



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Cobertura de la demanda energética en el sector
residencial mediante el recurso solar en Morelos**

presentada por

Ing. Adriel Eduardo Guzmán García

como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dra. Mónica Borunda Pacheco

Codirector de tesis

Dr. Manuel Adam Medina

Cuernavaca, Morelos, México. Septiembre de 2025



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; 22/AGOSTO/2025

Oficio No. DIE/118/2025

Asunto: Aceptación de documentos.

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Adriel Eduardo Guzmán García**, con número de control **M23CE104** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Cobertura de la Demanda Energética en el Sector Residencial Mediante el Recurso Solar en Morelos"**, y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Mónica Borunda Pacheco
Doctora en Física

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Manuel Adam Medina
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5992003

REVISOR 1

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 9968714

REVISOR 2

Dra. Ma. Guadalupe López López
Doctora en Ciencias en Ingeniería Química
Cédula profesional 7980045

C.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas, Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmo



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2224.
e-mail: die@cenidet.tecnim.mx

cenidet
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, **22/agosto/2025**

Oficio No. SAC/208/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ADRIEL EDUARDO GUZMÁN GARCÍA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Cobertura de la Demanda Energética en el Sector Residencial Mediante el Recurso Solar en Morelos"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

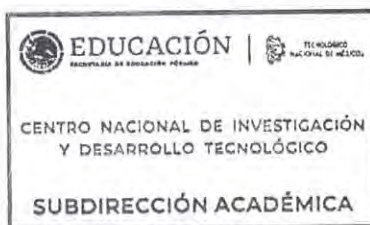
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA-ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p./ Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



Dedicatoria

Este trabajo ha sido fruto de un gran esfuerzo y dedicación, por ello deseo dedicarlo en primer lugar a Dios, por permitirme alcanzar este logro en mi vida; sin su guía y ayuda nada de esto habría sido posible.

A mis padres: a mi padre, Jesús Guzmán Melgar, quien siempre fue un ejemplo a seguir. Su carácter, sabiduría y manera de vivir dejando una huella imborrable en mí, enseñándome a avanzar pese a las adversidades, a dar siempre lo mejor de mí y a no rendirme. A mi madre, María García Castrejón, quien en esta etapa ha sido un apoyo incondicional, velando siempre por mi bienestar. Gracias a ella por su respaldo económico cuando fue necesario y por sus palabras de aliento en los momentos de mayor dificultad.

A mi esposa, Claudia Yazmín Arce Ocampo, quien ha estado a mi lado durante todo este camino, compartiendo conmigo cada reto y motivándome constantemente, siendo un pilar fundamental en esta travesía.

Y, finalmente, a mi hija, mi pequeña princesa Vannia Janine Guzmán Arce, por su paciencia en aquellos momentos en los que no podíamos salir a pasear debido a las responsabilidades y el trabajo. Ella es y siempre será mi mayor motivación e inspiración para seguir creciendo en conocimientos y alcanzar nuevas metas.

Agradecimientos

Para iniciar esta sección quiero citar una porción bíblica con referente a Proverbios 16:3 donde dice “encomienda a Jehová tus obras, Y tus pensamientos serán afirmados”, parafraseando este texto es poner todo lo que uno haga en las manos de Dios, los planes terminarán siendo un éxito. Y quiero iniciar dando gracias a Dios por darme la vida hasta estos momentos y que él fue, es y será mi sustento en todo lo que realice, me permitió iniciar esta aventura donde había dudas y temor, sin embargo, me está permitiendo terminar con gran satisfacción, es por eso mi eterno agradecimiento a mi Dios.

Agradezco infinitamente a la Dra. Mónica Borunda Pacheco por todo su apoyo, motivación y exigencia durante el desarrollo de este trabajo, porque siempre estuvo ahí para motivarme y ayudarme en los momentos de dificultad académica.

Mi agradecimiento al Dr. Manuel Adam Medina, siempre tuvo palabras para motivarme y estuvo pendiente para disipar cualquier duda que se me presentara.

A mis revisoras la Dra. Ma. Guadalupe López López y la Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo, sus comentarios en las revisiones siempre fueron acertadas que me permitieron crecer en conocimiento y mejorar el trabajo.

Quiero agradecer también a mi esposa Claudia Yazmín Arce Ocampo por su apoyo durante este tiempo, en algunos momentos complicados, pero siempre estuvo allí para mí. También mi agradecimiento a mi hija Vannia Janine Guzmán Arce por su paciencia, comprensión y apoyo durante todo este tiempo, y que ella es un motivo e inspiración para terminar esta etapa de mi vida.

Agradezco infinitamente a mi madre María García Castrejón por su apoyo incondicional tanto moral, espiritual y económicamente, por todo su apoyo, siempre creyendo que podía terminar un nivel más académicamente. Gracias a mis hermanos Merari Guzmán, Israel Guzmán y Mario Guzmán que siempre están para mí, siempre brindándome el apoyo incondicionalmente. Así como a toda mi familia, cuñado, cuñadas y sobrinos.

A mis suegros también gracias por su apoyo, mi suegra Silva Ocampo por apoyarnos y siempre motivarnos a mejorar.

A mis amigos Arturo Ocampo, Leonardo Guerrero, Roosevelt Esteva, Evelyn Bahena, Eduardo Martínez, Dryden Estrada por su amistad y apoyo durante todo este tiempo que estuvimos conviviendo día a día.

En especial quiero agradecer al SECIHTI por haberme brindado el apoyo económico durante este periodo de estudio, sin el apoyo de la secretaría, no hubiera sido posible realizar este posgrado. Agradezco también al CENIDET por brindarme la oportunidad de realizar el programa de posgrado en sus instalaciones, brindando una buena calidad en las instalaciones, así como la humanidad entre su personal.

Y para terminar esta sección quiero agradecer a Dios por mi padre Jesús Guzmán Melgar quien ya no está con nosotros, pero quien llevo en mi vida todos los días, recordando quien fue y como fue en vida, una persona excepcional, recta, justa, comprometida en todo lo que realizaba quien siempre me marco el camino por donde ir, quien siempre me motivaba a mejorar y crecer en todos los aspectos de la vida.

Resumen

La creciente demanda energética y la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ han impulsado el uso de sistemas fotovoltaicos (SFV). Sin embargo, su diseño óptimo en entornos residenciales requiere ajustes precisos en la superficie de captación para maximizar la eficiencia y minimizar los costos. Por lo que se propone una metodología para optimizar el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica, desarrollando ecuaciones matemáticas y haciendo comparaciones de los resultados con la aplicación de algoritmos de optimización, como es el caso del algoritmo de Optimización por enjambre de partículas por sus siglas en ingles PSO utilizando el software MatLab y validando los resultados con el software PVsyst.

Se analizaron los datos reales obtenidos de los consumos energéticos de las tres viviendas (V1, V2 y V3), optimizando la superficie de captación para cada una de las viviendas, tomando en consideración datos reales de irradiancia y consumo energético, seccionando los días, entre semana (Weekday) y fin de semana (Weekend), tomando en consideración los hábitos y rutinas de los habitantes.

Los resultados obtenidos mediante el método discreto para la optimización de la superficie de captación, con respecto al costo de los equipos, son similares a los obtenidos por medio del algoritmo de optimización PSO, así como los resultados obtenidos mediante el software PVsyst.

Se demostró también en el análisis del costo nivelado de la energía (LCOE) que los costos de los equipos del sistema fotovoltaico son un factor importante en la toma de decisión al momento de adquirir los equipos, ya sea mediante la adquisición por internet o tiendas departamentales. Este trabajo aporta un marco metodológico replicable para el diseño de sistemas fotovoltaicos residenciales, equilibrando viabilidad técnica, económica y ambiental.

Abstract

The growing energy demand and the need to reduce CO₂ emissions have driven the adoption of photovoltaic systems (PV). However, their optimal design in residential settings requires precise adjustments to the collection surface to maximize efficiency and minimize costs. This study proposes a methodology to optimize the sizing of grid-connected photovoltaic systems by developing mathematical equations and comparing results through optimization algorithms, specifically the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, implemented in MATLAB, with validation performed in PVsyst software.

Real energy consumption data from three households (V1, V2, and V3) were analyzed to optimize the collection surface for each case. The study accounted for actual irradiance and energy consumption data, segmented into weekdays and weekends, while considering the inhabitants' habits and routines.

The results obtained through the discrete method for surface optimization (relative to equipment costs) aligned closely with those from the PSO algorithm, as well as with PVsyst simulations. Additionally, the Levelized Cost of Energy (LCOE) analysis demonstrated that PV system equipment costs significantly influence purchasing decisions, whether through online or retail channels.

This work provides a replicable methodological framework for residential PV system design, balancing technical, economic, and environmental feasibility.

Contenido

Contenido.....	i
Índice de figuras.....	iv
Índice de tablas.....	viii
Capítulo I. Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 General.....	2
1.1.2 Específicos.....	2
1.2 Metas.....	2
1.3 Justificación.....	2
1.4 Propuesta de solución.....	3
1.4.1 Planteamiento.....	3
1.4.2 Hipótesis.....	4
1.4.3 Alcance.....	4
1.4.4 Aportación.....	4
Capítulo II. Marco Teórico.....	5
2.1 Radiación Solar.....	5
2.2 Tecnología Fotovoltaica.....	7
2.3 Paneles Fotovoltaicos.....	13
2.4 Utilización de la energía en vivienda residencial.....	21
Capítulo III. Estado del Arte.....	27
3.1 Impacto del costo en implementación de SFV.....	30
3.2 Aplicación de técnicas de optimización en sistemas FV residenciales.....	31
Capítulo IV. Metodología.....	32

4.1. Estudio del recurso solar	32
4.2. Estudio de demanda energética en el sector residencial	33
4.3. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico (SFV)	36
4.4. Análisis de Costo	38
4.5. Optimización	38
4.5.1 Técnica de optimización por enjambre de partículas (PSO)	39
4.6. Validación del sistema	40
Capítulo V. Procedimientos para el diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico	41
5.1 Diseño del sistema fotovoltaico para los tres casos de estudio	41
5.2 Optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico aislado con toy model	42
5.3 Optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico aislado con datos de las viviendas	46
5.4. Optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red.....	46
Capítulo VI. Análisis y discusión de resultados	50
6.1 Análisis de los datos adquiridos de Energía en cada vivienda	50
6.1.1. Análisis de los datos adquiridos de la Energía, V1	50
6.1.2. Análisis de los datos adquiridos de Energía, V2	51
6.1.3. Análisis de los datos adquiridos de Energía, V3	52
6.2 Aplicación de la optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red para las tres viviendas.....	53
6.2.1 Caso de estudio - Vivienda 1.....	53
6.2.2 Caso de estudio - Vivienda 2.....	55
6.2.3 Caso de estudio - Vivienda 3.....	57

6.3 Resultados en MatLab aplicando la técnica de optimización PSO	60
6.4 Prueba y validación con PVSyst	61
6.5 Costo nivelado de la Energía (LCOE)	65
6.6 CO ₂ en función de la energía consumida en las viviendas	67
Capítulo VII. Conclusión y trabajos futuros	69
7.1 Conclusiones	69
7.2 Trabajos Futuros	70
Referencias	72

Índice de figuras

<i>Figura 2.0.1.1. Espectro electromagnético.</i>	6
<i>Figura 2.1.2. Irradiación solar promedio (kWh/m²/día) con base a un mes del año en Temixco [7].</i>	6
<i>Figura 2.1.3. Tipos de energía: Eléctrica, combustible químico y térmica [5].</i>	7
<i>Figura 2.0.2.1. Incidencia de fotones y conversión de electrones.</i>	8
<i>Figura 2.2.2. Átomo, formado por núcleo y electrones.</i>	8
<i>Figura 2.2.3. Interrelación de electrones de valencia y red cristalina.</i>	9
<i>Figura 2.2.4. Desplazamiento de Electrones.</i>	9
<i>Figura 2.2.5. Silicio dopado con fosforo (Tipo N).</i>	10
<i>Figura 2.2.6. Silicio dopado con Boro (Tipo P).</i>	10
<i>Figura 2.2.7. Generación de corriente.</i>	11
<i>Figura 2.2.8. Celda fotovoltaica.</i>	11
<i>Figura 2.2.9. Esquemático de una celda solar con parámetros eléctricos [9].</i>	12
<i>Figura 2.2.10. Eficiencia de células solares [10].</i>	13
<i>Figura 2.3.1. Panel Fotovoltaico.</i>	13
<i>Figura 2.3.2. Sistema Fotovoltaico interconectado a la Red Eléctrica (CFE).</i>	14
<i>Figura 2.3.3. Diagrama de bloques de un sistema fotovoltaico híbrido con batería e interconectado a la red eléctrica (CFE).</i>	14
<i>Figura 2.3.4. Diagrama esquemático de la conexión serie de celdas solares.</i>	15
<i>Figura 2.3.5. Diagrama esquemático de la conexión en paralelo de las celdas solares.</i>	15
<i>Figura 2.3.6. Configuración de conexión eléctrica entre módulo y carga. a) Conexión directa, b) Conexión a través de una batería de energía.</i>	17
<i>Figura 2.3.7. Acoplamiento directo entre un módulo fotovoltaico y un acumulador. a) diagrama esquemático del acoplamiento. b) Curva I-V típica de un módulo fotovoltaico de 36 celdas en serie.</i>	19
<i>Figura 2.3.8. Curva I-V, P-V.</i>	20
<i>Figura 2.3.9. Curva isopotencial sobre una curva I-V de un módulo fotovoltaico.</i>	20
<i>Figura 2.0.3.1. Tiempo de uso estimado diario de Equipos y electrodomésticos.</i>	22
<i>Figura 2.4.2. Distribución porcentual de viviendas particulares por condición disponibilidad de energía eléctrica, y viviendas habitadas con energía eléctrica y su distribución según tipo de fuente [13].</i>	22
<i>Figura 2.4.3. Porcentaje del uso de accesorios luminosos, tipo de accesorios luminoso y tipo de zona [13].</i>	23
<i>Figura 2.4.4. Distribución porcentual de viviendas particulares que usan refrigeradores concierto tipo de deshielo, sea automático, deshielo manual o deshielo semiautomático [13].</i>	23
<i>Figura 2.4.5. Distribución porcentual de vivienda particulares habitadas que usan refrigerador por tamaño del refrigerador según regiones climáticas [13].</i>	24

<i>Figura 2.4.6. Distribución porcentual de viviendas particulares habitadas por condición de uso de plancha y tipo de uso según tipo de localidad [13].</i>	24
<i>Figura 2.4.7. Distribución porcentual del número de ventiladores en uso en viviendas particulares habitadas y número de equipos por vivienda según el tipo de localidad [13].</i>	25
<i>Figura 2.4.8. Distribución porcentual de viviendas particulares habitadas en que usan ventiladores por tipo y su distribución porcentual según el tiempo de uso al día [13].</i>	25
<i>Figura 2.4.9. Número de equipos de aire acondicionado por región y el número de equipos instalados y tipo de aire acondicionado por vivienda [13].</i>	26
<i>Figura 2.4.10. Distribución porcentual de equipos de aire acondicionado en uso al día en viviendas particulares, según el tipo de equipo [13].</i>	26
<i>Figura 4.0.1.1. Irradiancia en un día soleado en Morelos [15].</i>	32
<i>Figura 4.1.2. Esquema de la sección del estudio del recurso solar.</i>	33
<i>Figura 4.2.1. Equipo de monitoreo para el consumo energético total de la vivienda, marca Emporia.</i>	34
<i>Figura 4.0.2.2. Sensor (TC) para medir el consumo de la vivienda y registrar en la nube [16].</i>	34
<i>Figura 4.2.3. Conexión del equipo Emporia en las fase del sistema eléctrico de cada una de las viviendas monofásicas [16].</i>	35
<i>Figura 4.2.4. a) Interfaz de la App de Emporia para visualizar los datos adquiridos o monitoreados del consumo energético, b) LA parte superior del interfaz donde se muestra la energía consumida pico de 15 min., y c) es la parte inferior del interfaz donde se muestra las opciones para visualizar el consumo energético.</i>	35
<i>Figura 4.2.5. Datos obtenidos con el equipo Emporia, con respecto al consumo energético de la vivienda 1 durante un año.</i>	36
<i>Figura 4.2.6. Diagrama de bloques, mostrando el seguimiento del proceso de estudio.</i>	36
<i>Figura 4.3.1. Sistema Fotovoltaico interconectado a la Red Eléctrica (CFE).</i>	37
<i>Figura 4.3.2. Diagrama de bloques de un sistema fotovoltaico híbrido con batería e interconectado a la red eléctrica (CFE).</i>	37
<i>Figura 4.3.3. Sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica, seleccionado con propósito de estudio.</i>	38
<i>Figura 4.5.1. Muestra los nodos validos en base a la nueva posición de la hormiga.</i>	39
<i>Figura 4.5.2. Muestra el comportamiento de las partículas en diferentes etapas del PSO [17].</i>	40
<i>Figura 5.2.1. Potencia generada por un sistema fotovoltaico, curva azul, y consumo energético característico de una vivienda, curva naranja. La diferencia entre la generación fotovoltaica y el consumo energético corresponde a las áreas coloreadas. A1, A2 y A3 generadas al amanecer, durante el día y al atardecer, coloreadas en verde, naranja y azul, respectivamente.</i>	43
<i>Figura 5.2.2. Secuencia de solución del problema de optimización.</i>	45

<i>Figura 5.3.1. Potencia generada por un sistema fotovoltaico, curva azul, y consumo energético característico del promedio de 3 viviendas, curva naranja.</i>	46
<i>Figura 5.4.1. Potencia generada por un sistema fotovoltaico, curva azul, y consumo energético característico de una vivienda, curva naranja.</i>	47
<i>Figura 6.1.1. Diagrama de caja y bigotes de los días de la semana de la V1.</i>	51
<i>Figura 6.1.2. Diagrama de caja y bigotes de los días de la semana de la V2.</i>	52
<i>Figura 6.1.3. Diagrama de caja y bigotes de los días de la semana de la V3.</i>	52
<i>Figura 6.2.1.1. Potencia generada (azul) y potencia consumida (naranja) por la Vivienda 1 con una irradiancia de 1000 W/m² para Weekday.</i>	54
<i>Figura 6.2.1.2. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red Vivienda 1.</i>	54
<i>Figura 6.2.1.3. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekday Vivienda 1 (gráfica de superficie).</i>	55
<i>Figura 6.2.1.4. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekend Vivienda 1 (gráfica de superficie).</i>	55
<i>Figura 6.2.2.1. Potencia generada y potencia consumida por la Vivienda 2 con una irradiancia de 1000 W/m² para Weekday.</i>	56
<i>Figura 6.2.2.2. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red, Vivienda 2.</i>	56
<i>Figura 6.2.2.3. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekday, Vivienda 2.</i>	57
<i>Figura 6.2.2.4. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekend, Vivienda 2.</i>	57
<i>Figura 6.2.3.1. Potencia generada y potencia consumida por la Vivienda 3 con una irradiancia de 1000 W/m² para weekday.</i>	58
<i>Figura 6.2.3.2. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red, Vivienda 3.</i>	58
<i>Figura 6.2.3.3. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekday, Vivienda 3.</i>	59
<i>Figura 6.2.3.4. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekend, Vivienda 3.</i>	59
<i>Figura 6.4.1.1. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico: a) Vivienda 1, b) Vivienda 2 y c) Vivienda 3.</i>	62
<i>Figura 6.4.1.2. Producción normalizada (por kWp): a) Potencia nomina Vivienda 1 de 550 Wp, b) Potencia nominal Vivienda 2 de 1100 Wp y c) para la Vivienda 3 una potencia nominal de 405 Wp.</i>	63
<i>Figura 6.4.1.3. Proporción de rendimiento (PR): a) Vivienda 1, b) Vivienda 2 y c) Vivienda 3.</i>	65

<i>Figura 7.1. Resultados obtenidos en la optimización de la superficie de captación para cada Vivienda, con distintas irradiancias.</i>	<i>70</i>
---	-----------

Índice de tablas

<i>Tabla 3.1. Artículos consultados en el estado del arte.</i>	27
<i>Tabla 4.2.1. Características de las viviendas.</i>	33
<i>Tabla 5.1.1. Dimensionado de las posibles configuraciones para cada una de las viviendas.</i>	41
<i>Tabla 5.4.1. Tarifa del consumo energético con base a CFE [47].</i>	47
<i>Tabla 6.1.1. Datos obtenidos en las gráficas de cajas y bigotes de las viviendas.</i>	53
<i>Tabla 6.2.3. Tabla comparativa de los resultados de la función objetivo con distinta irradiancia.</i>	59
<i>Tabla 6.3 Tabla comparativa de los resultados de la función objetivo con distinta irradiancia.</i>	60
<i>Tabla 6.4.1. Tabla de resultados de los sistemas fotovoltaicos.</i>	65
<i>Tabla 6.5.1. Resultados obtenidos.</i>	67
<i>Tabla 6.6.1. Factores de energía y su factor de emisión</i>	68
<i>Tabla 6.6.2. Valores obtenidos en el cálculo de la emisión de CO₂.</i>	68

Capítulo I. Introducción

La energía desempeña un papel fundamental en nuestra vida diaria, y durante mucho tiempo hemos dependido en gran medida de los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural para satisfacer nuestras necesidades en el hogar, la industria y el transporte. Sin embargo, estos recursos son finitos y su uso ha tenido un impacto significativo en el cambio climático.

El Acuerdo de París, un pacto internacional sobre el cambio climático fue adoptado por 196 países durante la COP21 en París el 12 de diciembre de 2015, entrando en vigor el 4 de noviembre de 2016. Su objetivo es limitar el aumento de la temperatura global a 2°C, con una meta más ambiciosa de 1.5°C. Este acuerdo está vinculado al crecimiento de la demanda energética, que aumentó un 0.52% de 2021 a 2022, pasando de 10,422.73 PJ a 10,477.17 PJ [1]. México se comprometió a que el 35% de la energía producida para el año 2024 y el 43% para el 2030 provenga de fuentes limpias. Estos compromisos, junto con metas adicionales como la reducción del 25% de los gases de efecto invernadero de vida corta y del 51% de las emisiones de carbono negro, necesitan ser respaldados por incentivos [2]. Sin embargo, se señaló que, en la actualidad, solo el 30% de la energía eléctrica generada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) proviene de fuentes limpias, y es probable que para finales de 2024 este porcentaje alcance el 32%, lo que supondría no cumplir con los objetivos establecidos en el Acuerdo de París firmado durante la Conferencia de las Partes (COP21) en 2015 [3].

Por otra parte, el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2023-2037, busca lograr los objetivos de generación de energía limpia en la nación.

El PRODESEN 2023-2037 refleja la urgencia del gobierno mexicano por cumplir con su compromiso de generar el 35% de la energía eléctrica a partir de fuentes limpias para 2024.

Por otra parte, México no ha aumentado su capacidad de generación renovable al ritmo exigido por las tendencias globales y sus compromisos [4]. Dentro de los puntos clave de la PRODESEN se encuentra el incremento de la generación de energías limpias.

Dado a lo anterior, con el objetivo de incentivar los sistemas fotovoltaicos (SFV) en el sector residencial. Se desarrolla para alinearse a los objetivos de PRODESEN.

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Diseño y optimización de un sistema fotovoltaico para el máximo aprovechamiento del recurso solar en una localidad en Morelos, utilizando datos medidos del recurso, generación y consumo.

1.1.2 Específicos

1. Recolectar y analizar datos del recurso solar en Morelos.
2. Evaluar el consumo energético en viviendas en Morelos.
3. Diseñar el sistema fotovoltaico.
4. Optimizar el sistema de generación de energía.
5. Evaluar la viabilidad económica y ambiental.
6. Realizar pruebas y validación.

1.2 Metas

1. Caracterizar el recurso solar en la localidad a lo largo del año.
2. Obtener los consumos de los equipos y electrodomésticos más demandantes en una vivienda residencial particular.
3. Obtener el consumo diario, mensual y anual de las viviendas residenciales particulares.
4. Determinar los paneles adecuados para una vivienda residencial particular con datos específicos.
5. Determinar el inversor adecuada para el resguardo de la energía a utilizar en la vivienda residencial particular con datos específicos.
6. Determinar la viabilidad económica y ambiental de la implementación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red.

1.3 Justificación

El Edo. de Morelos cuenta con un excelente recurso energético para cubrir las demandas energéticas. La energía solar es una fuente de energía renovable, gratuita, ilimitada

y no emite gases de efecto invernadero, por lo que al utilizar Sistemas Fotovoltaicos (SFV) contribuye a la lucha contra el cambio climático y reduce la contaminación del aire y agua. Adicionalmente reduce la dependencia a los combustibles fósiles. Sin embargo, al implementar los SFV, puede parecer inicialmente una inversión muy costosa, a largo plazo, la utilización de esta tecnología es una opción más económica debido a los costos del consumo energético de la red eléctrica, aún más si se cuenta con un almacenamiento de energía que permita a los usuarios aprovechar la energía producida, por la noche o en días nublados.

Si bien los SFV representan una inversión inicial significativa, su rentabilidad a largo plazo está comprobada, especialmente al considerar el creciente costo de la energía convencional. Sin embargo, un desafío crítico en su implementación es la superficie de captación disponible, que limita la capacidad instalada y encarece el proyecto cuando no se optimiza.

Este proyecto evolucionó desde un enfoque tradicional de SFV con almacenamiento hacia una optimización técnico-económica que maximiza la relación costo-beneficio al:

- Minimizar el área requerida sin comprometer la eficiencia energética, adaptándose a espacios urbanos o rurales con limitaciones de terreno.
- Reducir costos de instalación y componentes, seleccionando configuraciones que equilibren producción, consumo y presupuesto.
- Incrementar accesibilidad al hacer los SFV viables para usuarios con distintas capacidades de inversión y superficies disponibles.

1.4 Propuesta de solución

1.4.1 Planteamiento

Actualmente el aprovechamiento de las energías renovables en la sociedad es imperioso. En particular, Morelos cuenta con un excelente recurso solar, siendo el sector residencial un sector adecuado para su aprovechamiento. En este trabajo se propondrá la optimización de sistema fotovoltaico con relación al costo – superficie de captación, para satisfacer la demanda energética de una vivienda en el estado.

1.4.2 Hipótesis

Si se dimensiona y optimiza un sistema fotovoltaico en Morelos, considerando las restricciones de superficie, los costos del sistema y el perfil de consumo residencial, entonces será posible cubrir igual o más que el 60% de la demanda anual con un periodo de retorno de inversión menor a 10 años, demostrando que la energía solar es técnica y económicamente viable en la región.

1.4.3 Alcance

Este trabajo tiene como prioridad: Caracterizar el recurso solar en Morelos mediante datos de irradiación y horas pico solares, para evaluar el potencial de generación fotovoltaica. Cuantificar la demanda energética residencial a través de un monitoreo continuo del consumo (diario, semanal y mensual), utilizando registros del medidor eléctrico. Seleccionar un inversor y dimensionar un sistema fotovoltaico (SFV) óptimo que satisfaga la demanda identificada, garantizando eficiencia y viabilidad técnica-económica.

1.4.4 Aportación

Al realizar este trabajo se pretende construir en detalle el perfil de la demanda energética de una vivienda promedio en el estado de Morelos para diseñar un sistema fotovoltaico, a la medida de las necesidades energéticas de una vivienda unifamiliar, obteniendo los datos diarios a través de lectura en el medidor de una vivienda en particular, así también tener datos confiables de la irradiación solar de la localidad. Se realizará un traje a la medida de un sistema fotovoltaico, ya que el recurso solar y la demanda energética presentan variaciones a lo largo del día, semana, mes, y año, a diferencia de los sistemas fotovoltaicos que a la fecha la mayoría se realiza con datos promedios de esas variables energéticas.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1 Radiación Solar

La energía que proporciona la fuente natural de energía solar es bastante. El sol proporciona a la tierra 1.2×10^5 TW de energía radiante, por lo que supera cualquier otro recurso energético en disponibilidad y capacidad. El sol proporciona al año 3.78×10^{12} TJ de energía. Según Crabtree y Lewis [5], las reservas de petróleo recuperables de la tierra (3 billones de barriles) representan 1.7×10^{10} TJ de energía. Por lo que el sol suministra esta cantidad de energía en sólo 1.6 días.

Según la universidad de Oxford la energía utilizada global es de aproximadamente de 16×10^5 TWh por año, aproximadamente 55.76×10^8 TJ/año, por lo que el sol podría cubrir la energía en sólo una hora con 20 minutos.

Para la utilización de la energía solar, esta debe ser convertida en otras formas de energía, como lo es la energía eléctrica y la energía térmica. Sin embargo, las limitaciones en la conversión de la energía solar son un reto para la eficiencia de las tecnologías existentes y la capacidad para producir de manera sostenible.

Pero ¿Qué es la radiación solar?

Es una radiación electromagnética que se compone por la luz infrarroja, visible y ultravioleta, sus rangos van desde:

- Infrarrojo (52 – 55% $\lambda > 700$ nm)
- Visible (42 – 43% $400 < \lambda < 700$ nm)
- Ultravioleta (3 – 5% $100 < \lambda < 400$ nm)

La radiación solar cerca de la superficie terrestre está en el rango de λ 290 – 2500 nm. La energía unitaria (Quantum) de la radiación electromagnética – fotón es $E=h\nu$, donde E es la energía del fotón (en julios, J), h es la constante de Plank (6.626×10^{-34} J*s) y ν es la frecuencia de la radiación (Hertz, Hz), el cual es un término más conveniente en el mecanismo de la conversión solar.

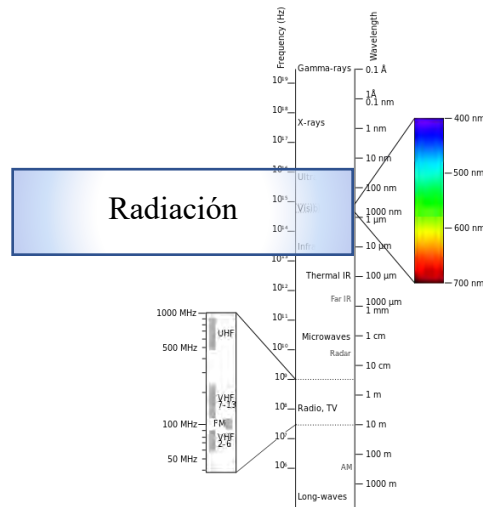


Figura 2.0.1.1. Espectro electromagnético.

En la [Figura 2.1.1](#) se muestran los tipos de radiación electromagnética [6] a lo largo de la escala de longitud de onda y frecuencia de radio. Cuando la radiación del sol llega a la tierra consta del (52 – 55%) de la radiación infrarroja, (42 – 43%) visible y (3 – 5%) ultravioleta, esto cubre el rango de la longitud de onda desde 290 nm a 2.5 μm .

Otro aspecto para considerar es la constante solar, esta es la energía solar que incide perpendicularmente en la cima de la atmosfera terrestre a una distancia media, entre el sol y la tierra, su magnitud es representada con W/m^2 , y es aproximadamente de 1367.7 W/m^2 . Conocer la constante solar nos permite determinar la cantidad de energía que se puede generar a través de los paneles solares en un determinado lugar, día y hora (ver [Figura 2.1.2](#)).

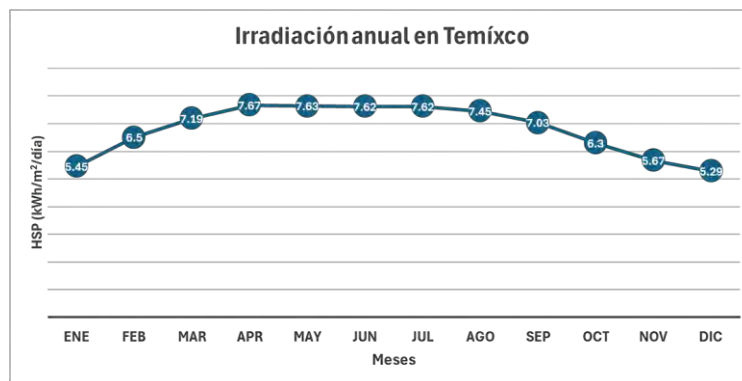


Figura 2.1.2. Irradiación solar promedio ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) con base a un mes del año en Temixco [7].

La luz solar se puede convertir en electricidad mediante la excitación de electrones en una célula solar. De igual manera, se puede producir combustible químico mediante la fotosíntesis, este se puede apreciar en las plantas, pero también se puede realizar la fotosíntesis artificial en sistemas desarrollado por el ser humano. La luz solar que es concentrado o no se concentra puede producir calor, para un uso directo o para convertir en electricidad.

En la [Figura 2.1.3](#) se muestra la fotosíntesis, los fotones solares se convierten naturalmente en tres tipos de energías: electricidad, combustible y calor, que se relacionan a la forma de energías existentes.

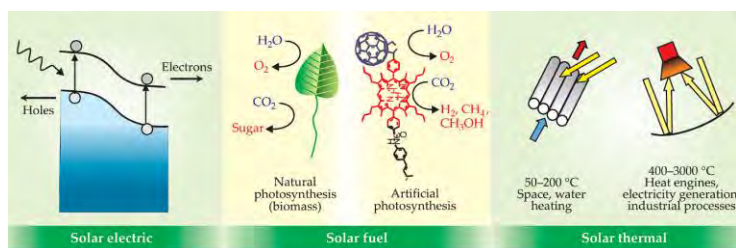


Figura 2.1.3. Tipos de energía: Eléctrica, combustible químico y térmica [5].

La energía solar satisface una pequeña parte de la necesidad energética global, por lo que representa el 0.015%. La biomasa representa el 11% aproximado del combustible mundial.

La eficiencia es una medida importante en la conversión de la energía. Es utilizada para evaluar y comparar diverso método y dispositivos en cuestión del rendimiento técnico, y está relacionado con el costo de la tecnología.

2.2 Tecnología Fotovoltaica

Otra de las formas que puede utilizar el ser humano la energía solar es mediante la conversión directa de la luz solar en electricidad con el efecto fotovoltaico o fotoeléctrico.

El efecto fotovoltaico se realiza en una célula hecha con materiales semiconductores, en donde absorbe la luz solar y es allí donde se genera la energía eléctrica en corriente directa,

sin haber ningún otro proceso en medio. La celda solar es la parte mínima de la conversión de luz solar en electricidad.

El proceso de la generación de electricidad se puede conseguir mediante algunos materiales que tiene ciertas propiedades de absorber fotones y emitir electrones (ver [Figura 2.2.1](#)), el silicio es uno de los materiales más utilizados en la actualidad.

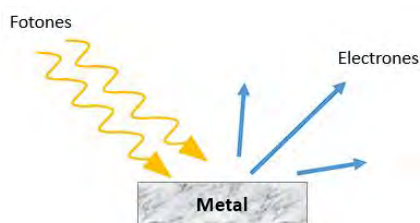


Figura 2.0.2.1. Incidencia de fotones y conversión de electrones.

Para una mejor comprensión de este efecto, se describe el comportamiento de los átomos que están compuestos de dos partes: el núcleo y los electrones. El núcleo está formado por una carga positiva, mientras los electrones son cargas negativas (ver [Figura 2.2.2](#)).

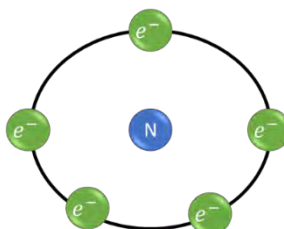


Figura 2.2.2. Átomo, formado por núcleo y electrones.

Los electrones giran alrededor del núcleo en diferentes bandas de energía, compensando la carga positiva, por lo que se forma un conjunto estable y eléctricamente neutro. Sin embargo, al utilizar la última capa, los electrones reciben el nombre de electrones de valencia y estos se interrelacionan con otras capas similares y forman una red cristalina (ver [Figura 2.2.3](#)).

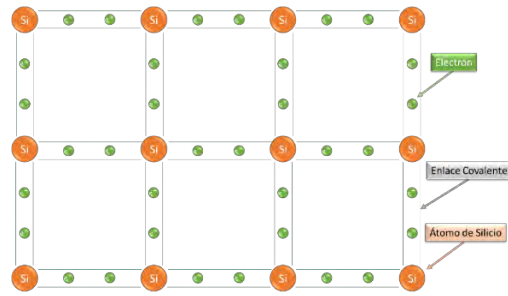


Figura 2.2.3. Interrelación de electrones de valencia y red cristalina.

Sin embargo, existen tres tipos de materiales: los conductores, los semiconductores y los aislantes. Los conductores son aquellos materiales en el cual los electrones fluyen libres de un punto a otro con un pequeño agente externo, los semiconductores son materiales en los cuales solo necesita un poco energía para que se conviertan en conductores y los materiales aislantes son aquellos que necesitan una energía muy grande para poder mover los electrones de valencia.

Es por lo que en las células fotovoltaicas se utilizan los semiconductores, cuando la luz solar incide en el material semiconductor, se rompen los enlaces entre el núcleo y los electrones de valencia, estos electrones quedan libres y circulan por el semiconductor, a los espacios que dejan los electrones que se liberaron se les conoce como huecos, estos tienen el mismo valor que los electrones, pero con signo contrario, esto quiere decir que con carga eléctrica positivas (ver [Figura 2.2.4](#)).

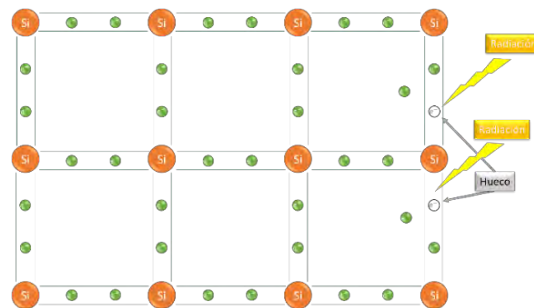


Figura 2.2.4. Desplazamiento de Electrones.

Al liberar los electrones y formarse los huecos por la radiación, estos tienden a recombinarse perdiendo su actividad, debido a esto se crea en el interior del semiconductor

un campo eléctrico para aprovechar la libertad de los electrones y generar una corriente eléctrica.

Como antes mencionado el material más utilizado en la producción de las células fotovoltaicas es el silicio, que está construido por cuatro electrones de valencia, por lo que, para crear un campo eléctrico, se hace la unión de dos regiones de silicio tratadas químicamente, a este se le denomina unión “p-n”.

Para obtener un semiconductor tipo “n”, se sustituye algunos átomos de silicio por átomos de fósforo que tiene cinco electrones de valencia. Esto se puede lograr debido a que solo se necesitan cuatro electrones de valencia para formar los enlaces con los átomos contiguos, por lo que queda un electrón libre, ver [Figura 2.2.5](#).

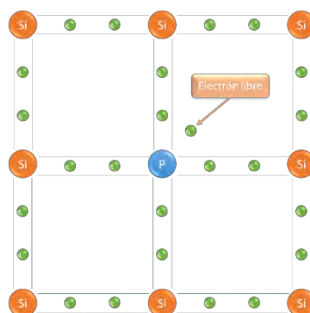


Figura 2.2.5. Silicio dopado con fósforo (Tipo N).

Sin embargo, para conseguir un semiconductor tipo “p”, se sustituye algunos átomos de silicio por átomos de boro, ya que estos tienen 3 electrones de valencia, a diferencia de los semiconductores tipo “n”, en esta configuración queda un hueco, debido a la cantidad de electrones del boro (ver [Figura 2.2.6](#)).

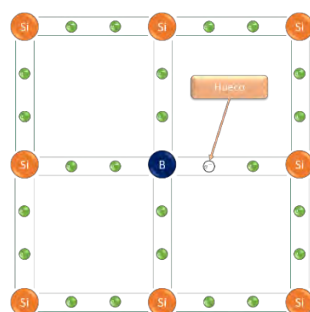


Figura 2.2.6. Silicio dopado con Boro (Tipo P).

Para conseguir una unión “p-n”, se pone en contacto una superficie del semiconductor tipo “p” con una del semiconductor tipo “n”. Al realizar esta unión los electrones libres que se encuentran en el material semiconductor tipo “n”, tienden a ocupar los huecos que se encuentran en el semiconductor tipo “p” y de forma contraria, creando así un campo eléctrico. El campo eléctrico se va fortaleciendo a medida que los electrones y los huecos continúan en movimiento. Este proceso continúa hasta que no se puedan intercambiar los electrones y los huecos, por lo que se consigue un campo eléctrico permanente, sin la ayuda de un campo eléctrico externo [8].

La generación de la corriente se produce cuando la radiación de la luz del sol, inciden en la zona “n”, y la energía de los fotones se transmiten a los electrones, quedando libres e incrementando la carga negativa de la zona “n” y se aumenta la diferencia de potencial U_{OC} (ver [Figura 2.2.7](#)).

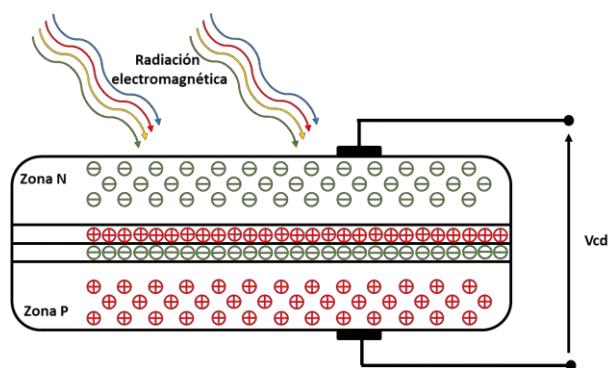


Figura 2.2.7. Generación de corriente.

Para generar mayor diferencial de potencial en el aprovechamiento de la luz solar se hace una configuración de varias células fotovoltaicas interconectadas en serie ([Figura 2.2.8](#)).

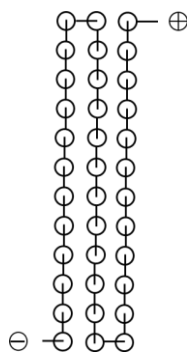


Figura 2.2.8. Celda fotovoltaica.

Las características eléctricas de las celdas solares están estandarizadas internacionalmente con las siguientes condiciones.

1. Irradiancia de $1,000 \text{ W/m}^2$
2. $G_p = 1.0 \text{ kW/m}^2 = 100 \text{ mW/cm}^2$
3. Espectro de la Radiación Solar a una Masa de Aire AM1.5
4. Temperatura de operación a 25°C

En la [Figura 2.2.9](#) se muestra un esquema de los parámetros eléctricos de una celda solar.

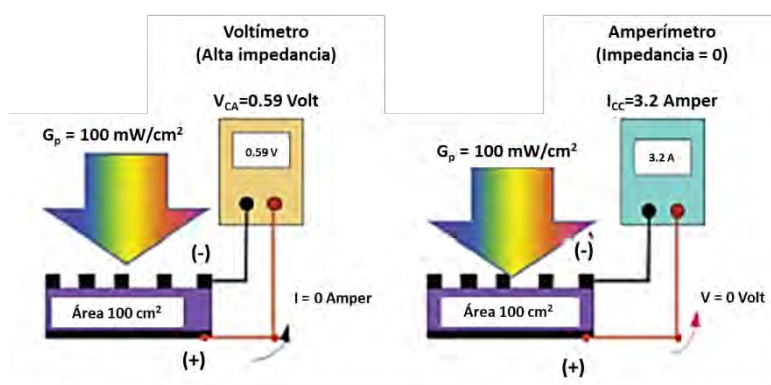


Figura 2.2.9. Esquemático de una celda solar con parámetros eléctricos [9].

La energía solar se puede aprovechar como energía solar térmica y energía fotovoltaica. La energía solar térmica aprovecha la energía solar para generar calor, mediante los colectores solares que absorben la radiación solar y la convierten en calor, esta se utiliza para calentar agua, aire u otro fluido caloportador. La energía solar fotovoltaica se aprovecha para generar electricidad mediante paneles fotovoltaicos. Los principales paneles fotovoltaicos son los monocristalinos y los policristalinos, sin embargo, se cuenta con paneles fotovoltaicos de capa fina, bifaciales y orgánicos. Los paneles monocristalinos, a diferencia de los policristalinos, tienen una eficiencia y una vida útil mayor, tienen un color negro, uniforme, son los más usados en viviendas, y son hechos de silicio. Los paneles solares policristalinos también son hechos con silicio, pero el proceso de fabricación es menos exhaustivo, aunque su rendimiento es más limitado, y su costo es bajo, a comparación de los monocristalinos, por lo que son una buena opción cuando no se cuenta con los recursos económicos.

En el transcurso de los años han surgido tecnologías para el aprovechamiento de la energía fotovoltaica. En la [Figura 2.2.10](#) se muestra cómo ha evolucionado la eficiencia alcanzada en las células solares desde su inicio en los años 70s.

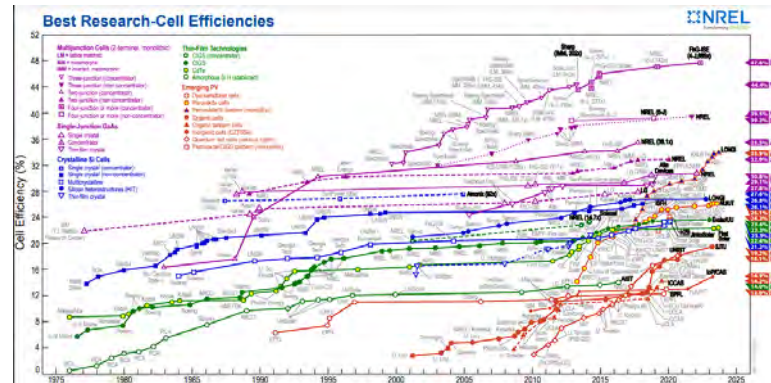


Figura 2.2.10. Eficiencia de células solares [10].

Se puede observar en la [Figura 2.2.10](#) que la mayoría de las células muestran una mejor eficiencia al transcurso de los años, por lo que se puede apreciar que las celdas de 4 uniones son los que han mostrado una mejor eficiencia, alcanzando una eficiencia del 47.6%. Sin embargo, los paneles fotovoltaicos monocristalinos de silicio llegan a alcanzar eficiencias de hasta 27.6%.

2.3 Paneles Fotovoltaicos

Los arreglos típicos de paneles fotovoltaicos están contruidos con módulos de 36 celdas fotovoltaicas generando un voltaje de corriente directa de 12 a 15 V con una corriente aproximada de 4 A. (Ver [Figura 2.3.1](#)).

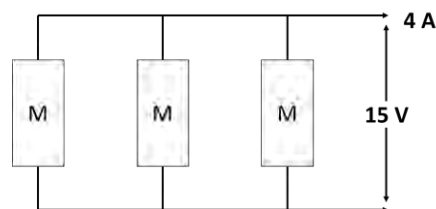


Figura 2.3.1. Panel Fotovoltaico.

Los sistemas fotovoltaicos tienen configuraciones para la satisfacción de la carga de dicho lugar, sin embargo existen diferentes tipos de configuraciones de sistemas, por ejemplo están los sistemas fotovoltaicos de acoplamiento directo, sistemas interconectados a la red eléctrica ([Figura 2.3.2](#)) y los sistemas híbridos conectados [11].

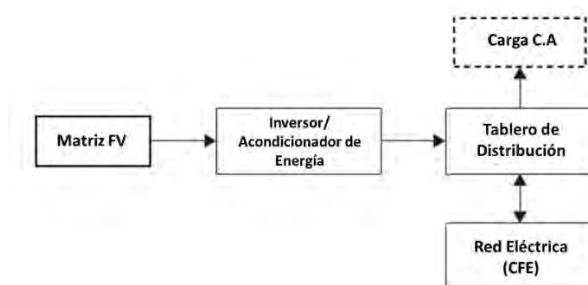


Figura 2.3.2. Sistema Fotovoltaico interconectado a la Red Eléctrica (CFE).

También están los sistemas fotovoltaicos híbridos con baterías e interconectados a la red Eléctrica, en este tipo de sistema se emplean más de dos generadores de energías o suministradores de energía a la carga de CA. En la [Figura 2.3.3](#) se muestra un diagrama esquemático de un sistema híbrido.

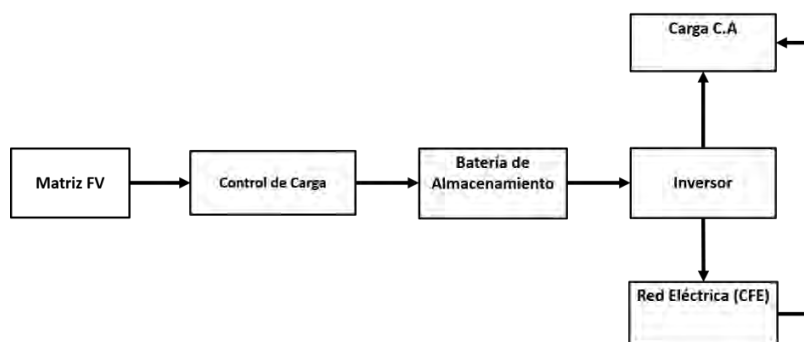


Figura 2.3.3. Diagrama de bloques de un sistema fotovoltaico híbrido con batería e interconectado a la red eléctrica (CFE).

En los módulos fotovoltaicos la corriente y el voltaje generado son muy pequeño para una aplicación práctica, es por eso, que para una aplicación se debe de fabricar nuevas estructuras con base a la unidad mínima de conversión. La interconexión de celdas solares es necesaria para incrementar el voltaje como la corriente generada. Esta interconexión es conocida como Módulo Fotovoltaico (MFV). Las celdas solares se comportan como fuentes de voltaje y corriente. Con base a las leyes de Kirchhoff para circuitos eléctricos, si hay

fuentes de voltaje con las mismas características y se interconectan en series o paralelo, se tiene que:

- Para las conexiones en serie entre fuentes de voltaje con las mismas características, el voltaje se suma y la corriente es la misma en el circuito.
- Para las conexiones en paralelo entre fuentes de voltaje, la corriente incrementa o se suman y el voltaje permanece constante.

Para la conexión en serie de las celdas idénticas, si se conectan N cantidad de celdas el Voltaje de salida es igual al número de celdas por el voltaje que genera cada celda, como se muestra en la [Figura 2.3.4](#) [9].

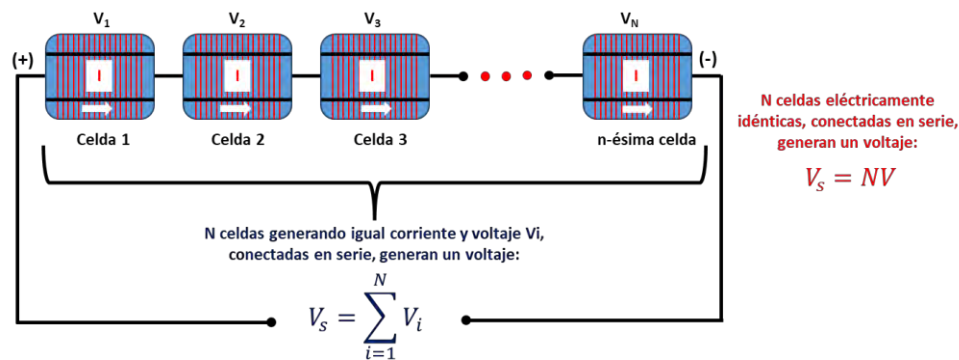


Figura 2.3.4. Diagrama esquemático de la conexión serie de celdas solares.

Para una conexión en paralelo de las celdas solares, se genera la suma de las corrientes generadas por las celdas solares, y el voltaje permanece constante. En la [Figura 2.3.5](#) se muestra donde la corriente de salida (I_s) es el resultado de las sumas de las corrientes generadas por las celdas solares. Por lo tanto la corriente de salida (I_s) es igual al número de celdas solares por la corriente generada por cada celda [9].

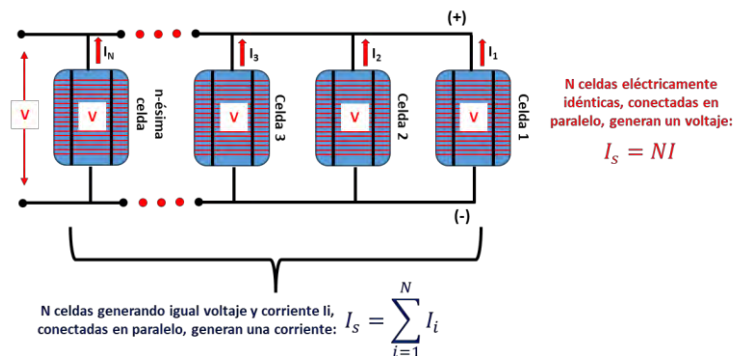


Figura 2.3.5. Diagrama esquemático de la conexión en paralelo de las celdas solares.

En algunas condiciones si se tienen conectado en serie una N cantidad de celdas solares y una de estas está dañada por fábrica o es afectada por una sombra y sea cubierta parcial o totalmente, la celda afectada es considerada como “celda mala”, bajo estas condiciones se considera como corto circuito (la carga eléctrica a conectar tiene una resistencia de carga RL cercana a cero), la celda afectada se comportará como inversamente polarizada, esto quiere decir que será parecida a la suma de los voltajes de las celdas restantes, y se comportará como un elemento resistivo y la potencia que disipara es igual al producto de la corriente que es producida por las celdas, y multiplicado por el voltaje de polarización. Este efecto es considerado como punto caliente y la corriente de la conexión en serie estará controlada por la celda mala, y su magnitud será inferior a la de las celdas buenas.

En caso de una conexión en paralelo de las celdas solares y una de ellas genera un voltaje inferior a las demás, esto debido a un defecto de fábrica o como en el anterior caso, por sombra parcial o cubierta totalmente, es considerada de igual forma “celda mala”, por lo tanto se comportara como un circuito abierto (la carga eléctrica a conectar tiene una resistencia de carga RL muy grande), esta celda se polarizará inversamente y circulara una corriente de retorno que será igual a la suma de las corrientes de las celdas restantes. Esto hará que la celda disipe una potencia que es el producto del voltaje y la corriente de retorno. Si la corriente de retorno es mayor a la ampacidad de la celda, ésta se quemará.

Para la disminución de los efectos de desacoplamiento eléctrico de las celdas solares los fabricantes han introducido caminos de alivio conocidos como “by pass”, esto para evitar la introducción de voltaje o corriente en una celda de menor eficiencia, que están constituidos de diodos rectificadores.

Para la solución de los casos anteriores se utilizan, por ejemplo, un diodo para reducir los efectos de la polaridad invertida en celdas no idénticas conectadas en serie, esto consiste en conectar un diodo en paralelo con la celda mala para permitir el paso de la corriente, sin que se vea reducida la corriente de la celda mala, a este diodo recibe el nombre de diodo de paso.

En cambio, para el caso de la conexión en paralelo, se conecta un diodo en serie con la celda mala para evitar inyectar la corriente en polaridad invertida. El diodo bloquea dicha corriente, este diodo recibe el nombre de diodo de bloqueo.

Para la conexión de diodos a nivel de celdas no es muy práctico, por lo que se debe hacer a nivel de módulo fotovoltaico.

Cuando los módulos fotovoltaicos están integrados por las celdas solares con características idénticas conectadas en serie, la Potencia Máxima (P_{MP}) que pueden generar, está determinada por la suma de la potencia máxima de cada una de las celdas, a su vez estas dependen del área de la celda.

En la actualidad hay una variedad de potencias de los módulos solares que van desde los 250 W hasta 550 W aplicados en el sector residencial, conteniendo celdas de 18, 36, 54, 60, 72, 80 y 90 conectadas en serie. El contenido de las celdas no ha sido al azar, esto ha dependido de la aplicación de la tecnología fotovoltaica.

En los inicios de la aplicación fotovoltaica entre los 70's y 90's, estaba enfocada para zonas rurales, con sistemas híbridos de almacenamiento electroquímico (baterías tipo automotriz) de plomo-ácido a un voltaje de 12 V nominales, así como para bombeo fotovoltaico. Y con la aparición de los acondicionadores de potencia para interconectar a la red, la aplicación para la zona urbana no se hizo esperar.

En la [Figura 2.3.6](#) se muestra un diagrama a bloques de dos posibles configuraciones de acoplamiento de un módulo a una carga eléctrica.

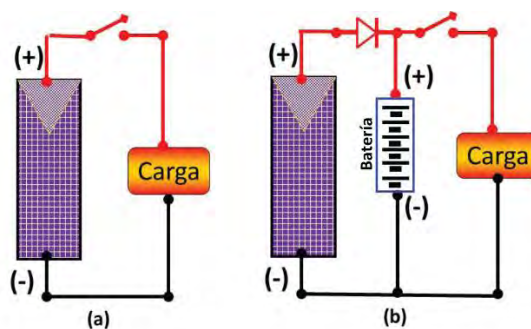


Figura 2.3.6. Configuración de conexión eléctrica entre módulo y carga. a) Conexión directa, b) Conexión a través de una batería de energía.

En el caso (a) el módulo fotovoltaico debe generar el voltaje mínimo necesario para que la carga opere. Esto quiere decir que las características eléctricas de la carga que requiere cierto voltaje es la que define el número de celdas del módulo. Lo ideal es que se realice en el punto de máxima potencia de generación del módulo fotovoltaico. Por ejemplo, si una

carga tiene un voltaje nominal de 15 V, éste necesitará un módulo que genere en el punto de máxima potencia el mismo voltaje. Pero si la carga requiere 30 V nominal, entonces se necesitarán dos módulos fotovoltaicos conectados en serie. En esta conexión directa módulo fotovoltaico-carga es la más simple, las condiciones son: mientras hay sol, el módulo fotovoltaico genera electricidad y la carga opera, pero si no hay sol, el módulo fotovoltaico no genera electricidad y la carga no opera.

En el caso (b) es una conexión entre el módulo fotovoltaico, batería y carga. Como bien se sabe los módulos fotovoltaicos generan electricidad mientras hay luz solar, sin embargo, por las noches no hay producción de energía, es por eso, que es necesario almacenar la energía producida para ser usada durante la noche, en lugares aislados.

Gracias a los avances tecnológicos en baterías o acumuladores la celda electroquímica de plomo-ácido es de alta diseminación mundial debido a la industria automotriz y están formadas por placas de plomo, bióxido de plomo, un electrolito formado por ácido sulfúrico al 37% y un contenedor plástico. El voltaje nominal de las celdas cuando están cargadas es de 2V, a circuito abierto de 2.12V, y cuando están descargadas es de 1.98 V. Para formar una batería de 12V se requieren seis celdas conectadas en serie para obtener 12V. Para la capacidad de almacenamiento de energía es proporcional al número de placas en cada celda.

Para baterías tipo automotriz el voltaje nominal es de 12V, pero el voltaje de carga máxima recomendada es de 15.24 V. Si la carga es lenta, el voltaje final de carga máxima es de 14.7 V, siendo el voltaje final de descarga en una batería de 11.4 V.

Con el objetivo de satisfacer los voltajes de carga en una batería, los fabricantes de celdas solares han decidido construir los módulos fotovoltaicos con 36 celdas en serie, esto considerando el voltaje de la celda y la magnitud de la corriente. Siendo que las celdas solares de silicio comprenden entre el rango de 0.454 a 0.51V, con fines didácticos que cada celda genera un voltaje máximo de 0.5 V. Si se requiere un voltaje para cargar una batería de 12V nominales, que requiere un voltaje de carga de 14.7 V, el módulo fotovoltaico debe generar en su punto de máxima potencia un voltaje de 15 V, por lo que se requiere un mínimo de 30 celdas conectadas en serie ($0.5 \text{ V} \times 30 = 15 \text{ V}$).

Si se considera una irradiancia constante, la batería al inicio de la carga tratará de sacar la máxima corriente, iniciando a un voltaje de 11.4 V. Conforme se va acumulando la corriente, el voltaje se incrementa, esto hace que la corriente de inyección disminuya. Para

garantizar la plena carga de la batería, el acumulador se acoplará en puntos cercanos al voltaje máximo y la corriente se reducirá conforme la batería alcanza su máximo voltaje de carga. Debido a las pérdidas de potencias por temperatura, cableado y circuitos de protección los fabricantes de módulos consideran que los módulos de 30 celdas no son capaces de llenar al 100% a una batería, por lo que el número de celdas optimas es de 36.

En la [Figura 2.3.7](#) inciso (a) se muestra un diagrama esquemático del acoplamiento directo entre un módulo fotovoltaico y un acumulador, en el inciso (b) se muestra la curva característica I-V de un módulo fotovoltaico de 36 celdas con una irradiancia pico a diferentes temperaturas. El acoplamiento se realizó con un voltaje de 11.2 V, que es el voltaje de descarga hasta 15.4 V voltaje de carga completa.

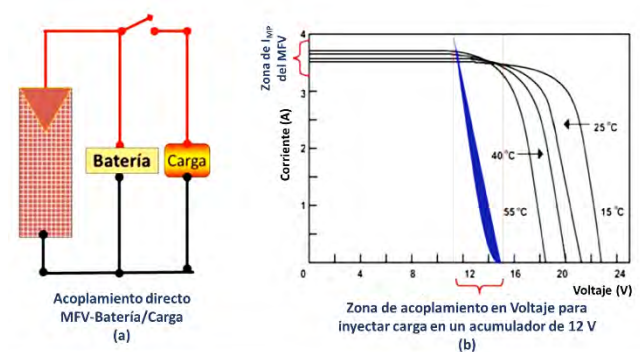


Figura 2.3.7. Acoplamiento directo entre un módulo fotovoltaico y un acumulador. a) diagrama esquemático del acoplamiento. b) Curva I-V típica de un módulo fotovoltaico de 36 celdas en serie.

Los módulos fotovoltaicos pretenden tener una compactación máxima, la forma geométrica de los módulos usada por los fabricantes es rectangular, teniendo 3 columnas de 12 filas o 4 columnas y 9 renglones, para la carga de una batería de 12 V nominales, se ocupan módulos fotovoltaicos de 36 celdas con diferentes potencias.

En la actualidad comercialmente los módulos fotovoltaicos tienen 54, 60, 72, 80, 96 y hasta 120 celdas conectadas en serie o conexión mixtas (serie –paralelo). Para aplicación doméstica, comerciales e industrial los módulos con mayor demanda son los de 60 celdas conectas en serie y para granjas solares o plantas de Generación eléctrica Fotovoltaica de gran escala son de 72 celdas conectadas en serie.

El comportamiento eléctrico de los módulos está dado por las curvas de corriente – Voltaje o potencia – voltaje. La [Figura 2.3.8](#) muestra las curvas I-V, P-V, para un módulo fotovoltaico típico, bajo las condiciones estándares de prueba 1000 W/m^2 , 25°C , AM 1.5, en el que se puede identificar los parámetros eléctricos de un módulo fotovoltaico.

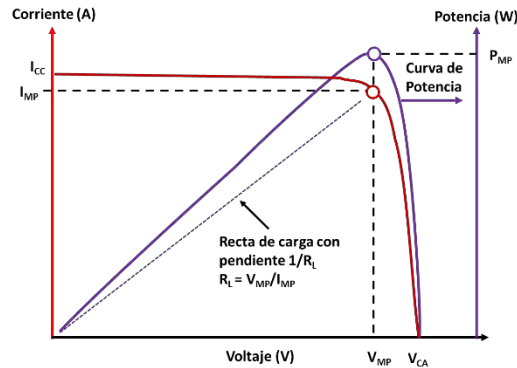


Figura 2.3.8. Curva I-V, P-V.

Donde V_{MP} es el voltaje máximo, P_{MP} es la potencia máxima, cuando la irradiancia es de 1000 W/m^2 recibe el nombre de potencia pico (Watts pico, W_p) del módulo.

La potencia del módulo es la potencia nominal con la que se identifican los módulos en su venta. Esto quiere decir que, si el módulo especifica que es de 50 Wp , significa que entrega 50 W a una irradiancia de 1000 W/m^2 . La potencia pico está definida por la corriente (I_{MP}) y voltaje (V_{MP}), a través de la Ley de Ohm, $P_p = (V_{MP} * I_{MP})$. En la [Figura 2.3.9](#) se muestra un conjunto de curvas de igual potencia ($I * V = \text{constante}$) que interceptan a la curva I-V en dos puntos, definiendo una resistencia de carga.

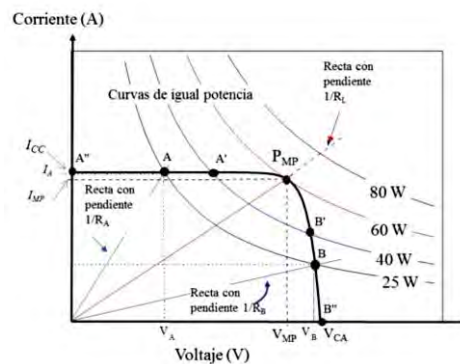


Figura 2.3.9. Curva isotencial sobre una curva I-V de un módulo fotovoltaico.

En los puntos de intersección en la curva de potencia y la curva I-V los puntos A y B con una potencia de 25 W y 40 W, se tiene un acoplamiento que no corresponde al punto de máxima potencia, por lo que el módulo opera lejos del punto de máxima potencia y la potencia P_{OP} se reduce significativamente, por lo que se tendrá pérdidas de energía. Con base a lo anterior, se puede establecer el rendimiento R, como: $R = P_{OP}/P_{MP}$. Esto se puede determinar que habrá dos valores de resistencias, en la que la celda entregará la misma potencia.

2.4 Utilización de la energía en vivienda residencial

La utilización de la energía en las casas habitación siempre ha sido un factor importante, con los avances tecnológicos ha facilitado los trabajos domésticos, desde hacer simplemente una salsa que anteriormente se hacía a mano con molcajete. En la actualidad se hace con mayor rapidez y sin mucho esfuerzo humano, con electrodoméstico (licuadora). El mantener los alimentos frescos y conservarlos por mayor tiempo, el refrigerador es un componente de línea blanca indispensable en una casa habitación, sin su aplicación, muchos de los alimentos se descompondrían en muy poco tiempo, más en los meses de mayor calor, como lo son los meses de abril y mayo. Así como los ejemplos anteriores, más electrodomésticos y equipos eléctricos han facilitado la vida cotidiana del ser humano en el hogar.

Es por eso, que la energía eléctrica es fundamental para la utilización de herramientas y equipos en los hogares. Como se muestra en la [Figura 2.4.1](#) se realizó una comparación con tiempos aproximados de algunos equipos y electrodomésticos que se utilizan a diario en las viviendas.

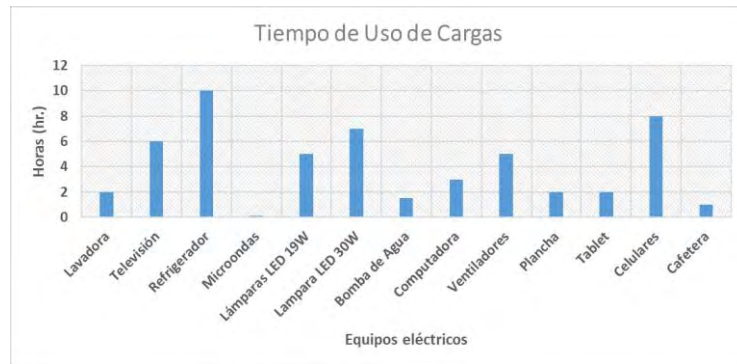


Figura 2.0.3.1. Tiempo de uso estimado diario de Equipos y electrodomésticos.

Con base a la norma oficial mexicana NOM-015 [12], se deben tener algunas consideraciones para la colocación del electrodoméstico como es el refrigerador, por ejemplo una cierta distancia de la parrilla del refrigerador hacia la pared, como mínimo una distancia de 51 mm, preferentemente a una distancia 100 mm y a los lados 50 mm, pero esto dependerá del modelo y del fabricante del equipo, otra de las características para un ahorro significativo, es que no incida los rayos solares directos al refrigerador, estar retirado de otra fuente de calor, como es la estufa. Esto nos permite tener en óptimas condiciones el refrigerador y presentar un ahorro eléctrico.

En el 2018 la Encuesta Nacional de Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares [13], generó información estadística que permite conocer los patrones de consumo energético de las viviendas en México por región [13]. Se determinó que el 99% de las viviendas habitadas del país tienen electricidad y un 0.25 % cuentan con una de fuente solar y otra minoría cuenta con sistemas bidireccional o híbridos, esto quiere decir que cuenta con sistema solar y conexión a la red eléctrica pública (ver [Figura 2.4.2](#)).



Figura 2.4.2. Distribución porcentual de viviendas particulares por condición disponibilidad de energía eléctrica, y viviendas habitadas con energía eléctrica y su distribución según tipo de fuente [13].

De igual manera se realizó un estudio de luminarias en viviendas del país, en el que hay un registro de 226.4 millones de accesorios luminosos, siendo el 84% lámparas fluorescentes o tecnología tipo LED. Sin embargo, en las localidades menores a 15 mil habitantes, es decir zonas rurales, el 30% de lámparas luminosas, son focos tipo incandescentes y la tecnología LED apenas se incorpora, en la [Figura 2.4.3](#), se muestra la cantidad de focos, el número de tipo de accesorio luminoso y el tipo de localidad [13].



Figura 2.4.3. Porcentaje del uso de accesorios luminosos, tipo de accesorios luminoso y tipo de zona [13].

Otro de los equipos más utilizados en las viviendas son los refrigeradores, en el país se identificaron aproximadamente 28.9 millones en uso [13].

Los refrigeradores eran equipos de consumo de energía elevado, sin embargo, han tenido una mejora en su eficiencia al transcurso de los años. En la Figura 3.4.4, se muestran los porcentajes de los diferentes tipos de refrigeradores, de los que se utilizan en los hogares: los refrigeradores con deshielo automático, los de deshielo manual, y los de deshielo semiautomático, en la [Figura 2.4.4](#), se puede apreciar que los más comunes son los refrigeradores más recientes con deshielo automático.

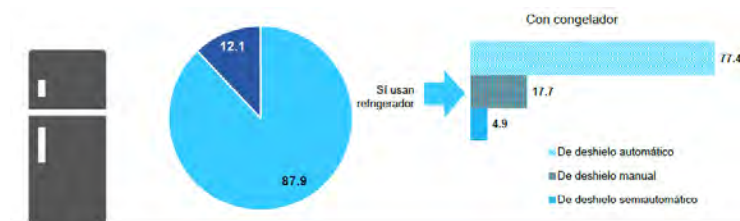


Figura 2.4.4. Distribución porcentual de viviendas particulares que usan refrigeradores concierto tipo de deshielo, sea automático, deshielo manual o deshielo semiautomático [13].

En la [Figura 2.4.5](#), se muestra el tamaño del refrigerador con respecto al tipo de región, sea cálido extremo, templado o tropical. Esta información nos ayuda a conocer estadísticamente cual es el porcentaje de la cantidad de equipos que trabajan más tiempo durante el día, recordando que el consumo de un refrigerador depende de varios factores como lo es la distancia entre paredes, no estar directamente a la radiación del sol, las veces de apertura del equipo, la temperatura exterior, estas características influyen en la energía de consumo de un refrigerador.

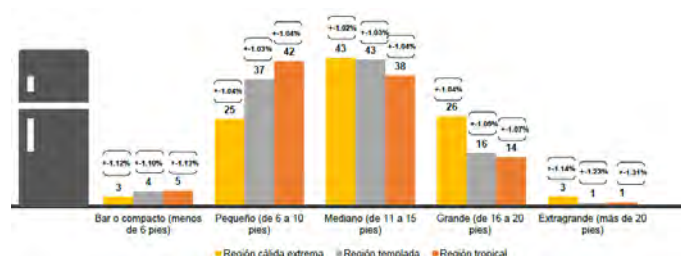


Figura 2.4.5. Distribución porcentual de vivienda particulares habitadas que usan refrigerador por tamaño del refrigerador según regiones climáticas [13].

La plancha es otro electrodoméstico que, aunque se ocupa por lapsos cortos a la semana, es una cantidad considerable en el consumo de energía, el 62% de viviendas en México ocupan este electrodoméstico, este porcentaje corresponde a 20.2 millones de viviendas, y por cada 6 de 10 viviendas utilizan planchas de vapor. En la [Figura 2.4.6](#), se muestra la diferencia en el uso de una zona urbana y zona rural.



Figura 2.4.6. Distribución porcentual de viviendas particulares habitadas por condición de uso de plancha y tipo de uso según tipo de localidad [13].

Los ventiladores es otro dispositivo eléctrico que se encuentran comúnmente en las viviendas para refrescar espacios, el 45% de las viviendas particulares habitadas en localidades urbanas, y en las localidades rurales solo el 41%, utilizan ventiladores. En la

[Figura 2.4.7](#), se muestra la cantidad de ventilados por viviendas en localidades urbanas y localidades rurales. Así también en la [Figura 2.4.8](#) muestra el tiempo de uso dependiendo del ventilador, si es tipo pedestal, de techo o de otro tipo de montaje.



Figura 2.4.7. Distribución porcentual del número de ventiladores en uso en viviendas particulares habitadas y número de equipos por vivienda según el tipo de localidad [13].

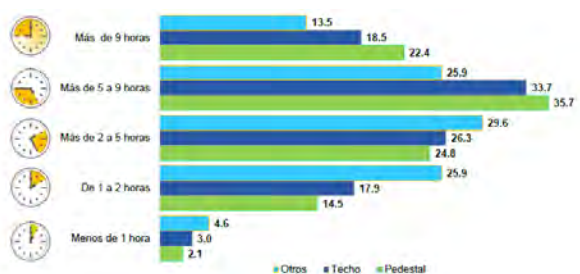


Figura 2.4.8. Distribución porcentual de viviendas particulares habitadas en que usan ventiladores por tipo y su distribución porcentual según el tiempo de uso al día [13].

El aire acondicionado en los últimos años ha aumentado el uso de estos equipos, debido al incrementado de la temperatura a causa del calentamiento global, siendo esto un poco más de 7 millones de equipos de aire acondicionado instalados en viviendas particulares. En la [Figura 2.4.9](#), se muestra el número de equipos por región del país, y se muestra, el número de equipos instalados en una vivienda, así como el tipo.



Figura 2.4.9. Número de equipos de aire acondicionado por región y el número de equipos instalados y tipo de aire acondicionado por vivienda [13].

Es importante saber el tiempo de uso de estos equipos, debido al alto consumo que generan al utilizarlos, en la [Figura 2.4.10](#) se muestra el tiempo de uso de estos equipos y se grafican dependiendo del tipo de equipo.

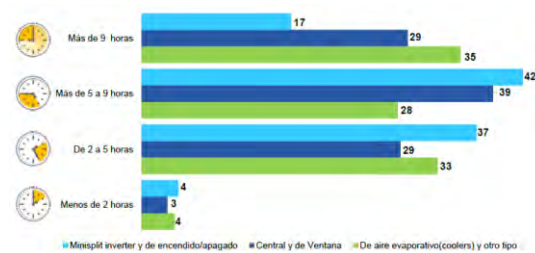


Figura 2.4.10. Distribución porcentual de equipos de aire acondicionado en uso al día en viviendas particulares, según el tipo de equipo [13].

En algunas regiones del país se utiliza los equipos calefactores, sin embargo, la zona seleccionada para este trabajo no se considera el calefactor debido a su clima durante el año, es importante mencionar que a nivel nacional únicamente el 6.3% de las viviendas del país usan este tipo de equipo. Aproximadamente el 2.6 millones de equipos son utilizados, de estos 2 millones son utilizados en la región cálida extrema, 489 mil en la región templada y 34 mil equipos en la región tropical.

Capítulo III. Estado del Arte

Se realizó una búsqueda bibliográfica con base a los temas relacionados a este trabajo, como el consumo energético en las viviendas unifamiliares, así como técnicas de optimización de SFV en la parte económica, técnica, de ahorro de energía y aprovechamiento de energía. A continuación, se muestra la [Tabla 3.1](#) donde se incluyen los artículos más destacados.

Tabla 3.1. Artículos consultados en el estado del arte.

No. Referencia	Año	Autor	Título	Contribución
[18]	2011	B. Yu, et al.	<i>Representing in home and out if home energy consumption behavior in Beinjing</i>	Representa un análisis del gasto de los hogares en una serie de usos finales dentro y fuera de la vivienda, basado en el momento de valor extremo discreto-continuo múltiple.
[19]	2012	D. Bonino et al.	<i>Home energy consumption feedback: A user server</i>	Realizó una encuesta en el cual participaron 1807 personas. Para comprender los hábitos de consumo energético en las viviendas.
[20]	2016	M. T. Baquero et. al	<i>Eficiencia energética en el sector residencial de la Ciudad de Cuenca, Ecuador</i>	Realizó una encuesta en 280 viviendas del sector residencial, así también monitorio el consumo de energía y la calidad del ambiente, analizándolo mediante simulación
[21]	2017	D. Jareemit et al.	<i>Influence of Changing Behavior and High Efficient Appliances on Household Energy Consumption in Thailand</i>	Realizó el análisis del comportamiento del ahorro de energía mediante el cambio de electrodomésticos de alta eficiencia energética en las viviendas unifamiliares.
[22]	2018	P. van den Brom et al.	<i>Performance gaps in energy consumption: household groups and building characteristics</i>	Realizó un estudio que comparó el consumo de energía real y teórico para diferentes tipos y características de hogares, revelando conocimiento sobre la influencia de los ocupantes en la demanda de energía y el papel de las características de los edificios.

[23]	2018	L. Barelli et al.	<i>Dynamic analysis of a hybrid energy storage system (H-ESS) coupled to a photovoltaic (PV) plant Energies.</i>	El Flywheel proporciona un mejor rendimiento en un sistema híbrido de almacenamiento de energía, por lo que se ve reflejado en la vida útil de la batería, y en la mejora de la calidad de la energía interconectada con la red.
[24]	2018	A. Gargallo	<i>Medición y análisis del consumo energético de energía eléctrica en los receptores domésticos en condiciones reales de funcionamiento: Aplicación a una vivienda Unifamiliar</i>	Realizó un estudio de los perfiles de consumo de los electrodomésticos de las viviendas en el cual demuestra que el proceso de calentar mediante resistencias es el proceso que genera mayor consumo eléctrico, así como el refrigerador, el electrodoméstico con mayor consumo eléctrico.
[25]	2018	H. Shareef	<i>Review on Home Energy management system considering demand responses, smart technologies and intelligent controllers.</i>	La creciente demanda de electricidad y la aparición de redes inteligentes ha creado oportunidades para un sistema de gestión de energía en el hogar, que puede reducir el uso de energía mediante la incorporación de una herramienta de respuesta a la demanda.
[26]	2020	X. Prado	<i>Análisis técnico-económico de una instalación fotovoltaica en consumidores residenciales en áreas rurales aisladas.</i>	Un sistema fotovoltaico aislado, puede suministrar la demanda de un usuario residencial aislado, a un costo competitivo y cumpliendo con ciertos criterios, como por ejemplo si hay meses nublados o soleados se tiene un margen de 0.25 a 0.65
[27]	2020	R. Basmadjian	<i>Optimized Charging of PV-Batteries for Households Using Real-Time Pricing Scheme: A Model and Heuristics-Based Implementation</i>	Se centra en la optimización de sistemas de baterías fotovoltaicas utilizando precios en tiempo real. Se propone un algoritmo basado en conjuntos de técnicas para optimizar la carga de baterías durante periodos de tiempo económicamente favorables, lo que resulta en un ahorro de costos en comparación con otros enfoques.
[28]	2020	A. Sen et al.	<i>Aggregate Household Behavior in Heating and cooling control strategy and energy efficient Appliance adoption</i>	Realizó un análisis del comportamiento de los hogares en términos de control de temperatura y adopción de aparatos energéticos eficientes,

				utilizando datos de encuesta nacional
[29]	2021	M. Alarcon et al.	<i>Estudio comparativo entre energía eléctrica y energía solar en viviendas unifamiliares</i>	El uso de la energía solar y de red eléctrica es viable dependiendo las condiciones de temperatura y tarifas de la energía (kWh).
[30]	2021	P. Nie et al.	<i>Prediction of home energy consumption based on gradient boosting regression tree</i>	Simula y predice el consumo de energía eléctrica de los edificios y analiza los datos de consumo de energía eléctrica mediante el uso de nuevos modelos algoritmos.
[31]	2022	E. Mustafa et al.	<i>An investigation of optimal power system designs for a net zero energy house: A case study of Kahramanmaraş</i>	Se investiga el diseño óptimo para un sistema híbrido de fuentes de energía renovables y un generador de energía diesel. El software Homer se utiliza durante este proceso. El diseño realizado se evalúa en términos de sus aspectos técnicos y ambientales.
[32]	2022	A. Becerril et al.	<i>Caracterización del estilo de vida a partir del consumo de energía eléctrica y las prácticas proambientales de los hogares de la ciudad de Mexicali. B.C.</i>	Realizo una investigación en la que se centró en los aspectos del consumo energético debido a que en Mexicali los consumos de energía eléctrica son excesivos por el alto consumo de los equipos de aire acondicionado, por las altas temperatura.
[33]	2024	Elsabet F. et al.	<i>Optimization of off-grid hybrid renewable energy systems for cost-effective and reliable power supply in Gaita Selassie Ethiopia</i>	Se realizaron estudios de diferentes escenarios para el abastecimiento de energía eléctrica en zonas rurales de Gaita con centrales renovables, deforma de optimizar los compones del sistema y así reducir los costos.
[34]	2016	Mohamed A. et al.	<i>PSO-Based Smart Grid Application for Sizing and Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems</i>	Presenta un algoritmo de dimensionamiento óptimo para un sistema híbrido de energía renovable que utiliza una aplicación de gestión de carga de red inteligente basada en la generación disponible.
[35]	2020	Shukla, A. et al.	<i>Design, simulation and economic analysis of standalone roof top solar PV system in India</i>	Analiza viabilidad técnica y económica de sistemas PV autónomos en techos residenciales en India, considerando irradiación local, costos del sistema,

				mantenimiento, mano de obra y dispositivos de control.
[36]	2021	M. Zeraatpisheh et al.	<i>Economic Analysis for Residential Solar PV Systems Based on Different Demand Charge Tariffs</i>	Evalúa el impacto de tarifas eléctricas variables (demand charges) en la rentabilidad de sistemas PV residenciales, proponiendo estrategias de optimización.
[37]	2022	M. S. Matthews et al.	<i>Economic and Environmental Evaluation of Residential Fixed Solar Photovoltaic Systems in the United States</i>	Compara costos y beneficios ambientales (CO ₂ evitado) de sistemas PV residenciales en diferentes estados de EE.UU., con enfoque en incentivos fiscales.
[38]	2020	A. Sow et al	<i>Economic analysis of residential solar photovoltaic electricity production in Canada</i>	Modela el retorno de inversión (ROI) y payback periodo para sistemas PV en Canadá, considerando clima frío y subsidios gubernamentales.
[39]	2021	A. S. Matthews et al.	<i>The Economic Feasibility and Cost Reduction of Grid-linked Solar PV Systems in South Africa</i>	Investiga cómo la conexión a red y políticas de net metering reducen costos en instalaciones PV comerciales en Sudáfrica.
[40]	2023	Z. Arifin et al.	<i>Economic Feasibility Investigation of On-Grid and Off-Grid Solar Photovoltaic System Installation in Central Java</i>	Compara la viabilidad económica de sistemas PV conectados y autónomos en Indonesia, con análisis de costos de baterías y tarifas eléctricas locales.
[41]	2020	T. Khatib. et al.	<i>A review of photovoltaic systems size optimization techniques</i>	Revisión exhaustiva de métodos (analíticos, heurísticos, IA) para optimizar el tamaño de sistemas PV, comparando precisión y complejidad.
[42]	2022	S. Khanal. et al.	<i>Optimal capacity of solar photovoltaic and battery storage for grid-tied houses based on energy sharing</i>	Determina capacidades ideales de PV y baterías en comunidades con intercambio de energía, evaluando beneficios económicos colectivos.

En los puntos 3.1 y 3.2, se muestra un pequeño resumen de los artículos mostrados en la [Tabla 3.1](#).

3.1 Impacto del costo en implementación de SFV

Los estudios analizados revelan que la viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos (SFV) residenciales varía significativamente según el contexto geográfico y

regulatorio. A. K. Shukla et al [35] demostraron que los sistemas autónomos en la India (ej.: 110 kWp) pueden ser técnicamente viables mediante herramientas de simulación, aunque con altos costos iniciales. En contraste, M. Zeraatpisheh et al. [36] encontró que las tarifas por demanda reducen drásticamente la rentabilidad (índices de 0.2-0.8), especialmente en sistemas grandes. En E.U., H. S. Matthews et al [37] destacaron la caída de costos (hasta \$2.99/W post-incentivos) y beneficios ambientales, mientras que A. Sow, M Mehrtash et al [38] mostraron mejoras en Canadá (períodos de recuperación mayores a 30 se redujo la recuperación menores a 10 años) gracias a políticas de apoyo. Estudios en Sudáfrica G. Sharma [39] y Z. Arifin [40] confirmaron que la conexión a red es más rentable que los sistemas aislados, pero requieren subsidios para masificarse.

3.2 Aplicación de técnicas de optimización en sistemas FV residenciales

Los estudios revisados demuestran diversas metodologías para optimizar sistemas fotovoltaicos residenciales. A. Mohamed et al [41], en su revisión sistemática identifican que los algoritmos metaheurísticos (como PSO y GA) reducen hasta un 25% los errores de dimensionamiento frente a métodos convencionales. Para sistemas aislados, M. Bianchi [43] proponen un modelo híbrido fotovoltaico - batería que minimiza el LCOE mediante programación lineal entera mixta, logrando autonomía del 90% con 20% menos capacidad de batería. En el contexto australiano, J. Li [44] desarrollan un algoritmo multiobjetivo que optimiza simultáneamente costos (0.07 USD/kWh) y autosuficiencia (85%) en sistemas conectados a red. J. Li et al [44] implementan un esquema de precios en tiempo real con heurísticas adaptativas, mejorando el retorno de inversión (ROI) en un 30% mediante carga/descarga óptima de baterías. Finalmente, S. Khanal et al [45] proponen un modelo de compartición energética que optimiza colectivamente la capacidad FV-batería en comunidades, disminuyendo costos totales en un 22% versus sistemas individuales.

Capítulo IV. Metodología

4.1. Estudio del recurso solar

Para llevar a cabo el estudio del recurso solar en la localidad seleccionada, es necesario recopilar datos de radiación solar. En este sentido, se recurre a fuentes de acceso libre como Nasa Power [14], National Solar Radiation Database, Photovoltaic Geographical Information System y CONAGUA [15]. Una vez recopilados los datos, se realizó un análisis detallado del recurso solar en el estado de Morelos, lo que permitió obtener el perfil de producción de energía fotovoltaica y calcular los paneles solares considerando sus especificaciones técnicas para la selección del sistema fotovoltaico. con estos datos obtenidos, se consideró la irradiancia de un día soleado, como se muestra en la [Figura 4.1.1](#).



Figura 4.0.1.1. Irradiancia en un día soleado en Morelos [15].

Además de esto, se monitoreó la producción de energía solar generada por ocho paneles fotovoltaicos instalados en el edificio del departamento de electrónica en el CENIDET. Estos sistemas fotovoltaicos, están compuestos por cuatro unidades de 255 W (S60PC-255) y cuatro unidades de 265 W (S60PC-265), generan un total de 2 kW. En la [Figura 4.1.2](#) se muestra de forma gráfica la evolución del estudio del recurso solar.

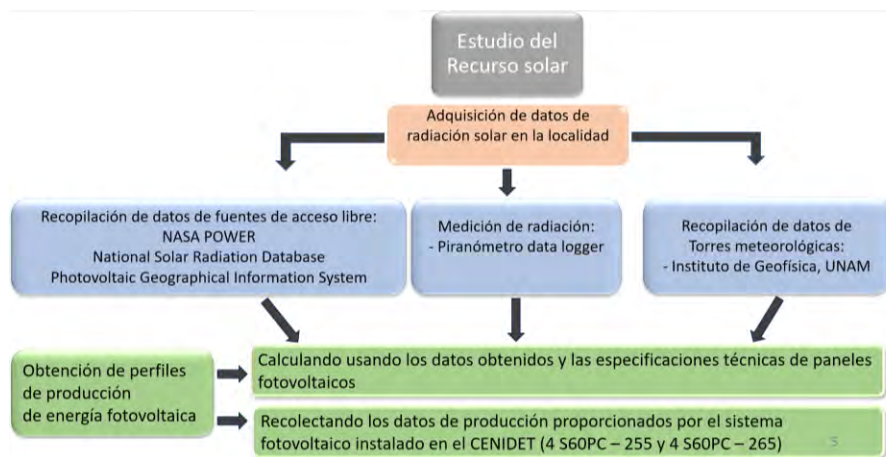


Figura 4.1.2. Esquema de la sección del estudio del recurso solar.

4.2. Estudio de demanda energética en el sector residencial

Para el estudio de demanda energética se obtendrán los datos a través del monitoreo constante del consumo energéticos en los tableros principales de las viviendas, las cuales se consideran tres viviendas con las características que se describen en la [Tabla 4.2.1](#).

Tabla 4.2.1. Características de las viviendas.

Viviendas	Integrantes de la familia	Fases	Tensión de alimentación
1	3	1	127 Vca
2	4	1	127 Vca
3	3	1	127 Vca

Para recopilar datos, se han adquirido equipos data logger de la marca Emporia (ver [Figura 4.2.1](#)), los cuales posibilitan la obtención del consumo energético de las viviendas en tiempo real y de forma horaria. Esta implementación nos brindará un amplio panorama del comportamiento de las cargas eléctricas de una vivienda, permitiéndonos determinar sus variaciones en función del paso del tiempo, así como en el cambio de estaciones y meses, de igual manera se analizaron los datos seccionando los días de la semana, donde se agrupan en días entresemana (lunes a viernes) y días de fin de semana (sábado y domingo), observando que el comportamiento del consumo energético son muy marcados debido a factores, costumbres y hábitos.



Figura 4.2.1. Equipo de monitoreo para el consumo energético total de la vivienda, marca Emporia.

El monitor de energía de la marca Emporia cuenta con tres entradas para sensores principales, lo que permite monitorear redes eléctricas trifásicas. Además, dispone de ocho entradas adicionales para sensores, que permiten el monitoreo independiente de equipos, no obstante, estos sensores se deben adquirir por separado. Las características eléctricas son: 240/127 VCA, 50 A, trifásicas 415 Y/240VCA (sin conexión Delta).

Este dispositivo se instala cerca del centro de carga de la vivienda, esto va dependiendo de la instalación eléctrica, sin embargo, como las viviendas monitoreadas son de una fase, se toma uno de los sensores que contiene el dispositivo Emporia como se muestra en la [Figura 4.2.2](#) y se coloca en la fase en el extremo que va del interruptor principal de la vivienda hacia el medidor como se muestra en la Figura 4.2.3.

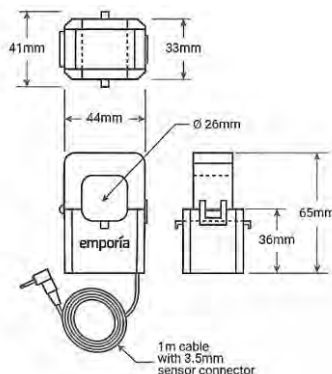


Figura 4.0.2.2. Sensor (TC) para medir el consumo de la vivienda y registrar en la nube [16].

En el caso de la [Figura 4.2.3](#), en el caso de las viviendas monitoreadas son de 1 fase, con base a eso, solo lleva un sensor en el conductor de la fase, los sensores que van instalados en las fases son de 50 A, los sensores para cada línea son de 20 A.

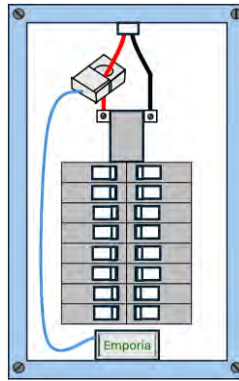
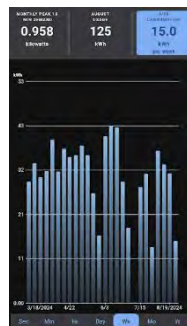
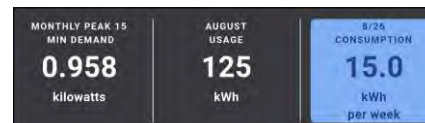


Figura 4.2.3. Conexión del equipo Emporia en las fase del sistema eléctrico de cada una de las viviendas monofásicas [16].

Los datos de energía monitoreados registrados cada segundo sólo se pueden visualizar en la aplicación instalados en el sistema Android o iOS como se muestra en la [Figura 4.2.4](#), y se conservan por un periodo de 3 horas. Los datos por minutos y por hora se almacenan en la nube: los datos por minuto se guardan durante 7 días, mientras que los datos por hora se conservan indefinidamente. Esto permite exportar los datos desde la aplicación en cualquier momento que se requieran. Es necesaria una conexión Wifi de 2.4 GHz para el funcionamiento del sistema.



a)



b)



c)

Figura 4.2.4. a) Interfaz de la App de Emporia para visualizar los datos adquiridos o monitoreados del consumo energético, b) LA parte superior del interfaz donde se muestra la energía consumida pico de 15 min., y c) es la parte inferior del interfaz donde se muestra las opciones para visualizar el consumo energético.

Esto nos permite visualizar el consumo energético y registrar los datos para su uso en nuestro caso de estudio como se muestra en la [Figura 4.2.5](#). En donde se muestra la energía

consumida durante un año, en el eje horizontal corresponde al tiempo (h), en el eje vertical corresponde a la energía consumida (kWh), estos datos pertenecen a la vivienda 1.

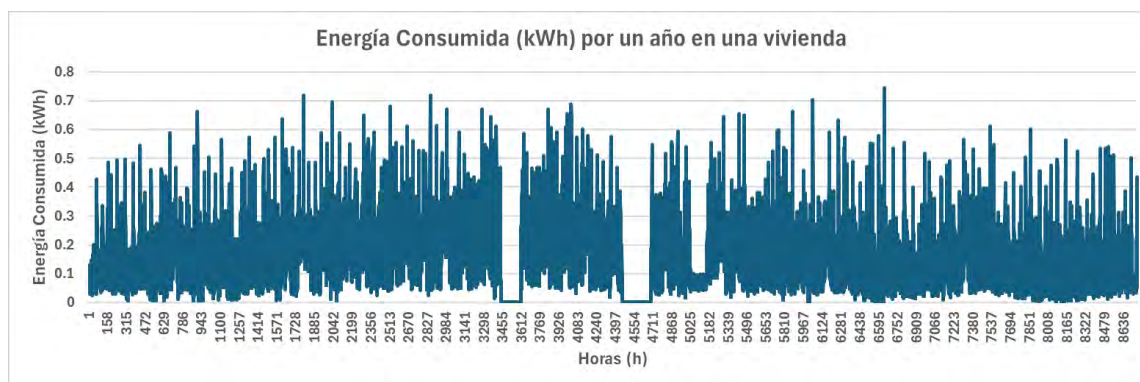


Figura 4.2.5. Datos obtenidos con el equipo Emporia, con respecto al consumo energético de la vivienda 1 durante un año.

En la [Figura 4.2.6](#) se muestra en forma de diagrama la estructura del estudio de la demanda energética en el sector residencial,

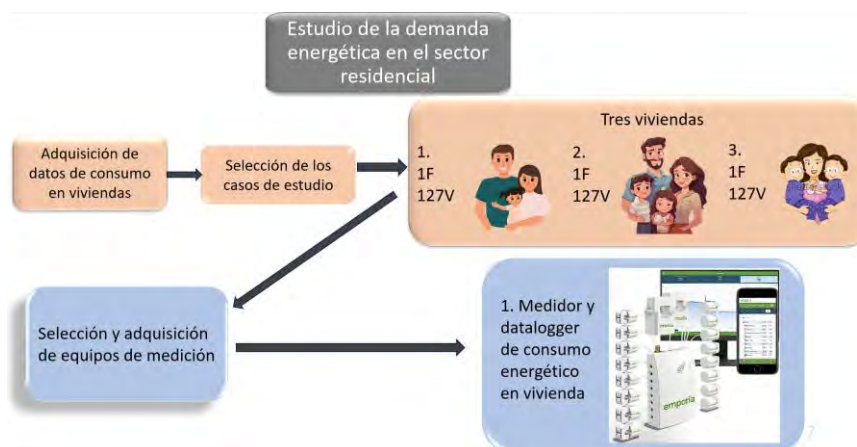


Figura 4.2.6. Diagrama de bloques, mostrando el seguimiento del proceso de estudio.

4.3. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico (SFV)

Los sistemas fotovoltaicos tienen configuraciones para la satisfacción de la carga de dicho lugar, sin embargo existen diferentes tipos de configuraciones de sistemas, por ejemplo están los sistemas fotovoltaicos de acoplamiento directo, sistemas interconectados a la red eléctrica (ver [Figura 4.3.1](#)), sistemas híbridos conectados [11].

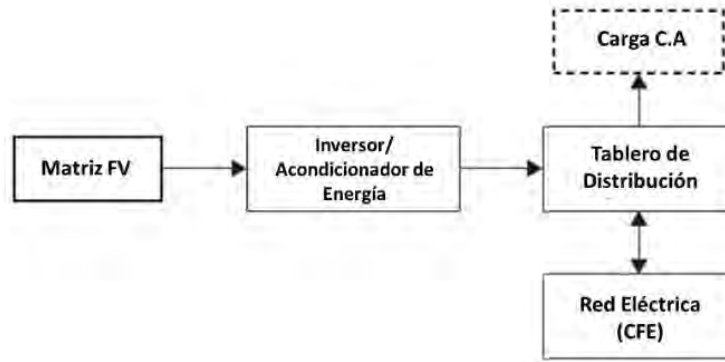


Figura 4.3.1. Sistema Fotovoltaico interconectado a la Red Eléctrica (CFE).

También están los sistemas fotovoltaicos híbridos con baterías e interconectados a la red Eléctrica, en este tipo de sistema se emplean más de dos generadores de energías o suministradores de energía a la carga de CA. En la [Figura 4.3.2](#), se muestra un diagrama esquemático de un sistema híbrido.

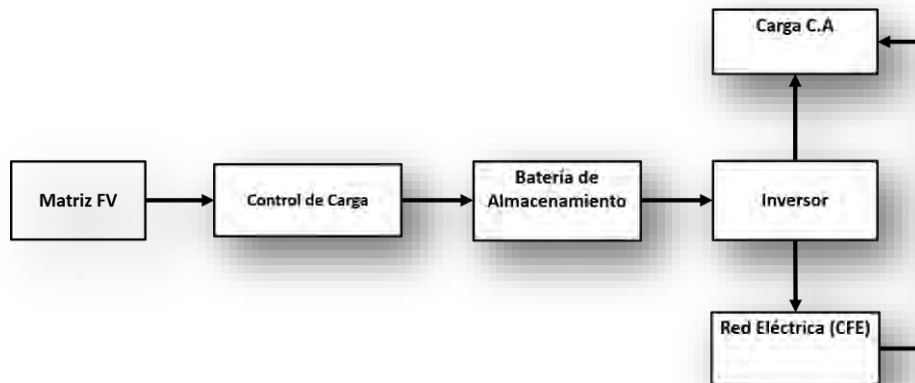


Figura 4.3.2. Diagrama de bloques de un sistema fotovoltaico híbrido con batería e interconectado a la red eléctrica (CFE).

Una vez que se realizó el estudio del recurso solar y el estudio de la demanda energética, se dimensionó el sistema fotovoltaico de las tres viviendas considerando un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica de Comisión Federal de Electricidad (CFE) como se muestra en la [Figura 4.3.3](#). Durante el dimensionado del sistema fotovoltaico se analizaron los datos y balance energético en cada una de las viviendas.

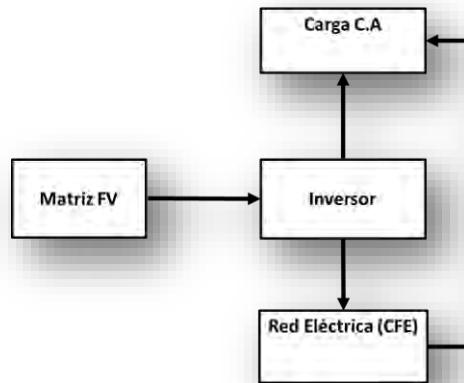


Figura 4.3.3. Sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica, seleccionado con propósito de estudio.

4.4. Análisis de Costo

Una vez completado el dimensionado del sistema, se llevó a cabo un análisis detallado de los costos de los componentes del sistema fotovoltaico, teniendo en cuenta los siguientes elementos:

- Paneles fotovoltaicos
- Inversor

Se procedió a investigar la disponibilidad de estos elementos en el mercado nacional, considerando aspectos como las especificaciones técnicas de los equipos y las marcas disponibles. Una vez obtenidos los costos de los equipos, se realizará un cálculo de la inversión basado en las necesidades energéticas de las viviendas, la energía generada por el sistema, y finalmente se calculará el tiempo estimado para recuperar la inversión.

4.5. Optimización

Para realizar la optimización del sistema FV se consideraron los siguientes parámetros:

- Superficie para la instalación del sistema fotovoltaico
- Costo de los paneles
- Cantidad de paneles fotovoltaicos
- Configuración de los sistemas fotovoltaicos

-
- Cantidad de inversores o micro inversores
 - Costo de los inversores o micro inversores.
 - Características de los paneles fotovoltaicos.

Para esto se construyó la función objetivo y se resolvió con una técnica de optimización multiobjetivo como por ejemplo los algoritmos genéticos o por optimización por enjambre de partículas (PSO).

Así, una vez encontrada la configuración óptima se procede a la validación de esta, descrita en la Sección 4.6.

4.5.1 Técnica de optimización por enjambre de partículas (PSO)

La Optimización por Enjambre de Partículas es un algoritmo de optimización desarrollado por Kennedy y Eberhart en 1995. Este enfoque está inspirado en el comportamiento de las bandadas de aves durante la búsqueda de alimento. Aunque las aves no saben de antemano la ubicación exacta de la fuente de alimento, tienen una idea aproximada de la distancia, y como estrategia, tienden a seguir al ave más cercana a dicha fuente.

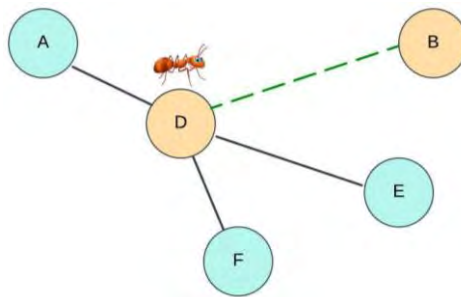


Figura 4.5.1. Muestra los nodos validos en base a la nueva posición de la hormiga.

El algoritmo PSO emula este comportamiento para abordar problemas de optimización mediante la generación de posibles soluciones, donde cada solución representa a un ave dentro del espacio de búsqueda en constante movimiento. La dirección y velocidad de cada partícula se ajustan en función de la mejor posición alcanzada por ella misma y de la mejor solución global o local encontrada por el grupo (según el vecindario definido por el

usuario, ver [Figura 4.5.2](#)). Este enfoque permite converger hacia una solución eficiente para resolver el problema [17].

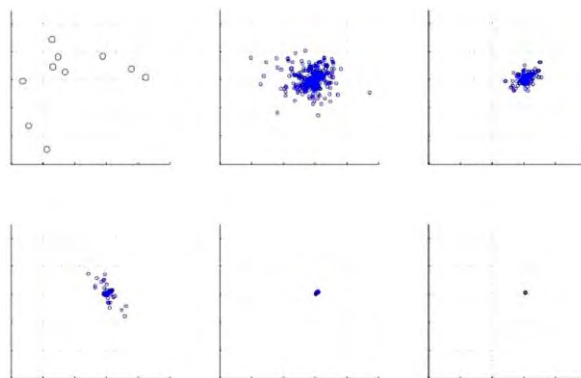


Figura 4.5.2. Muestra el comportamiento de las partículas en diferentes etapas del PSO [17].

4.6. Validación del sistema

Para concluir la metodología de este trabajo, se procederá a la simulación del sistema fotovoltaico con en el software PVsyst. Se llevarán a cabo simulaciones de diversos escenarios con el fin de identificar la configuración óptima para la generación de energía en relación con la demanda energética de las viviendas.

Capítulo V. Procedimientos para el diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico

En esta sección muestra algunas de las actividades que se realizaron para llegar a los resultados obtenidos.

5.1 Diseño del sistema fotovoltaico para los tres casos de estudio

En esta sección se muestra los resultados obtenidos en el dimensionamiento de los SFV para cada una de las viviendas. El dimensionado del sistema es representado por el número de paneles fotovoltaicos. En la ecuación (1) se muestra el cálculo del número de paneles fotovoltaicos requeridos en base a la potencia del panel,

$$No. de Paneles = \frac{Consumo\ diario \times Factor\ de\ seguridad}{Hora\ solar\ pico \times potencia\ del\ panel} \quad (1)$$

No. de paneles, el consumo diario de la vivienda, el factor de seguridad considerando un valor de 1.3 con un valor de hora solar pico de 6.06 y por último, considerando el valor de dos paneles fotovoltaicos de potencia de 250 W y 500 W. Los resultados se muestran en la [tabla 5.1.1](#).

Tabla 5.1.1. Dimensionado de las posibles configuraciones para cada una de las viviendas.

Vivienda	Consumo de energía diario (Wh)	No. de Paneles de 250 W	No. de Paneles de 500 W
1	4,340	4	2
2	7,010	6	3
3	2,400	2	1

Por otra parte, en el avance de la tesis se consideró una modificación en el alcance de los objetivos para cumplir satisfactoriamente, profundizando en el desarrollo del sistema fotovoltaico interconectado a la red sin considerar almacenamiento (baterías).

5.2 Optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico aislado con toy model

Iniciando con la optimización de los sistemas fotovoltaicos, se desarrolló un análisis de un sistema *toy model*, esto con el fin de conocer el comportamiento de la energía consumida con respecto a la energía generada. En la optimización de la superficie de captación para los sistemas fotovoltaicos considerando una fracción solar de 100% donde se pretende satisfacer la siguiente expresión:

$$f_{pv}(t) \geq C(t), \quad (2)$$

en donde $f_{pv}(t)$ es la potencia fotovoltaica generada (W), $C(t)$ es la potencia consumida o perfil de demanda (W) y t es el tiempo (s).

La potencia generada por el sistema fotovoltaico está dada en términos de la irradiancia solar por la siguiente expresión:

$$f_{pv}(t) = S * \eta * R(t), \quad (3)$$

en donde S es la superficie de captación (m^2), η es la eficiencia del panel (unitario) y $R(t)$ es la irradiancia solar (W/m^2).

La irradiancia $R(t)$ en un día soleado en Morelos se puede expresar como una función por intervalos en términos de una aproximación polinomial de orden 5 de la siguiente manera:

$$R(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t \leq 6 \\ r_5 t^5 + r_4 t^4 + r_3 t^3 + r_2 t^2 + r_1 t + r_0, & 6 \leq t \leq 17 \\ 0, & 17 \leq t \leq 23, \end{cases} \quad (4)$$

en donde $r_0=94.619$, $r_1=-143.99$, $r_2=-23.865$, $r_3=1.1823$, $r_4=-0.2081$, y $r_5=0.0053$.

Considerando el comportamiento del consumo energético en las tres viviendas, se define un consumo energético simplificado y característico, dado por $C(t)$ en el intervalo $6 \leq t \leq 19$:

$$C(t) = 70 + 70 [u(t - 6) - u(t - 10)] + 210 [u(t - 17) - u(t - 19)], \quad (5)$$

donde la función escalón unitario, $u(t)$, está definida por:

$$u(t - a) = \begin{cases} 0 & t < a \\ 1 & t \geq a. \end{cases} \quad (6)$$

En la [Figura 5.2.1](#), se muestran de forma ilustrativa las gráficas de $f_{pv}(t)$ y $C(t)$, así como las áreas A1, A2 y A3, en donde A1 y A3 muestran la energía consumida y no es suplida por la energía generada, mientras que A2 muestra la energía generada durante el tiempo t_1 y t_2 que es cuando hay radiación y no es consumida la energía generada en su totalidad y tampoco no es aprovechada. Se consideró que $C(t)$ representa el consumo energético equivalente de una vivienda aislada que no tiene conexión a la red eléctrica, ni respaldo de energía eléctrica de cualquier tipo. El objetivo de este análisis es evaluar la capacidad de satisfacer la demanda de energía eléctrica mediante un sistema fotovoltaico que utiliza exclusivamente la irradiancia solar como fuente de suministro primario.

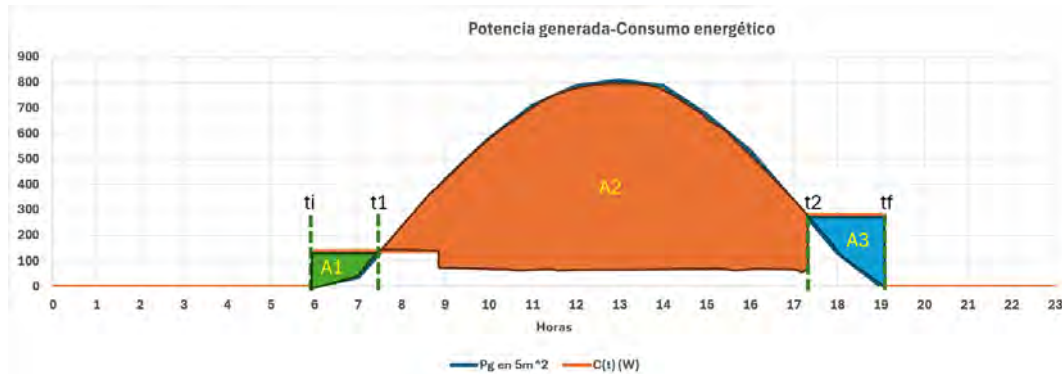


Figura 5.2.1. Potencia generada por un sistema fotovoltaico, curva azul, y consumo energético característico de una vivienda, curva naranja. La diferencia entre la generación fotovoltaica y el consumo energético corresponde a las áreas coloreadas. A1, A2 y A3 generadas al amanecer, durante el día y al atardecer, coloreadas en verde, naranja y azul, respectivamente.

Para delimitar las áreas A_1 , A_2 y A_3 se consideran 4 momentos clave en el tiempo. Para definirlos se considera que diariamente, los paneles fotovoltaicos funcionan desde el momento t_i en que la luz solar incide sobre los paneles en la mañana y se comienza a producir energía eléctrica, hasta el momento t_f en que la radiación solar deja de incidir sobre los paneles y estos dejan de producir energía eléctrica. Adicionalmente, se consideran dos puntos de intersección entre las gráficas de la energía fotovoltaica y la gráfica del consumo de energía, el primero, t_1 , ocurre en la mañana antes del mediodía, y el segundo, t_2 , ocurre en la tarde después del mediodía.

Así, los momentos t_1 y t_2 están determinados por las condiciones siguientes:

$$\begin{aligned} f_{PV}(t_1) &= C(t_1) \quad | \quad t_1 < 12, \\ f_{PV}(t_2) &= C(t_2) \quad | \quad t_2 > 12. \end{aligned} \quad (7)$$

Con las definiciones anteriores, las áreas A_1 , A_2 y A_3 estarán definidas por $f_{PV}(t)$ y $C(t)$ de la siguiente manera:

$$A_1 = \int_{t_i}^{t_1} (C(t) - f_{PV}(t)) dt, \quad (8)$$

$$A_2 = \int_{t_1}^{t_2} (f_{PV}(t) - C(t)) dt, \quad (9)$$

$$A_3 = \int_{t_2}^{t_f} (C(t) - f_{PV}(t)) dt, \quad (10)$$

en donde t_i es el momento de inicio de la generación fotovoltaica, t_1 es el momento de intersección entre $f_{PV}(t)$ y $C(t)$ para $t < 12$, t_2 es el momento de intersección entre $f_{PV}(t)$ y $C(t)$ para $t > 12$ y t_f es el momento de terminación de la generación fotovoltaica.

Con base en lo anterior se puede plantear un problema de optimización matemática para resolver el problema de ingeniería consistente en encontrar la superficie de captación (S^*) que satisfaga lo más posible la demanda de energía eléctrica o consumo energético $C(t)$ de una vivienda en Morelos, sin conexión a la red eléctrica, ni sistemas de respaldo de energía.

El problema de optimización puede plantearse en sus términos más generales como determinar la superficie de captación (S^*) que minimice la diferencia entre la energía fotovoltaica generada por los paneles, o bien sea el área bajo la curva de $f_{PV}(t)$ y la energía

consumida por la vivienda, o bien el área bajo la curva de $C(t)$. Esta diferencia de energía puede verse como la suma de las áreas A_1 , A_2 y A_3 :

$$A = A_1 + A_2 + A_3, \quad (11)$$

como se mostró en la [Figura 5.2.1](#), y cada una de las áreas pueden calcularse con las ecuaciones (8), (9) y (10). Por consiguiente, es necesario determinar t_1 y t_2 con las condiciones indicadas en la ecuación (7) y el conocimiento de $f_{pv}(t)$ y $C(t)$. La potencia consumida $C(t)$ está dada por la ecuación (5) y la potencia generada $f_{pv}(t)$ debe determinarse con anterioridad en términos de la irradiancia $R(t)$, la eficiencia η de los paneles fotovoltaicos y la superficie de captación S es la variable que debe manipularse para encontrar la S^* que resuelva el problema de optimización. El procedimiento de solución descrito se muestra en la [Figura 5.2.2](#),

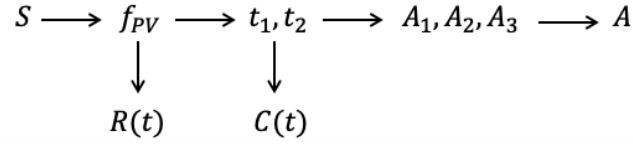


Figura 5.2.2. Secuencia de solución del problema de optimización.

De manera complementaria, la ecuación (11) muestra la secuencia de mapeos entre los diversos dominios que intervienen en la solución del problema de optimización.

$$\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}(t) \rightarrow \mathbb{R}^2(t) \rightarrow \mathbb{R}^3(t) \rightarrow \mathbb{R}. \quad (12)$$

Finalmente, el problema de optimización puede expresarse simplemente como

$$S^* = S \mid \min_{S \in \mathbb{R}} (A \in \mathbb{R}), \quad (13)$$

$$S^* = S \mid \min_{S \in \mathbb{R}} \{A(S, R(t), C(T))\},$$

en donde A es la función objetivo a minimizar, dada por la ecuación. (11), y las ecuaciones. (7) a (10) son las restricciones que deben ser satisfechas por la solución.

5.3 Optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico aislado con datos de las viviendas

Una vez que se hizo el análisis de la optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico con toy model, se realizó con datos obtenidos medidos, en la [Figura 5.3.1](#) se muestra el promedio de la energía consumida de las tres viviendas con respecto a la energía generada con una superficie de captación de 5 m^2 . Al aplicar los datos obtenidos mediante la medición en las viviendas se aprecia que los puntos de intersección de las áreas A1, A2 y A3 cambian, sin embargo, también se aprecia una similitud con respecto al toy model. Recordemos que se trata de un sistema aislado, por tal motivo sólo se consideran las horas de cuando hay sol, que son desde las 6 de la mañana cuando sale el sol hasta las 7 de la noche cuando este se oculta. De igual forma el consumo energético es considerado en el mismo lapso de tiempo, no tomando en cuenta otro tipo de fuente de energía.

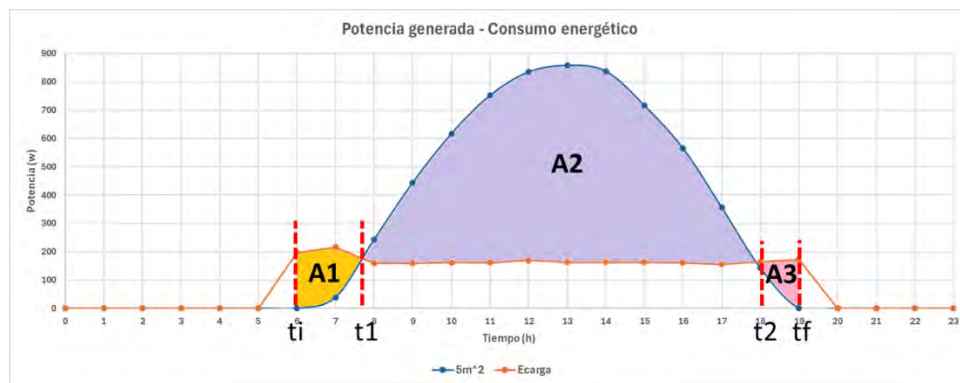


Figura 5.3.1. Potencia generada por un sistema fotovoltaico, curva azul, y consumo energético característico del promedio de 3 viviendas, curva naranja.

5.4. Optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red

En la optimización del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica (CFE), se prioriza el costo de la energía horaria diaria, considerando tanto la energía generada por el sistema como la proporcionada por la red. Para el caso de estudio, se compara la energía

producida por el sistema fotovoltaico con la suministrada por la red. Por un lado, se analiza la energía generada por el SFV, la energía consumida por la vivienda en el momento de la generación y el excedente no utilizada, el cual es inyectado a la red eléctrica para su posterior uso por la vivienda. Se asume que el costo de la energía es el mismo precio de compra y venta [46].

Con base a la información proporcionada en [47], se dividen en tres niveles el consumo energético que son: básico, intermedio y excedente como se muestra en la [Tabla 5.4.1](#), es importante mencionar que los costos de la energía cambian con base a la región del país, y estación del año. Considerando la información tarifaria, para el caso de estudio se toma un promedio del consumo básico e intermedio.

Tabla 5.4.1. Tarifa del consumo energético con base a CFE [47].

Consumo	Tarifa	Descripción
<i>Básico</i>	\$ 1.055	Por cada uno de los primeros 75 (setenta y cinco) kilowatts-hora
<i>Intermedio</i>	\$ 1.280	Por cada uno de los siguientes 100 (cien) kilowatt-hora
<i>Excedente</i>	\$ 3.75	Por cada kilowatt-hora adicional a los anteriores

En la [Figura 5.4.1](#), se muestra $C(t)$ y $R(t)$, donde $C(t)$ representa el consumo promedio diario de las tres viviendas monitoreadas. F_{pv} corresponde a la potencia generada por un sistema con una superficie de 5 m^2 y una eficiencia del panel de 21%, se considera una irradiancia de un día soleado con un pico de 1020 W/m^2 , de acuerdo con la ecuación (14).

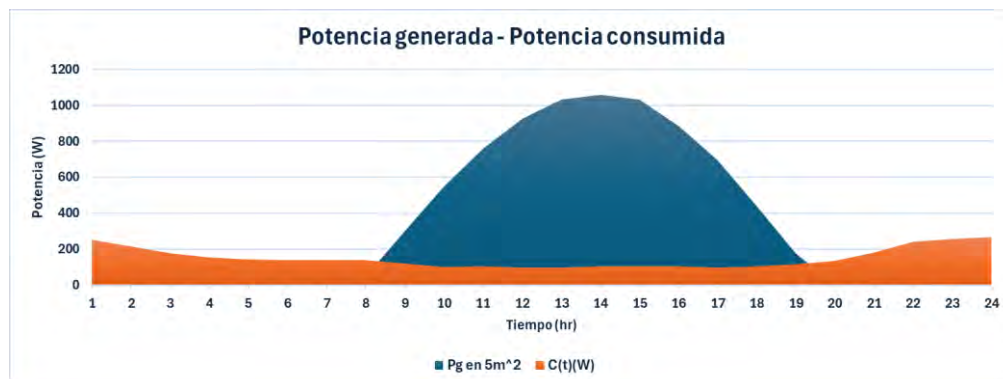


Figura 5.4.1. Potencia generada por un sistema fotovoltaico, curva azul, y consumo energético característico de una vivienda, curva naranja.

Para minimizar el costo de la energía diaria, se determina la siguiente ecuación:

$$C_{sist.fv} = N_{fv} * [C_{fv} + C_{Inv}], \quad (14)$$

$$C_{sist.fv} \approx S_{cap} * (N_{fv} * C_{fv} + N_{inv} * C_{Inv}), \quad (15)$$

donde $C_{sist.fv}$ es el costo del sistema fotovoltaico, N_{fv} es el número de paneles fotovoltaicos, C_{fv} es el costo del panel fotovoltaico, C_{Inv} es el costo del inversor, y S_{cap} es la superficie de captación del sistema fotovoltaico.

Asumiendo que el tiempo de retorno de inversión es a 10 años tenemos que la inversión diaria (Inv_{diaria}), depende del costo del sistema fotovoltaico ($C_{sist.fv}$) de la siguiente forma,

$$Inv_{diaria} = \frac{C_{sist.fv}}{10} * \frac{1}{365} = \frac{C_{sist.fv}}{3650}. \quad (16)$$

El costo diario de energía (C_{diario}) es determinado por el consumo diario de la energía de la vivienda menos la generación del sistema fotovoltaico, la diferencia de las energías es multiplicada por el costo (kWh) considerando las tarifas de CFE (C_{kWhCFE}). Se muestra en 17 el costo diario de la energía:

$$C_{diario} = [Consumo_{diario} - Generación PV_{diario}] * C_{kWhCFE}, \quad (17)$$

$$Consumo_{diario} = \int_0^{24} C(t) dt. \quad (18)$$

En la ecuación 19, la generación PV diario está dado por el producto de: eficiencia (η), superficie de captación (S_{cap}) e irradiancia ($R(t)$) integrada en el tiempo,

$$Generación PV_{diario} = \int_0^{24} \eta * S_{cap} * R(t) * dt. \quad (19)$$

El costo total del sistema por día está dado por la suma de 16 y 17,

$$C_{total_sist_diario} = \frac{C_{sist.fv}}{3650} + C_{diario}, \quad (20)$$

Para definir la ecuación de la función objetivo, se considera que la superficie de captación (S_{cap}) debe estar incluida en el costo diario del sistema, el cual debe minimizarse. Así, la función objetivo queda expresada como:

$$S_{cap} \ni C_{total_sist_diario} \rightarrow \text{mínimo (Función Objetivo)}, \quad (21)$$

$$C_{total_sist_diario} \approx S_{cap} * \left[\frac{C_{sist.fv} + C_{Inv}}{3650} \right] + \left[\int_0^{24} C(t)dt - \int_0^{24} \eta * S_{cap} * R(t) * dt \right] \quad (22)$$

$$* \$_{kWhCFE}.$$

Las restricciones consideradas en el modelo incluyen la siguiente condición integral, que garantiza que la energía generada por el sistema fotovoltaico cubra la demanda energética diaria de la vivienda:

$$\int_0^{24} C(t)dt \geq \int_0^{24} \eta * S_{cap} * R(t) * dt. \quad (23)$$

Esta restricción asegura que la energía total producida (lado derecho) sea al menos igual a la demanda diaria consumida (lado izquierdo).

Capítulo VI. Análisis y discusión de resultados

La optimización del sistema fotovoltaico interconectado a la red CFE, descrita en la sección 5.3, se aplicó para tres viviendas donde se monitoreó su consumo energético durante un año. Con base a los datos adquiridos durante el año 2024, se hizo la selección de los datos en dos grupos una considerado como weekday, que son los datos consumidos en las viviendas de los lunes a viernes, y un segundo grupo weekend que son los datos adquiridos de los sábados y domingos. Esto con base a las diferencias en los consumos de energía entre semana debido a los hábitos y rutinas de las personas, ya que entre semana las personas suelen ausentarse por horas en las viviendas debido a sus rutinas, trabajo, escuela u otras actividades. Estos hábitos o rutinas producen un efecto en el uso reducido de los electrodomésticos, dispositivos electrónicos como televisores, sistemas de alumbrado o luminarias. Sin embargo, en los fines de semanas se suele realizar actividades en las viviendas como lavar ropa, cocinar, en otras palabras, se realizan más actividades en el hogar.

Para poder usar los datos obtenidos de cada una de las viviendas durante un año, se hizo un promedio diario horario de los datos, en weekday y weekend. Una vez obtenido el valor promedio diario horario se aplicó la optimización de la superficie de captación para el sistema fotovoltaico interconectado a la red, obteniendo los siguientes resultados.

6.1 Análisis de los datos adquiridos de Energía en cada vivienda

En esta sección se realizó el análisis de los datos obtenidos de las viviendas en un periodo de un año que corresponde del mes de enero hasta el mes de diciembre por lo que se obtuvieron los siguientes resultados, como se muestran en los puntos 6.1.1, 6.1.2 y 6.1.3

6.1.1. Análisis de los datos adquiridos de la Energía, V1

De acuerdo con el diagrama de caja mostrado en la [Figura 6.1.1](#), se observa que los sábados presentan el mayor consumo energético. En estos días, el cuartil 1 (Q1) tiene un valor de 3.66 kWh, la media es de 4.73 kWh y el cuartil 3 (Q3) alcanza los 5.99 kWh, lo que resulta en un rango inter-cuartil (IQR) de 2.33 kWh. Esta diferencia de 2.33 kWh entre el 25% y el 75% de los datos refleja la variabilidad en el consumo de energía. Un IQR más amplio sugiere una mayor dispersión de los datos, mientras que un IQR más estrecho indica una distribución más concentrada alrededor de la mediana.

Por otro lado, se observa que los martes presentan el menor consumo energético. En este caso, los valores de los cuartiles son los siguientes: $Q1 = 2.52$ kWh, media = 3.41 kWh y $Q3 = 4.17$ kWh, con un rango inter-cuartil de 1.65 kWh.

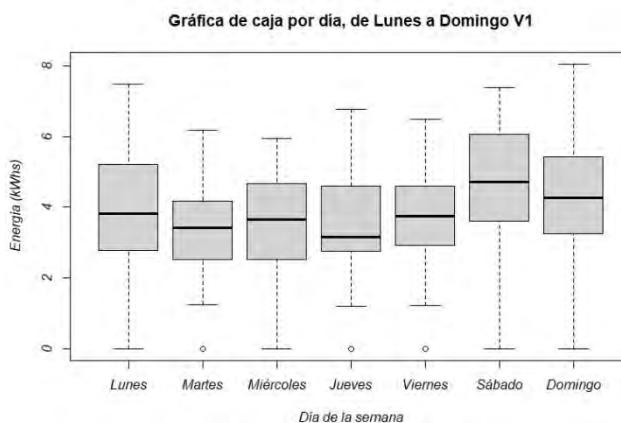


Figura 6.1.1. Diagrama de caja y bigotes de los días de la semana de la V1.

6.1.2. Análisis de los datos adquiridos de Energía, V2

En la vivienda 2, representada en la [Figura 6.1.2](#) mediante un diagrama de caja, se destaca que los días con mayor consumo energético son los jueves. En estos días, se observan los siguientes valores: $Q1 = 4.59$ kWh, media = 5.24 kWh y $Q3 = 6.24$ kWh, lo que resulta en un rango inter-cuartil (IQR) de 2.63 kWh. Esta diferencia de 1.65 kWh entre el 25% y el 75% de los datos refleja la variabilidad en el consumo de energía. Un IQR más amplio indica una mayor dispersión de los datos, mientras que un IQR más estrecho sugiere una distribución más concentrada alrededor de la mediana.

Por otro lado, se observa que los sábados presentan el menor consumo energético en esta vivienda. En este caso, los valores de los cuartiles son los siguientes: $Q1 = 3.32$ kWh, media = 4.48 kWh y $Q3 = 5.24$ kWh, con un rango inter-cuartil de 1.92 kWh.

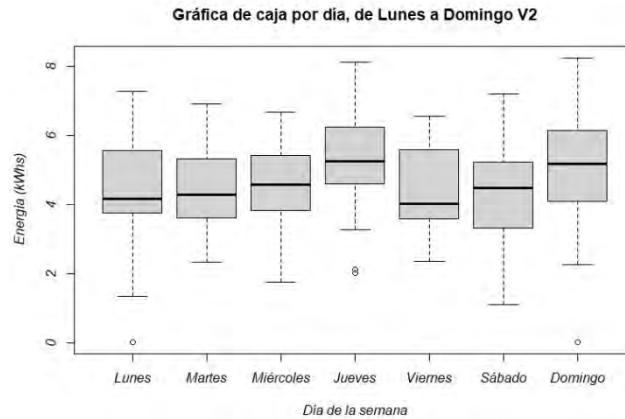


Figura 6.1.2. Diagrama de caja y bigotes de los días de la semana de la V2.

6.1.3. Análisis de los datos adquiridos de Energía, V3

En la vivienda 3, representada en la [Figura 6.1.3](#) mediante un diagrama de caja, se destaca que los días con mayor consumo energético son los viernes. En estos días, se observan los siguientes valores: $Q1 = 1.62$ kWh, $\text{media} = 1.80$ kWh y $Q3 = 1.99$ kWh, lo que resulta en un rango inter-cuartil (IQR) de 0.37 kWh. Esta diferencia de 0.37 kWh entre el 25% y el 75% de los datos refleja la variabilidad en el consumo de energía. Un IQR más amplio indica una mayor dispersión de los datos, mientras que un IQR más estrecho sugiere una distribución más concentrada alrededor de la mediana.

Por otro lado, se observa que los días domingo presentan el menor consumo energético en esta vivienda. En este caso, los valores de los cuartiles son los siguientes: $Q1 = 0.96$ kWh, $\text{media} = 1.20$ kWh y $Q3 = 1.70$ kWh, con un rango inter-cuartil de 0.74 kWh.

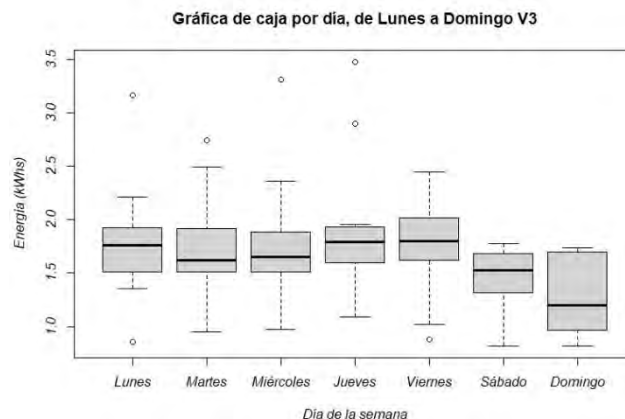


Figura 6.1.3. Diagrama de caja y bigotes de los días de la semana de la V3.

Tabla 6.1.1. Datos obtenidos en las gráficas de cajas y bigotes de las viviendas.

Vivienda	Mayor o menor consumo	Día promedio	Q1 (kWh)	Mediana (kWh)	Q3 (kWh)	Inter cuartil (kWh)
1	Máximo	Sábado	3.66	4.73	5.99	2.33
1	Mínimo	Martes	2.52	3.41	4.17	1.65
2	Máximo	Jueves	4.59	5.24	6.24	1.65
2	Mínimo	Sábado	3.32	4.48	5.24	1.92
3	Máximo	Viernes	1.62	1.80	1.99	0.37
3	Mínimo	Domingo	0.96	1.20	1.70	0.74

6.2 Aplicación de la optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red para las tres viviendas

Se realizó la aplicación de la optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica en cada una de las viviendas monitoreadas. Los resultados obtenidos se describen por vivienda en los puntos 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3.

6.2.1 Caso de estudio - Vivienda 1

En la [Figura 6.2.1.1](#) se muestra la potencia generada con una irradiancia de 1000 W/m² en una superficie de 3 m². Donde la energía generada por el sistema es de 1920 Wh y la energía consumida por la vivienda 1 es de 1793 Wh.

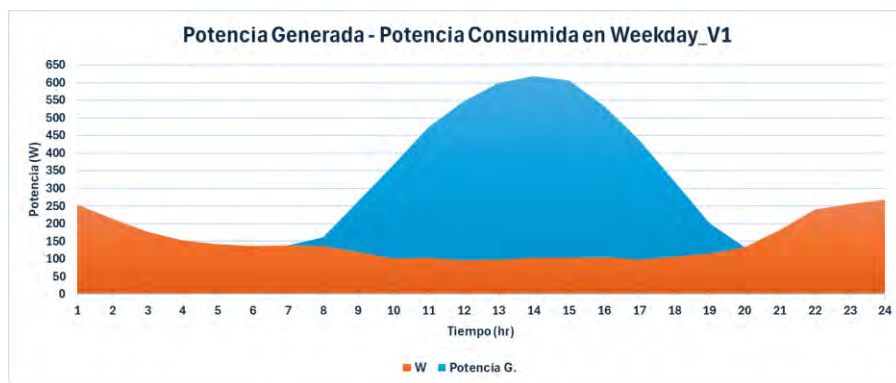


Figura 6.2.1.1. Potencia generada (azul) y potencia consumida (naranja) por la Vivienda 1 con una irradiancia de 1000 W/m^2 para Weekday.

Para el caso de weekend la potencia generada con una irradiancia de 1000 W/m^2 en una superficie de 3 m^2 . Donde la energía generada por el sistema es de 1920 Wh y la energía consumida por la Vivienda 1 es de 2187 Wh .

En la [Figura 6.2.1.2](#) se muestra los resultados obtenidos en la optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red, en el caso para weekday, con irradiancias de 1000 y 800 W/m^2 se obtuvo una superficie de captación de 2 m^2 y con una irradiancia de 600 W/m^2 una superficie óptima de 3 m^2 . Los resultados obtenidos para weekend, se obtuvo para una irradiancia de 1000 y 800 W/m^2 una superficie de captación de 3 m^2 y con una irradiancia de 600 W/m^2 una superficie óptima de 4 m^2 .

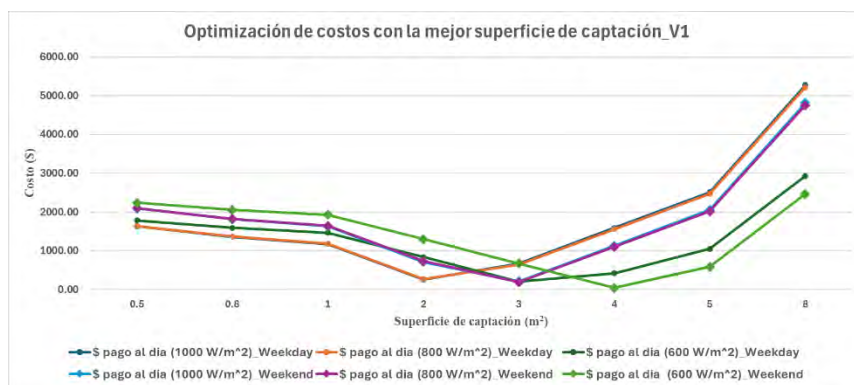


Figura 6.2.1.2. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red Vivienda 1.

En las [Figuras 6.2.1.3](#) y [6.2.1.4](#) se muestra una representación de los resultados en una gráfica de superficie para una mejor visualización.

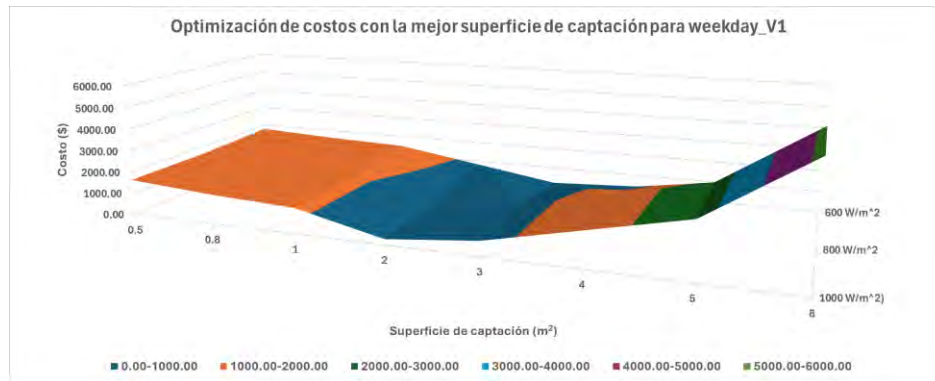


Figura 6.2.1.3. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekday Vivienda 1 (gráfica de superficie).

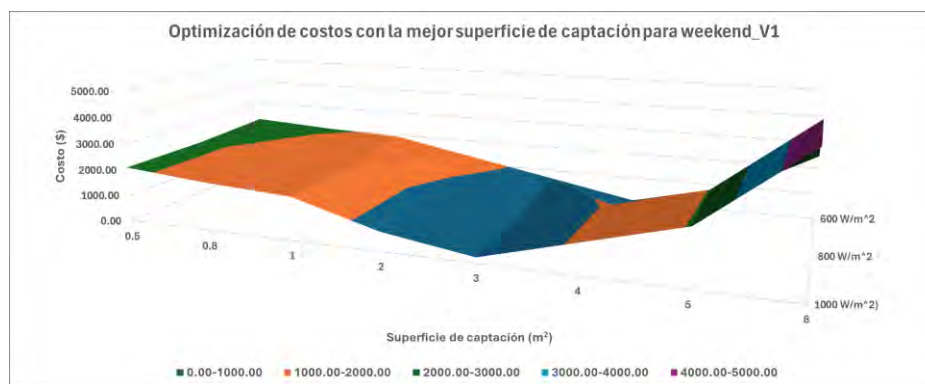


Figura 6.2.1.4. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekend Vivienda 1 (gráfica de superficie).

6.2.2 Caso de estudio - Vivienda 2

En la [Figura 6.2.2.1](#) se muestra la potencia generada con una irradiancia de 1000 W/m² en una superficie de 4 m². Donde la energía generada por el sistema es de 2,561 Wh y la energía consumida de 2,342 Wh.

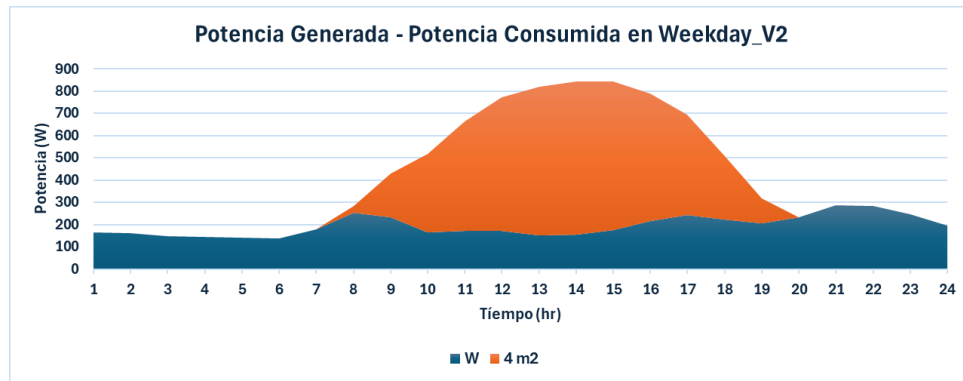


Figura 6.2.2.1. Potencia generada y potencia consumida por la Vivienda 2 con una irradiancia de 1000 W/m² para Weekday.

En el caso weekend la potencia generada con una irradiancia de 1000 W/m² en una superficie de 3 m². Donde la energía generada por el sistema es de 2,561 Wh y la energía consumida es de 2,342 Wh.

En la [Figura 6.2.2.2](#) se muestra los resultados obtenidos en la optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red, para weekday se obtuvo con una irradiancia de 1000 y 800 W/m² una superficie de captación de 3 m² y con una irradiancia de 600 W/m² una superficie optima de 4 m². De los resultados obtenidos para weekend, se obtuvo para 1000 y 800 W/m² una superficie de captación de 3 m² y con una irradiancia de 600 W/m² una superficie optima de 4 m².

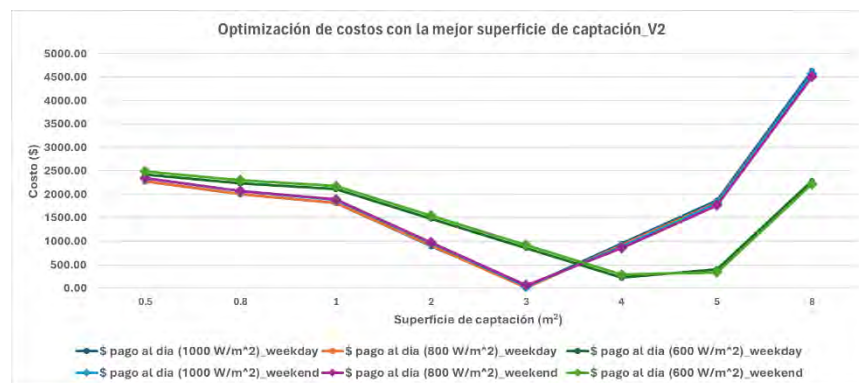


Figura 6.2.2.2. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red, Vivienda 2.

En las [Figuras 6.2.2.3](#) y [6.2.2.4](#) se muestra una representación de los resultados en una gráfica de superficie para una mejor visualización.

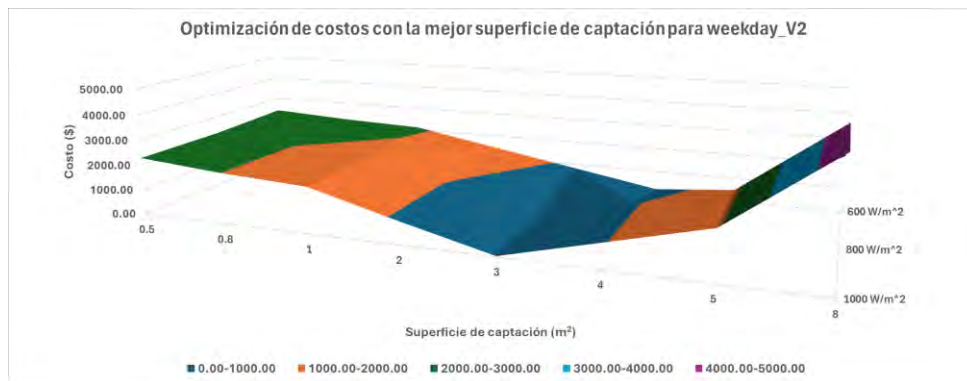


Figura 6.2.2.3. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekday, Vivienda 2.

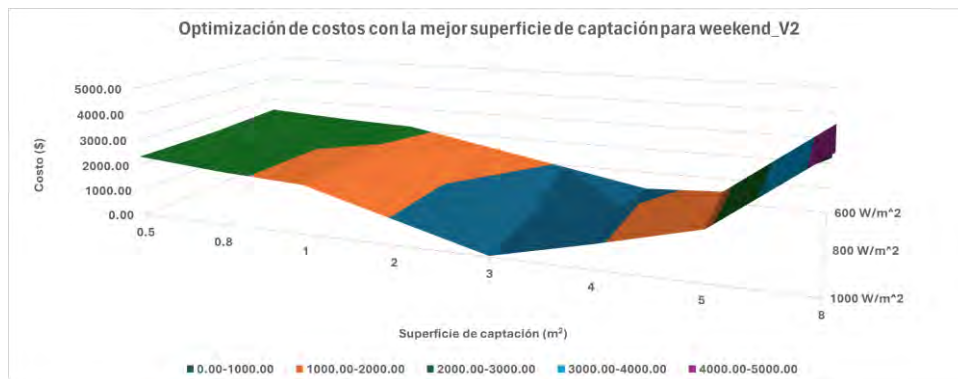


Figura 6.2.2.4. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekend, Vivienda 2.

6.2.3 Caso de estudio - Vivienda 3

En la [Figura 6.2.3.1](#) se muestra la potencia generada con una irradiancia de 1000 W/m² en una superficie de 1 m². La energía generada por el sistema es de 640 Wh y la energía consumida de 912 Wh.

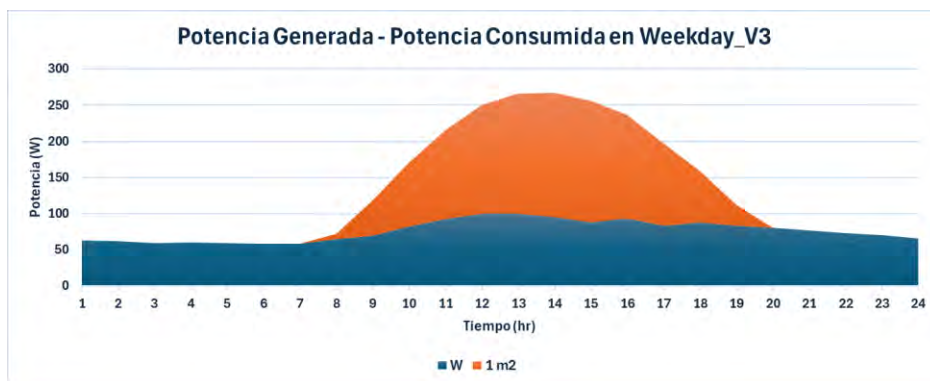


Figura 6.2.3.1. Potencia generada y potencia consumida por la Vivienda 3 con una irradiancia de 1000 W/m² para weekday.

En el caso weekend la potencia generada con una irradiancia de 1000 W/m² en una superficie de 1 m². La energía generada por el sistema es de 640 Wh y la energía consumida es de 869 Wh.

En la [Figura 6.2.3.2](#) se muestra los resultados obtenidos en la optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red, en este caso de weekday, se obtuvo para una irradiancia de 1000 y 800 W/m² una superficie de captación de 1 m² y con una irradiancia de 600 W/m² una superficie optima de 2 m².

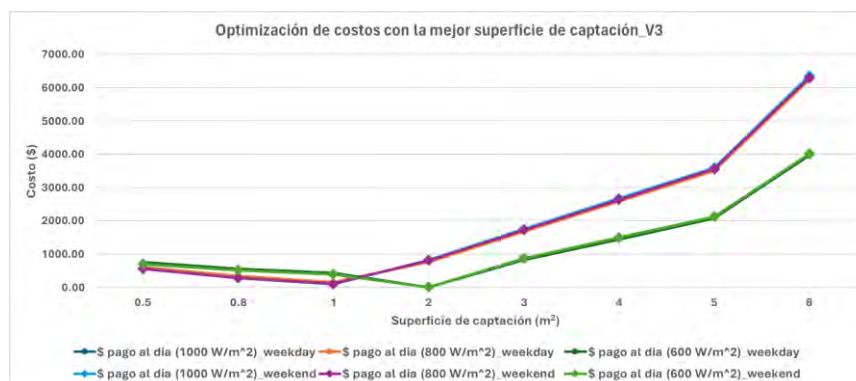


Figura 6.2.3.2. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red, Vivienda 3.

En las [Figuras 6.2.3.3](#) y [6.2.3.4](#) se muestra una representación de los resultados en una gráfica de superficie para una mejor visualización.

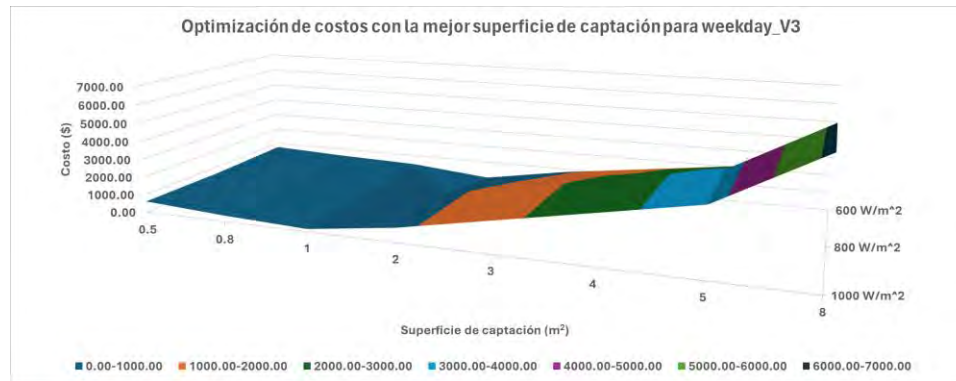


Figura 6.2.3.3. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekday, Vivienda 3.

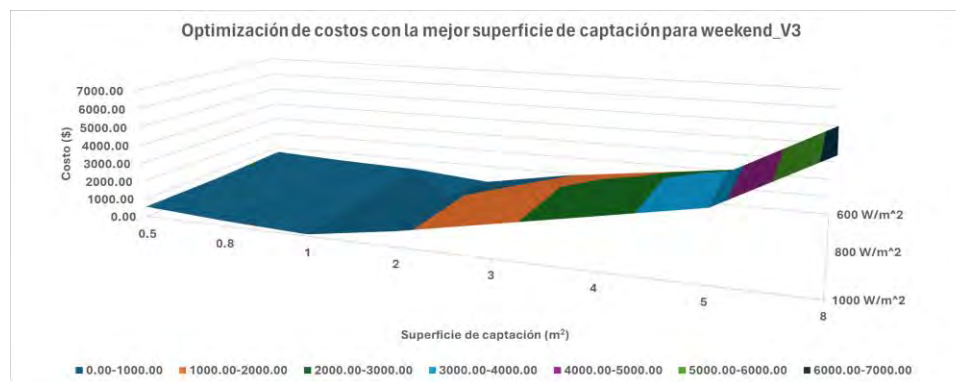


Figura 6.2.3.4. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red para weekend, Vivienda 3.

En la [tabla 6.2.3](#) se muestra una comparación de los resultados obtenidos en los puntos 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3, para una mejor visualización.

Como se observa, para las viviendas se aplica una misma superficie de captación para weekday y weekend, cuando la irradiancia sea de 1000 a 800 W/m², sin embargo, como se conoce, los sistemas fotovoltaicos son intermitentes y en caso de una deficiencia de irradiancia, en el caso de 600 W/m² la superficie de captación aumenta 1 m².

Tabla 6.2.3. Tabla comparativa de los resultados de la función objetivo con distinta irradiancia.

Vivienda		Superficie m ² (1000 W/m ²)	Superficie m ² (800 W/m ²)	Superficie m ² (600 W/m ²)
1	Weekday	2	2	3
	Weekend	3	3	4

2	Weekday	3	3	4
	Weekend	3	3	4
3	Weekday	1	1	2
	Weekend	1	1	2

6.3 Resultados en MatLab aplicando la técnica de optimización PSO

Se realizó la comprobación de los resultados obtenidos mediante la optimización de forma discreta, aplicando una técnica de optimización por enjambre de partículas (PSO), utilizando un código en el software Matlab, con el propósito de determinar la superficie de captación y que minimice el costo total, donde se considera la inversión inicial en paneles e inversores, el ahorro generado por la energía solar producida y el costo de la energía no cubierta por el SFV.

El algoritmo PSO explora diferentes áreas entre 0.5 y 8 m². La configuración del algoritmo PSO es con 30 partículas y 100 iteraciones, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6.3 Tabla comparativa de los resultados de la función objetivo con distinta irradiancia.

Vivienda		Superficie m ² (1000 W/m ²)	Superficie m ² (800 W/m ²)	Superficie m ² (600 W/m ²)
1	Weekday	2.10	2.12	2.94
	Weekend	2.61	2.63	3.65
2	Weekday	2.85	2.88	3.99
	Weekend	2.92	2.95	4.09
3	Weekday	1.11	1.12	1.56
	Weekend	1.06	1.07	1.48

Los resultados obtenidos de la forma discreta en comparación con el método de optimización por PSO son muy similares, sin embargo, los resultados no son tan exactos debido en la forma de la evaluación de la forma discreta fue elaborado por puntos concretos 0.5, 0.8, 1, 2, 3, 4, 5 m², en cambio, por el método de PSO se evaluó de 0.5 en 5 m² con mayores iteraciones. Con base a lo anterior se aprecia que los resultados son aproximados entre un método y otro.

6.4 Prueba y validación con PVSyst

Se realizó la simulación con el software PVSyst para la comprobación de la optimización de los sistemas fotovoltaicos de las tres viviendas. A continuación, se muestra cada caso y los resultados obtenidos.

Para llevar a cabo la simulación en el software se debían conocer algunos datos importantes, como es: la ubicación geográfica de las viviendas (latitud y longitud), datos de la irradiancia durante todo el año, datos meteorológicos, estos datos se utilizaron los que proporciona el software, de la base de datos de Meteonorm, así como la energía consumida anual de las viviendas, para ello se utilizaron los datos adquiridos de nuestro equipo Emporia, que registro la energía consumida durante el 2024. Para continuar con el análisis de nuestros sistemas se eligieron los paneles fotovoltaicos e inversores. Para la Vivienda 1 (a) se utilizó un panel solar de la marca JA Solar Modelo JAM72-S30-550-MR de una potencia de 550 Wp, y un microinversor de la marca APsystems modelo DS3. b) para la Vivienda 2 se utilizaron dos paneles solares de la marca JA Solar Modelo JAM72-S30-550-MR de una potencia de 550 Wp, y un inversor de la marca APsystems modelo QS1A-BR. c) para la Vivienda 3 se utilizó un panel solar de la marca LG Electronics Modelo LG 405 N3K-V6 de una potencia de 405 Wp, y un microinversor de la marca APsystems modelo DS3.

Teniendo los datos necesario para la simulación y definiendo las configuraciones de los sistemas fotovoltaicos (arreglo fotovoltaico) se procede a la simulación, donde se obtendrán la cantidad de energía eléctrica que se espera que el sistema genere en un año, un desglose de la energía producida esperada en cada uno de los meses del año, lo que nos dará una idea del comportamiento del sistema en las estaciones del año. Se conocerá las pérdidas del sistema fotovoltaico por ejemplo por inclinación, en el mismo arreglo fotovoltaico, pérdidas por temperatura, en el inversor entre otras.

En la [Figura 6.4.1.1](#) se muestra los diagramas unifilares de los sistemas fotovoltaicos de cada una de las viviendas,

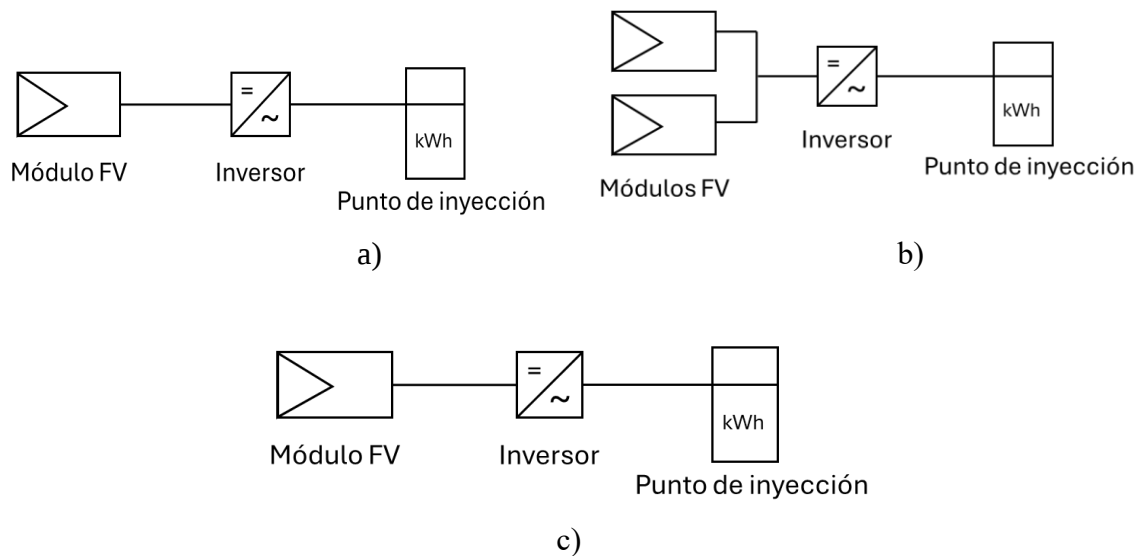
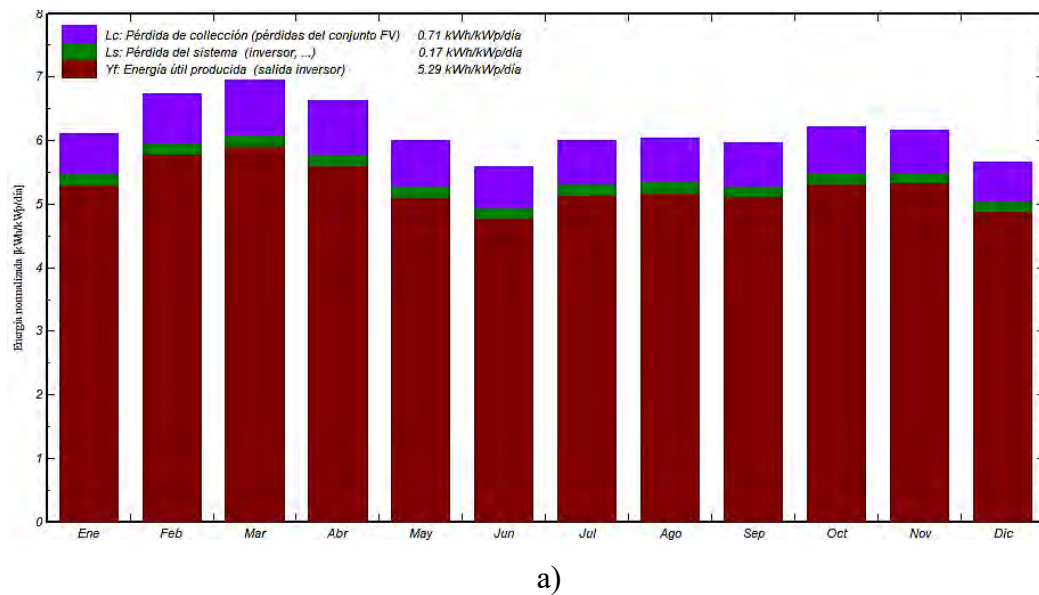
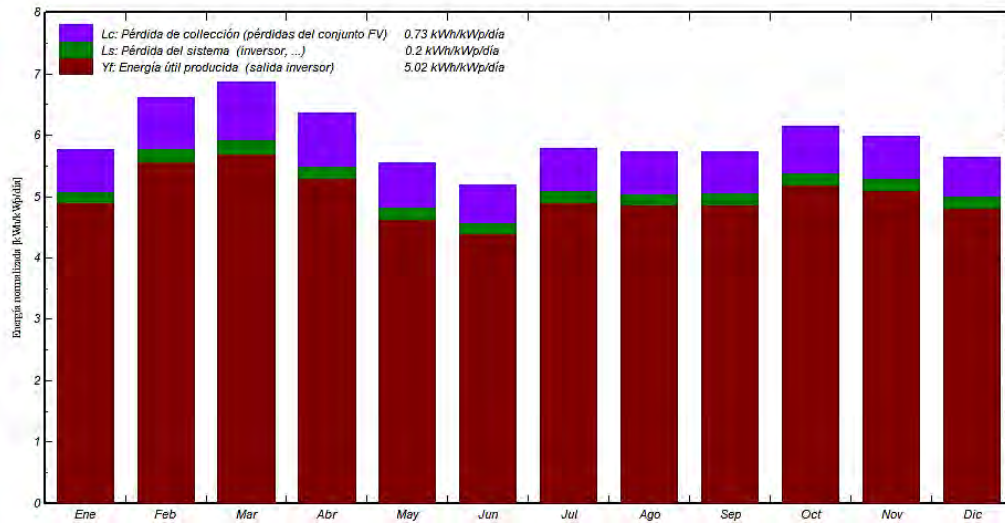


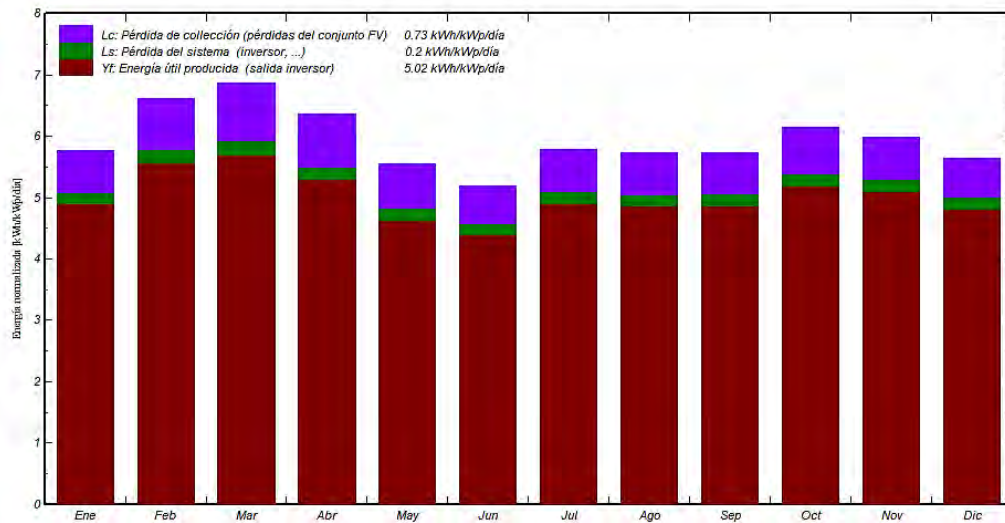
Figura 6.4.1.1. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico: a) Vivienda 1, b) Vivienda 2 y c) Vivienda 3.

Con base a los datos descritos en el punto 6.1 de los datos obtenidos en el monitoreo de la vivienda se obtuvieron los siguientes resultados. En la [Figura 6.4.1.2](#) se muestra la gráfica durante el año donde Lc que está representada del color morado es la pérdida del arreglo fotovoltaico, Ls representado de color verde son las pérdidas del inversor, etc., Yf de color marrón es la energía útil producida, que viene siendo la energía útil en la salida del inversor.





b)



c)

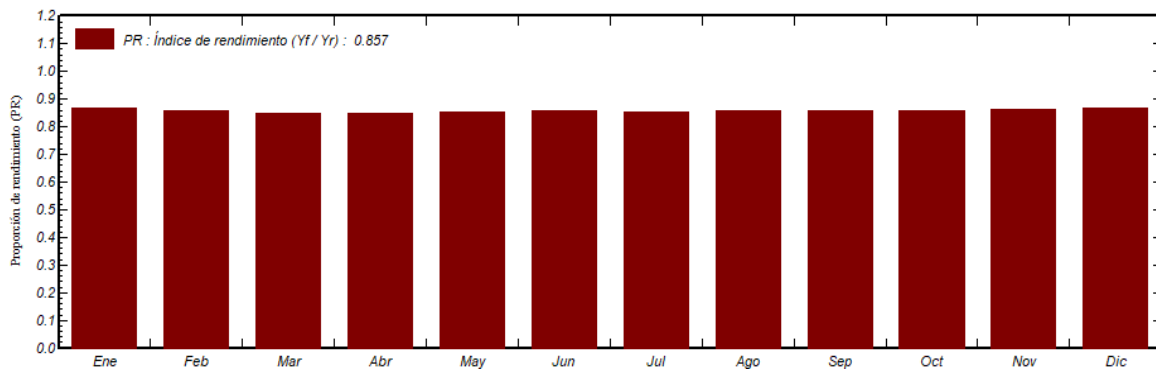
Figura 6.4.1.2. Producción normalizada (por kWp): a) Potencia nomina Vivienda 1 de 550 Wp, b) Potencia nominal Vivienda 2 de 1100 Wp y c) para la Vivienda 3 una potencia nominal de 405 Wp.

En donde el Watt-pico (Wp) es la potencia máxima que un módulo fotovoltaico (PV) puede generar bajo condiciones estándar de prueba. Donde se consideran los siguientes parámetros

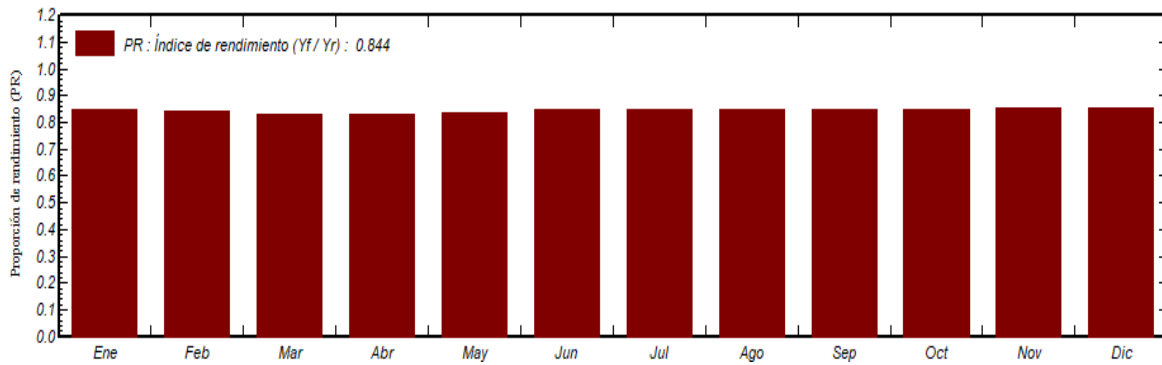
Irradiancia solar de 1000 W/m^2 , una temperatura de 25°C y una masa de aire de 1.5, para el cálculo de la potencia pico se determina por el producto de la eficiencia (η), la superficie de captación (S_{cap}) y la irradiancia (R):

$$Wp = \eta * S_{cap} * R. \quad (24)$$

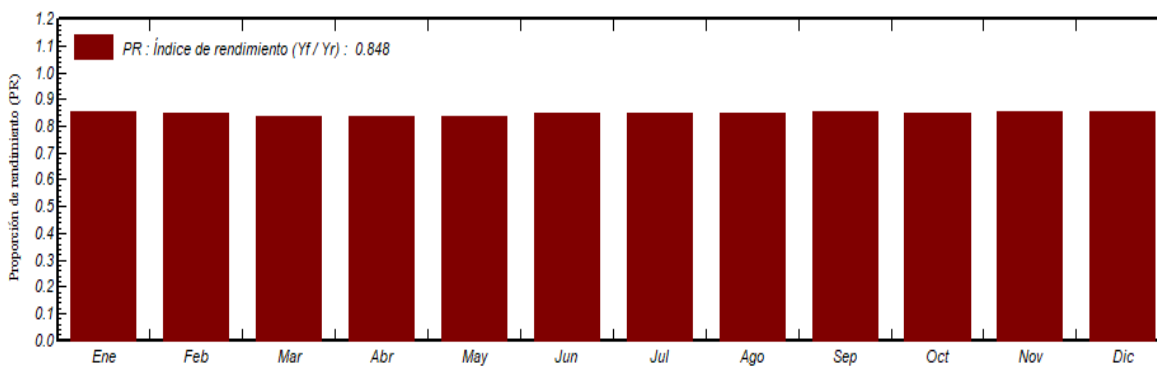
En la [Figura 6.4.1.3](#) se muestra los resultados obtenidos en la simulación obteniendo una proporción de rendimiento del 85.7% para V1, 84.4% para V2 y 84.8% para V3, siendo este el rendimiento en general del sistema. El índice de rendimiento útil, debido a que no depende directamente de las condiciones climáticas o de la orientación del sistema, lo que permite comparar la calidad de diferentes instalaciones en distintas ubicaciones, por lo que un sistema bien diseñado y mantenido suele tener proporción de rendimiento (PR) entre el 75 y el 85%.



a)



b)



c)

Figura 6.4.1.3. Proporción de rendimiento (PR): a) Vivienda 1, b) Vivienda 2 y c) Vivienda 3.

En la [tabla 6.4.1](#) se muestra los resultados obtenidos en la simulación del software PVsyst. Se observa que la energía producida anual es aproximadamente igual a la energía consumida por cada una de las viviendas, de esta forma se cubre el 100% del consumo total anual de cada vivienda, teniendo un pequeño excedente de 62 kWh para la V1, de 293 kWh para V2 y de 88 kWh para V3 (ver ecuación 25).

$$E_{\text{excedente}} = E_{\text{producida}} - (E_{\text{consumida del sistema}} + E_{\text{consumida de la red}}), \quad (25)$$

$$E_{\text{excedente}} = 1062 - (482 + 518) = 1062 - (1000) = 62 \text{ kWh}.$$

Tabla 6.4.1. Tabla de resultados de los sistemas fotovoltaicos.

Vivienda	Superficie (m ²)	Pérdidas en el arreglo fotovoltaico	Pérdidas en el inversor	Producción energética (anual)	Energía consumida del sistema (anual)	Energía inyectada a la red (anual)	Energía consumida de la red (anual)
1	3	-9.3%	-3.1%	1062 kWh	482 kWh	579 kWh	518 kWh
2	5	-9.8%	-3.8%	2014 kWh	680 kWh	1334 kWh	1041 kWh
3	2	-9.8%	-3.0%	745 kWh	290 kWh	455 kWh	367 kWh

6.5 Costo nivelado de la Energía (LCOE)

El costo nivelado de la energía (LCOE) ayuda a comparar el costo de generación de energía entre diferentes tecnologías y proyectos.

$$LCOE \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{\text{Costo total del ciclo de vida } \left(\frac{\$}{W} \right)}{\text{Producción total de energía durante su vida útil } \left(\frac{kWh}{kW} \right)}, \quad (26)$$

desglosando cada variable de la ecuación 26, la ecuación queda expresada de la siguiente manera (25),

$$LCOE = \frac{\text{Costo de instalación} + \sum_{n=1}^N \frac{\text{Costo O\&M}}{(1 + \text{Tasa de descuento})} - \sum_{n=1}^N \frac{\text{Depresación}}{(1 + \text{Tasa de descuento})^n \times (\text{tasa de impuesto})} - \frac{\text{Valor residual}}{(1 + \text{Tasa de descuento})}}{\sum_{n=1}^N \frac{kWh \text{ basado en CA}}{(1 + \text{Tasa de descuento})^n} \times (1 - \text{Tasa de degradación del sistema})} \quad (27)$$

LCOE está dada en \$/kWh. Costo de instalación, este costo incluye el costo del inversor, costo de los paneles fotovoltaicos, así como el costo de los herrajes, cableado y mano de obra. Costo O&M es el costo de mantenimiento y operación. Tasa de descuento es el porcentaje que se usa traer a valor presente los flujos de efectivo futuro por lo que se usa para evaluar la rentabilidad de proyectos. En otras palabras, es una tasa del sistema financiado, donde se considera el capital y la deuda que se adquiere. Sin embargo, este sistema no es considerado para un financiamiento. Por lo que la fórmula expresada es reducida. Depreciación se asume que el sistema pierde el mismo valor cada año hasta llegar a su valor residual (ver ecuación 28),

$$\text{Depreciación} = \frac{\text{Costo inicial} - \text{Costo residual}}{\text{Vida Útil (años)}}. \quad (28)$$

Tasa de impuesto, en México la tasa de impuesto es referente al IVA, que en el caso de las personas morales se considera un 30% y para las personas físicas un 16%. Valor Residual, el valor residual es un porcentaje del costo original del sistema, para un sistema fotovoltaico se puede considerar de dos maneras, una considerar solo los paneles fotovoltaicos y la segunda es el sistema completo como son los paneles fotovoltaicos, inversor, estructuras, cableado, etc.

$$\text{Valor residual} = \text{Costo inicial} \times \% \text{ valor inicial}, \quad (29)$$

se considera 15 – 30% del costo inicial si los paneles siguen operando con eficiencia reducida, de 5 – 10% si solo se pueden revender como desperdicio o reciclaje, y 0% si se considera que el sistema ya no tiene ningún valor económico.

Producción de la energía inicial (kWh en C.A), es la energía generada del sistema fotovoltaico, en este caso el valor obtenido por la simulación por PVSyst es de 1062 kWh. Degradación del sistema, es el porcentaje anual de reducción de la producción de la energía del sistema fotovoltaico, esta suele ser de 0.5 a 1%. En nuestro caso es de 0.55% con base a la hoja de datos de los paneles solares.

Con base a lo descrito anteriormente nuestra formula queda de la siguiente manera (ecuación 30). Debido a que el proyecto no está considerado de forma de financiamiento ante alguna organización o empresa, se reduce como se muestra en la ecuación 30.

$$LCOE = \frac{\text{Costo de instalación} + \sum_{n=1}^N \text{Costo O\&M} - \sum_{n=1}^N \text{Depresación} \times (\text{tasa de impuesto}) - \text{Valor residual}}{\sum_{n=1}^N \text{kWh basado en CA} \times (1 - \text{Tasa de degradación del sistema})} \quad (30)$$

Los resultados que se obtuvieron considerando los costos de los equipos en tiendas departamentales, y precios obtenidos en internet se muestran en la [tabla 6.5.1](#).

Tabla 6.5.1. Resultados obtenidos.

Vivienda	Energía generada (kWh)	LCOE equipos en internet	LCEO tienda departamental
1	1062	\$2.61	\$4.66
2	2001	\$1.68	\$3.19
3	743	\$3.73	\$4.30

6.6 CO₂ en función de la energía consumida en las viviendas

Determinar las equivalencias de las emisiones de CO₂ con respecto a la equivalencia del consumo energético de las viviendas, es útil para varios propósitos, especialmente en el contexto de sostenibilidad, eficiencia energética y mitigación del cambio climático. Este nos permite cuantificar cómo el consumo energético de las viviendas contribuye al calentamiento

global, también nos ayuda a comparar diferentes fuentes de energía, por ejemplo, electricidad renovable contra combustibles fósiles en términos de huella de carbono.

Para determinar cuánto CO₂ equivale a la energía consumida por las viviendas, está expresada en la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones de CO}_2 \text{ (kg)} = \text{Energía consumida (kWh)} \times \text{Factor de emisión (kg CO}_2\text{/kWh)} \quad (30)$$

En la [tabla 6.6.1](#) se muestra algunos de los factores de energía con sus respectivos factores de emisión, para considerar en el cálculo de la emisión de CO₂.

Tabla 6.6.1. Factores de energía y su factor de emisión

Factor de energía	Factor de emisión
Carbón	0.90
Gas Natural	0.20 - 0.22
Red eléctrica mundial	~ 0.475
Red eléctrica México	~ 0.4 – 0.45
Solar, eólica, hidroeléctrica	~ 0.0 – 0.05

En la [tabla 6.6.2](#) se muestra los resultados obtenidos al implementar el cálculo considerando los datos de la simulación en PVSyst, así como la consideración del valor de 0.45 de la red eléctrica de México, en este caso de la CFE.

Tabla 6.6.2. Valores obtenidos en el cálculo de la emisión de CO₂.

Vivienda	Energía consumida (kWh) Anual	Emisión de CO₂ (kg) Anual	Gas Natural	Carbón	Energía Solar
1	1062	478	234	956	53
2	2001	900	440	1801	100
3	743	334	163	669	37

Capítulo VII. Conclusión y trabajos futuros

7.1 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se examinó la generación energética de un sistema fotovoltaico y se analizó el perfil de consumo eléctrico en tres viviendas mediante el seguimiento de datos. Los resultados demostraron que la producción de energía solar fluctuaba según las condiciones meteorológicas y el rendimiento del sistema. Además, se detectaron variaciones significativas en el consumo entre los tres hogares, lo que refleja distintos patrones de uso, probablemente asociados a los hábitos y rutinas de cada familia.

Al comparar los datos gráficos del sistema fotovoltaico, se visualizaron claramente las diferencias en generación durante tres días con condiciones contrastantes (óptimas, intermedias y desfavorables), así como su correlación con los picos de demanda en las viviendas. Estos hallazgos subrayan la influencia clave de la eficiencia del sistema fotovoltaico en la producción de energía renovable. Asimismo, destacan la necesidad de entender y gestionar el consumo residencial para mejorar la eficiencia energética y minimizar gastos.

Cabe destacar que la configuración del sistema fotovoltaico (conectado a la red) determina directamente la función objetivo. Los análisis realizados hasta el momento demuestran una notable concordancia entre los cálculos matemáticos y los resultados obtenidos mediante la técnica de optimización por enjambre de partículas (PSO).

Los datos presentados en la [Figura 7.1](#) revelan que la superficie óptima de captación para la vivienda 1 es de 3 m². Este valor representa el punto de mínimo costo para todas las condiciones evaluadas, donde además se consigue la mayor eficiencia económica independientemente de los niveles de irradiancia y el tipo de día (weekday o weekend). El análisis gráfico evidencia que superar esta área de captación no genera beneficios adicionales, ya que los costos experimentan un incremento significativo a partir de este umbral, lo que indica un rendimiento decreciente en la inversión.

Análisis de superficies óptimas de captación solar para cada una de las viviendas, en donde se muestra los resultados obtenidos (ver [Figura 7.1](#)).

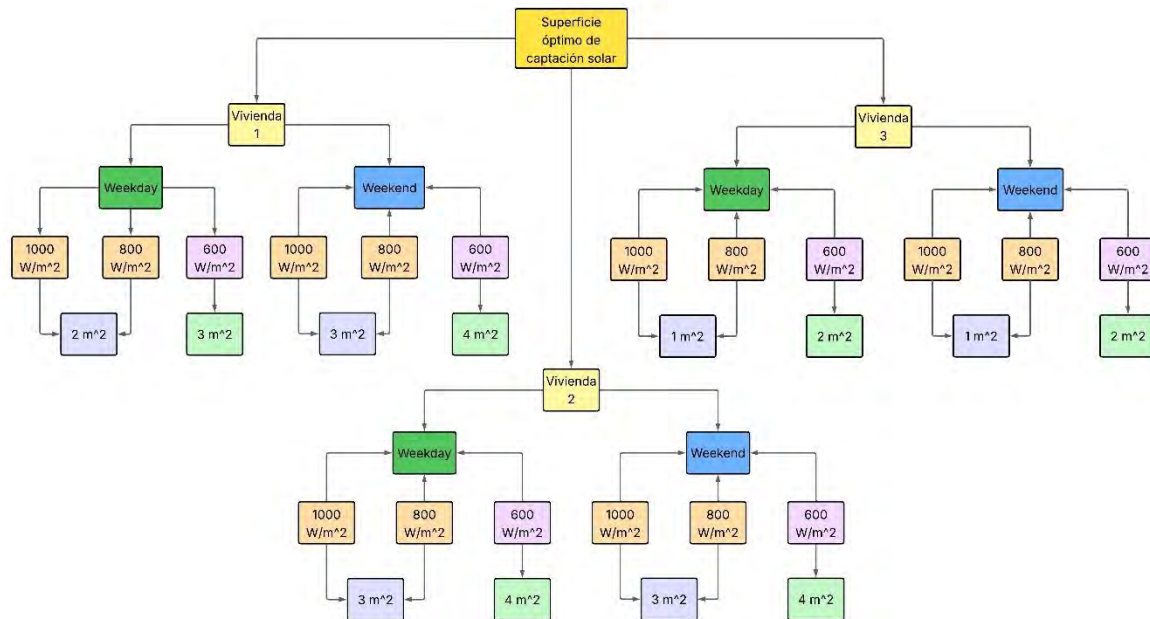


Figura 7.1. Resultados obtenidos en la optimización de la superficie de captación para cada Vivienda, con distintas irradiancias.

La recomendación técnica sugiere 3 m² para V1, 4 m² para V2 y 2 m² para V3, como solución balanceada, ya que ofrece mayor capacidad de captación en condiciones variables y mantiene un impacto económico marginal, proporciona estabilidad operativa en diferentes escenarios.

Con base a lo anterior, los casos demuestran que la superficie óptima varía significativamente según las condiciones de irradiación. La selección final debe considerar no solo el costo mínimo absoluto, sino también la estabilidad operativa y la adaptabilidad a diferentes escenarios climáticos, donde las soluciones de 3 m², 4 m² y 2 m² respectivamente ofrecen el mejor equilibrio entre eficiencia económica y rendimiento energético.

7.2 Trabajos Futuros

El estudio de este trabajo nos abre una posibilidad de diversas variantes futuras como las que se describe a continuación:

- Ampliando el estudio a otros estados de la República Mexicana.
- Realizar el estudio con sistemas híbridos, sistemas aislados con sistemas de almacenamiento (baterías).

-
- Realizar el estudio con sistemas interconectados a la red y con sistemas de almacenamiento (baterías).

Referencias

- [1] "SENER. "Balance Nacional de Energía 2022"," p. <https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%ADa2022.pdf>, 2022.
- [2] W. R. Institute, "Los compromisos climáticos de México," pp. <https://es.wri.org/noticias/los-compromisos-climaticos-de-mexico#:~:text=M%C3%A9xico%20se%20comprometi%C3%B3%20a%20que,de%20carbono%20negro%2C%20requieren%20incentivos>, 2019.
- [3] E. Financiero, "México se encamina al fracaso en metas de energías limpias," pp. <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/2024/02/19/mexico-se-encamina-al-fracaso-en-metas-de-energias-limpias/>.
- [4] IMCO, "EL PRODESEN 2023-2037 INCREMENTA ARTIFICIALMENTE LAS CIFRAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA LIMPIA EN MÉXICO," pp. <https://imco.org.mx/el-prodesen-2023-2037-incrementa-artificialmente-las-cifras-de-generacion-de-energia-limpia-en-mexico/>, 2023.
- [5] G. W. Crabtree and N. S. Lewis, "Solar energy conversion," *Physics Today*, vol. 60, no. 3, pp. 37-42, 2007, doi: 10.1063/1.2718755.
- [6] P. Blacus Victor. "Electromagnetic-Spectrum.svg." <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic-Spectrum.svg> (accessed.
- [7] N. E. Sciences's. "The Power Project." <https://power.larc.nasa.gov/> (accessed.
- [8] C. R. Méndez Javier, *Energía Solar Fotovoltaica*.
- [9] A. Sánchez Juárez and D. Martínez Escobar, "Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial," 2017.
- [10] NREL. "Best research - Cell Efficiencies." <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed.
- [11] S. A. Kalogirou, *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic press, 2013.
- [12] A. de Normalización, A. Certificación, S. d. C. Mabe, and S. Normalización y Certificación NYCE, "NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-015-ENER-2018, EFICIENCIA ENERGÉTICA DE REFRIGERADORES Y CONGELADORES ELECTRODOMÉSTICOS. LÍMITES, MÉTODOS DE PRUEBA Y ETIQUETADO PREFACIO."
- [13] INEGI, "Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI)," ed: INEGI Aguascalientes, 2018.
- [14] N. POWER. "NASA Power Data." <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (accessed.
- [15] CONAGUA. "Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS)." <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s> (accessed.
- [16] "Emporia." <https://shop.emporiaenergy.com/> (accessed.
- [17] J. C. Ponce Gallegos *et al.*, *Inteligencia artificial*. Iniciativa Latinoamericana de Libros de Texto Abiertos (LATIn), 2014.
- [18] B. Yu, J. Zhang, and A. Fujiwara, "Representing in-home and out-of-home energy consumption behavior in Beijing," *Energy policy*, vol. 39, no. 7, pp. 4168-4177, 2011.

-
- [19] D. Bonino, F. Corno, and L. De Russis, "Home energy consumption feedback: A user survey," *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 383-393, 2012.
- [20] M. T. Baquero and F. Quesada, "Eficiencia energética en el sector residencial de la Ciudad de Cuenca, Ecuador," *Maskana*, vol. 7, no. 2, pp. 147-165, 2016.
- [21] D. Jareemit and B. Limmeechokchai, "Influence of changing behavior and high efficient appliances on household energy consumption in Thailand," *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 241-246, 2017.
- [22] P. van den Brom, A. Meijer, and H. Visscher, "Performance gaps in energy consumption: household groups and building characteristics," *Building Research & Information*, vol. 46, no. 1, pp. 54-70, 2018.
- [23] L. Barelli *et al.*, "Dynamic analysis of a hybrid energy storage system (H-ESS) coupled to a photovoltaic (PV) plant," *Energies*, vol. 11, no. 2, p. 396, 2018.
- [24] A. Gargallo Tatay, "Medición y análisis del consumo de energía eléctrica en los receptores domésticos en condiciones reales de funcionamiento: Aplicación a una vivienda unifamiliar," Universitat Politècnica de València, 2018.
- [25] H. Shareef, M. S. Ahmed, A. Mohamed, and E. Al Hassan, "Review on home energy management system considering demand responses, smart technologies, and intelligent controllers," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 24498-24509, 2018.
- [26] B. X. Prado Gaibor, "Análisis técnico-económico de una instalación fotovoltaica en consumidores residenciales en áreas rurales aisladas," 2020.
- [27] R. Basmadjian, "Optimized charging of pv-batteries for households using real-time pricing scheme: A model and heuristics-based implementation," *Electronics*, vol. 9, no. 1, p. 113, 2020.
- [28] A. Sen and Y. Qiu, "Aggregate Household Behavior in Heating and Cooling Control Strategy and Energy-Efficient Appliance Adoption," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 69, no. 3, pp. 682-696, 2020.
- [29] S. D. M. Alarcón, W. A. G. Salas, and G. A. S. Velandia, "Estudio comparativo entre energía eléctrica y energía solar en viviendas unifamiliares," *Formación Estratégica*, vol. 3, no. 01, pp. 98-15, 2021.
- [30] P. Nie, M. Roccotelli, M. P. Fanti, Z. Ming, and Z. Li, "Prediction of home energy consumption based on gradient boosting regression tree," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1246-1255, 2021.
- [31] M. Eken and İ. Çelik, "An investigation of optimal power system designs for a net zero energy house: A case study of Kahramanmaraş," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 11, no. 4, pp. 971-982, 2022.
- [32] D. A. Becerril and J. Ley García, "Caracterización del estilo de vida a partir del consumo de energía eléctrica y las prácticas proambientales de los hogares de la ciudad de Mexicali, BC," *Revista de ciencias tecnológicas*, vol. 5, no. 1, 2022.
- [33] E. F. Agajie *et al.*, "Optimization of off-grid hybrid renewable energy systems for cost-effective and reliable power supply in Gaita Selassie Ethiopia," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 10929, 2024.
- [34] M. A. Mohamed, A. M. Eltamaly, and A. I. Alolah, "PSO-based smart grid application for sizing and optimization of hybrid renewable energy systems," *PloS one*, vol. 11, no. 8, p. e0159702, 2016.
- [35] A. K. Shukla, K. Sudhakar, and P. Baredar, "Design, simulation and economic analysis of standalone roof top solar PV system in India," *Solar Energy*, vol. 136, pp. 437-449, 2016.
-

-
- [36] M. Zeraatpisheh, R. Arababadi, and M. Saffari Pour, "Economic analysis for residential solar PV systems based on different demand charge tariffs," *Energies*, vol. 11, no. 12, p. 3271, 2018.
 - [37] H. S. Matthews, G. Cicas, and J. L. Aguirre, "Economic and environmental evaluation of residential fixed solar photovoltaic systems in the United States," *Journal of infrastructure systems*, vol. 10, no. 3, pp. 105-110, 2004.
 - [38] A. Sow, M. Mehrtash, D. R. Rousse, and D. Haillot, "Economic analysis of residential solar photovoltaic electricity production in Canada," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 33, pp. 83-94, 2019.
 - [39] A. K. Onaolapo, G. Sharma, S. Sharma, and T. Adefarati, "The economic feasibility and cost reduction of grid-linked solar PV systems in South Africa," in *2022 2nd International Conference on Innovative Sustainable Computational Technologies (CISCT)*, 2022: IEEE, pp. 1-5.
 - [40] Z. Arifin, M. A. Rosli, Y. J. Prasajo, N. F. Alfaiz, S. D. Prasetyo, and W. Mulyani, "Economic feasibility investigation of on-grid and off-grid solar photovoltaic system installation in central Java," *International Journal of Energy Production and Management*. 2023. Vol. 8. Iss. 3, vol. 8, no. 3, pp. 169-175, 2023.
 - [41] T. Khatib, A. Mohamed, and K. Sopian, "A review of photovoltaic systems size optimization techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 454-465, 2013.
 - [42] S. Khanal, R. Khezri, A. Mahmoudi, and S. Kahourzadeh, "Optimal capacity of solar photovoltaic and battery storage for grid-tied houses based on energy sharing," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 17, no. 8, pp. 1707-1722, 2023.
 - [43] M. Bianchi, L. Branchini, C. Ferrari, and F. Melino, "Optimal sizing of grid-independent hybrid photovoltaic–battery power systems for household sector," *Applied Energy*, vol. 136, pp. 805-816, 2014.
 - [44] J. Li, "Optimal sizing of grid-connected photovoltaic battery systems for residential houses in Australia," *Renewable energy*, vol. 136, pp. 1245-1254, 2019.
 - [45] S. Khanal, R. Khezri, A. Mahmoudi, and S. Kahourzadeh, "Optimal capacity of solar photovoltaic and battery storage for grid-tied houses based on energy sharing," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023.
 - [46] CFE. "Contratación de suministro para solicitudes de interconexión." <https://www.cfe.mx/hogar/infcliente/pages/catalogo-tramites.aspx> (accessed).
 - [47] "TarifasCRECasa," 2024. [Online]. Available: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1B.aspx>.
-