurso solar del día correspondiente.

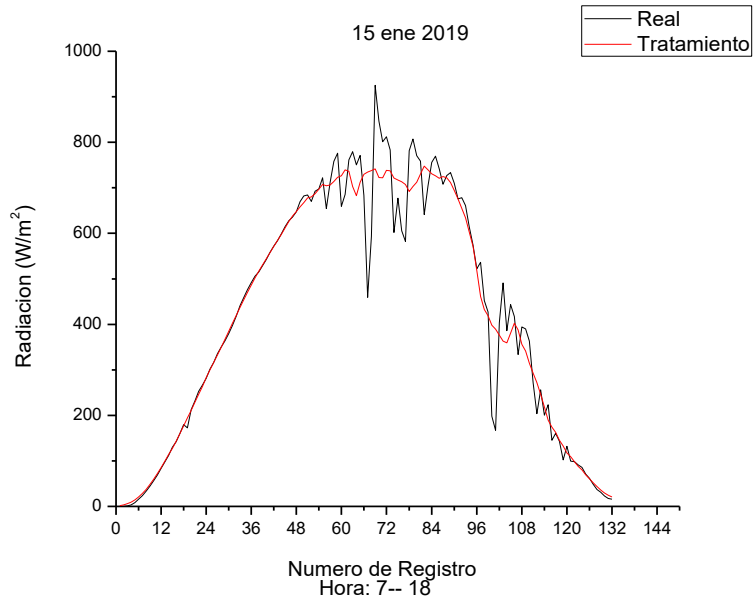


Figura 44: técnica de filtrado 15/ene/2019 CDMX cada 5 min.

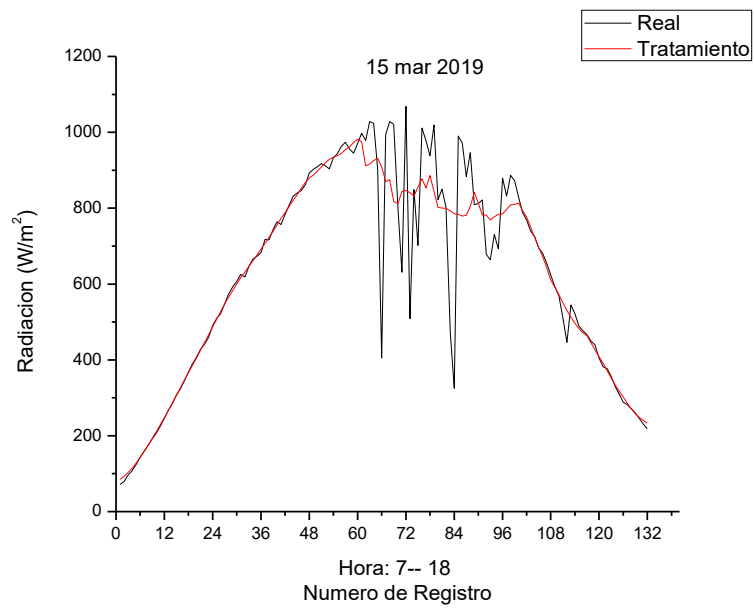


Figura 45: técnica de filtrado 15/mar/2019 CDMX cada 5 min.

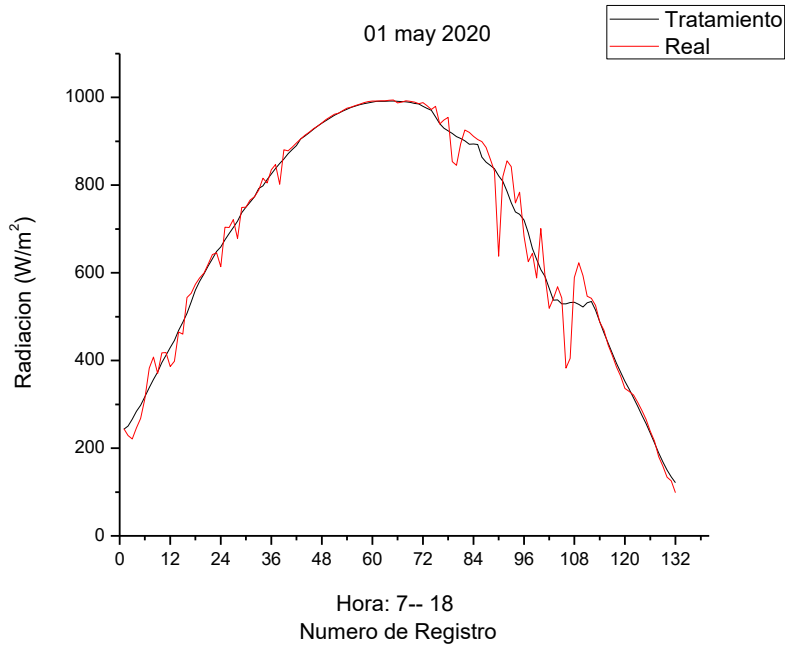


Figura 46: Técnica de filtrado Mazatlán 01/may/2020 cada 5 min.

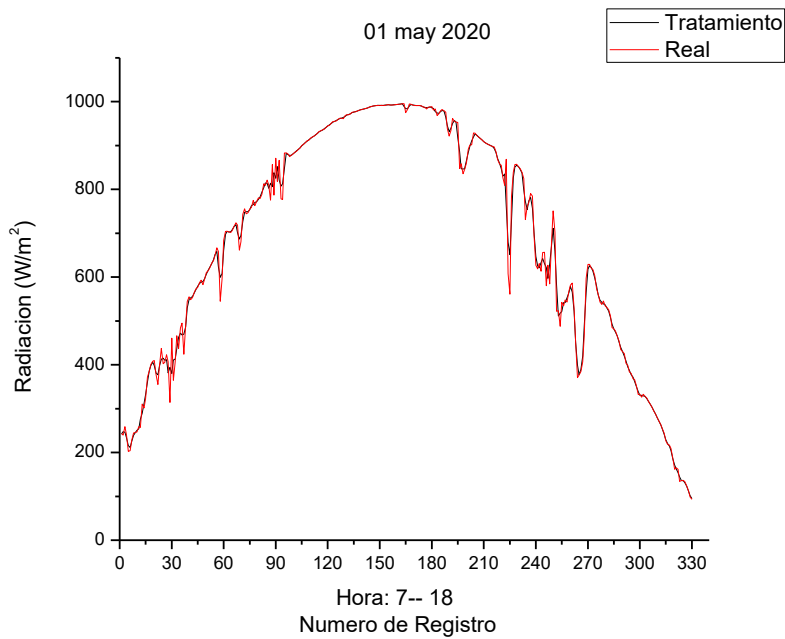


Figura 47: Técnica de filtrado Mazatlán 01/may/2020 cada 2 min.

#### 4. Discusión

Se puede asumir que el sistema de control mediante lógica difusa determina de manera adecuada el punto sobre el cual incide mayor radiación solar (como se observa en las figuras

55, 56 y 57), lo que permite alcanzar mayores niveles de generación de energía. Los niveles de potencia generados por los módulos implementados en pruebas preliminares y finales corresponden a lo reportado por [22], [35], [37], [38], [42] y [44], puesto que el MF móvil genera mayores niveles de potencia. La implementación de un seguidor solar mediante lógica difusa representa una mejora en los niveles de generación de energía con el recurso solar presente en Mazatlán, Sinaloa, tal como se puede observar en la tabla 14, donde se registra una ganancia en la generación de energía de 18.37 Wh por parte del seguidor solar de un eje. De igual manera, los datos registrados el día 02 de diciembre, los cuales se muestran en la tabla 15, presentan una ganancia de 44.80 Wh por parte del seguidor solar de un eje. El sistema de control que permite alcanzar esta ganancia energética, representa un consumo aproximado de 1 Wh por cada hora de operación.

## **CAPÍTULO V**

### **IX CONCLUSIONES**

Se propone un sistema de control mediante lógica difusa para evaluar los niveles de potencia de un seguidor solar de un eje y un sistema fijo bajo las mismas condiciones. Los resultados obtenidos demuestran que el control propuesto responde positivamente de acuerdo al recurso solar de la zona, pues la potencia resultante del sistema móvil es superior a la entregada por el sistema fijo. Se puede concluir que en lapsos nublados los valores de potencia entregados por ambos sistemas son similares, puesto que ambos MF reciben solamente radiación difusa y no directa.

La implementación de sensores de voltaje y corriente en conjunto con la tarjeta SD y el RTC, son una herramienta fundamental para registrar y posteriormente evaluar el aprovechamiento del recurso solar en las instalaciones fotovoltaicas. Esto se debe a que se tiene información (voltaje, corriente, potencia) en tiempo real de ambos sistemas fotovoltaicos, trabajando bajo las mismas condiciones, lo que permite realizar una comparación idónea.

El sistema de posicionamiento del seguidor solar de un eje representa un consumo energético del 3.98 % del total de energía generada, lo que equivale a una ganancia en la generación de energía eléctrica de 19.75 %.

La implementación de este proyecto de investigación contribuye de manera positiva a la atenuación de los efectos ocasionados por el cambio climático, pues demuestra la factibilidad de un seguidor solar para aumentar los niveles de generación de energía eléctrica a través de una fuente alterna a los combustibles fósiles.



Se logra implementar un sistema de control que permite posicionar al MF al punto de mayor generación de energía eléctrica, a pesar de la variabilidad inherente al recurso solar.

Como trabajo futuro, se recomienda implementar el sistema de control a una instalación fotovoltaica de mayor escala, esto con la finalidad de corroborar su utilidad energética y económica frente a una instalación más aproximada a las que son implementadas en el sector industrial y doméstico.

Dentro de las contribuciones académicas, se encuentra la publicación de un artículo bajo el nombre de “Control y Evaluación de un Seguidor Solar de un Eje” dentro de la XLIV semana nacional de energía solar

## CAPÍTULO VI

### X REFERENCIAS

- [1] B. M H, G. A, A. J L, G. R H, and G. J J, “Situación del petróleo en México: Implicaciones socio-económica y políticas.,” *Daena*, vol. 11, pp. 144–174, 2016.
- [2] SENER, “Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030,” México, 2016.
- [3] Diccionario de la Lengua Española, “Real Academia Española,” 2019. <https://dle.rae.es/cambio?m=form#Fxnnw1W>.
- [4] Agencia Internacional de Energía, “Estadísticas de las emisiones de CO2.,” 2018.
- [5] SENER, “BALANCE NACIONAL DE ENERGÍA,” 2017. [Online]. Available: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf).
- [6] CENACE, “Programa de Ampliación y Modernización de la RNT y RGD 2019-2033,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cenace.gob.mx/Paginas/Publicas/MercadoOperacion/ProgramaRNT.aspx>.
- [7] SENER, “PRODESEN 2018-2032,” México, 2018. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>.
- [8] Forbes, “Energía Solar Fotovoltaica,” 2016.
- [9] Agencia Internacional de Energía, “Next Generation Wind and Solar Power,” 2016.
- [10] F. Mekonnen Guangul and G. Tade Chala, “Solar Energy as Renewable Energy Source: SWOT Analysis,” *Energies*, vol. 11, pp. 29–34, 2018.
- [11] A. Iranzu Balbuena, “Diseño de equipo automatizado para la limpieza de paneles solares,” Universidad Pública de Navarra, 2018.
- [12] Soli clima, “Cuáles son los problemas comunes en la reparación de paneles solares?,” 2019. <https://news.soliclima.com/noticias/energia-solar/cuales-son-los-problemas-comunes-en-la-reparacion-de-paneles-solares>.
- [13] F. A. García Barrios, “EFECTO DE LOS FACTORES AMBIENTALES EN LA EFICIENCIA DE ARREGLOS DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS,” Universidad Autónoma del caribe, 2018.
- [14] Ecosistemas del sureste, “El efecto fotovoltaico,” 2015. <http://m.ecosistemasdelsureste.com/news/el-efecto-fotovoltaico/>.
- [15] M. Pasos, A. Alarcón, and W. Dalaison, “+ SOL + LUZ: Guía práctica para la implementación de sistemas fotovoltaicos en proyectos de infraestructura social,” Washington, D.C., Aug. 2018. doi: 10.18235/0001245.
- [16] R. Chávez López, “Equipos que conforman un sistema interconectado a la red,”

2019. .

- [17] A. Escobar Mejía, C. A. Torres, and R. Hincapie Isaza, “Conexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica,” pp. 31–36, 2010.
- [18] J. Cepeda and A. Sierra, “Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones,” Colombia, 2017.
- [19] A. Pradhan and B. Panda, “Analysis of ten external factors affecting the performance of PV system,” in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, Aug. 2017, pp. 3093–3098, doi: 10.1109/ICECDS.2017.8390025.
- [20] S. Torres Pacheco, F. Jurado Pérez, D. Granados Lieberman, and A. Lozano Luna, “Eficiencia en paneles solares,” *Rev. del Diseño Innov.*, vol. 2, pp. 9–21, 2018.
- [21] G. Prinsioo and R. Dobson, “High precision solar position algorithms, programs, software and source-code for computing the solar vector, solar coordinates & sun angles in Microprocessor, PLC, Arduino, PIC and PC-based sun tracking devices or dynamic sun following hardware,” *ResearchGatePr*, pp. 1–542, 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.4265.6329/1.
- [22] N. Al-Rousan, N. A. di Mat Isa, and M. K. Mat Desa, “Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review,” *ELSEVIER*, 2017.
- [23] N. Machado Toranzo, A. Lussón Cervantes, L. Leysdian Oro Carralero, J. Bonzon Henríquez, and O. Escalona Costa, “Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar,” *Scielo*, vol. 26, pp. 190–199, 2015.
- [24] A. Borja Martínez, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE SEGUIDOR SOLAR PARA PANELES FOTOVOLTAICOS,” Universidad de León, 2015.
- [25] M. Mayer, M. Cáceres, A. D. Firman, and L. H. Vera, “Desarrollo de algoritmos de control de un sistema seguidor para la medición de las componentes de la radiación solar,” *Extensionismo, Innovación y Transf. Tecnológica*, vol. 4, p. 198, May 2018, doi: 10.30972/eitt.402887.
- [26] R. Villela Varela, C. Reyes Rivas, F. E. López Monteagudo, A. Beltrán Telles, D. A. Martínez Castro, and A. Chacón Ruiz, “Control difuso de un seguidor solar,” *Acad. Journals*, 2019.
- [27] R. Hernández Gaviño, *Introducción a los sistemas de control*, Pearson. 2010.
- [28] D. C. H. Tuong M.Nguyen, M. W. Dunnigan, and M. A. Mueller, “Comparison between Open- and Closed-Loop Trackers of a Solar Photovoltaic System,” 2013.
- [29] N. Kuttybay *et al.*, “An Automated Intelligent Solar Tracking Control System With Adaptive Algorithm for Different Weather Conditions,” 2019.
- [30] G. Buckbee and L. Gordon, “True control system objective,” *ResearchGate*, 2009.
- [31] T. ESRAM and P. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power

- Point Tracking Techniques,” in *TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 2007, pp. 439–449.
- [32] M. Argyrou, P. Christodoulides, and S. Kalogirou, “Modeling of a photovoltaic system with different MPPT techniques using MATLAB/Simulink,” *IEEE*, 2018.
- [33] H. López Xelo, J. J. Hernández Medina, and M. N. Romano Rodríguez, “Diseño de un sistema fotomecánico inteligente con dos grados de libertad para la orientación de un panel fotovoltaico que optimice la producción de energía eléctrica,” *Rev. Ing. Eléctrica*, vol. 2, pp. 27–32, 2018.
- [34] M. Blej and M. Azizi, “Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Fuzzy Inference Systems for Fuzzy Real Time Scheduling,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, pp. 11071–11075, 2016.
- [35] S. Ahmad, S. Shafie, and M. Z. Abidin Ab Kadir, “A High Power Generation, Low Power Consumption Solar Tracker,” 2012.
- [36] H. Rezk and A. M. Eltamaly, “A comprehensive comparison of different MPPT Systems techniques, for photovoltaic systems,” *ELSEVIER*, pp. 1–11, 2014.
- [37] R. Arreola Gómez, A. Quevedo Nolasco, M. Castro Popoca, Á. Bravo Vinaja, and D. Reyes Muñoz, “Diseño, construcción y evaluación de un sistema de seguimiento solar para un panel fotovoltaico,” *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, vol. 6, pp. 1715–1727, 2015.
- [38] S. Malav and S. Vadhera, “Hardware Implementation of Solar Tracking System Using a Stepper Motor,” *IEEE*, 2015.
- [39] N. D. Galán, J. Ontiveros Mireles, G. Rubio Astorga, N. Y. Mejías Brizuela, and J. M. Cañedo Castañeda, “Caracterización experimental de un panel fotovoltaico bajo la radiación solar de Mazatlán, Sinaloa,” *ResearchGate*, 2017.
- [40] W. Nsengiyumva, S. Guo Chen, L. Hu, and X. Chen, “Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review,” *ELSEVIER*, vol. 250–270, 2018.
- [41] A. Basrah Pulungan, L. Son, and Syafii, “A Riview of Solar Tracking Control Strategies,” in *Proceeding of EECSI 2018*, 2018, pp. 319–323.
- [42] J. A. Pelayo López, A. Luna Soto, F. Bernabe Ramos, and B. Guzmán Flores, “Comparativa entre un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y un sistema fotovoltaico fijo,” *Rev. Iberoam. las ciencias biológicas y Agropecu.*, vol. 7, 2018, doi: 10.23913/ciba.v7i13.76.
- [43] A. Sawant, “Design and Analysis of Automated Dual Axis Solar Tracker Based on Light Sensors,” *2018 2nd Int. Conf. I-SMAC (IoT Soc. Mobile, Anal. Cloud) (I-SMAC)I-SMAC (IoT Soc. Mobile, Anal. Cloud) (I-SMAC)*, 2018 2nd Int. Conf., pp. 454–459, 2018, doi: 10.1109/I-SMAC.2018.8653779.
- [44] B. R. Latif Abd and M. I. Satar Abdul, “Developing a Dual-Axis Solar Tracker System with Arduino,” *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, no. March, pp.

578–581, 2019.

- [45] A. Soetedjo, I. Budi Sulistiawati, and Y. Ismail Nakhoda, “Integration of solar tracker and maximum power point tracking for improving photovoltaic (pv) system efficiency,” vol. 16, no. 2, pp. 429–443, 2020, doi: 10.24507/ijicic.16.02.429.
- [46] K. A. Jiménez, “Diseño e implementación de seguimiento solar automático en un panel fotovoltaico y análisis de eficiencia energética,” Universidad Autónoma de la Ciudad de México, 2016.
- [47] R. Min Chao, H. Ku Lin, and C. Hsuan Wu, “Solar-Powered Boat Design Using Standalone Distributed PV System,” in *International Conference on Applied System Innovation 2018*, 2018, pp. 31–34.
- [48] O. Konur and E. Erginer, “ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION TECHNIQUES FOR SOLAR POWERED BOATS,” in *The Second Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation*, 2016, pp. 356–367.
- [49] M. Tahsin Bin Mostafa, S. M. Tanzim Alam Choudhury, and M. Shazad Hosain, “Design and Performance Analysis of a Dual Axis Solar Tracker,” *IEEE*, 2019.
- [50] M. Ali and M. Khalid Paracha, “AN IOT BASED APPROACH FOR MONITORING SOLAR POWER CONSUMPTION WITH ADAFRUIT CLOUD,” *Int. J. Eng. Appl. Sci. Technol. 2020*, vol. 4, no. 9, pp. 335–341, 2020.
- [51] C. Kulkarni *et al.*, “Power monitoring with time controlling & data logging,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 06, no. 04, pp. 336–339, 2019.
- [52] L. Lelutiu, C. Lungoci, M. Calin, and M. Cirstea, “A Power Efficient Mobile Solar Tracking System,” *IEEE*, pp. 561–566, 2017.
- [53] R. Diaz santos, M. Castro Fernandez, A. Santos Fuentesfría, and M. Vilaragut Llanes, “Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica.,” *Rev. Ing. energética*, vol. 39, pp. 146–156, 2018.

## XI ANEXOS

### 1. Técnicas de Filtrado

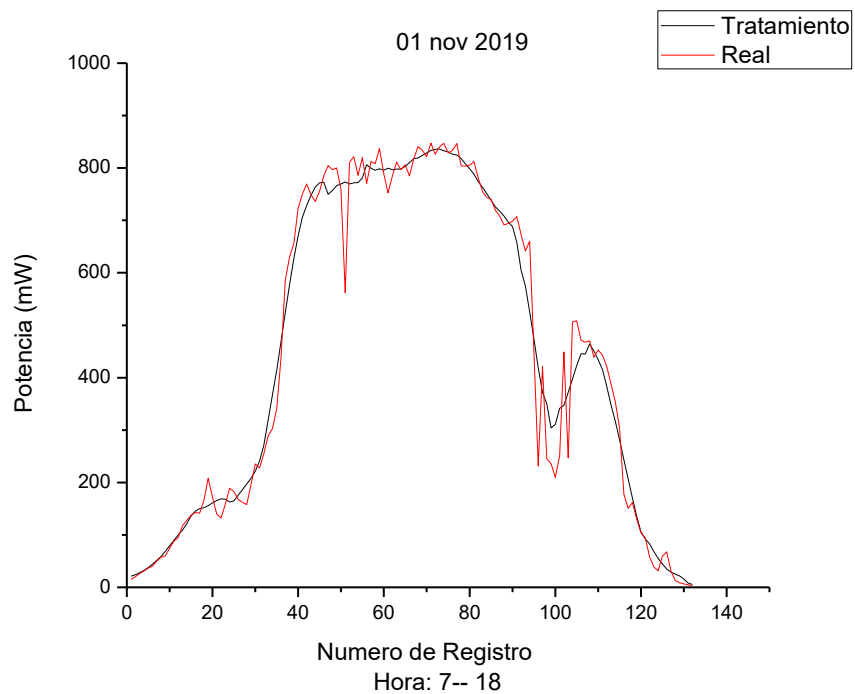


Figura 48: Técnica de filtrado 01/nov/2019 CDMX cada 5 min.

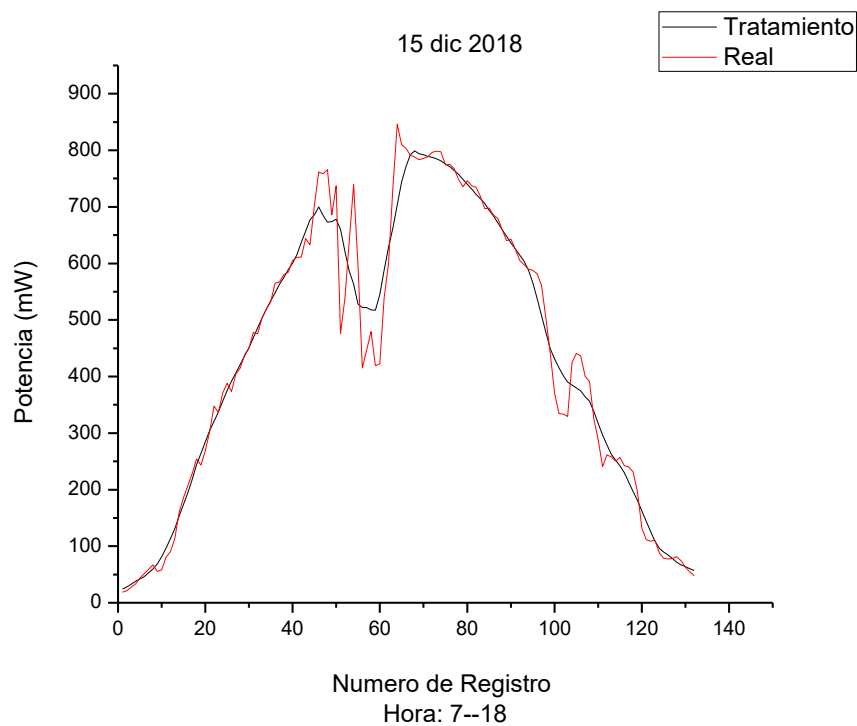


Figura 49: Técnica de filtrado 15/dic/2018 CDMX cada 5 min.

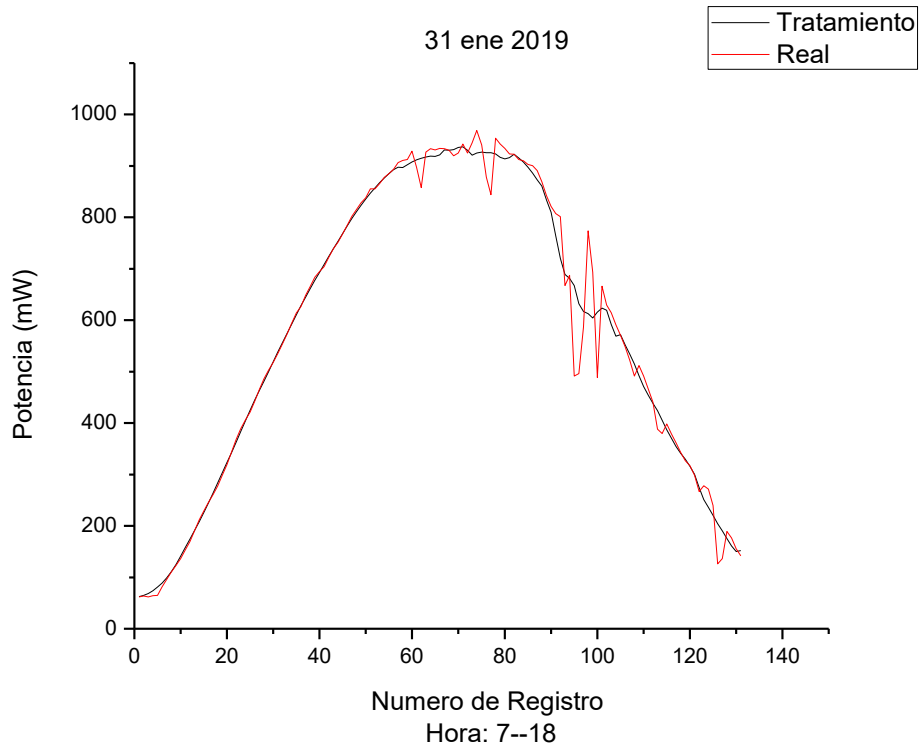


Figura 50: Técnica de filtrado 31/ene/2019 CDMX cada 5 min.

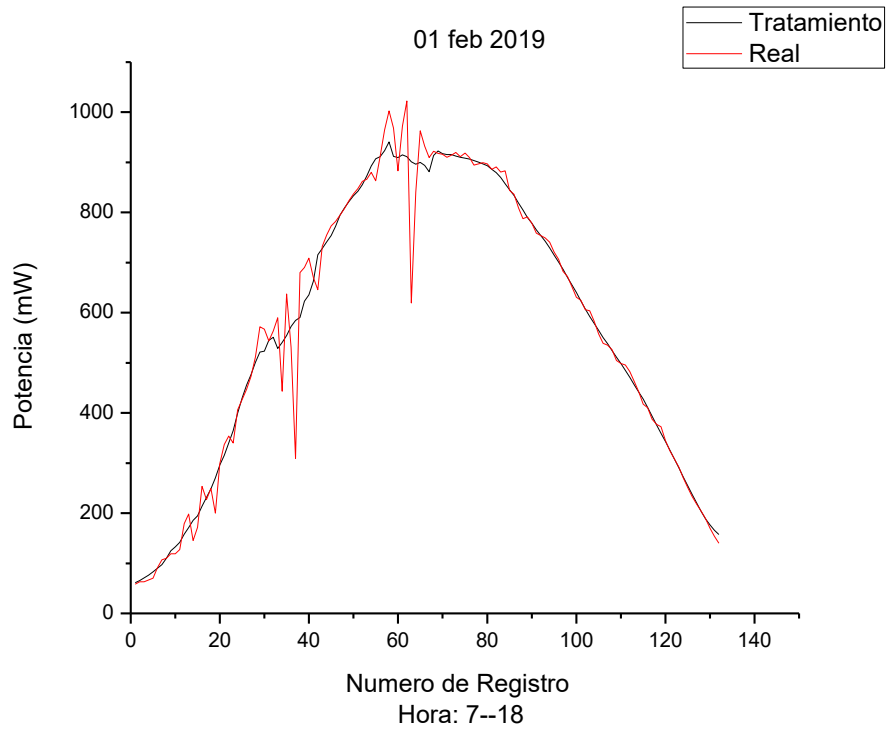


Figura 51: Técnica de filtrado 01/feb/2019 CDMX cada 5 min.

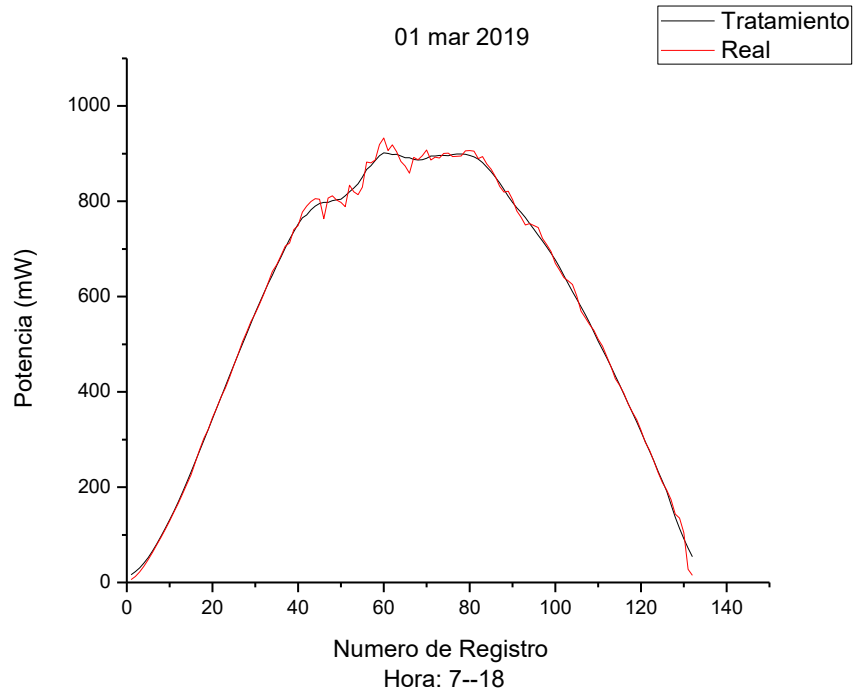


Figura 52: Técnica de filtrado 01/mar/2019 CDMX cada 5 min.

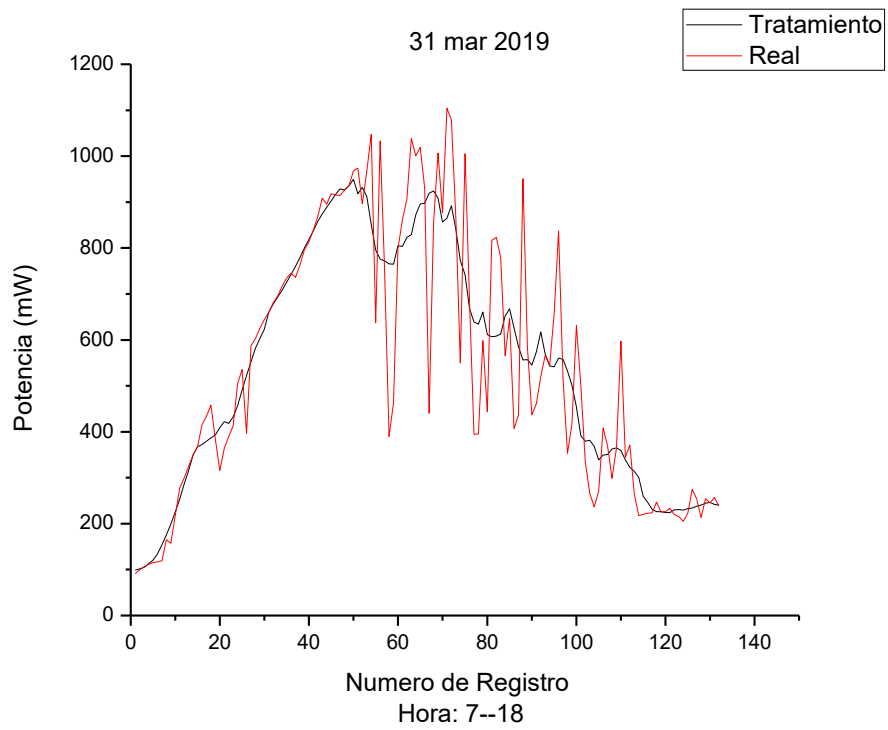


Figura 53: Técnica de filtrado 31/mar/2019 CDMX cada 5 min.



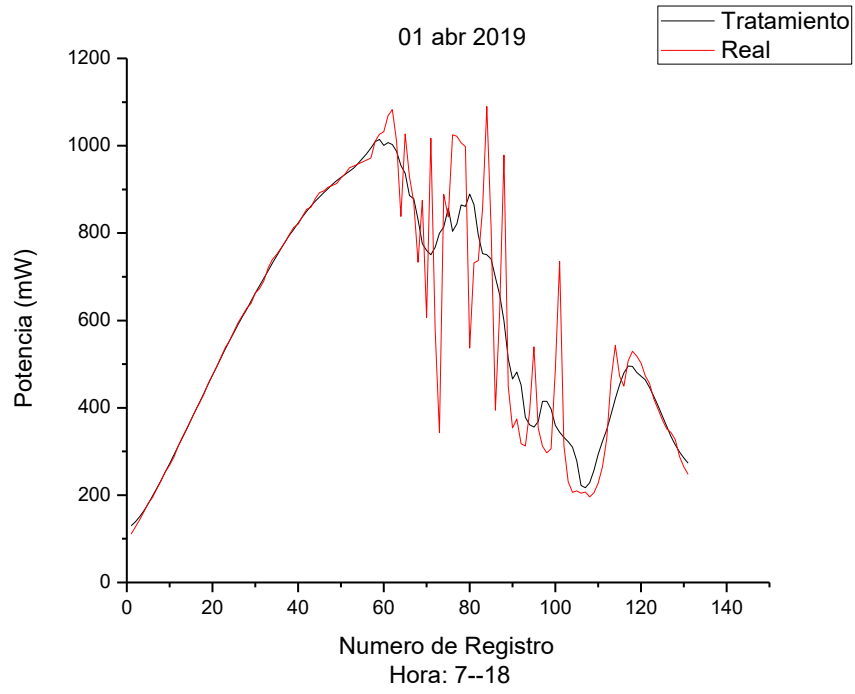


Figura 54: Técnica de filtrado 01/abr/2019 CDMX cada 5 min.



Figura 55: Orientación 08:00 a.m.



Figura 56: Orientación 12:00 p.m.



Figura 57: Orientación 14:30 p.m.