

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Dirección de Posgrado



*Metodología de prospección técnico-económica para la
previsión e implementación de sistemas fotovoltaicos
interconectados*

TESIS QUE PRESENTA

MC. Juan Carlos Gutiérrez Villegas
Asesor: Dr. Agustín Escamilla Martínez

Para obtener el grado de

Doctor en
Manufactura Avanzada

Aguascalientes, Aguascalientes
noviembre, 2022

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Querétaro, Querétaro, 14 de julio del 2022

MTRO. GEOVANY GONZÁLEZ CARLOS

Gerente de Posgrado
CIATEQ, A.C.

PRESENTE

El abajo firmante, miembro del Comité Tutorial del MC. Juan Carlos Gutiérrez Villegas, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis, titulado "Metodología de prospección técnico-económica para la previsión e implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados" **autorizo** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Doctor en Manufactura Avanzada**.

Sin otro particular por el momento, agradecemos la atención prestada.

Dr. Agustín Escamilla
Asesor Académico

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE COAHUILA

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
UNIDAD TORREON**

Torreón, Coahuila, 14 de julio del 2022

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico de Posgrado
CIATEQ, A.C.

El abajo firmante, miembro del Comité Tutorial del MC. Juan Carlos Gutiérrez Villegas, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis, titulado "Metodología de prospección técnico-económica para la previsión e implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados" **autorizo** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Doctor en Manufactura Avanzada**.

Sin otro particular por el momento, agradecemos la atención prestada.

Dr. Set Vejar Ruiz
Asesor en Planta

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Zapopan, Jalisco, 14 de Julio del 2022

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **MC. Juan Carlos Gutierrez Villegas**, cuyo título es:

“Metodología de prospección técnico-económica para la previsión e implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados”

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Firma

Dr. Omar Humberto Cruz Silva



CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Zapopan, Jalisco, 27 de octubre del 2022.

Mtro. Geovany González Carlos
Gerente de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno (a) **Juan Carlos Gutiérrez Villegas**, cuyo título es:

“Metodología de prospección técnico-económica para la previsión e implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados”

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Firma

Dr. Noé Villa Villaseñor



DEDICATORIA

A mi esposa Noralma y a mis hijas María Fernanda y Carla Sofía, que son parte fundamental en mi vida y que indudablemente lo han sido para la realización de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación de Tecnología Avanzado A. C. (CIATEQ) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por las facilidades concedidas hacia la realización y conclusión de este trabajo de posgrado.

Agradezco a mi director, el Dr. Agustín Escamilla Martínez; gracias por el tiempo que me ha dedicado, por su comprensión y paciencia, pero sobre todo por su aportación a la culminación de este proyecto.

Al Mtro. Raúl Contreras Acosta por su guía y recomendaciones que dieron claridad para finalizar este trabajo.

A mi asesor de planta, el Dr. Set Vejar Ruiz, por el apoyo desde que inició la investigación.

A mis revisores de tesis, Dr. Noé Villa Villaseñor y Dr. Omar Humberto Cruz Silva, por los comentarios y consejos que permitieron enriquecer esta tesis; por su interés hacia el desarrollo de mi proyecto, la disponibilidad y apoyo brindado, muchas gracias.

* * *

RESUMEN

La implementación de sistemas Fotovoltaicos (FV) Interconectados reduce el consumo de energía de la red, siendo una alternativa económicamente factible en tarifas donde el cargo es únicamente por consumo de energía, pero no necesariamente en tarifas donde se considera el consumo horario. En este trabajo se presenta una metodología de prospección técnico-económica con referencia a la tarifa Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH) que permite generar información clave para la toma de decisiones en la implementación de sistemas FV interconectados a la red que operan bajo un esquema de consumo horario. Se analiza el consumo histórico de energía por parte del usuario identificándose que la mayor demanda se encuentra en el horario intermedio y un menor consumo en el horario punta; sin embargo, al revisar la factura el cargo por consumo en horario punta aumenta de manera significativa, por tal razón se propone un SFV para abatir el consumo en este horario. Se continúa con el dimensionamiento del sistema FV, el cálculo de la inversión, un análisis de proyecciones económicas y un estudio de factibilidad para los escenarios de horario intermedio y horario punta, con el objetivo de realizar un comparativo para la consideración de uno u otro caso. Posteriormente, se presenta la implementación de un prototipo para generar, almacenar y gestionar la inyección de energía en horario punta analizando el impacto sobre la factura eléctrica y se demuestra que se puede alcanzar una reducción del costo de la demanda y energía en este horario hasta en un 37% de la factura eléctrica mensual.

Palabras clave: Energía eléctrica, Sistema fotovoltaico, Tarifa eléctrica, Horarios de consumo.

ABSTRACT

The implementation of Interconnected photovoltaic (PV) systems reduces the energy consumption of the electrical power grid, being an economically feasible alternative in rates where the charge is exclusively for energy consumption. This work presents the analysis of the High Demand Medium Hourly Voltage (GDMTH) rate that allows the design of the PV systems interconnected to the electrical power grid, thus, contributing to the reduction of maximum demand of power at peak hours, increasing energy generation through PV systems in rates where hourly consumption is considered. The energy consumption by the user is analyzed, identifying the highest demand that occurs during the intermediate hours and the lowest consumption during peak hours; however, reviewing the bill, the charge for consumption during peak hours increases significantly, for this reason, a PV system is proposed to reduce consumption during peak hours. Subsequently, the implementation of a prototype to generate, store and manage the supply of energy at peak hours is presented. This system analyzes the impact on the electricity bill, and it is shown that the reduction of demand and energy costs can be achieved up to 37% of the monthly electricity bill.

Keywords: Electric energy, Photovoltaic system, Electricity rate, Consumption hours.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
GLOSARIO	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	4
1.2 JUSTIFICACIÓN	6
1.3 OBJETIVOS.....	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos particulares	8
1.4 HIPÓTESIS	8
2. ANTECEDENTES.....	9
2.1 GESTIÓN DE ENERGÍA.....	10
2.2 ENERGÍA SOLAR.....	18
2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (SFV)	21
2.3.1 Sistema FV autónomo	23
2.3.2 Sistema FV interconectado	24
2.3.3. Sistemas FV con almacenamiento	26
2.4 ALMACENAR LA ENERGÍA	27
2.4.1 Almacenamiento hidráulico	29
2.4.2 Almacenamiento de energía térmica	30
2.4.3 Almacenamiento de energía utilizando aire comprimido	30

2.4.4 Baterías para almacenamiento de energía.....	32
2.5 NORMATIVIDAD ELÉCTRICA.....	34
2.5.1 Leyes y reglamentos.....	34
2.5.2 Facturación eléctrica.....	38
2.6 SISTEMAS FV INTERCONECTADOS CON ESQUEMAS DE MONITOREO Y CONTROL	
43	
3. MATERIALES Y MÉTODOS	47
3.1 DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE CONSUMO	47
3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FV	49
3.3 CÁLCULO DE LA INVERSIÓN	51
3.4 PROYECCIONES ECONÓMICAS	52
3.5 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD	52
3.6 METODOLOGÍA DE PROSPECCIÓN TÉCNICO – ECONÓMICO PARA INSTALACIÓN PV	52
3.7 PROCEDIMIENTO PARA INYECCIÓN DE ENERGÍA DE UN SISTEMA FV CON CONTROL DE INYECCIÓN HORARIA	54
3.8 CARACTERÍSTICAS DEL PROTOTIPO	57
3.8.1 Características del equipo a utilizar	58
3.8.2 Instalación y puesta en marcha del prototipo	63
3.9 CUMPLIMIENTO DE NORMATIVIDAD DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS.....	68
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	70
4.1 CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO ENERGÉTICO DEL CENTRO DE TRABAJO....	70
4.1.1 Consumo de energía	72
4.1.2 Demanda máxima	75
4.2 DIMENSIONADO DE SISTEMA FV PARA HORARIO INTERMEDIO Y PUNTA.....	78
4.2.1 Dimensionado de sistema FV para abatir energía en periodo intermedio	78

4.2.2 Dimensionado de sistema FV para abatir el consumo en periodo punta	79
4.3 IMPACTO EN LA FACTURA ELECTRICA	81
4.3.1 Reducción de energía en horario intermedio	81
4.3.2 Reducción en horario punta	84
4.4 CASO DE ESTUDIO: PROTOTIPO DE GENERACIÓN E INYECCIÓN EN HORARIO PUNTA.....	88
4.5 MEDICION DE LA INYECCIÓN DE ENERGÍA DE UN SISTEMA FV EN HORARIO PUNTA.....	91
CONCLUSIONES	93
RECOMENDACIONES	96
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	97
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	98
REFERENCIAS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento de la capacidad y generación de electricidad utilizando sistemas FV en México, periodo 2006 – 2016.	2
Figura 2. Irradiación solar global en México.....	19
Figura 3. Potencial de generación de electricidad fotovoltaica.....	20
Figura 4. Efecto fotoeléctrico en una celda solar.....	22
Figura 5. Esquema de un SFV autónomo.	24
Figura 6. Esquema de SFV interconectado.....	25
Figura 7. Esquema de SFV con almacenamiento y conexión a la red.....	27
Figura 8. Diagrama para dimensionar un SFVI.....	49
Figura 9. Diagrama de metodología de prospección técnica – económica para sistemas PV.....	54
Figura 10. Metodología para la generación e inyección de energía en horario punta.....	55
Figura 11. Diagrama unifilar de la instalación.....	64
Figura 12. Paneles solares instalados	65
Figura 13. Inversor/cargador, regular y sistema de control instalados.....	66
Figura 14. Sistema de almacenamiento de energía	67
Figura 15. Sistema FV con almacenamiento de energía integrado	68
Figura 16. Desglose de factura eléctrica mensual en porcentaje.	71
Figura 17. Porcentaje de costo por energía y demanda.....	71
Figura 18. Aportación de consumo por periodo anual	74
Figura 19. Demanda máxima por periodo durante un año.....	76
Figura 20. Proyección de impacto al abatir consumo en horario intermedio	82

Figura 21. Escenarios de recuperación de la inversión para abatir energía en horario intermedio.....	83
Figura 22. Proyección de impacto al abatir consumo en horario punta.....	85
Figura 23. Escenarios de recuperación de la inversión para abatir energía en horario punta	86
Figura 24. Comportamiento de la energía en horario punta	89
Figura 25. Comportamiento de la demanda en horario punta.	90
Figura 26. Comportamiento de la demanda de energía en horario punta	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las principales fuentes de energía renovables.....	15
Tabla 2. Irradiación incidente promedio anual sobre una superficie inclinada.....	21
Tabla 3. Comparación de baterías para almacenamiento de energía	33
Tabla 4. Resumen de evolución de la normatividad de la industria eléctrica en México.....	34
Tabla 5. Metas de generación de energías limpias.....	37
Tabla 6. Tarifa en Gran Demanda en Media Tensión Horaria.....	40
Tabla 7. Periodos de consumo para tarifa GDMTH en Zacatecas	41
Tabla 8. Horario definido para el cargo de energía en horario de verano.....	42
Tabla 9. Horario definido para el cargo de energía en horario de invierno.....	42
Tabla 10. Condiciones de operación del sistema FV.....	56
Tabla 11. Listado de material adquirido.....	58
Tabla 12. Características del inversor/cargador	59
Tabla 13. Características del controlador de carga.....	60
Tabla 14. Características de sistema de programación y comunicación MATE3... 61	
Tabla 15. Características sistema de administración de comunicación del sistema	61
Tabla 16. Características técnicas del panel S36PC-140.....	62
Tabla 17. Características técnicas de fuente de almacenamiento	63
Tabla 18. Promedio de consumo mensual de acuerdo con el horario durante el día.	73
Tabla 19. Porcentaje promedio mensual anual de consumo y costo de energía..	74
Tabla 20. Datos para dimensionar un sistema FV (Energía en horario intermedio).	79

Tabla 21. Inversión de sistema FV (Energía en horario intermedio)	79
Tabla 22. Datos para dimensionar un sistema FV (Energía en horario punta).....	80
Tabla 23. Inversión de sistema FV (Energía en horario punta).....	81
Tabla 24. Retorno de la inversión del sistema FV (energía en horario intermedio...)	84
Tabla 25. Retorno de la inversión del sistema FV (energía y demanda en horario punta).....	86
Tabla 26. Comparación de la inversión	87

GLOSARIO

CRE: Comisión Reguladora de Energía, es una dependencia Pública Federal que tiene carácter de Órgano Regulador Coordinado en Materia Energética.

GDMTH: Tarifa eléctrica Gran Demanda en Media Tensión Horaria, es una de las doce tarifas eléctricas para usuarios del sector industrial con una demanda igual o mayor a 100 kW.

kWh: Kilo Watt hora, es la unidad de medida la energía que emplea el sector energético para determinar el costo del consumo de los usuarios.

kWp: Kilo Watt pico, es la unidad de medida que especifica la capacidad de un sistema fotovoltaico para generar energía en el punto de máximo rendimiento.

MPPT: Maximum Power Point Tracker, que significa seguidor del punto de máxima potencia y este será cuando el voltaje y la corriente se encuentren en su punto máximo.

MW: Megawatt, es la unidad de medida de la potencia.

SEN: Sistema Eléctrico Nacional.

SFV: Sistema Fotovoltaico, es un conjunto de equipos que convierten la energía solar ene energía eléctrica.

Irradiancia: Es la unidad de medida de la potencia solar por unidad de área [kW/m²].

Irradiación: Es la unidad de medida de la energía que llega del sol por unidad de superficie [kWh/m²].

Radiación solar: Es la energía emitida por el Sol que se propaga a través del espacio mediante ondas electromagnéticas.

1. INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo tecnológico y aumento de la población está demandando un mayor consumo de recursos energéticos, en la actualidad el sector energético a nivel mundial depende de los combustibles fósiles; aun y cuando se está haciendo un uso racional de estos recursos, es necesario que a la par se realicen inversiones para desarrollar tecnología para aprovechar las energías renovables.

En años recientes México ha crecido en infraestructura para generar, transportar y suministrar energía eléctrica; así como en las normas y reglamentos que regulan estos servicios. También se ha propiciado el aprovechamiento de energías limpias que van desde estímulos fiscales para la implementación de estas tecnologías y se han realizado modificaciones de leyes y reglamentos que favorecen su desarrollo.

Con el recurso solar disponible en México se garantiza que, al implementar generadores fotovoltaicos conectados a la red de suministro eléctrico, se reduce la dependencia energética de la compañía suministradora y por consecuencia la reducción de la factura eléctrica mensual. Sin embargo, para usuarios con tarifas donde el costo de la energía depende de la hora de consumo, los sistemas fotovoltaicos no generan un impacto significativo para la reducción de la factura eléctrica mensual; ya que un alto costo ocurre durante las horas donde no hay presencia de radiación solar.

La energía solar fotovoltaica es una alternativa para satisfacer el aumento en la demanda de energía eléctrica, México tiene un recurso solar privilegiado por su ubicación geográfica en la zona intertropical, lo que la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA) identifica como el Cinturón Solar (A.T. Kearney, 2010), lo ubican como un país con un alto potencial para el aprovechamiento de esta energía renovable con una irradiación de entre 4.5 – 7.0 kWh/m² en el plano normal (Tejeda Martínez & Gómez-Azpeitia, 2015).

Zacatecas un estado ubicado en el centro de México, recibe una irradiación del orden los 6.39 kWh/m² que lo coloca por encima de algunos países de Europa donde se tiene una gran cantidad de infraestructura fotovoltaica instalada (Muro, Saucedo, De la Torre, & Reta, 2007). Esto muestra que se cuenta con la radiación

solar para la instalación de sistemas fotovoltaicos (SFV), lo que permitirá reducir el costo de energía eléctrica y por consecuencia aumentar la productividad en la industria de la región.

En México los sistemas FV instalados hasta 2006 tenían el objetivo de suministrar energía eléctrica de zonas aisladas (electrificación rural, comunicaciones, señalamientos, bombeo y refrigeración), según se tienen registros de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) y que a partir del 2007 se inició la instalación de sistemas FV interconectados a la red eléctrica (Barzalobre, Carrasco, Amtmann, Rivera, & Brailovsky, 2012).

Como se muestra en la Figura 1, la capacidad anual instalada desde el 2006 hasta el 2016 comparándola con la generación instalada durante este mismo periodo, se puede apreciar un incremento medio anual del 36.3 % en este periodo pasando de 17.6 a 388.6 MW en la capacidad instalada y un aumento de 19 a 215 GWh en la generación de energía un incremento promedio anual de 27.1 %, esto se debe principalmente a desarrollo de la tecnología y de los cambios en leyes y reglamentos que propician el aumento en las solicitudes de contratos para interconexión que desde el 2010 se ha tenido un crecimiento (Secretaría de Energía, 2017).

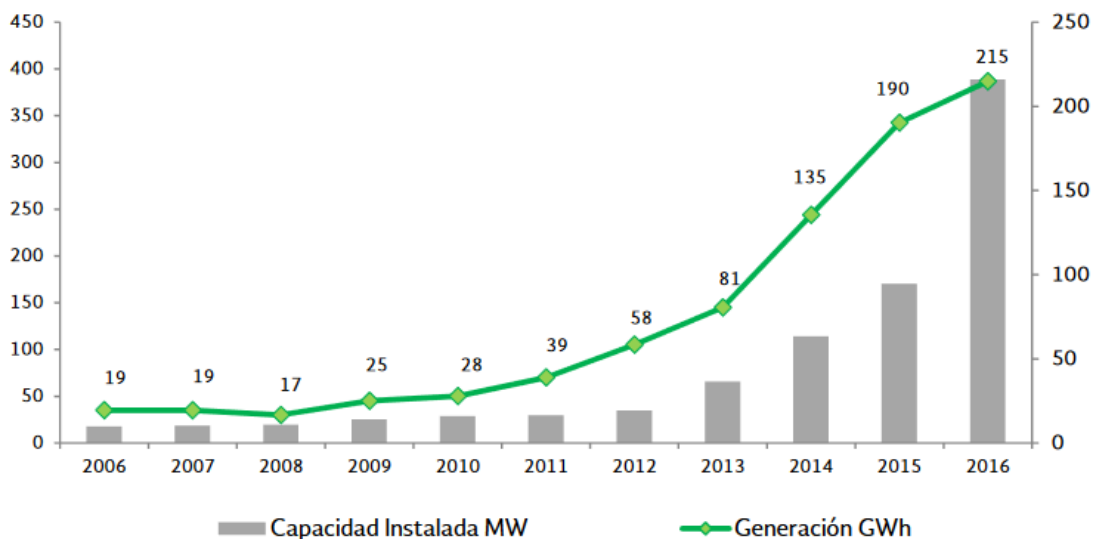


Figura 1. Comportamiento de la capacidad y generación de electricidad utilizando sistemas FV en México, periodo 2006 – 2016.
Tomada de Prospectiva de energías renovables (Secretaría de Energía, 2017).

Revisando la legislación de México, el 28 de noviembre del 2008 en México se publicó la "*Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética*" (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2008), para generar condiciones en el aprovechamiento de las energías renovables para la generación de electricidad, pero sin generar energía para el servicio público.

La Comisión Reguladora de Energía (CRE), el 8 de abril del 2010, publicó el modelo de "*Contrato de interconexión para fuente de energía renovable*" (Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2010), donde se establecen los lineamientos que debe cumplir el usuario que conecta alguna fuente de energía renovable al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). A partir del año 2010 es significativo el crecimiento en la capacidad y en la generación que en conjunto con la modificación del marco normativo se está favoreciendo la implementación de esta tecnología para la generación de electricidad.

Los sistemas con mayores ventajas que a partir de la radiación solar producen electricidad son los Sistemas FV Interconectados a la red eléctrica por lo que es necesario desarrollar proyectos de investigación para realizar propuestas y proponer nuevos modelos para mejorar el impacto de la generación de electricidad en los usuarios.

En la actualidad en los sistemas fotovoltaicos se están realizando investigaciones para aumentar su eficiencia y cubrir la creciente demanda de energía eléctrica por las ventajas que tiene respecto a otras fuentes renovables de energía. Estos sistemas no cuentan con almacenamiento, la energía generada por los paneles fotovoltaicos es directamente inyectada a la red para ser consumida por los usuarios y solo se cuenta con un sistema de medición bidireccional para registrar la energía generada y consumida por el usuario (Escobar Mejía, Torres, & Hisaza Hincapie, 2010).

En la literatura se han reportado sistemas FV en el cual se controla la generación con base en una metodología MPPT (Maximun Power Point Tracking) en el cual se ha conseguido mejorar la eficiencia en estos sistemas (Escobar Mejía, Torres, &

Hisaza Hincapie, 2010). El algoritmo calcula la potencia generada y minimiza las pérdidas en la conversión DC – AC. En investigaciones recientes sobre este tipo de sistemas FV se han reportado modelos utilizados para controlar la inyección energía eléctrica a la red; en (Di Tommaso, Genduso, & Miceli, 2012) se propone un modelo matemático de un sistema de mediana escala con conexión a la red de distribución utilizando un control basado en MPPT.

Bajo circunstancias de la creciente necesidad de mejorar la generación de energía eléctrica aprovechando la energía solar fotovoltaica y para que se tenga un mejor impacto en la tarifa eléctrica, esta investigación se centra en usuarios con tarifas horarias donde el costo de la energía depende de la hora de demanda del usuario. Para ello se propone un sistema de generación fotovoltaico con almacenamiento de energía que incluya un sistema de control horario para la inyección a la red.

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La electricidad está adquiriendo cada vez un papel central en la vida de los consumidores, se está posicionando como la fuente de energía de la que dependen todas las necesidades. Por lo que las tecnologías limpias se están convirtiendo en la mejor opción para los consumidores, principalmente por las nuevas políticas para su implementación y que con el tiempo son rentables; de estas, la energía solar y la energía eólica ya representan fuentes disponibles y baratas en la generación de electricidad.

En México en la Estrategia Nacional de Energía 2012-2026, se establece que la generación eléctrica a partir de energías limpias debe alcanzar una participación de 35 % de la generación total en 2026 (Cruz Silva, 2018), en la actualidad la capacidad instalada de energía limpia representa el 36 % de la generación total siendo las centrales eólicas y fotovoltaicas las principales fuentes de incremento (Centro Nacional de Control de Energía, 2021).

En lo que respecta a la generación de energía utilizando sistemas FV se ha tenido un crecimiento a junio del 2021 del 93 % respecto al 2019 donde se puede apreciar

que prácticamente en dos años se ha duplicado la capacidad fotovoltaica instalada esto por la apertura de la inversión privada que está permitiendo la instalación de nuevas plantas de generación que permite aprovechar el recurso solar, se espera que para el 2030 se logre un incremento de la capacidad instalada de energía solar de 10,372 MWp para generar energía eléctrica (Secretaría de Economía).

En un análisis realizado donde se comparan los costos de instalación, costo de operación y el costo nivelado de la electricidad los resultados mostraron que la energía eólica tiene los costos más bajos, seguido por Sistemas de Concentración Solar (CSP) y al final FV (Dale, 2013). Por esta razón es importante aumentar la eficiencia de los sistemas FV, así como aumentar el impacto en la tarifa eléctrica para el usuario.

Las compañías de generación de energía eléctrica comúnmente manejan tarifas horarias en función de las horas pico de demanda eléctrica. Por otra parte, los sistemas FV interconectados a red convencionales sólo inyectan potencia a la red durante el día y en proporción a la irradiancia disponible. Dado lo anterior se crea un nicho de oportunidad para investigar el impacto en la tarifa eléctrica por efecto inherente de la energía inyectada y adicionalmente por efecto de inyección horaria controlada. Por lo que necesariamente se requiere un sistema con almacenamiento de energía para realizar este desfase.

Se desarrolla un sistema FV con un control en la inyección de energía a la red, en donde además se tendrá un procedimiento para el monitoreo y el control de las variables de generación y consumo de energía que son las que proporcionaran las oportunidades de mejora. Entre los beneficios, se pueden mencionar que será posible reducir la demanda de energía de la red en horarios donde se tiene una tarifa más alta (energía de punta), también se podrá reducir el costo de la demanda contratada (Comisión Federal de Electricidad, 2022). De esta forma se reduce el cargo de la tarifa por consumo de energía y se estima que la reducción en el costo mensual del consumo en una tarifa GDMTH puede llegar a ser de hasta de un 30%.

Otra aplicación que tendrá el prototipo de esta propuesta de investigación es la posibilidad de implementarse en cualquier sistema de generación de energía a partir de fuentes renovables dentro de la pequeña y mediana industria.

De esta forma se propone una mejora para los sistemas de generación de energía eléctrica que utilizan las fuentes renovables para ser implementadas por la industria y que estas obtengan como principal beneficio la reducción en su tarifa eléctrica y así contribuir a la reducción de gases por efecto invernadero.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El consumo y ahorro de energía, y en especial la energía eléctrica, es un recurso que todas las empresas pretenden aprovechar al máximo, lo que se refleja en una buena utilización de los recursos y de implementación de buenas prácticas que tienen por objetivo reducir costos de la empresa.

Actualmente implementar tecnología para aprovechar la energía solar FV por parte de la industria con tarifas eléctricas horarias (GDMTH) requiere de una inversión inicial considerable que hace que desaparezcan las bondades de estos sistemas. Como el costo inicial es alto, para la mayoría de los usuarios en esta tarifa (GDMTH) no es atractivo realizar la inversión, aunque el rendimiento total al cabo de 20 años sea de más del 100% de ganancia.

Otra desventaja es que la eficiencia en la conversión de energía solar a eléctrica es baja, aun y cuando se desarrolla tecnología con mejores resultados de conversión no se ha logrado el impacto que se espera. En la publicación (Razykov, y otros, 2011) se muestra el desarrollo de los paneles FV y las eficiencias que se han obtenido.

De acuerdo con los aspectos anteriores se puede notar la necesidad de implementar sistemas y metodologías en los que se mejore la eficiencia para obtener mejores beneficios y sean instaladas en la industria con tarifas eléctricas horarias en mayor cantidad (López Torres, Alcalá Álvarez, & Moreno Moreno, 2012).

Esta investigación aportará a la industria información que demuestra el beneficio de implementar sistemas FV con almacenamiento, bajo un esquema de consumo horario, mediante la implementación de una metodología de prospección de parámetros técnicos y financieros. Esta información generará elementos que se deben de considerar para la elección de la tecnología a implementar, así como en el diseño y la construcción de la planta solar FV.

También esta investigación busca determinar un procedimiento que ayude a aumentar el aprovechamiento de las plantas solares FV interconectadas a la red eléctrica, se pretende reducir el costo de la energía implementando un sistema de control para la inyección horaria de potencia generada a la red eléctrica. Será necesario que la reducción del costo de la energía se vea reflejada de manera inmediata en la factura del usuario estimándose una reducción de la factura eléctrica en un 30%; que de acuerdo de la tendencia en el aumento del precio de los insumos este porcentaje puede ser cada vez más significativo y se reduzca el tiempo de retorno de la inversión.

Al aprovechar la radiación solar para disminuir la demanda de energía de la red, también impactará al medio ambiente, ya que con la reducción anual de energía se dejará de emitir CO₂ a la atmosfera y la cantidad dependerá de la reducción del consumo eléctrico que dependerá de la capacidad de generación del sistema fotovoltaico ya que por cada MWh de energía limpia se dejará de emitir a la atmosfera 0.494 tCO₂ (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

También en la presente investigación se desarrollará un prototipo que permita monitorear y controlar la energía eléctrica generada por la planta solar FV y de la energía consumida por el usuario para determinar en qué momento se debe inyectar la energía a la red. El prototipo se pondrá en evaluación en una Institución educativa en el estado de Zacatecas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología de prospección técnico - económica para instalaciones fotovoltaicas con almacenamiento de energía conectada a la red para reducir el costo de energía eléctrica en la pequeña y mediana industria por concepto de consumo horario.

1.3.2 Objetivos particulares

Los objetivos particulares de este trabajo se presentan a continuación:

- i. Diseñar un sistema fotovoltaico interconectado a la red que cuente con un sistema de monitoreo, control de inyección y almacenamiento de energía.
- ii. Desarrollar una metodología de prospección técnico – económica para la toma de decisiones en la adquisición de una instalación PV bajo un esquema de consumo horario.
- iii. Demostrar el impacto en la facturación de la inyección en forma horaria.

1.4 HIPÓTESIS

Existe una correlación estadísticamente significativa, entre el costo del consumo de energía eléctrica generada por medio de sistema convencional, el costo con un sistema FV interconectado convencional y el costo del consumo con un sistema FV interconectando a red con un control horario de inyección. Al controlar la inyección de energía a la red es posible reducir en un 30% adicional los costos por los conceptos de consumos horarios en industrias con tarifa horaria.

2. ANTECEDENTES

Los sistemas de suministro eléctrico presentan un rápido crecimiento en la aplicación de nuevas tecnologías para la generación y en el consumo de energía. Los futuros sistemas de energía basarán la generación por medio de fuentes convencionales y distribuidas además se deberán de incorporar las fuentes renovables de energía, sistemas de almacenamiento, considerar los mercados eléctricos y una fuerte respuesta a la demanda como recursos de la red para una planificación y operación eficiente (Poudineh & Jamasb, 2014). Al contar con diversos recursos conectados a las redes eléctricas, las convierte en elementos primordiales del sector eléctrico con objetivos a un futuro eléctrico sostenible.

Los cambios en los sistemas eléctricos presentan retos para la ingeniería y también cambios para el consumidor. Generalmente el consumo en el usuario final responde a estímulos externos, que normalmente son de tipo económico y que han sido utilizado desde ya hace tiempo.

Para atender esta problemática se ha implementado la respuesta a la demanda que plantea como factores a tratar; primero en el aspecto técnico económico realizar inversiones para el control, comunicación y monitorización del sistema y el segundo aspecto se relaciona con el mercado, la coordinación entre consumidores, generadores, operadores del sistema y de agentes distribuidos en el sistema (González, Pavas, & Sánchez, 2017). Es necesario considerar esquemas para la gestión de energía y mejorar el desempeño energético en los usuarios que por consecuencia se mejora el impacto en la factura eléctrica.

A continuación, se describen los aspectos teóricos a considerar en esta investigación:

- Gestión de la energía
- Energía solar
- Sistemas fotovoltaicos
- Almacenamiento de energía
- Normatividad eléctrica
- Sistemas FV interconectados con esquemas de monitoreo y control

2.1 GESTIÓN DE ENERGÍA

La Gestión de la Energía lo ha definido Antunes P. et al (Antunes, Carreira, & Miranda Silva, 2014), como el uso sistemático de las actividades de gestión y de la implementación de tecnología para mejorar el desempeño energético de los usuarios de energía; es una herramienta que proporciona seguimiento, medición, modelado de tendencias y análisis de costos del consumo de energía.

El termino gestión de la demanda de energía, se refiere a las actividades necesarias para la generación y el consumo de energía; se incluye el control y la modificación del uso de energía, así como el comportamiento de la instalación, las políticas y regulaciones, promoción de hábitos de consumo y de la educación de los usuarios (Alizadeh, Li, Wang, Scaglione, & Melton, 2012). El objetivo de la gestión de la demanda es generar estrategias para reducir el consumo eléctrico en las horas con alta demanda y propiciar el consumo en horas de menor actividad por parte de los usuarios.

Gestionar la energía eléctrica es una acción directa para soportar el crecimiento en la demanda para proporcionar tiempo para que las empresas suministradoras planteen estrategias para nuevos proyectos de generación. Tiene como resultado la planificación de una variedad de iniciativas para reducir el consumo de energía. Puede realizarse desde el lado de la compañía de suministro (oferta) y/o desde el lado del usuario (demanda); desde el lado de la compañía suministradora la gestión de energía garantiza el suministro de energía a los usuarios aprovechando los recursos disponibles para la generación. Gestionar la energía por parte del usuario, ayuda a reducir el costo en la compra de energía a la compañía de servicios públicos y de las sanciones asociadas a una alta demanda (Mohamed & Tariq Khan, 2009).

Las estrategias para la gestión de energía que implementan las compañías suministradoras consideran el diseño, las aplicaciones, la utilización, la operación y las actividades de mantenimiento en los sistemas de energía eléctrica para un suministro óptimo; existen técnicas para influir directamente en los usuarios, para que utilicen la energía de tal manera que produzcan cambios en los hábitos de

consumo. Un programa que se utiliza para la gestión de energía es el control directo de carga que consiste en interrumpir las cargas de los consumidores en horas de alta demanda de energía de la red de suministro eléctrico.

El control de carga es un método en el que la empresa de servicios públicos puede controlar de forma remota las cargas de los clientes que pueden ser sistemas de acondicionamiento de aire y calefacción; esto bajo un acuerdo previo entre cliente y empresa (Li, Chui, & Sun, 2017). En este método los clientes deben de instalar un sistema de interruptores donde el control se realiza de forma remota por la empresa y esta puede programar, conectar y desconectar los equipos de los usuarios avisando con poco tiempo de anticipación.

Ragan Banerjee en (Banerjee, 1998) reporta el caso de la india donde se realiza la desconexión en horas de alta demanda, de sistemas de bombeo agrícola y de aire acondicionado comercial para gestionar la demanda máxima. Se realiza una comparación con la metodología de los Estados Unidos logrando identificar como alternativas de éxito la utilización de tarifas por tiempo de uso (tarifas horarias) así como control de carga interrumpible (compromiso de no consumir energía en momentos específicos de alta demanda).

También Kelly Kissock et al (Kelly Kissock & Eger, 1998) muestra un análisis de los ahorros alcanzados al implementar estrategias de ahorro de energía, se utiliza un algoritmo para caracterizar los diferentes grupos de carga de clientes con base en la suma de carga controlable y no controlable, categorizando por grupos a las diferentes cargas definiendo a las que pueden ser interrumpidas para propiciar el ahorro de energía.

Otro método para la gestión de carga se realiza con la determinación de tarifas dependientes del tiempo, aquí los reguladores establecen las tarifas para cubrir los costos para generar, transmitir, distribuir y del costo para atención al cliente; en las tarifas planas o de cuota fija el costo del consumo de energía es el mismo en cualquier hora del día, sin embargo, existen tarifas horarias donde el costo depende la hora en que ocurre el consumo.

Utilizar tarifas horarias para la gestión de energía es una estrategia que utiliza la empresa suministradora, está proporcionando información sobre el precio de la energía en los diferentes periodos durante el día con el objetivo de incentivar el consumo en los periodos con menor demanda y desalentar el consumo en periodos de alta demanda con la variación del precio del kWh. Ashok en el 2001 (Ashok & Banerjee, 2001) presenta un modelo de gestión donde se toma en cuenta el perfil de consumo de los equipos considerando la utilización dependiente del tiempo y los parámetros de la eficiencia de máquinas y procesos. Se combina con una programación lineal para minimizar los costos de electricidad al programar cargas para satisfacer las limitaciones de proceso y producción. En México las tarifas que dependen del tiempo son obligatorias para usuarios con altos consumos (Comisión Federal de Electricidad, 2022).

Las compañías suministradoras pueden influir en la demanda de carga de los usuarios al generar incentivos financieros a través de la aplicación de tarifas horarias para el cobro de la energía. Con este tipo de tarifas las empresas pretenden aumentar el consumo de energía durante los periodos de menor actividad, mejorando el factor de carga de las empresas de suministro de energía logrando un sistema eléctrico estable y permitiendo una mejor planeación para el crecimiento de las compañías suministradoras, la demanda de energía hasta el momento se ha cumplido utilizando combustibles fósiles pero en los últimos años con la preocupación del cambio climático se exige la utilización de las energías limpias; existen recursos energéticos alternativos que se pueden utilizar pero no han sido aprovechados debido a barreras tecnológicas, pudiendo ser una alternativa dentro de los programas de gestión de energía.

Respecto a la gestión de energía a través de los consumidores (lado de la demanda), se enfoca en estrategias que realizan los consumidores para impactar de forma directa en la factura eléctrica. Gestionar la energía eléctrica del lado de la demanda se ocupa del diseño, de la aplicación, de los esquemas de utilización y de las actividades de mantenimiento enfocados a optimizar el mejor consumo de energía con el objetivo de reducir la demanda. Estos métodos se agrupan en

las categorías de: medidas de mantenimiento, modificación y ajuste de equipos y procesos, aprovechamiento máximo del equipo y análisis y reducir las pérdidas.

Investigaciones sugieren que en el sector industrial existe un potencial para aplicar métodos de gestión de energía y lograr buenos resultados esto por la posibilidad de poder controlar la gran cantidad de cargas que tienen instaladas. Bjork & Karlsson en (Bjork & Karlsson, 1985) proponen un estudio de inventarios para determinar las cargas que pueden ser controladas, las que no se pueden controlar y las que pueden brindar mayor reducción de la demanda, además se permite la variación de las cargas de acuerdo con el sistema de tarifas.

Ostadi et al en (Ostadi, Moazzami, & Rezaie, 2007) presentan los valores y tiempos óptimos para mejorar el consumo de energía eléctrica con base a sus operaciones y actividades de la fábrica. Se definen las tarifas y las restricciones operativas combinado con un consumo apropiado para la optimización energética, de esta forma se tiene la posibilidad de reducir el costo de energía eléctrica. Hay que puntualizar que cambia el costo, pero no el consumo de energía.

Otra practica para reducir la demanda máxima es la reducción de carga y así reducir las penalizaciones por alta demanda, esta práctica consiste en cambiar la carga de un periodo de alta demanda a un periodo de consumo en baja demanda. En el trabajo de Ashok (Ashok & Banerjee, 2001) se presentan aplicaciones de gestión de carga para el sector industrial, que consisten en el uso de incentivos económicos ofrecidos en la tarifa eléctrica; el modelo que se planteó se utilizó además para analizar la energía consumida en respuesta a diferentes tarifas.

Medir el ahorro de energía en la industria al implementar proyectos de gestión para reducir el consumo de energía, en la práctica es difícil implementar este tipo de proyectos por la naturaleza de sus procesos ya que requieren un orden y una duración precisa lo que significa que no puedan cambiar sus hábitos de consumo. Lo que se recomienda implementar en este tipo de servicio es mejorar los procesos de eficiencia energética (Li, Chui, & Sun, 2017).

Una alternativa para la eficiencia energética y mejorar la gestión de energía, es el aprovechamiento de energías renovables. En los últimos años ha habido un crecimiento en la tecnología mejorando la rentabilidad en muchas aplicaciones, propiciando un desarrollo sostenible de la sociedad donde se busca un balance entre la generación creciente de energía y una mayor necesidad de protección del medio ambiente; por ello la energía solar, la energía eólica, la energía hidráulica y la energía geotérmica son una opción para reducir la emisión al medio ambiente. Además, estas fuentes renovables se pueden utilizar para la generación distribuida en redes eléctricas con sistemas de gestión de energía.

En la Tabla 1 se muestran las características principales de las energías renovables, así como las áreas de aplicación y sus ventajas.

Tabla 1. Descripción de las principales fuentes de energía renovables.

Energía	Características	Ventajas
Solar Fotovoltaica	Se obtiene a partir de la radiación solar, pudiendo generar calor y electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden utilizar para la generación de energía eléctrica. • La tecnología fotovoltaica es la que más se ha desarrollado. • Posee una mayor facilidad de instalación. • En la generación no contaminan. • No existen partes móviles, reduciendo el costo de mantenimiento.
Eólica	Es la energía que se obtiene de aprovechar la energía cinética del viento, para mover sistemas electromecánicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto ambiental mínimo, no emite sustancias a la atmosfera. • Fuente inagotable • Factibilidad de instalar sistemas autónomos
Hidráulica	Aprovecha principalmente la energía potencial que posee un embalse de agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente energía limpia, no utiliza agua, solo utiliza la energía potencial de esta. • Bajo costo de operación, ya que no es necesario la utilización de combustibles. • Cuenta con la más alta eficiencia de conversión de energía. • Vida útil larga de los sistemas, poca inversión de mantenimiento.
Geotérmica	Se obtiene a partir del calor existente en el suelo subterráneo de la tierra	<ul style="list-style-type: none"> • Produce niveles bajos de gases de efecto invernadero. • Flujo constante de energía, no depende de las condiciones climatológicas.
Biomasa	Aquí se utilizan recursos biológicos para la generación de energía.	<ul style="list-style-type: none"> • No contribuye al calentamiento global, con obtener carbono biogénico, su combustión no produce dióxido de carbono. • La biomasa es un recurso local no varía sus precios respecto al mercado.

Realizada con información de (Saldías & Ulloa, 2008)

Los sistemas fotovoltaicos presentan ventajas competitivas en la generación y gestión de energía si se comparan con otras fuentes de energía renovables; ya que cuentan con características de cero contaminaciones en la generación, instalación en cualquier área residencial y/o industrial y tiene una disponibilidad de energía alta en cualquier parte de la superficie terrestre durante todo el año. En el 2013 Purnomo Sidi Priambodo et al (Sidi Priambodo, Sukoco, Purnomo, Sudiby, & Hartanto, 2013) proponen un procedimiento para implementar sistemas fotovoltaicos para la gestión de energía, donde se considera: establecer los requerimientos de energía, información estadística de clima de la ubicación, especificaciones de los componentes del sistema y de las baterías a utilizar. Se considera además un sistema de supervisión de entrada y salida de energía de las baterías y la medición de la cantidad de energía almacenada.

En los programas de gestión de energía del lado del proveedor y/o del lado del consumidor, permiten utilizar técnicas para realizar y monitorear actividades que tengan relación con el consumo de la energía eléctrica. Del lado del proveedor las principales técnicas para la gestión de energía son:

- El control directo de cargas del consumidor por parte del proveedor de energía en horas de alta demanda.
- Control indirecto de carga se implementan tarifas que dependen de la hora de consumo.

Y las técnicas empleadas para la gestión de energía del lado del consumidor se enfocan en la reducción de los picos de energía con el cambio de cargas a las horas de menor consumo con el objetivo de reducir la relación pico promedio en la demanda para impactar en la reducción de la factura de forma directa para el usuario. Las técnicas que se utilizan para la gestión de energía del lado del consumidor son:

- Mantenimiento adecuado de equipos.
- Modificación de equipos y procesos.
- Utilización de energías renovables, cogeneración y ahorro y uso eficiente de energía.

Utilizar fuentes de energía renovables que por su naturaleza tienen un comportamiento intermitente y cuando la generación no coincide con la hora de consumo, es necesario implementar sistemas de almacenamiento de energía para adaptar la generación con el consumo mejorando la disponibilidad y confiabilidad del sistema (Upasani & Patil, 2018). Aquí se presenta un análisis del modelo sistema fotovoltaico y el estado del sistema almacenamiento para la gestión de la energía; el estado de carga de la batería es controlado por un control difuso, se presenta además un análisis del estado de carga para mostrar como mejor la vida útil.

También se han desarrollado modelos de sistemas de generación fotovoltaicos con baterías como sistema de almacenamiento para mejorar la gestión de la energía y aumentar la eficiencia del sistema. En (Upasani & Patil, 2018) Mayuri Upasani et al reporta un sistema híbrido para suavizar la energía fotovoltaica fluctuante de acuerdo con la demanda, el control para la administración de la energía que se propone controla el flujo de la energía activa desde y hacia el sistema de almacenamiento tomando en cuenta la energía que se genera en el sistema fotovoltaico, la energía que demanda la carga y la energía que se encuentra almacenada en las baterías. En los resultados se muestra la viabilidad de la estrategia de gestión de la energía.

Una aplicación donde se integren sistemas fotovoltaicos con sistemas de almacenamiento donde el costo de la energía eléctrica depende de la hora de consumo, parece una solución donde se sincroniza la producción solar con el consumo y con el sistema de almacenamiento que permite desfasar el consumo y la producción. De esta forma se pretende tener una oportunidad para reducir la energía eléctrica proveniente de la red cuando que por el horario el costo es más alto.

Es evidente que la gestión de energía con la incorporación de sistemas fotovoltaicos es económicamente viable ya que el costo del kW fotovoltaico instalado de acuerdo con los reportes de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), son cada vez más competitivos ya que en la última década han tenido una reducción del 82 % (IRENA, 2020). Logrando un precio de 0.068 dólares por kWh en el 2019 y proyectando alcanzar para el 2021 un costo de 0.039

dólares. Comparando el costo del kWh fotovoltaico (0.039 dólares) con el costo de kWh en horario punta (0.0925 dólares) para una tarifa Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH) (Comisión Federal de Electricidad, 2022) se puede ver una ventaja económica al generar energía utilizando sistemas fotovoltaicos y se inyecta en horario punta.

Sin embargo, para poder utilizar la generación fotovoltaica en horario punta para usuarios en tarifa GDMTH, es necesario contar con sistemas de almacenamiento para aprovechar la generación solar en un horario donde no existe radiación. Las baterías como sistema de almacenamiento también están presentando una reducción significativa en los costos de inversión haciendo competitivo el costo de la energía almacenada, en reportes que presenta Bloomberg New Energy Finance (BNEF) muestra que el costo del kWh en el 2019 presentó una reducción del 87% respecto al costo en el 2010 (BNEF, 2019). En este mismo informe se proyecta que para el 2023 se alcanzara una reducción del 91%.

Desde el punto de vista económico implementar sistemas fotovoltaicos con sistemas de almacenamiento para la gestión de energía en usuarios con tarifas horarias (GDMTH) se pueden obtener un impacto significativo en el objetivo de la gestión de energía del lado de usuario.

2.2 ENERGÍA SOLAR

A la llegada gradual y adopción de uso de tecnologías para aprovechar las fuentes renovables de energía, y en específico, la energía solar que es una fuente inagotable, se hace indispensable analizar el significado de la dependencia energética, para el presente y para el futuro. Es evidente el desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de estas fuentes de energía y se puede concluir que una de las fuentes de energía más limpias y atractivas es la energía solar transformada a electricidad utilizando sistemas fotovoltaicos.

México cuenta con niveles altos de radiación solar (A.T. Kearney, 2010), en la Figura 2 se muestra el mapa de irradiación solar global diaria en el territorio nacional y se puede encontrar que en la parte central del estado de Zacatecas se cuenta con

una irradiación solar global promedio diaria de 6.39 kWh/m² (Nasa prediction of worldwide energy resources, 2020) que lo coloca como una de las zonas con mayores niveles de radiación solar.

Esto se complementa con la información que se presenta en la Figura 3 donde se presenta el mapa de potencial para generar electricidad utilizando tecnología fotovoltaica y se aprecia de igual forma que la zona central del estado de Zacatecas cuenta con las mejores condiciones para la generación aprovechando la radiación solar, ya que se puede obtener 5.4 kWh por cada kWp de módulos fotovoltaicos instalados.

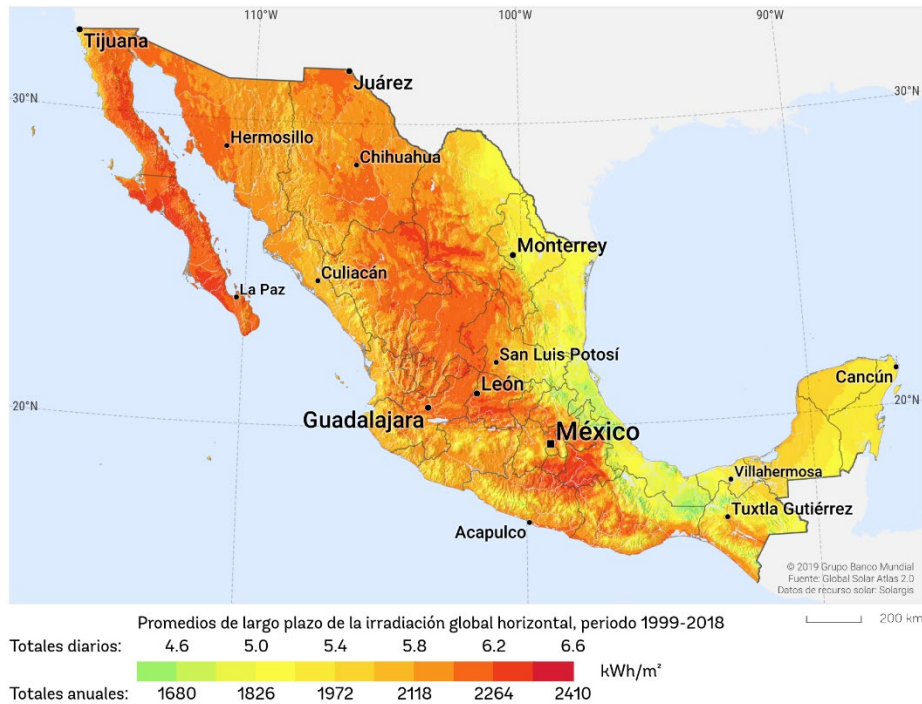


Figura 2. Irradiación solar global en México.
Tomada de Solargis (The World Bank, 2017).

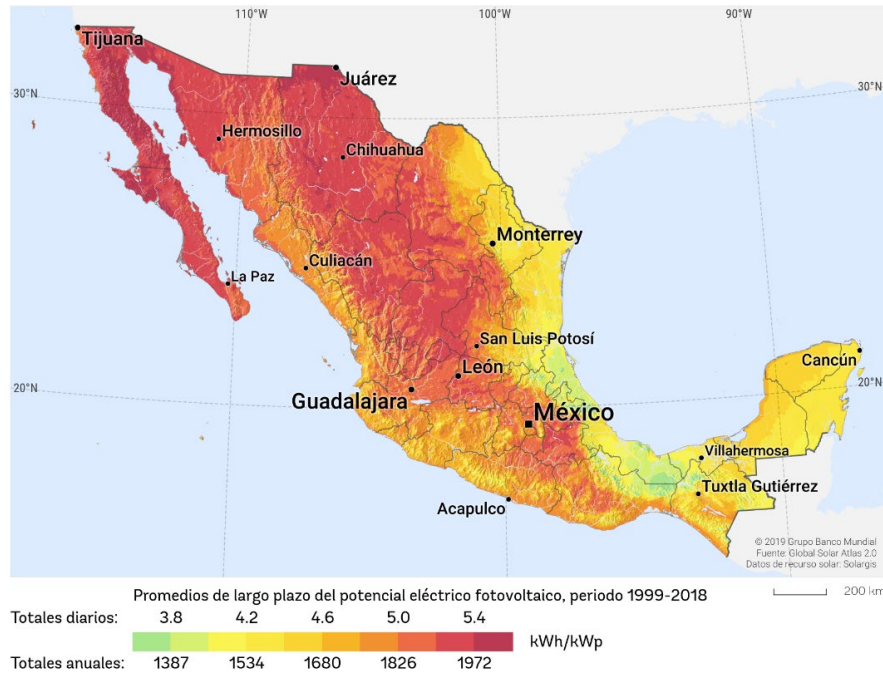


Figura 3. Potencial de generación de electricidad fotovoltaica.
Tomada de Solargis (The World Bank, 2017).

Empleando la base de datos pública Langley Research Center (LaRC) desarrollado por la NASA (Nasa prediction of worldwide energy resources, 2020), en la Tabla 2 se concentran los datos del recurso solar para la zona central del estado de Zacatecas:

Tabla 2. Irradiación incidente promedio anual sobre una superficie inclinada

	Solar Irradiance (kWh/m²/día)	Solar Irradiance Angle (grados)
Ene	5.99	47.5
Feb	6.34	39.5
Mar	7.09	26
Abr	6.9	10
May	7	-4
Jun	6.72	-9
Jul	6.27	-6.5
Ago	6.02	4.5
Sep	5.62	18
Oct	6.22	34
Nov	6.48	45.5
Dic	5.99	50
Anual	6.39	21.5

Elaboración a partir de los datos de LaRC.

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (SFV)

El efecto fotovoltaico descubierto por Alexandre-Edmond Becquerel in 1839 (R. Wolfe, 2018), fue el descubrimiento con el que se inició la investigación y el desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica que se basa en este principio físico de transformar esta energía que absorbe un material conductor, en corriente eléctrica.

El principal componente de la tecnología fotovoltaica es la celda solar que produce electricidad cuando los fotones chocan y transfieren energía a los electrones con carga negativa que se encuentran en el material semiconductor, lo que le permite el salto de un nivel de energía a otro siendo atraídas hacia un lado de la superficie del material semiconductor y las cargas positivas hacia el lado

opuesto generando de esta forma una corriente eléctrica. Este fenómeno se ilustra en la Figura 4.

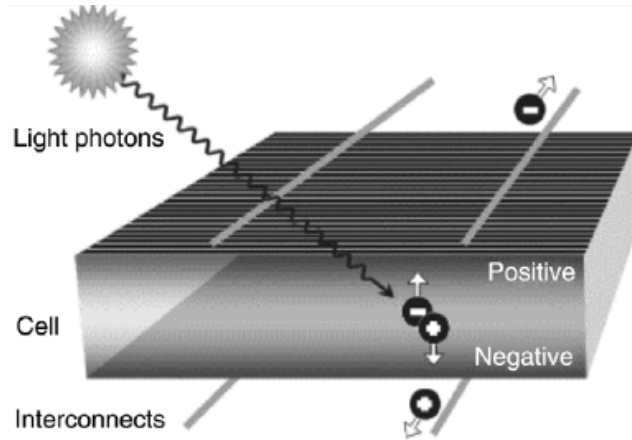


Figura 4. Efecto fotoeléctrico en una celda solar
Tomada de What Is Photovoltaics? (R. Wolfe, 2018)

La energía solar fotovoltaica es una alternativa para suministrar energía eléctrica a un amplio ramo de usuarios desde el medio rural (sistemas autónomos), doméstico, comercial e industrial (sistemas conectados a la red). Una primera clasificación puede ser la siguiente, agregando a demás sistemas con almacenamiento:

- Sistemas fotovoltaicos autónomos: son los sistemas que están aislados de la red eléctrica, su aplicación principal es en el medio rural.
- Sistemas conectados a la red: son los que interactúan con la red eléctrica inyectando los excedentes de generación a ella.
- Sistemas con almacenamiento: sistemas que cuentan con un sistema de almacenamiento de energía para suministrar cuando existen cortes por la empresa suministradora.

En la mayoría de las aplicaciones el consumo de energía se requiere independientemente de la existencia de radiación solar. Y también en otras aplicaciones se requiere incluir componentes para almacenamiento de energía, en los sistemas FV la energía producida puede ser almacenada en bancos de baterías. Para las aplicaciones de almacenamiento de energía; como el bombeo

de agua, los sistemas conectados a la red no requieren baterías, para el almacenamiento de energía utilizando el bombeo de agua la energía se acumula en forma de energía potencial mientras que en los sistemas interconectados la red eléctrica opera como un sistema de almacenamiento.

2.3.1 Sistema FV autónomo

Los sistemas fotovoltaicos autónomos se utilizan para generar y suministrar energía eléctrica en sitios aislados en los que es difícil el suministro de energía por medio de la red convencional por lo que comúnmente se cuenta con un banco de baterías como sistema de almacenamiento.

En estos sistemas la energía producida por los módulos fotovoltaicos es almacenada en las baterías utilizando un regulador de carga. También se cuenta con un inversor conectado que se encarga de acondicionar la energía almacenada en corriente alterna para la alimentación de las cargas.

En la Figura 5 se muestra el esquema de un sistema autónomo convencional donde se puede apreciar que su forma básica está compuesta por los siguientes elementos (Style, 2012):

- Generador: es el módulo FV que transforma la radiación solar en energía eléctrica.
- Regulador: este dispositivo controla la energía que se produce en el módulo fotovoltaico, la carga de la batería y la energía consumida por la carga.
- Batería: dispositivo donde es almacenada la energía que se genera en el módulo fotovoltaico.
- Inversor: también es conocido como convertidor y es el dispositivo que se encarga de transformar la corriente continua procedente de las baterías o de los paneles solares en corriente alterna para el uso en las cargas.
- Carga: equipos que consumen la energía.

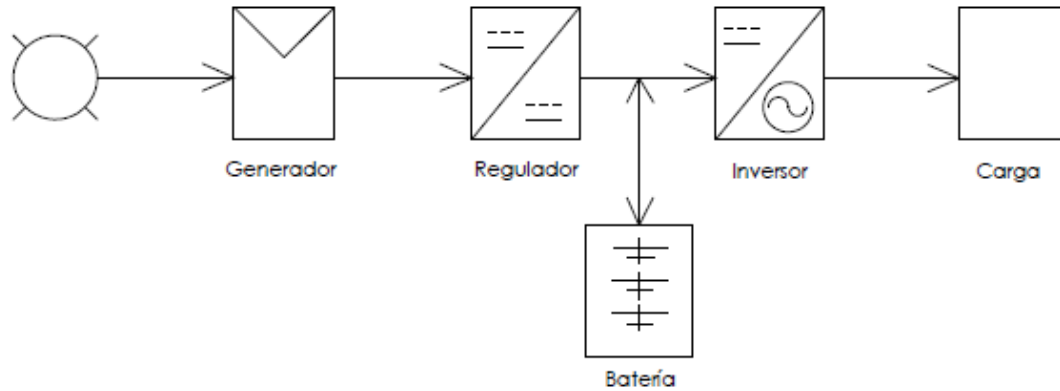


Figura 5. Esquema de un SFV autónomo.
Elaboración con información de "Energía Solar Autónoma" (Style, 2012).

En el dimensionado de sistemas FV autónomos se calculan básicamente:

- La potencia del generador FV.
- La capacidad del sistema de acumulación (baterías).
- La capacidad del regulador.
- La capacidad del inversor.
- El dimensionado del cableado.

Con el objetivo suministrar de forma confiable la energía requerida por la carga (González & Rojas, 2014). Para dimensionar el sistema FV se considera como información preliminar la estimación de consumo, los parámetros atmosféricos y de radiación solar del lugar donde se implementará el sistema FV. El correcto dimensionado de un sistema FV autónomo implica una relación entre el tamaño del generador fotovoltaico y las baterías de acumulación.

2.3.2 Sistema FV interconectado

El sistema fotovoltaico (FV) interconectado es un conjunto de dispositivos eléctricos, mecánicos y electrónicos para la producción de energía eléctrica en condiciones adecuadas para inyectarla a la red convencional a partir de la radiación solar. Como se muestra en la Figura 6, en general un sistema FV interconectado se

conforma por el generador fotovoltaico (módulos), del inversor DC/AC y el sistema de protecciones.

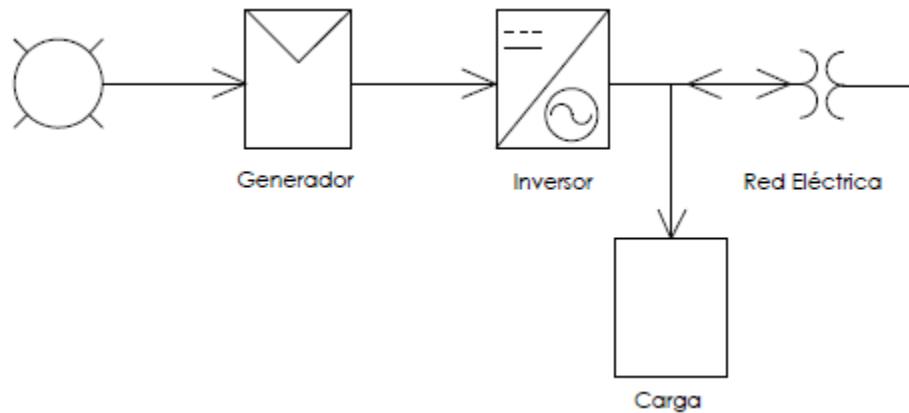


Figura 6. Esquema de SFV interconectado.
Elaboración con información de (Díaz Santos, Gerard, Castro Fernández, & Herrera Acosta, 2012)

La energía que se produce en este sistema se consume de forma parcial o total por el usuario y la energía excedente será inyectada a la red donde se distribuye a otros puntos de consumo, pero que para el usuario del sistema FV la red funciona como el sistema de almacenamiento del excedente de energía generada (Perpiñan Lamigueiro, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2012).

En el dimensionado de este tipo de sistema FV, se deben de considerar los aspectos que se reportan en (Chenlo Romero & Abella, 2006):

- Obtención de parámetros meteorológicos y de radiación solar del lugar donde se instalará el sistema FV.
- Se determina la demanda energética del lugar.
- De determina el número de paneles para abastecer parcial o totalmente la demanda energética, de acuerdo con la necesidad.
- Se dimensiona el inversor adecuado a la demanda.
- Se calcula el cableado.

El aspecto económico es factor importante al momento de decidir instalar sistemas FV, podemos encontrar en (Mani Paudel & Sarper, 2013) que se presenta un análisis económico identificando el costo de la instalación fotovoltaica, el programa de financiamiento, y los precios de la energía que son cruciales para la viabilidad económica del proyecto fotovoltaico. Además de contar con condiciones climáticas favorables, como se puede ver en el dimensionado se deben incluir todos estos factores para determinar la rentabilidad del sistema FV.

Entre las ventajas que se pueden mencionar de los sistemas FV interconectados, se tienen (ManassehObi & RobertBass, 2016):

- Vida útil entre 25 a 30 años.
- Costos en la operación y en manteniendo bajos.
- Ventajas medioambientales sobre las plantas de energía con combustibles fósiles.
- El excedente en la generación es inyectado a la red eléctrica que funciona como acumulador.

Es importante hacer notar que los sistemas FV presentan algunas desventajas como los son: variabilidad, intermitencia y falta de capacidad de reserva, que se puede solucionar con la implementación de sistemas de almacenamiento.

2.3.3. Sistemas FV con almacenamiento

Los sistemas FV con almacenamiento de energía regularmente se utilizan en casos donde se requiere contar con un respaldo de energía en caso de interrupciones o cortes de la red de suministro. En la Figura 7 se presenta un SFV con almacenamiento de energía por medio de un banco de baterías, aquí parte de la energía que generan los módulos fotovoltaicos es almacenada por las baterías y será suministrada a la carga en caso de requerirse.

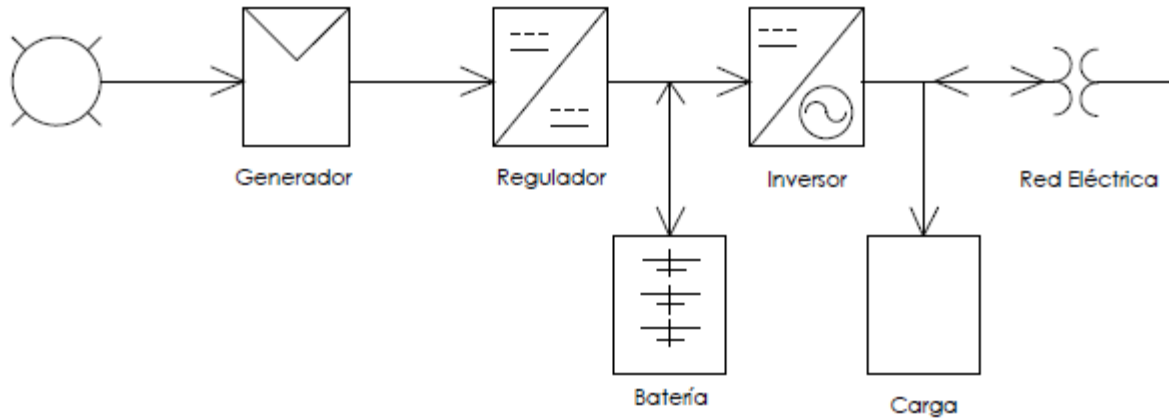


Figura 7. Esquema de SFV con almacenamiento y conexión a la red.
Elaboración propia.

Además de los componentes con los que cuenta un sistema interconectado, en esta configuración es necesario el regulador de carga y de un banco de baterías. Las baterías se convierten en un elemento central donde el costo de los sistemas FV aumenta de manera significativa, que afecta además los requisitos de mantenimiento, fiabilidad y el diseño de la instalación fotovoltaica.

Además de las baterías como elementos para el almacenamiento de energía, existen aplicaciones donde se cuenta con otros esquemas para almacenar energía cuando se tengan excedentes; en el siguiente apartado se describen las principales tecnologías utilizadas para el almacenamiento de energía.

2.4 ALMACENAR LA ENERGÍA

La electricidad generada a partir de sistemas FV tiene un crecimiento notable pero no se puede suministrar de forma inmediata ya que no se tiene la capacidad para suministrarse de forma regular de acuerdo con la demanda. Por lo tanto, el aumento de la producción solar fotovoltaica significa problemas de estabilidad en la red por lo que una forma para estabilizar es utilizar sistemas de almacenamiento, generalmente se piensa en la utilización de baterías, como una posible solución. Sin embargo, las baterías presentan desventajas ya que no soportan ciclos de

carga y descarga altos y se requieren de gran cantidad de baterías para almacenar una cantidad razonable de energía.

Al contar con almacenamiento de energía eléctrica se mejoran las condiciones del sistema eléctrico ya que se cuenta con un respaldo de energía para suministrar en demandas pico del sistema. Existen varias técnicas de almacenamiento y estas se pueden clasificar en cuatro categorías, de acuerdo con sus aplicaciones como se describe en (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008):

1. Aplicación para baja potencia, específicamente para el suministro de transductores y estaciones de emergencia.
2. Aplicación para potencia media en áreas aisladas.
3. Aplicación de conexión de red con nivelación máxima.
4. Aplicaciones para control de la calidad de energía.

Las categorías uno y dos se encuentran en sistemas a pequeña escala donde la energía se almacena en forma de energía cinética, energía química, aire comprimido, hidrógeno (pilas de combustible) o en supercondensadores. Las categorías tres y cuatro se aplican en sistemas de gran tamaño donde la energía se almacena en forma de energía potencial (sistemas hidráulicos), energía térmica (sensible, latente), energía química (acumuladores, baterías de flujo) o aire comprimido (o acoplado con líquido o almacenamiento de gas natural).

Es necesario presentar una breve descripción de las formas de almacenamiento de energía ya que en la propuesta se incluye mejorar las condiciones del sistema fotovoltaico considerando un sistema de almacenamiento para inyectar la energía de acuerdo con el horario de consumo. En (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008) se describen las características de las principales técnicas para el almacenamiento de energía de acuerdo con las categorías presentadas, a continuación, se describen las técnicas para el almacenamiento de energía.

2.4.1 Almacenamiento hidráulico

Este método de almacenamiento se utiliza la diferencia de altura que se puede tener en dos depósitos de agua. Se aprovechan los períodos donde la demanda es baja, la electricidad generada se utiliza para bombear el agua de un depósito inferior al depósito superior y cuando la demanda es muy alta, el agua fluye desde el depósito superior y activa las turbinas para generar una gran potencia de electricidad para las horas punta (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008). Este es el sistema de almacenamiento más común en el sector eléctrico, es tradicionalmente dependiente de las condiciones naturales, usualmente haciendo uso de ríos o lagos; además esta forma de almacenamiento de energía se puede aplicar como complemento de otras energías renovables utilizando la energía generada para bombear el agua al embalse superior contando de este modo una cantidad de energía potencial almacenada utilizable para la generación de energía eléctrica en horas de demanda pico.

Es una tecnología madura con una alta durabilidad. La eficiencia de los sistemas antiguos puede aumentarse mediante la adaptación de algunos de sus componentes, en particular sus turbinas. Estos sistemas de almacenamiento por bombeo tienen una eficiencia aproximada del 65 - 80%, (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008). Una de las desventajas de esta tecnología es que se requiere un sitio con diferentes elevaciones de agua, problemas ambientales y los altos costos iniciales (Chen, y otros, 2009).

Un ejemplo de esta forma de almacenamiento se puede encontrar en la red de suministro eléctrico en la isla del Hierro en España donde el 100% de la demanda de energía de la población se obtiene a partir de energías renovables y aproximadamente el 50% se obtiene de un sistema de almacenamiento basado en bombeo hidráulico (Guacaneme, Velasco, & Trujillo, 2014).

2.4.2 Almacenamiento de energía térmica

Los sistemas de almacenamiento utilizando energía térmica de un fluido tiene el potencial de incrementar el uso efectivo de este tipo de energía y de facilitar el control de la producción térmica a gran escala. Cuando este tipo de almacenamiento se utiliza para almacenar electricidad en forma de calor, es necesario, que el calor almacenado se convierta en electricidad mediante motores térmicos (Lopes Ferreira, Garde, Fulli, Kling, & Pecas Lopes, 2013).

En términos generales, se pueden utilizar dos procesos de almacenamiento térmico. Uno se basa en la capacidad calorífica del medio de almacenamiento y el otro en el cambio de fase del medio de almacenamiento. Se pueden usar varios materiales como medio de almacenamiento, incluyendo agua, sal fundida y fluoruro de litio. Durante la acumulación, el material a granel cambiará de estado y durante la recuperación, volverá a transferirse.

Este sistema se basa en la capacidad calorífica del medio de almacenamiento, se logra calentando un material a granel (sodio, sal fundida, agua a presión, etc.) que no cambia su estado durante la fase de acumulación; la entrada de energía en principio puede ser suministrada por calentamiento de una resistencia eléctrica donde la eficiencia global de la acumulación y recuperación puede ser baja (30 – 60%) pero con un buen impacto al medio ambiente con ventajas para edificios residenciales y comerciales (Chen, y otros, 2009).

Se han desarrollado proyectos experimentales para el almacenamiento de energía térmica y utilizarla para generar electricidad; como ejemplo de esta aplicación se puede mencionar el proyecto con unidades de demostración en el receptor del proyecto “Solar Two” desarrollado en la Universidad del Sur de California (U.S. Department of Energy, 2000).

2.4.3 Almacenamiento de energía utilizando aire comprimido

Este sistema comprime aire durante horas de baja demanda de energía aprovechando los excedentes que pueden ser generados por medios

convencionales o aprovechando las energías renovables. Se comprime aire que es almacenado en depósitos naturales (cuevas o cavernas) o en depósitos artificiales contruidos para este fin. Durante las horas de alta demanda la electricidad es producida por turbinas a partir del aire comprimido almacenado.

Esta tecnología se encuentra disponible de forma comercial capaz de proporcionar almacenamiento de energía muy grande (más de 100 MW con una sola unidad de almacenamiento). Estos sistemas para el almacenamiento de energía funcionan sobre la base de la generación convencional de turbinas de gas. Durante la baja demanda, la energía se utiliza para comprimir aire y almacenarlo en un espacio hermético, típicamente de 4.0 a 8.0 MPa. Cuando la demanda aumenta la energía almacenada se extrae del recipiente de alta presión. El aire se combina con combustible y es expandido a través de un sistema de baja presión. Estos sistemas están conectadas a un generador que producen electricidad (Chen, y otros, 2009).

La eficiencia de almacenamiento por aire comprimido oscila en el rango de 70 – 89% (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008) y se pueden encontrar sistemas con capacidades de 50 a 300 MW.

Se tienen como principal ventaja la durabilidad de este tipo de plantas de generación y como desventajas se tienen un alto costo de en la inversión inicial, son de respuesta lenta y de ubicación específica para el aprovechamiento de depósitos naturales (Lopes Ferreira, Garde, Fulli, Kling, & Pecas Lopes, 2013). Para el caso de pequeña escala se propone construir tanques de almacenamiento y para reducir las desventajas presentadas.

La primera estación de almacenamiento que utiliza un depósito subterráneo de aire comprimido ha estado en funcionamiento desde noviembre de 1978 en Huntorf, cerca de Bremen, Alemania. En 1991, una instalación estadounidense en Macintosh, Alabama, comenzó a entregar 100 MW de potencia durante 226 h, el aire ambiental se comprime y almacena a una presión entre 4 y 7 MPa en una caverna de 2,555,000 m³, a 700 m de profundidad en el suelo. Durante el verano, el sistema genera energía 10 h por día entre semana. La compañía que usa esta

aplicación recarga parcialmente durante las noches entre semana y la recarga completa se realiza los fines de semana. El sistema está en uso 1770 h por año (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008).

2.4.4 Baterías para almacenamiento de energía

Las baterías recargables es una de las primeras formas para almacenar energía eléctrica en forma de energía química; este dispositivo está conformado por celdas electroquímicas y cada celda consta de un líquido, pasta o electrolito sólido junto con un ánodo y un cátodo. La energía almacenada cuando se extrae se producen reacciones electroquímicas entre los electrodos que generan un flujo de electrones (o corriente) a través de una carga. Este proceso es reversible, lo que permite recargar la batería aplicando un voltaje externo a través de los electrodos.

Los sistemas de baterías son en la actualidad tecnologías maduras y confiables en una gran cantidad de aplicaciones como la tecnología de plomo ácido, que cuentan con un importante desarrollo y con aplicaciones que han probado su funcionalidad durante ya muchos años. Existen diseños más nuevos en diferentes etapas de desarrollo; estos incluyen sodio azufre y cloruro de níquel y sodio.

El desarrollo tecnológico de baterías ha sido impulsado por demanda en aplicaciones en la electrónica, aplicaciones portátiles, de transporte y existe un aumento del uso de las baterías para aplicaciones de almacenamiento de energía en servicios públicos; para estas aplicaciones se encuentran baterías de ácido de plomo, níquel cadmio, sodio azufre, cloruro de níquel sodio e iones de litio (EA Technology, 2004). En la Tabla 3 se comparan las baterías para almacenamiento de energía.

Tabla 3. Comparación de baterías para almacenamiento de energía

Tipo	Plomo ácido (Pb-Acid)	Níquel cadmio (Ni-Cd)	Sodio azufre (NaS)	Ion litio (Li-Ion)
Eficiencia energética (%)	70 - 80	60 - 90	70	70 – 75
Densidad de energía (Wh/kg)	20 - 35	40 - 60	120	100 – 200
Densidad de potencia (W/kg)	25	140 - 180	120	360
Ciclos de vida	200 – 2000	500 – 2000	2000	500 – 2000
Autodescarga	baja	baja	#	Media

Aunque no hay reacción de autodescarga, hay una pérdida parasitaria asociada con el mantenimiento de la temperatura de la batería.

Elaboración con información de (Vazquez, M. Lukic, Galvan, G. Franquelo, & Carrasco, 2010)

Las baterías son una alternativa para almacenar energía eléctrica, las de Pb-Acid son las baterías más utilizadas que además presentan un bajo costo y alta confiabilidad, pero cuentan con baja densidad de energía y un bajo rendimiento a bajas temperaturas; la batería de Ni-Cd es una tecnología consolidada de la misma forma que la de Pb-Acid pero con algunas ventajas respecto a esta, muestran mejoras en la densidad de carga, densidad de potencia y ciclos de vida.

La batería que presenta mejores características de operación es la de Li-Ion con la densidad de energía y de potencia superior al resto de las de baterías, no presenta efecto de mejoraría y baja auto descarga además funciona con niveles de corriente más alto.

De acuerdo con las características de la región donde se implementará el prototipo el sistema de almacenamiento conveniente es la utilización baterías, por lo que se elige este sistema de almacenamiento.

2.5 NORMATIVIDAD ELÉCTRICA

Con la creciente demanda de energía y además con la necesidad de disminuir la emisión de contaminantes, es necesario plantear metas para aprovechar las energías limpias para satisfacer la demanda energética y reducir la emisión de contaminantes a la atmosfera; por tal razón se han planteado metas de crecimiento para la implementación de las energías limpias que se encuentran en leyes y reglamentos de la industria eléctrica en México.

2.5.1 Leyes y reglamentos

La normatividad de la industria eléctrica en México ha evolucionado desde la reforma energética promulgada por el Ejecutivo en el 2013 (Poder Ejecutivo, Secretaría de Gobernación, 2013), se abrieron las puertas para las energías renovables dentro de la industria eléctrica para satisfacer la creciente demanda de energía y poder cumplir con las metas de energías limpias y la reducción contaminantes a la atmosfera y al medio ambiente (Secretaría de Energía, 2017).

En la Tabla 4 se presenta la evolución de la normatividad de la industria eléctrica que se ha tenido desde la promulgación de la reforma energética, con el objetivo de identificar los planteamientos para el aprovechamiento de la solar fotovoltaica.

Tabla 4. Resumen de evolución de la normatividad de la industria eléctrica en México.

Ley y/o reglamento	Año de promulgación	Que establece:
Ley General del Cambio Climático (LGCC) (Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, 2012)	2012	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir las emisiones un 50% para el 2050 respecto a las emisiones del 2000. • Establece alcanzar un 35% en generación de energía eléctrica con energías limpias.

<p>Ley de la Industria Eléctrica (LIE) (Secretaría de Energía, 2014)</p>	<p>2014</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se modifica el régimen del sector eléctrico para la libre competencia en la generación y comercialización de la electricidad. • Se declara que el Estado mantiene la planeación, regulación, control, transmisión y distribución. • Se establece como operador del sistema eléctrico Nacional (SEN) al Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) para garantizar la demanda de energía eléctrica.
<p>Ley de Transición Energética (LTE) (Secretaría de Energía, 2015)</p>	<p>2015</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se establecen los lineamientos para aprovechar las energías limpias. • Las metas de participación de estas energías en la generación de energía. • Se establece que para el 2024 se deberá tener una participación del 35% de generación a partir de energías limpias ¹.
<p>Disposiciones administrativas de carácter general en materia de acceso abierto y prestación de los servicios en la Red Nacional de Transmisión y las Redes Generales de Distribución de Energía Eléctrica (Secretaría de Energía, 2016)</p>	<p>2016</p>	<p>Establece lo siguiente²:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las reglas de acceso a la Red Nacional de Transmisión y a las Redes Generales de Distribución. • Las Condiciones para la prestación del servicio público de transmisión y distribución. • Las directrices, convenios y contratos. • La definición de los criterios que los Transportistas y Distribuidores deben cumplir respecto a los valores mínimos de los indicadores de calidad.

¹ Tercero transitorio de (Secretaría de Energía, 2015)

² Tomada: Apartado 1, Art 1 de (Secretaría de Energía, 2016)

<p>Manual de Interconexión de Centrales de Generación con Capacidad menor a 0.5 MW (Secretaría de Energía, 2016)</p>	<p>2016</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se establecen los lineamientos generales que deberán cumplir los Distribuidores, Generadores Exentos y Generadores que representen Centrales Eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW para realizar la interconexión de sus Centrales Eléctricas
<p>Disposiciones administrativas de carácter general, los modelos de contrato, la metodología de cálculo de contraprestación y las especificaciones técnicas generales, aplicables a las centrales eléctricas de generación distribuida y generación limpia distribuida (Secretaría de Energía, 2010)</p>	<p>2017</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Establecen lineamientos en materia de Generación Distribuida • Se define el modelo de Contrato que celebran el Distribuidor y el Solicitante • Establece las especificaciones técnicas requeridas en materia de Generación Distribuida • Desarrolla la metodología para determinar la contraprestación aplicable por la energía eléctrica entregada
<p>Programa Especial de Transición Energética" (PETE) (Secretaría de Energía, 2017)</p>	<p>2017</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se establecen las actividades y proyectos para promover el uso de tecnologías limpias.
<p>Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más</p>	<p>2020</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se establecen las metas para la reducción de contaminantes que origina la industria eléctrica.

Limpios (Secretaría de Energía, 2020)

Elaboración con la información de (Gutiérrez-Villegas, Quiroz-Martínez, Torres-Nuñez, & Mejía-Pérez, 2018).

En la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios se establecen las metas de generación a partir de energías limpias fomentando la transición energética. En la Tabla 5 se muestra como quedaron planteadas estas metas.

Tabla 5. Metas de generación de energías limpias.

Metas de generación de energías limpias.		
2024	2033	2050
35.1 % de la generación eléctrica total	39.9 % de la generación eléctrica total	50 % de la generación eléctrica total

Tomado de Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios (Secretaría de Energía, 2020)

Comparando las metas que se plantean de generación de energías limpias en la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios (Tabla 5) con las metas que se propusieron en la Ley General del cambio Climático como se muestra en la Tabla 4, (Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, 2012) en el 2012 y en la Ley de la Industria Eléctrica (Secretaría de Energía, 2014) en el 2014; se puede observar que estas leyes y estrategias se encuentran en armonía ya que esta meta esta ligeramente superior en la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, solo un 0.1%.

Con la promulgación de la reforma energética y leyes y reglamentos que se han desprendido para regular la generación, transmisión, distribución y venta de la energía eléctrica ha llevado a plantearse metas para lograr una mayor utilización

de las energías limpias. El reto ahora es desarrollar la tecnología para su aprovechamiento y la implementación de nuevas metodologías para mejorar la eficiencia en el uso y consumo de la energía proveniente de fuentes renovables.

2.5.2 Facturación eléctrica

La energía eléctrica en México se comercializa mediante una estructura tarifaria agrupada en cinco sectores dependiendo del uso: residencial, comercial, servicios, industria y agrícola. El costo de la energía depende: de la energía demandada, tensión, temperatura, tipo de tarifa y en algunas la hora de consumo (tarifas horarias). Los métodos de cálculo de las tarifas se basan principalmente en: a) métodos con un enfoque contable y b) método con base a teoría económica (Instituto Mexicano de la Competividad AC, 2006).

En el primer caso el costo de la generación es importante y no considera la demanda, solamente se considera la recuperación de los costos por la generación dando importancia a la recuperación de la inversión; mientras que en el segundo caso es prioritario el uso eficiente de los recursos y al manejo eficiente de la demanda en términos de eficiencia económica (Instituto Mexicano de la Competividad AC, 2006).

Para usuarios con consumos altos de energía se establecieron tarifas donde el costo de la energía depende de la hora del día y así plantear esquemas económicos a usuarios que propicien el uso racional de la electricidad (principalmente el sector industrial). Esto es, porque el usuario ve reflejado el costo de producción de energía para la CFE en horas de alta demanda, estas tarifas horarias se establecieron el 10 de noviembre de 1991 (Secretaría de Gobernación, 1991). Sin embargo, han sufrido modificaciones, en el sector industrial la modificación del esquema tarifario que ocurrió en diciembre de 1998 (Secretaría de Gobernación, 1998) se consideró el consumo de energía de acuerdo con la hora durante el día, estas tarifas para el sector industrial en media tensión se definen en rangos de demanda contratada y de los costos de la energía dependiendo del horario de consumo.

En la legislación vigente estas tarifas se han reestructurado y se establece que la CRE es quien determinará la metodología para cálculo de las tarifas para suministro eléctrico (Secretaría de Energía, 2014) y a partir del 1 de diciembre de 2017 existe en nuestro país una nueva estructura de las tarifas eléctricas. La estructura de Tarifas Finales de Suministro Básico (TFSB) está conformadas por los costos para generar, transportar, distribuir la energía eléctrica a los usuarios finales y se clasifican de acuerdo con las características de consumo, nivel de tensión, tipo de medición y regiones tarifarias (Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2018).

La fórmula de cálculo en este esquema tarifario la TFSB que se aplica a los usuarios queda de la siguiente forma³:

$$TFSB_{i,j,m} = T_j + D_{i,j} + C_{en} + OSSB_{i,j} + SCnMEM + G_{i,j,m} \quad (1)$$

Con:

$$G_{i,j,m} = E_{i,j,m} + C_{i,j,m} \quad (2)$$

Donde:

i es una de las 17 zonas tarifarias

j es cada una de las 12 categorías tarifarias

m es el mes de aplicación de TFSB

$TFSB_{i,j,m}$ es la Tarifa Final de Suministro Básico de la división i , categoría tarifaria j , para el mes m

T_j cargo por transmisión de la categoría j

$D_{i,j}$ cargo por distribución de la división i , categoría j

³ Tomada: Apartado 1.1 de (Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2018)

C_{en} cargo vigente por la operación del Centro Nacional de Control Energía (CENACE)

$OSSB_{i,j}$ cargo por la Operación del Suministrador de Servicios Básicos de la división i , categoría j

$SCnMEM$ cargo por los Servicios Conexos no Incluidos en el MEM

$G_{i,j,m}$ cargo de generación de la división i , categoría tarifaria j , para el mes m

$E_{i,j,m}$ cargo de energía de la división i , categoría tarifaria j , para el mes m

$C_{i,j,m}$ cargo por capacidad de la división i , categoría tarifaria j , para el mes m

En la Tabla 6 se muestra en nueva categoría tarifaria para usuarios en alto consumo horario, así como una descripción y la relación con el esquema tarifario anterior.

Tabla 6. Tarifa en Gran Demanda en Media Tensión Horaria.

Categoría Tarifaria	Descripción	Categoría Anterior
GDMTH	Gran Demanda (mayor a 25 KW-mes) en Media Tensión horaria	HM, HMC, 6

Tomada de memoria documental de la CRE (Secretaría de Gobernación, 1998)

Analizando los conceptos que intervienen en las tarifas y específicamente revisando la tarifa horaria en media tensión HM (esquema tarifario anterior) que corresponde en el nuevo esquema a la tarifa Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH). A continuación, se presentan los aspectos que intervienen en el esquema de cobro a partir del esquema tarifario vigente a la fecha.

Los costos de la tarifa GDMTH están definidos de acuerdo con las diferentes regiones del país y a las temporadas del año. Para la región del estado de

Zacatecas y la división bajo están definidos en la Tabla 7, donde se muestran los aspectos que intervienen en la tarifa mensual.

Tabla 7. Periodos de consumo para tarifa GDMTH en Zacatecas

Categoría	Tarifaria		GDMTH			
	Unidades	\$/mes	\$/kWh base	\$/kWh intermedio	\$/kWh punta	\$/kW
Tarifas reguladas	Transmisión		√	√	√	
	T_j					
	Distribución					√
	$D_{i,j}$					
	Operación CENACE		√	√	√	
C_{en}						
	Operación SSB	√				
$OSSB_{i,j}$						
	Servicios conexos no MEM		√	√	√	
$SCnMEM$						
Cargos variables	Energía		√	√	√	
	$E_{i,j,m}$					
	Capacidad				√	
$C_{i,j,m}$						

Elaboración con información de la CRE (Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2020)

En esta tarifa se realizan cobros por conceptos de energía en punta, intermedia y base de acuerdo con los horarios locales que se establecieron de forma oficial que para la zona de análisis los horarios se encuentran definidos de acuerdo con las temporadas del año y se muestran en la Tabla 8 y Tabla 9.

Tabla 8. Horario definido para el cargo de energía en horario de verano

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre			
Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00	20:00 - 22:00
		22:00 - 24:00	
Sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Tomada página de la CFE (Comisión Federal de Electricidad, 2022)

Tabla 9. Horario definido para el cargo de energía en horario de invierno

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril			
Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:00	18:00 - 22:00
		22:00 - 24:00	
Sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:00	19:00 - 21:00
		21:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

Tomada página de la CFE (Comisión Federal de Electricidad, 2022)

Existen cobros de energía por demanda máxima y este interviene en los aspectos de Distribución y Capacidad donde se toma en cuenta la demanda máxima mensual y la demanda máxima en horario punta.

El análisis de los componentes del esquema de facturación en una tarifa GDMTH puede permitir determinar el grado de impacto que tiene en la reducción del pago eléctrico al implementar sistemas FV en esquemas con cargo horario. Ya que al

controlar la inyección de energía en un horario determinado permite aumentar el beneficio en la reducción de la factura eléctrica mensual.

2.6 SISTEMAS FV INTERCONECTADOS CON ESQUEMAS DE MONITOREO Y CONTROL

Con el rápido desarrollo de las instalaciones fotovoltaicas y aumento en el número de sistemas de generación fotovoltaicos conectados a la red, se ha convertido en imprescindible elaborar un sistema de interconexión eficiente con instrumentación adecuada para que los sistemas garanticen una máxima transferencia de potencia. Para caracterizar una instalación fotovoltaica es necesario realizar simulaciones y pruebas que nos permita validar los resultados, en (Prajapat, K.K, Katariya, A, Kumar, A, & Shukla, S, 2011) se presenta un análisis de resultados obtenidos por medio de simulaciones y de experimentación y se determinó el impacto de los factores ambientales sobre la eficiencia del sistema.

Aumentar la eficiencia de sistemas FV interconectados a la red requiere primeramente que se realice un monitoreo de los parámetros de operación y poder determinar una propuesta de control que nos permita mejorar en funcionamiento del sistema. En la literatura se reportan algunas técnicas de monitoreo en (Boonmee, Plangklang, & Watjanatepin, 2009) encontramos una propuesta donde los datos monitoreados se utilizan para determinar el rendimiento del sistema realizando el registro sin desconectar los generadores fotovoltaicos. Los datos que se están monitoreando son la radiación solar, tensión y energía fotovoltaica de un sistema de 5 kWp.

También se reporta en (Perpiñan Lamigueiro, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2012) un trabajo donde se evalúa el uso de baterías para almacenar y suministrar energía eléctrica a la red de distribución. El sistema propuesto consta de cuatro generadores y cuatro sistemas de almacenamiento. El control tiene una estructura jerárquica con un nivel de control de lado de la red para regular la potencia y la corriente inyectada y cuatro unidades de regulación lateral de entrada. El objetivo de este trabajo es inyectar a la red una potencia fija cualquiera que sea la

condición de irradiancia solar y la temperatura. Los resultados obtenidos de este trabajo confirman que la estrategia de control adoptada logra los objetivos de funcionamiento específicos.

En la inyección de potencia a la red se debe de garantizar la calidad de la energía. En (Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, & C.V. Nayar, 2006), se presenta un sistema fotovoltaico con un regulador de la calidad de potencia que utiliza una corriente de control para mejorar la calidad de la energía en la red eléctrica y el seguimiento de punto máximo de potencia (MPPT) de generadores fotovoltaicos. El funcionamiento del sistema se ha dividido en dos modos (soleado y noche). En el modo nocturno, el inversor controlado opera para compensar la energía reactiva demandada por la variación de cargas. En el modo soleado, el sistema propuesto reduce las corrientes armónicas y mejora el factor de potencia, y en operación en MPPT suministra energía activa de los generadores fotovoltaicos simultáneamente.

Se puede ver de los resultados de investigaciones que la utilización de los sistemas FV ofrece no solamente la producción de energía renovable, sino que también tienen aplicación para mejorar la calidad de esta.

Para aprovechar la energía solar fotovoltaica se han desarrollado diferentes materiales en (Barzalobre, Carrasco, Amtmann, Rivera, & Brailovsky, 2012) se muestra la evolución técnica en el desarrollo de paneles fotovoltaicos. Esto permite aprovechar una de las mejores opciones de energía sostenible en el mundo. En la actualidad el mercado fotovoltaico está creciendo, permitiendo que el costo del kWh de electricidad fotovoltaica cada vez se esté reduciendo.

Aunado a los materiales con mayor eficiencia se desarrollan metodologías para aumentar el impacto sobre la factura eléctrica, en este trabajo de investigación se desarrolla una propuesta para reducir la demanda de energía de la red en usuarios con tarifas horarias para el periodo en punta.

Las características variable y aleatoria de la generación FV requiere de acciones para equilibrar el sistema y esto se logra con: Sistemas de almacenamiento, redes eléctricas inteligentes con optimización y gestión de energía y algunos sistemas

utilizan métodos de pronóstico para la producción renovable y el consumo de los usuarios.

En el 2018 Meuris Mark (Mark, y otros, 2018) propone un modelo para aumentar la participación del consumo de electricidad renovable un algoritmo simple para limitar la inyección a la red durante el día y la noche. Evaluando la combinación del almacenamiento en baterías y la generación fotovoltaica para respaldar la inyección a la red, en el modelo propuesto la batería solo almacena la energía FV que no se consume al instante y la inyección de la energía almacenada se realiza justo después que el sistema deja de generar. Los resultados muestran que se puede obtener hasta un 70% del consumo de electricidad renovable.

En el 2020 Petros Iliadis (Iliadis, y otros, 2021) propone una metodología para el diseño y operación de un banco de baterías con operación predictiva que tiene por objetivo aplanar la carga de la demanda de las plantas térmicas de la red eléctrica analizada. El enfoque de la investigación se centra en la gestión energética y la integración de los diferentes módulos de pronóstico de las diferentes formas de energía; se analiza el despliegue de baterías desde un aspecto técnico y económico. Sin embargo, es necesario implementar estrategias de gestión energética para alcanzar el objetivo de costos y seguridad en el suministro.

Para determinar cuál es la óptima estrategia para la gestión de energía fotovoltaica y sistema de baterías, en (Ouédraogo, Faggianelli, Pigelet, Duchaud, & Notton, 2021) se analiza el propósito es determinar como la elección de una estrategia puede afectar el costo y la participación en la red utilizando la tarifa eléctrica. Es obvio que las tarifas de compra/venta de energía influyen en los resultados de la optimización y en beneficio de las micro-redes. En el modelo propuesto se plantean las restricciones o límites para los flujos de energía entre la generación y las cargas para plantear las estrategias de control con base en reglas.

Aquí se proponen tres estrategias; en la primera se prioriza la energía fotovoltaica para suministrar a la carga y con el excedente se cargan las baterías y si aún hay energía se inyecta a la red; en la segunda estrategia se considera el costo de la

energía y la generación FV, se favorece la energía de la red fuera de horas pico y la energía almacenada en horas pico aquí se consideran los horarios, pero siempre es prioridad la alimentación a la carga. Y por último en la tercera estrategia es similar a la anterior, pero se prevé la generación FV para optimizar la gestión de la batería.

En las conclusiones reportan que la utilización de pronóstico no mejora el rendimiento de manera significativa y que entre más mejoras se realizan a las estrategias disminuye la producción FV, en lo que respecta a uso de baterías se determina que el número de ciclos debe maximizarse cuando los costos de compra son altos.

En el 2021 Aschilean & et al (Aşchilean, Cobîrzan, Bolboaca, Boieru, & Felseghi, 2021), reporta una combinación de generación FV con almacenamiento con baterías e hidrogeno obtenido electrolíticamente, el objetivo es evaluar la viabilidad del sistema que combina la energía solar con tecnologías de almacenamiento y se muestra el análisis técnico, ambiental y de costo de sistemas de energía limpia y la influencia del entorno del almacenamiento. Los resultados muestran la viabilidad de implementar sistemas de generación FV con sistemas de almacenamiento.

Se ha presentado una revisión de la evolución de sistemas fotovoltaicos donde aplica algunas técnicas de la gestión de energía con sistemas de almacenamiento, podemos plantear que existe tecnología para implementarse y desde lo económico cada vez tienen mayor viabilidad.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En el capítulo anterior se presentó una breve descripción que abarca aspectos desde la revisión de la gestión de energía, recurso solar con el que se cuenta de la región, los conceptos de sistemas fotovoltaicos, las formas para almacenar la energía y la evolución de la normatividad en México referente a las estrategias que se están implementando para fortalecer el crecimiento de energías limpias en el país, así como el esquema actual de facturación de la energía. Siendo esto último un factor clave para favorecer el crecimiento de los sistemas fotovoltaicos interconectados con sistema de almacenamiento para usuarios en tarifa horaria.

En este capítulo se expondrá una metodología para la implementación de un sistema FV con almacenamiento basado en horario de consumo, que contempla los siguientes aspectos: análisis de perfil de consumo, dimensionamiento del sistema FV, cálculo de la inversión, proyección económica y estudio de factibilidad.

Aquí también se presenta el proceso de implementación del prototipo considerando la descripción y dimensionado del sistema a instalar, además se presenta la descripción de la medición de la energía que está generando el sistema y en la parte final se realiza una revisión del cumplimiento de la normatividad.

3.1 DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE CONSUMO

El Centro de Trabajo donde se implementa el proyecto es una institución educación de nivel superior con una población estudiantil de alrededor de 2300 alumnos distribuidos en seis ingenierías y dos carreras económico-administrativas con un horario de actividades académicas de 7 am a 6 pm y que se encuentra ubicado en la parte central del estado de Zacatecas. El clima de la región es semidesértico con una radiación solar global de 6.39 kWh/m² (A.T. Kearney, 2010) siendo uno de los más altos del país.

De acuerdo con la carga conectada la Institución se encuentra en una tarifa "*Gran Demanda en Media Tensión Horaria*" (GDTMH) donde la facturación en esta

tarifa se considera el consumo de energía dependiendo de la hora durante el día y la época del año, por consecuencia se encuentra que el costo del kWh de energía varía constantemente.

Para determinar y caracterizar el consumo de energía de la institución donde se implementa el proyecto, es necesario obtener el perfil de consumo durante un ciclo de trabajo normal dentro de la Institución. Para tener una mejor descripción se registró y analizo información por mes de facturación del consumo energético tomando en cuenta el consumo en horario base, intermedio y punta.

Se realiza un registro histórico del consumo de los últimos tres años de energía obteniendo un promedio mensual para cada uno de los horarios definidos para la región Bajío presentados en el Acuerdo A/064/2018 (Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2018).

También en el perfil de consumo es necesario determinar el impacto de cada una de estas variables en los conceptos de la factura eléctrica, los conceptos de cargo en la factura que intervienen son:

- Suministro
- Distribución
- Transmisión
- CENACE
- Energía en horario base
- Energía en horario intermedio
- Energía en horario punta
- Capacidad
- SCnMEM

Se analizará el promedio anual mensual del consumo de la energía, así como el costo en que impactan en la factura y de esta manera se obtiene el perfil de consumo de energía por parte del usuario.

3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FV

Para el dimensionamiento de Sistemas Fotovoltaicos interconectados (SFVI) se realiza en función principalmente de dos variables:

1. La distribución temporal de la demanda de energía y
2. El recurso solar disponible.

El cálculo y diseño de la instalación del sistema fotovoltaico se sintetiza en el diagrama presentado en la Figura 8.

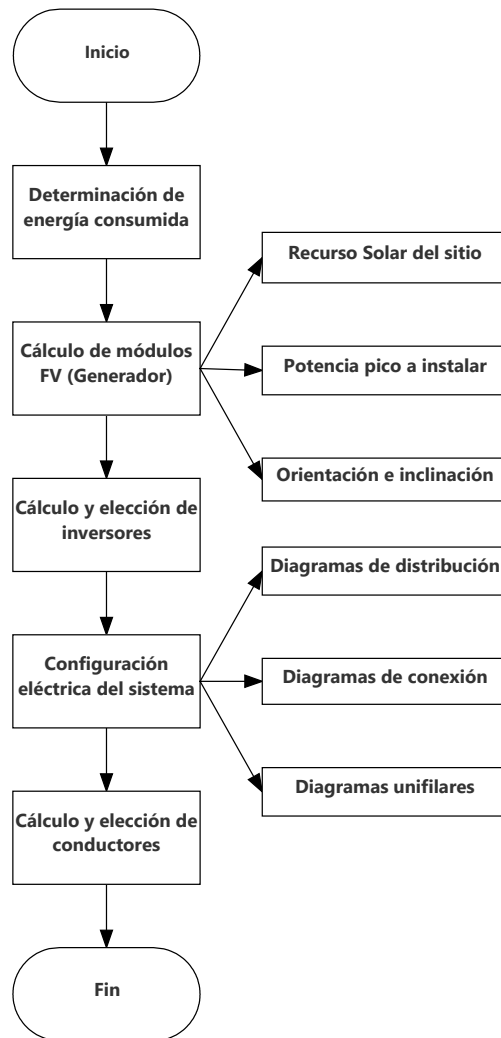


Figura 8. Diagrama para dimensionar un SFVI
Elaboración propia.

A continuación, se describe de forma general cada una de las etapas que se presentan en la metodología de la Figura 8:

1. Determinación de la energía consumida: Se debe de obtener de la carga total instalada dentro de la empresa se puede realizar un inventario de las cargas instaladas y el tiempo de utilización. También se puede utilizar el recibo de energía eléctrica, donde se encuentra el histórico anual de la energía consumida y el promedio anual puede ser utilizado para dimensionar el SFVI.
2. Cálculo de módulos FV (generador): Con el promedio de la energía consumida diariamente se selecciona el módulo fotovoltaico a utilizar, se debe de considerar la eficiencia para obtener la potencia pico a instalar (W_p).

Para determinar la potencia pico (W_p) a instalar se considera la energía consumida y la eficiencia total del sistema de acuerdo con la ecuación (3):

$$W_p = \frac{\text{Consumo de energía}}{hr \times \eta_{tot}} \quad (3)$$

Donde:

Consumo de energía Consumo promedio anual de energía al día [kWh]

hr Recurso solar [h]

η_{tot} Rendimiento total (incluye el rendimiento térmico, de degradación, mínimo del inversor y de los conductores).

Con esta información se deben de determinar el número de módulos seleccionados a instalar y se calculan de acuerdo con la ecuación (4):

$$\text{Número de módulos} = \frac{W_p \text{ a instalar}}{W_p \text{ del módulo}} \quad (4)$$

Y además es necesario determinar el número de módulos que se conectarán en serie y estos se determinan con la ecuación (5):

$$\text{Módulos en serie} = \frac{V_{m\acute{a}x} \text{ de entrada del inversor}}{V_{OC} \text{ del m\acute{o}dulo}} \quad (5)$$

3. Cálculo y elección de inversores: En la elección del inversor se debe considerar que este debe de proporcionar la potencia que pueda estar conectada al sistema y las características de la instalación.
4. Configuración eléctrica del sistema: Aquí se debe de considerar el arreglo de los módulos FV, la orientación e inclinación, diagrama de distribución de paneles, diagrama de conexión y sistema de anclaje.
5. Cálculo y elección de conductores: Se deben considerar las recomendaciones de la capacidad de conducción de corriente eléctrica, así como el sistema de protecciones. Se debe tomar en cuenta los artículos 690-8 y 690-9 de la Norma Oficial Mexicana, instalaciones eléctricas (utilización) (Secretaría de Energía, 2012).

Aquí se presenta un procedimiento de general para determinar en función del perfil de consumo del usuario los elementos que se requieren para generar la energía eléctrica por medios fotovoltaicos que requiere el usuario.

3.3 CÁLCULO DE LA INVERSIÓN

Con la información que se genera en el dimensionado se obtienen los componentes, así como las cantidades del sistema FV a instalar. El cálculo de la inversión se realiza con los precios actuales en el mercado, así como el costo de la instalación y puesta en marcha del sistema.

3.4 PROYECCIONES ECONÓMICAS

El retorno de la inversión en la implementación de sistema FV, básicamente es calcular la ganancia que se obtendrá después de un periodo de tiempo. Se debe de considerar el valor total de la inversión, los ahorros que se obtendrán durante la vida útil del sistema que aproximadamente es de 25 años.

La potencia del sistema FV, la cantidad de energía generada y el costo del kWh en la tarifa eléctrica podrán determinar de un cálculo de retorno básico en el retorno de la inversión. Además, otro indicador para determinar el ahorro que se puede obtener es el costo nivelado de la energía que en un sistema FV es la medida del costo presente neto del sistema.

3.5 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

Un estudio de factibilidad se realiza para determinar la posibilidad de implementar un negocio o proyecto con el fin de determinar si puede resultar favorable o desfavorable. Además, con este estudio se pueden determinar el tipo de estrategias que se pueden implementar para que pueda llegar al éxito; en resumen, un estudio de factibilidad permite determinar si el proyecto se puede implementar, cuáles son las condiciones para realizarlo y como poder resolver las dificultades que se presenten.

Con el estudio de factibilidad se consideran el dimensionamiento del sistema, la implementación del sistema FV, el tiempo de recuperación de la inversión con el fin de demostrar la viabilidad técnico-económica de la instalación de un sistema fotovoltaico para abatir el consumo de energía en horario punta.

3.6 METODOLOGÍA DE PROSPECCIÓN TÉCNICO – ECONÓMICO PARA INSTALACIÓN PV

La metodología que se propone considera un análisis tanto técnico como económico para analizar, proponer e implementar sistemas fotovoltaicos en donde

los costos de la factura eléctrica dependen del horario en el que se consume la energía.

En la Figura 9 se muestra la metodología empleada determinar el impacto de la implementación de sistemas PV en usuarios que se encuentran en tarifas horarias (GDMTH), se inicia con la determinación del perfil de consumo por el usuario en cada uno de los horarios, se dimensiona el sistema para satisfacer la demanda de energía en los horarios de consumo intermedio y punta, se determina la inversión económica inicial, se realiza una proyección de la reducción de energía y de la factura eléctrica mensual y por último se realiza un análisis de factibilidad para mostrar las ventajas de cada una de las implementaciones.

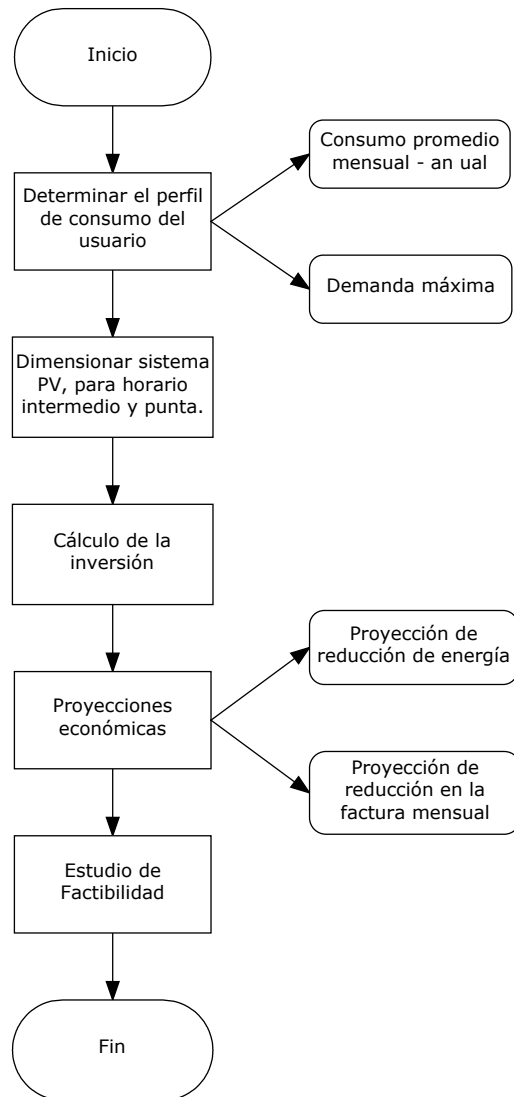


Figura 9. Diagrama de metodología de prospección técnica – económica para sistemas PV.
Elaboración propia

3.7 PROCEDIMIENTO PARA INYECCIÓN DE ENERGÍA DE UN SISTEMA FV CON CONTROL DE INYECCIÓN HORARIA

Como se ha demostrado, la tendencia de los sistemas de energía tendrá que incluir las fuentes de generación convencional y las distribuidas por lo que para planificar y operar de forma eficiente será necesario tener una respuesta rápida a la demanda que se puede alcanzar con la utilización de fuentes de almacenamiento.

La metodología adoptada para la generación e inyección de energía se muestra en la Figura 10, aquí se puede ver la secuencia de generación de la energía fotovoltaica hasta alimentar a la carga. Es importante hacer notar que se tiene como prioridad garantizar que se logre el almacenamiento de la energía en las baterías durante el periodo de radiación solar para generar mejor beneficio en horario punta.

Con este procedimiento se garantiza que durante las horas de radiación solar la energía que se genera del sistema fotovoltaico se estará almacenando en el banco de baterías hasta que alcance su capacidad máxima ($SoC_{m\acute{a}x}$). Cuando se alcance el horario punta (como se describe en la Tabla 8 y Tabla 9) la energía almacenada será inyectada a la carga para su consumo hasta que alcance su valor mínimo de almacenamiento ($SoC_{m\acute{i}n}$) y/o se cumpla el horario de inyección de la energía.

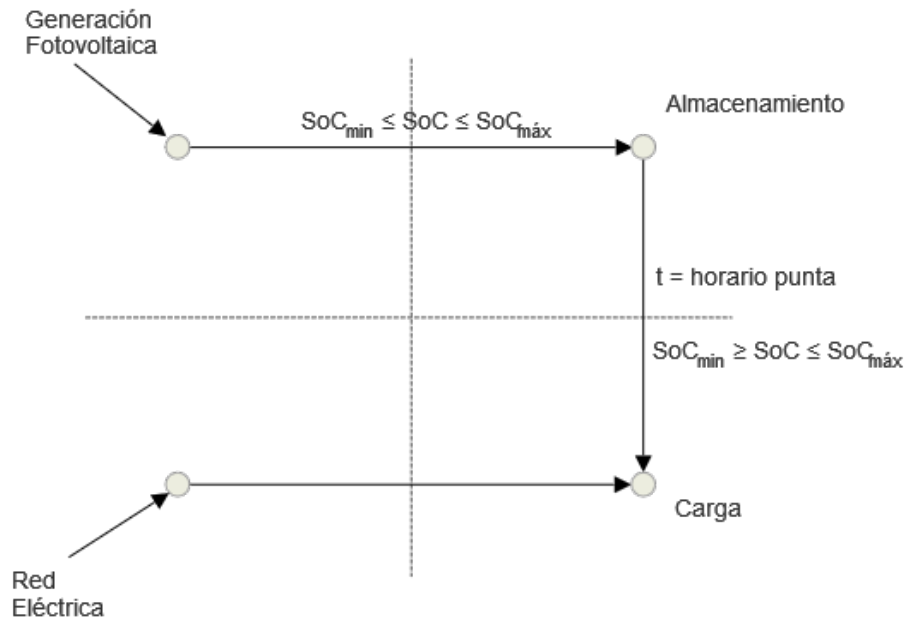


Figura 10. Metodología para la generación e inyección de energía en horario punta. Elaboración propia.

Se pueden presentar diversas condiciones de operación del sistema que dependen del medio ambiente y del consumo de energía, para sintetizar se pueden presentar las siguientes condiciones:

Tabla 10. Condiciones de operación del sistema FV

Generación FV	t = horario punta	SoC	Criterio procedimental	Uso energético
Si	Si	$\leq SoC_{min}$	Generación a reserva	SFV: Carga las baterías Red: Suministra energía la carga
		$> SoC_{min}$ y $< SoC_{m\acute{a}x}$	Generación a demanda y a carga	SFV: Carga de baterías y alimenta a la carga Red: Complementa alimentación a carga
		$\geq SoC_{m\acute{a}x}$	Generación a demanda	SFV: Alimenta a la carga Red: Complemento alimentación a carga
Si	No	$\leq SoC_{min}$	Generación a reserva	SFV: Carga las baterías Red: Suministra la totalidad de energía a la carga
		$> SoC_{min}$ y $< SoC_{m\acute{a}x}$	Generación a reserva	SFV: Carga las baterías Red: Suministra la totalidad de energía a la carga
		$\geq SoC_{m\acute{a}x}$	Generación a demanda	SFV: Alimenta a la carga Red: Complemento alimentación a carga
No	Si	$\leq SoC_{min}$	Red a reserva y a cargas	Red: Alimenta a las cargas No hay alimentación de baterías a carga
		$> SoC_{min}$ y $< SoC_{m\acute{a}x}$	Red a demanda	Baterías: Alimenta a cargas.

			Red: Complementa alimentación a carga
		$\geq \text{SoC}_{\text{máx}}$	Red a demanda Baterías: Alimenta a cargas.
		$\leq \text{SoC}_{\text{mín}}$	Red a reserva y cargas Red: Alimenta a cargas y almacén
		$> \text{SoC}_{\text{mín}}$ y $< \text{SoC}_{\text{máx}}$	Red a demanda La carga es alimentada por energía de la red
No	No	$\geq \text{SoC}_{\text{máx}}$	Red a demanda La carga es alimentada por energía de la red y la almacenada se reserva hasta alcanzar horario punta

Elaboración propia.

En la Tabla 10 se puede apreciar en los diferentes escenarios que el sistema de control es un control sencillo donde fuera del horario punta se privilegia el almacenamiento de energía en el banco de baterías y en horas punta se trata de abatir la energía que demanda la carga ya sea con el almacenamiento logrado y la generación FV, para demandar la menor energía de la red.

3.8 CARACTERÍSTICAS DEL PROTOTIPO

Con el dimensionamiento de Sistemas Fotovoltaicos interconectados (SFVI) se determinan los componentes a utilizar.

El objetivo de esta metodología es la de proporcionar un procedimiento general para realizar el cálculo y diseño del sistema FV que garantice la generación de la energía requerida y la rentabilidad de este tipo de tecnologías para procurar la credibilidad de estas y no instalar sistemas sobre dimensionados que lo único que se alcanzaría es una inversión inicial alta y un tiempo de recuperación mayor.

3.8.1 Características del equipo a utilizar

La adquisición del equipo para la implementación del prototipo se realizó con el financiamiento de programas de apoyo a la investigación para Instituciones de Educación Superior. En la Tabla 11 se muestra el equipo seleccionado y adquirido para la instalación del prototipo de investigación:

Tabla 11. Listado de material adquirido

N°	Cantidad	Descripción
1	3	Inversor Outback Grid-interactive ventilated GVFX3648
2	1	Outback Hub 10 slots
3	1	Display de control y monitoreo Mate 3
4	3	Controlador Solar MPPT Flexmax 80
5	24	Panel policristalino 145 W 36 Celdas
6	24	Batería trojan 6 V 225 AH Ciclo profundo
7	8	Conector tipo MC 4 Par M-H
8	50	Cable FV 10 AMG
9	1	Sistema de montaje para 24 módulos, 2 filas de 12 paneles, 20"
12		Accesorios de protección, instalación y montaje

Elaboración propia

A continuación, se describen las características técnicas del equipo que se ha utilizado para la instalación del prototipo.

Inversor Outback Grid-interactive ventilated GVFX3648: Es un inversor/cargador de red interactivo, incorpora un inversor de onda senoidal de CC a CA y cargador de batería (OutBack Power Systems, 2020). Este inversor/cargador brinda la capacidad de inyectar energía a la red mientras proporciona energía de respaldo del banco de baterías. Con el interruptor de transferencia incorporado desconecta

automáticamente las cargas de la red y las alimenta desde el inversor lo que permite continuar usando la energía de respaldo solar y de las baterías. Las características del inversor se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12. Características del inversor/cargador

Modelo	GVFX3648
Voltaje de entrada nominal CC	48 VCD
Potencia CC	3600 VA
Frecuencia/Voltaje AC	60 Hz/ 120 VAC
Corriente RMS de salida AC	30 A AC
Eficiencia típica	93 %
Corriente de entrada máxima	60 A AC
Variación de voltaje de interacción con la red	108 0 132 V AC
Variación de frecuencia de interacción con la red	59.3 a 60.5 Hz
Corriente de salida a cargar la batería	45 A DC

Elaboración con la ficha técnica del equipo (OutBack Power Systems, 2020)

Controlador Solar MPPT Flexmax 80: Es un controlador de carga de seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT), puede operar en una gama amplia de tensiones de batería nominales y la capacidad de reducir el voltaje del generador solar para recargar baterías a menor voltaje (Outback Power, 2020). También cuenta con un sistema de monitoreo y control que permite comunicación de forma remota a través de un sistema MATE que proporciona una integración completa. Las características del controlador se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Características del controlador de carga.

Modelo	FLEXmax 80 (FM80-150VDC)
Voltaje nominal de batería	12, 24, 36, 48 o 60 VCC
Corriente máxima de salida	80A @ 104°F (40°C)
Voltaje de circuito abierto PV (Voc)	Condiciones máximas absolutas de 150 VCC / puesta en marcha y máximo de funcionamiento de 145 VCC
Eficiencia	97.5 a 80 AAC en un sistema de 48 VAC
Regulación de voltaje	13 a 80 VCC protección con contraseña
Pantalla remota y controlador	MATE3, MATE o MATE2
Opcional	
Registro de datos	Últimos 128 días de operación: Ah, kWh, tiempo en flotación, Wp, A, V de sistema FV, Vmáx de la batería, Vmin de la batería, tiempo de absorción, Ah acumulados y kWh de producción
Rango de temperatura de operación	-40 a 60 ° C (potencia reducida automáticamente por encima de 40 ° C)

Elaboración a partir de la ficha técnica del equipo (Outback Power, 2020)

MATE3: Pantalla y sistema de comunicación para programar y monitorear un sistema Outback completo, cuenta con una función incorporada de reloj y calendario que permite la programación basada en temporizador de la operación del inversor y el cargador. Con esta función se permite que el sistema funcione con tarifas de energía en función de la hora durante el día cuenta con una memoria interna que permite restablecer los parámetros programados aun cuando exista una des energización. El MATE3 permite monitoreo por medio de un servidor de intranet de todo el sistema Outback. Las características técnicas se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Características de sistema de programación y comunicación MATE3

Modelo	MATE3
Monitor	Pantalla gráfica completa de 4.0 x 1.2"
Acceso rápido al sistema	5 teclas de acceso rápido del sistema, 4 teclas programables por el usuario
Protocolo de comunicación	Protocolo de comunicaciones patentado OutBack
Cableado de interconexión incluido	Cable de red CAT5 estándar con conector modular RJ-45 - 6 '(2 m)
Interfaz de computadora PC	Panel de estado del sistema HTML a través de una conexión de intranet local
Microprocesador Procesador	80MHz 32 bit
Punto de ajuste y memoria de datos	8Mb RAM / 64Mb de flash RAM
Rango de temperatura de operación	0 a 50 ° C
Clasificación ambiental	Interior tipo 1 (IP 30)

Elaboración a partir de la ficha técnica del equipo (Outback Power, 2020)

Outback Hub 10.3: Administrador de comunicación del sistema. El sistema de comunicaciones y el sistema HUB forman la columna vertebral del sistema de generación de energía OutBack en red. El OutBack HUB comunica los elementos del sistema, utiliza un cableado de interconexión estándar Ethernet CAT5 con conectores modulares RJ-45. A través del HUB la comunicación con el sistema MATE3 coordinan y administran completamente un sistema. En la Tabla 15 se muestran las características del sistema de administración de comunicación del sistema.

Tabla 15. Características sistema de administración de comunicación del sistema

Modelo	HUB 10.3
Numero de puertos	10
Rango de temperatura de operación	0 a 50 °C
Apilamiento trifásico	Si

Elaboración a partir de la ficha técnica del equipo (Outback Power, 2020)

Panel policristalino 145 W 36 Celdas: Panel solar de 36 celdas con una eficiencia superior al 14%, con un valor del coeficiente de temperatura reducido que logra un buen desempeño en condiciones de baja iluminación que permite entregar mayor cantidad de energía en condiciones de potencia máxima. En la Tabla 16 se presentan las características de los paneles utilizados para este sistema.

Tabla 16. Características técnicas del panel S36PC-140

Modelo	S36P-140
Condiciones de operación. Temperatura	-40 °C a +90°C
Especificaciones	
Numero de celdas	36
Cable	90 cm
Conexión	IP65 tipo IV, MC4 tipo Plug
Voltaje Voc	22.01 V
Voltaje en funcionamiento optimo	17.89 V
Corriente Isc	8.37 A
Corriente de funcionamiento optimo	7.82 A
Potencia máxima en STC	140 W

Elaboración a partir de la ficha técnica del equipo (Solartec SA de CV).

Batería trojan 6 V 225 Ah Ciclo profundo: Es una batería de plomo acido de ciclo profundo marca Trojan de 6 V modelo *T-105 Plus*, con una vida útil de 10 años, está fabricada para soportar condiciones rigurosas en aplicaciones de energía renovable. Las características técnicas de las baterías se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Características técnicas de fuente de almacenamiento

Modelo	T-105 Plus (Marca Trojan)
Voltaje	6
Celdas	3
Capacidad (minutos).	@25 Amp 447 @75 Amps 115
Capacidad Ah	5-hr vel 185 10-Hr vel 207 20-Hr vel 225 100-Hr vel 250
Energía	1.5 kWh

Elaboración a partir de la ficha técnica del equipo (Trojan Battery Company).

3.8.2 Instalación y puesta en marcha del prototipo

El prototipo propuesto es un sistema de 3.48 kWp de potencia que se instala y se está monitoreando para analizar el impacto sobre la tarifa eléctrica de la institución con esquemas de control de inyección por horario que es la propuesta de investigación. En la Figura 11 se muestra en diagrama unifilar del sistema instalado.

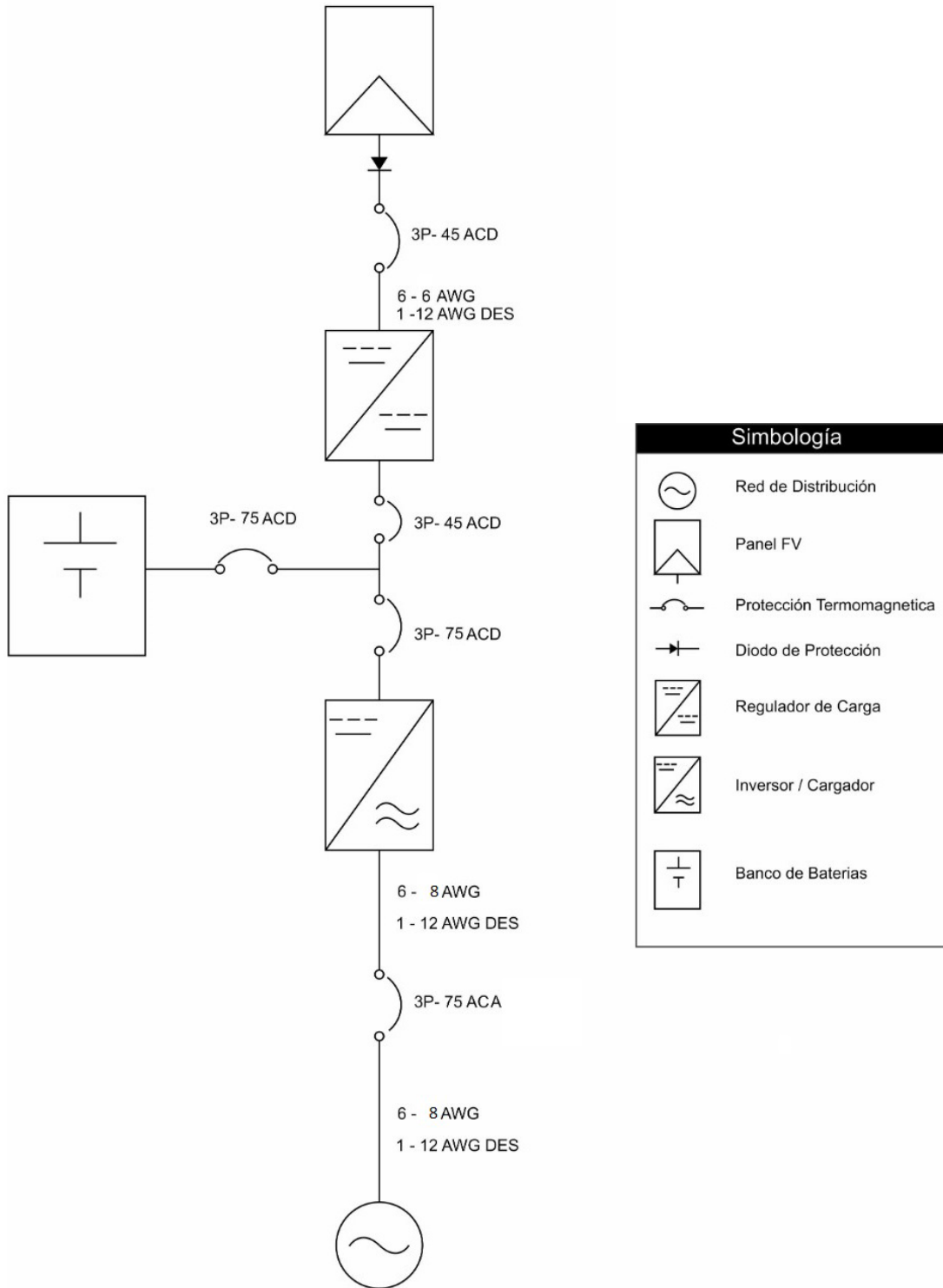


Figura 11. Diagrama unifilar de la instalación.
Elaboración propia

A continuación, se muestra la instalación del equipo del sistema de generación de energía con sistema de control de inyección horaria.

- a) Instalación de paneles FV.** Se realizó la instalación en edificio de docencia del centro de estudios, ya que cuenta con el área disponible y se encuentra libre de edificios que puedan afectar con sombreado. En la Figura 12 se muestra la instalación terminada de los 24 módulos fotovoltaicos que generaran 3.48 kWp que proporcionará una energía de 16 Kwh al día.



Figura 12. Paneles solares instalados
Tomada de trabajo de campo.

- b) Instalación de inversor/cargador.** En el cuarto de control fueron instalados el inversor/cargador, regulador de carga y sistema de monitoreo y control como se muestra en la Figura 13. Además, se realizó el alambrado de potencia y del sistema de comunicación y control del sistema de monitoreo. En la Figura 13 se muestra los equipos instalados en el cuarto de control.



Figura 13. Inversor/cargador, regular y sistema de control instalados.
Tomada de trabajo de campo.

c) Sistema de almacenamiento. El sistema de almacenamiento consiste en un conjunto de 24 baterías que tendrán la capacidad para almacenamiento de energía de 37.44 kWh, suficiente para almacenar la energía que suministrara el arreglo fotovoltaico. En la Figura 14 se muestra el sistema de almacenamiento instalado en el cuarto de control.



Figura 14. Sistema de almacenamiento de energía
Tomada de trabajo de campo.

El sistema integrado se muestra en la Figura 15 donde puede observar el sistema de almacenamiento, los inversores/cargador, los reguladores, el sistema de monitoreo y control y el conjunto de protecciones del sistema.



Figura 15. Sistema FV con almacenamiento de energía integrado
Tomada de trabajo de campo.

Este sistema se interconecta a la subestación 2 de la institución para realizar la inyección y el monitoreo de la energía.

3.9 CUMPLIMIENTO DE NORMATIVIDAD DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS

En la Instalación del prototipo de generación de energía fotovoltaica se considera la Norma Oficial Mexicana de instalaciones eléctricas (Secretaría de Energía, 2018), considerando específicamente el Art. 690. Sistemas solares fotovoltaicos:

- 690-7 Tensión máxima en circuitos de corriente continua.
- 690-8. Dimensionamiento y corriente de los circuitos.
- 690-9. Protección contra sobrecorriente.
- 690-31. Métodos de alambrado.
- 690-32. Interconexión de componentes.
- 690-41. Puesta a tierra del sistema.
- 690-55. Sistemas fotovoltaicos conectados a sistemas de almacenamiento de energía.

Para el caso de conocimiento y análisis de la factura eléctrica se toma como referencia la normatividad vigente para el cálculo y determinación de las tarifas eléctricas (Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2019):

- Acuerdo A/038/2019: Se describe la metodología del cálculo y ajuste de tarifas.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo de resultados se realiza primeramente el análisis de reducción de energía para el horario intermedio y punta. Se determina el impacto sobre la factura y el análisis de la inversión. Se centra el análisis en dos parámetros de reducción en la factura: el impacto que se tiene en la reducción de la energía y la disminución de la demanda máxima.

También se presentan los resultados de la implementación del prototipo, presentando resultados de igual forma en el consumo de energía y de la demanda máxima.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO ENERGÉTICO DEL CENTRO DE TRABAJO

De acuerdo con la carga conectada la Institución se encuentra en una tarifa "*Gran Demanda en Media Tensión Horaria*" (GDTMH) y analizando la descripción que se muestra en la Tabla 6, la facturación en esta tarifa se considera el consumo de energía dependiendo de la hora durante el día y la época del año. En la Figura 16 se muestra cada uno de los parámetros que intervienen en la factura eléctrica, se puede ver que el mayor porcentaje es el consumo de energía seguida por la capacidad.

La energía y la demanda representan el 81% de la factura eléctrica, de lo que se puede deducir que con la implementación de sistemas FV se puede impactar significativamente en la factura al reducir la energía y la demanda por parte del usuario de la red.

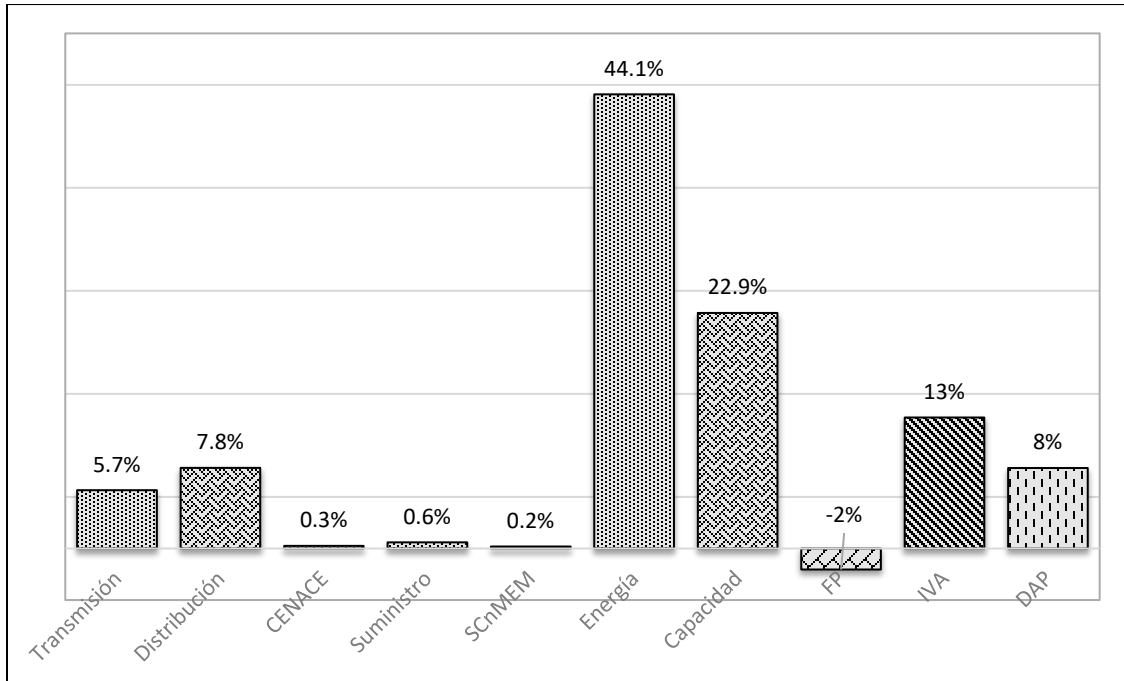


Figura 16. Desglose de factura eléctrica mensual en porcentaje.
Elaboración con información de la factura eléctrica.

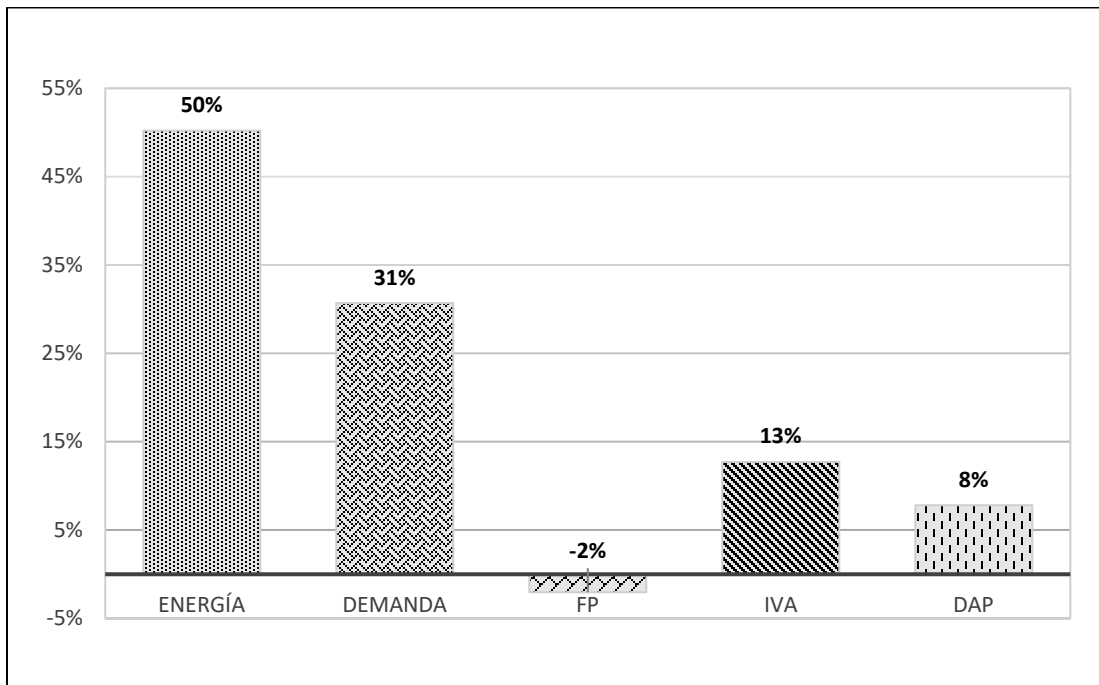


Figura 17. Porcentaje de costo por energía y demanda.
Elaboración con información de la factura eléctrica.

En la factura eléctrica se encuentran también los cargos por factor de potencia (FP) que en este caso existe una compensación por contar con un $FP=0.99$ que representa una bonificación del 2%, el cargo por el IVA representa el 13% y el Derecho de Alumbrado Público (DAP) representa el 8% de la factura. Es claro que el consumo de energía y la demanda son los que impactan en mayor medida en la factura eléctrica como se puede ver en la Figura 17 donde se agrupan los términos en los que se interviene la energía y la demanda; a continuación, se analiza el consumo de acuerdo con el horario y la demanda.

4.1.1 Consumo de energía

El perfil de consumo durante un ciclo de trabajo se registró y analizó la información por mes de facturación del consumo considerando el consumo en horario base, intermedio y punta. El registro histórico obtenido de los últimos tres años de energía proporciona un promedio mensual para cada uno de los horarios definidos para la región Bajío que se presentaron en la Tabla 8 y Tabla 9 presentados en el Acuerdo A/064/2018 (Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2018); en la Tabla 18 muestran el consumo mensual de energía en kWh.

Tabla 18. Promedio de consumo mensual de acuerdo con el horario durante el día.

Mes	Consumo de energía por horario en [kWh]			
	Base	Intermedio	Punta	Total
Ene.	7,397	14,868	3,551	25,815
Feb.	7,023	14,331	3,249	24,604
Mar.	6,813	14,630	3,049	24,493
Abr.	6,337	16,310	1,665	24,313
May.	6,949	16,343	1,417	24,708
Jun.	6,701	17,766	1,488	25,955
Jul.	5,213	11,928	1,094	18,234
Ago.	5,301	12,040	1,061	18,402
Sep.	6,725	16,828	1,465	25,018
Oct.	7,518	18,265	2,012	27,795
Nov.	8,881	16,515	3,855	29,251
Dic.	7,677	13,781	3,485	24,943
Promedio mensual	6,878	15,300	2,283	24,461

Elaboración con información de la factura eléctrica.

Se observa que el mayor consumo de energía se presenta en el horario intermedio que es donde se desarrollan la mayor cantidad de actividades en el centro de trabajo, el porcentaje promedio de consumo mensual de energía por horario queda de la siguiente forma: en horario base del 28%, intermedio del 63% y punta del 9%; siendo muy notable que en el horario punta es un tercio del consumo en horario base y un séptimo del consumo en horario intermedio.

Analizando la información de la Figura 18 donde se presenta el porcentaje de la demanda de energía mensual por horario de consumo acompañada del porcentaje de su costo; se puede observar que aun y cuando el consumo en horario punta tiene un valor cercano al 10% este representa el 38% del total del costo de la energía solo 9% por debajo del costo de la energía en horario intermedio y 22% por encima del costo de la energía en horario base. En la Tabla

19 se muestran el porcentaje promedio del consumo de energía por horario y por su costo.

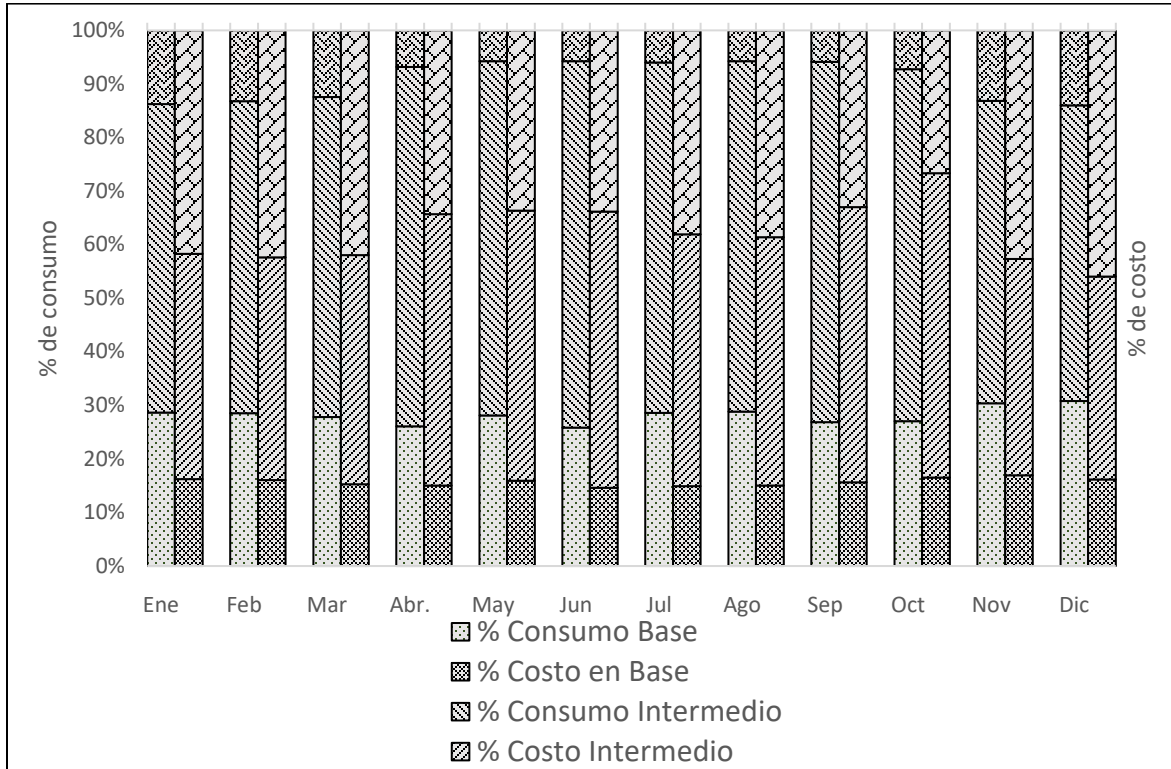


Figura 18. Aportación de consumo por periodo anual
Elaboración a partir de información de la factura eléctrica.

Tabla 19. Porcentaje promedio mensual anual de consumo y costo de energía.

Energía	Promedio mensual anual por horario de consumo		
	Base	Intermedio	Punta
kWh	6,878	15,300	2,283
% de consumo	28	63	9
% de costo	16	47	38

Elaboración con información de la factura eléctrica.

Una alternativa para evitar cargos excesivos por concepto de energía en periodo de punta es que la empresa evite consumir energía durante este periodo. Sin

embargo, esto implica que las empresas particulares instalen sus propias plantas de generación de energía para autoabastecerse. Una alternativa es la instalación de un sistema FV interconectado, pero además que cuente con un banco de baterías que le permita almacenar energía durante las horas de Sol y poder inyectarla de forma controlada a la red eléctrica en el periodo de punta.

4.1.2 Demanda máxima

Otro aspecto que es necesario analizar en la tarifa GDMTH, es la demanda máxima ya que también depende de características de consumo por parte del usuario y este parámetro influye directamente en el cargo por distribución y de capacidad.

La demanda máxima medida se define como⁴:

“Las demandas máximas medidas en los distintos periodos se determinarán mensualmente por medio de instrumentos de medición, que indican la demanda media en kilowatts, durante cualquier intervalo de 15 minutos del periodo en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el periodo correspondiente, cualquier fracción de kilowatt de demanda medida se tomará como kilowatt completo.” (Secretaría de Energía, 2016).

En la Figura 19 se muestran los valores de la demanda máxima medida en cada uno de los periodos y para todos los meses que corresponden al ciclo de trabajo analizado.

⁴ Artículo Primero, apartado 1 de (Secretaría de Energía, 2016)

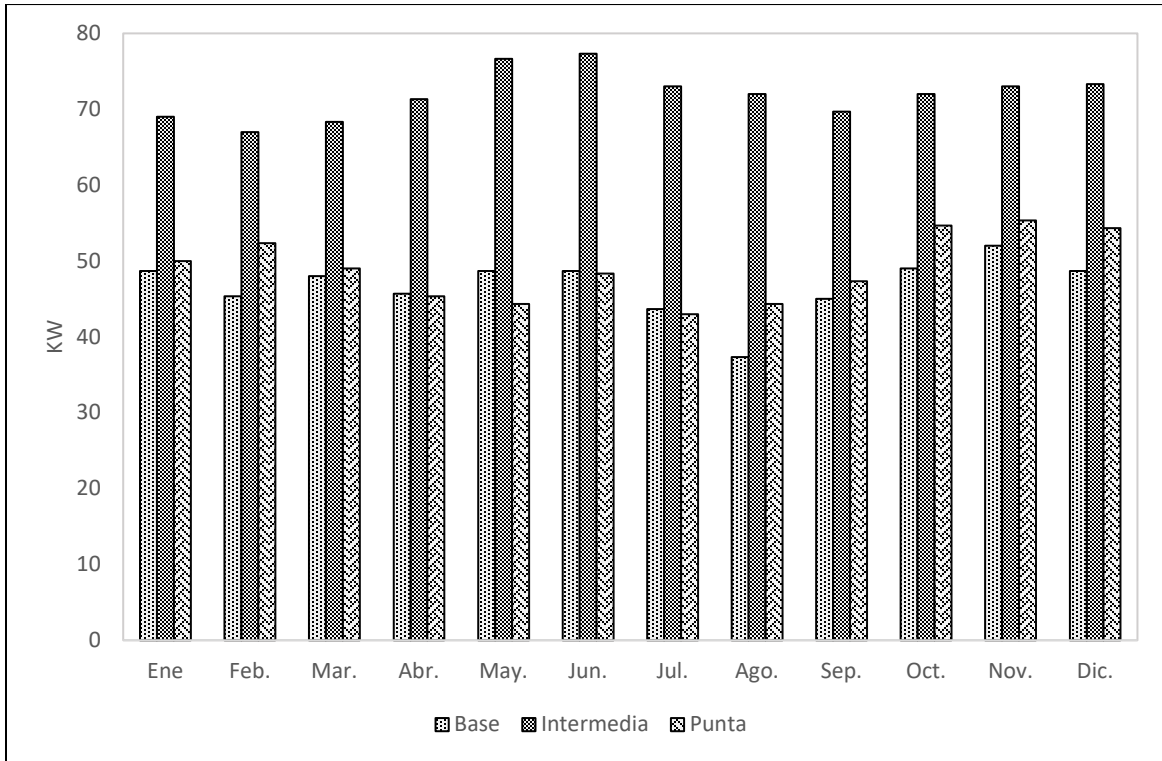


Figura 19. Demanda máxima por periodo durante un año.
Elaboración con información de la factura eléctrica.

Es necesario identificar el comportamiento de la demanda ya que como se mostró en la Figura 17 la demanda influye en 31% de la factura eléctrica mensual afectando el cargo por distribución y capacidad.

El cargo por distribución para usuarios en tarifa GDMTH está definido por el valor mínimo que se obtenga de la demanda máxima y del consumo de energía registrado en el periodo de facturación de acuerdo con la ecuación (6) que está definida en (Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2019):

$$\min \left\{ D_{\text{máx}_{\text{mensual}}}, \left[\frac{Q_{\text{mensual}}}{24 \times d \times FC} \right] \right\} \quad (6)$$

Donde:

$D_{\text{máx}_{\text{mensual}}}$ demanda máxima en el mes de facturación en kW

$Q_{mensual}$ consumo mensual en el mes de facturación en kWh

d días del periodo de facturación

FC factor de carga correspondiente al apartado 3.3.1 del acuerdo A/038/2019.

Como se puede observar en la ecuación (6) al reducir el consumo de energía (kWh) mensual el cargo por distribución también se reduce impactando directamente en la factura eléctrica.

Para el cobro de Capacidad también se toma en cuenta la Demanda Máxima, pero en este caso se considera la demanda en horario punta de acuerdo con la ecuación (7):

$$\min \left\{ D_{\max_{punta}}, \left[\frac{Q_{mensual}}{24 \times d \times FC} \right] \right\} \quad (7)$$

Donde:

$D_{\max_{punta}}$ demanda máxima registrada en el mes de facturación en horario punta en kW

$Q_{mensual}$ consumo mensual en el mes de facturación en kWh

d número de días del periodo de facturación

FC factor de carga correspondiente al apartado 3.3.1 del acuerdo A/038/2019

De acuerdo con la ecuación (7) se puede determinar que al reducir el consumo y la demanda en horario punta, se impacta directamente en la reducción de la factura eléctrica y que puede llegar a ser significativo, ya que de acuerdo con la Figura 17 el cargo por capacidad representa el 22.9% de la facturación mensual.

Analizando el cargo por energía en horario punta y de capacidad se detecta la necesidad de disminuir el consumo y la demanda en este horario y se alcanzará una disminución del costo de la factura eléctrica. Analizando estas variables de la factura y el consumo del usuario se puede dimensionar un sistema FV con la capacidad de producir y almacenar energía para abatir el consumo en el periodo en este horario.

4.2 DIMENSIONADO DE SISTEMA FV PARA HORARIO INTERMEDIO Y PUNTA

4.2.1 Dimensionado de sistema FV para abatir energía en periodo intermedio

Los datos que se requieren para iniciar el dimensionado son: la energía consumida y el recurso solar.

Para conocer el consumo el cual definirá la energía que el sistema FV generará, esta información la obtenemos del registro histórico del consumo anual por parte del usuario que ya se presentó en la Tabla 18. Después de tener el valor del consumo de energía es posible definir el porcentaje de este que se cubrirá con el sistema FV, todo dependerá de las condiciones económicas de la propuesta técnica. La propuesta de análisis incluye abatir el 100% de energía en horario intermedio; así que se realiza una propuesta para abatir 15,300 kWh-mes.

Después de conocer el consumo de energía es necesario analizar el recurso solar disponible en el sitio de instalación que ya se presentó en la Tabla 2, ahí encontramos la irradiación promedio anual y el ángulo óptimo de incidencia para el dimensionamiento de sistemas.

Como resumen de los datos para el dimensionado en la Tabla 20 se presentan los datos del consumo de energía en horario intermedio, la irradiación solar y el ángulo de irradiación.

Tabla 20. Datos para dimensionar un sistema FV (Energía en horario intermedio)

Mes	Consumo de energía Intermedio [kWh]	Irradiación Solar [kWh/m²/día]	Angulo de irradiación solar [grados]
Promedio mensual	15,300	6.39	21.5

Elaboración con información de la factura eléctrica y datos de LaRC (Nasa prediction of worldwide energy resources, 2020)

En la Tabla 21 se presenta la propuesta económica simplificada de los componentes del sistema para abatir el consumo de energía en horario intermedio con este sistema se reducirán 500 kWh por día de energía en este horario.

Tabla 21. Inversión de sistema FV (Energía en horario intermedio)

No	Concepto	Costo
1	Modulo Fotovoltaico ET 405 W	1,523,500.00
2	Inversor SMA 5 KVA	804,000.00
3	Estructura	300,000.00
4	Material eléctrico	200,000.00
Inversión:		2,827,500.00

Elaboración a partir de dimensionado

4.2.2 Dimensionado de sistema FV para abatir el consumo en periodo punta

Para abatir el consumo de energía en horario punta es necesario dimensionar el generador para la energía demanda por la carga en este horario, en la Tabla 22 se muestra el promedio mensual anual del consumo de energía en este horario, así como los parámetros de radiación solar para el lugar donde se instalará el sistema FV.

Además, se debe considerar una fuente de almacenamiento de esta energía porque de acuerdo con la Tabla 8 y Tabla 9, antes mostradas, para reducir el consumo en horario punta será necesario inyectar a la red y/o la carga cuando ya no existe radiación solar. En la propuesta de dimensionado se consideró un banco de baterías para el almacenamiento y se seleccionó inversor/cargador de baterías de la marca Outback Power Systems (OutBack Power Systems, 2020).

En la Tabla 22 se muestran la información de consumo de energía, irradiación solar y ángulo de irradiación para el dimensionado del sistema FV para abatir el consumo en horario punta.

Tabla 22. Datos para dimensionar un sistema FV (Energía en horario punta).

Mes	Consumo de energía Punta [kWh]	Irradiación Solar [kWh/m²/día]	Angulo de irradiación solar [grados]
Promedio mensual	2,283	6.39	21.5

Elaboración con información de la factura eléctrica y datos de LaRC (Nasa prediction of worldwide energy resources, 2020)

En Tabla 23 se presenta la propuesta económica simplificada con la lista de los componentes para abatir el consumo de energía en horario punta, con este sistema se reducirá la demanda de 75 kWh por día; pero que tienen que ser inyectados en horario punta para reducir la demanda en este horario que influirá directamente en el cargo por capacidad cómo se puede ver en la ecuación (7).

Tabla 23. Inversión de sistema FV (Energía en horario punta)

No	Concepto	Costo
1	Modulo Fotovoltaico ET 405 W	412,500.00
2	Inversor SMA 6 KVA	270,000.00
3	Estructura	30,000.00
4	Material eléctrico	15,000.00
5	Baterías	264,000.00
Inversión:		991,500.00

Elaboración a partir de dimensionado

4.3 IMPACTO EN LA FACTURA ELECTRICA

4.3.1 Reducción de energía en horario intermedio

Para conocer el impacto sobre la factura eléctrica con la implementación de un Sistema FV interconectado, se plantea un sistema con la capacidad para abatir el consumo de energía en este horario, se realizan las estimaciones de impacto en el cargo por energía que se presentan en la Figura 20 donde claramente se proyecta una disminución del cargo en la factura eléctrica en un 63% del total. Estas estimaciones se realizan de forma analítica considerando que es posible generar por medios fotovoltaicos el total de la energía que es consume en horario intermedio.

Al reducir la energía consumida en horario intermedio se tiene un impacto importante en este periodo ya que aquí se realizan la mayor cantidad de actividades en la institución y por lo tanto mayor consumo. Analizando el resto de los conceptos que intervienen en la factura se puede identificar que existe una reducción en los conceptos de Distribución, Transmisión y Capacidad ya que estos dependen de la energía consumida durante el periodo de facturación, a continuación, se describe el porcentaje de reducción:

Distribución: Se logra una disminución del 4.8 % y esto se puede ver de la ecuación (6) donde interviene la demanda máxima y la energía que se consumió en el periodo. Al tener una reducción de la energía el valor a multiplicar el cargo por distribución será el que resulte a partir de la $Q_{mensual}$ de la misma ecuación.

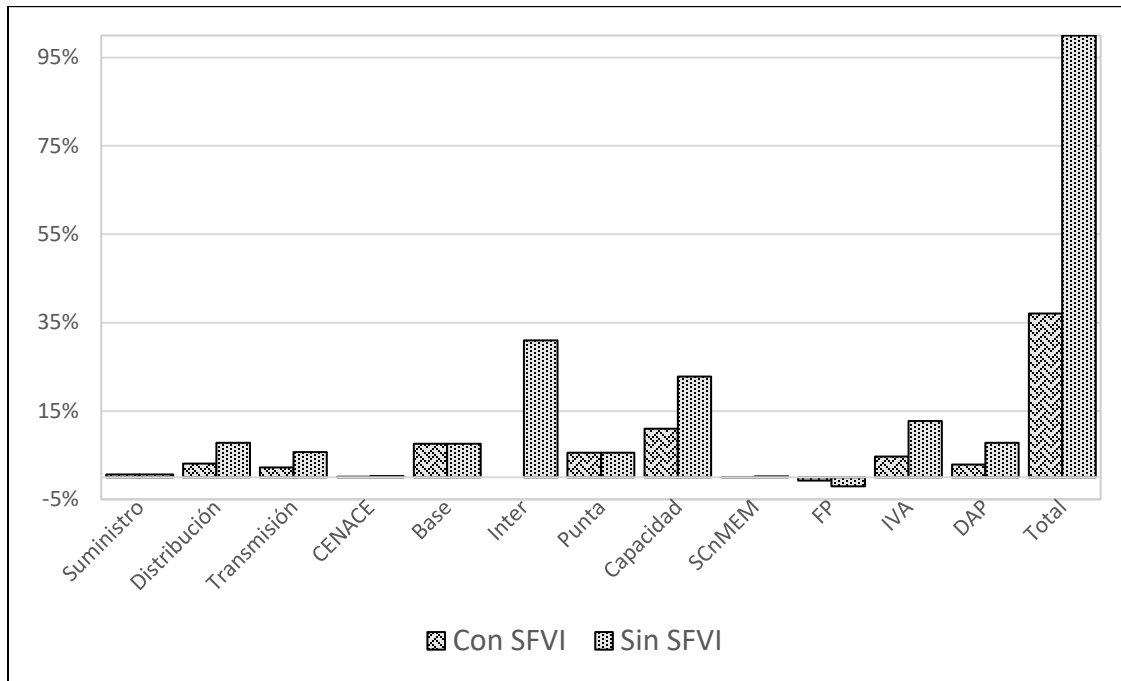


Figura 20. Proyección de impacto al abatir consumo en horario intermedio
Elaboración propia.

Transmisión: En el cargo por transmisión se obtuvo una reducción del 3.4 %, ya que este cargo depende únicamente de la energía consumida en cualquiera de los horarios durante el periodo de facturación.

Capacidad: En el cargo por capacidad se logró una reducción del 10%, esta se determina de acuerdo con la ecuación (7) donde interviene la demanda máxima en punta y el consumo de energía en el periodo. Al reducir la energía queda como valor mínimo el término donde interviene el consumo $Q_{mensual}$.

También existe una reducción en los impuestos ya que dependen de los cargos por consumo y al reducir la energía en automático estos cargos se reducen impactando en el costo total.

Al implementar sistemas fotovoltaicos es necesario asegurar la factibilidad y la calidad de los proyectos, analizar desde una perspectiva financiera se evalúa la competitividad de las energías renovables ya que los principales ingresos provienen de la energía generada. Para la evaluación financiera es necesario realizar una proyección de la generación de la energía que entregará a lo largo de su vida útil, para esto es necesario considerar los aspectos de rendimiento del sistema que varían con respecto al tiempo la degradación y variación de las tarifas en el mercado principalmente.

En la Figura 21 se muestran dos escenarios posibles de recuperación de la inversión:

Escenario 1: Aquí no se considera la reducción en la generación de energía por la degradación de los componentes del sistema ni aumento de tarifa, obteniéndose un retorno de la inversión de 9 años.

Escenario 2: En este escenario se considera el aumento anual de la tarifa (8%) y la degradación de los componentes del sistema siendo la recuperación de la inversión ligeramente mayor a los 7.5 años.

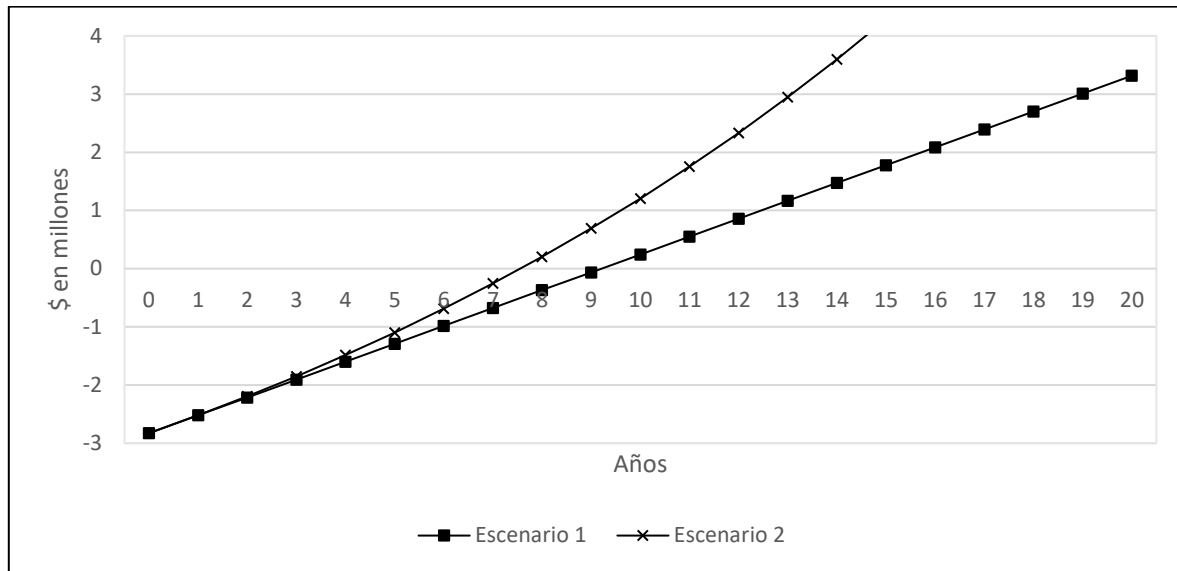


Figura 21. Escenarios de recuperación de la inversión para abatir energía en horario intermedio
Elaboración propia.

El incremento anual de la tarifa eléctrica influye directamente en la recuperación de la inversión; sin embargo, la tendencia de los costos de los combustibles en los años recientes ha permitido el descenso de los costos de la energía por lo que para algunas tarifas eléctricas no se han tenido las mejores condiciones para hacer atractivo la implementación de sistemas FV. Así que el tiempo de recuperación del escenario 2 se puede ver reducido si llegan a incrementarse los precios de la energía, ya que el retorno de la inversión depende únicamente de la energía consumida.

La propuesta de abatir la energía en horario intermedio para usuarios en tarifa GDMTH logra una reducción importante en factura mensual logrando un valor neto 1.17 veces el valor de la inversión inicial, en la Tabla 24 se resume el análisis de costos del sistema fotovoltaico.

Tabla 24. Retorno de la inversión del sistema FV (energía en horario intermedio).

Inversión	Retorno de inversión	Valor presente neto
\$2,927,500.00	9 años	\$ 3,310,050.87

Elaboración propia.

4.3.2 Reducción en horario punta

La propuesta del sistema FV con conexión a la red, aquí presentada, para reducir el consumo de energía en este horario se presenta en la Figura 22, se puede ver que se logra una disminución del cargo en la factura eléctrica en un 37% del total de la factura.

Al analizar los conceptos que intervienen en la factura que son afectados por la inyección de energía en horario punta se puede apreciar que existe una reducción en el cargo de energía en Punta y en Capacidad, sin dejar de mencionar una ligera reducción del 0.5% en Distribución y Transmisión.

Capacidad: Se obtuvo una reducción del 100%, ya que esta se determina de acuerdo con la ecuación (7) donde interviene la demanda máxima en punta y el

consumo de energía en el periodo de facturación, como esta ecuación toma el valor mínimo entre la demanda en punta y el consumo de energía se logra un impacto de reducción del 23%.

También existe una reducción en los cargos en los impuestos ya que dependen de los cargos por consumo y al reducir la energía en automático este cargo se reduce impactando en el costo total.

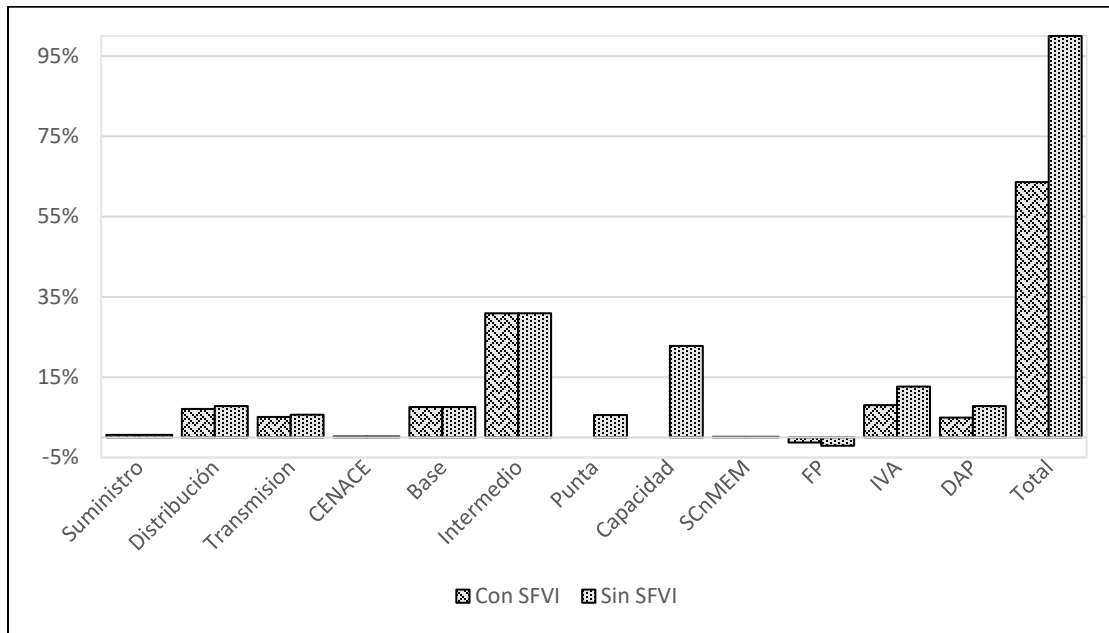


Figura 22. Proyección de impacto al abatir consumo en horario punta
Elaboración propia.

Verificar la factibilidad económica de la propuesta se realiza analizando principalmente la degradación de los materiales y el incremento del costo anual de la energía. Así que el tiempo de recuperación del escenario 2 se puede ver reducido si llegan a incrementarse los precios de la energía y demanda.

La propuesta de abatir la energía y demanda en horario punta para usuarios en tarifa GDMTH logra una reducción del 37% con inversión que se puede recuperar en 4 años como se puede distinguir en la Figura 23, notando que en los dos escenarios planteados no existe diferencia en el tiempo de recuperación.

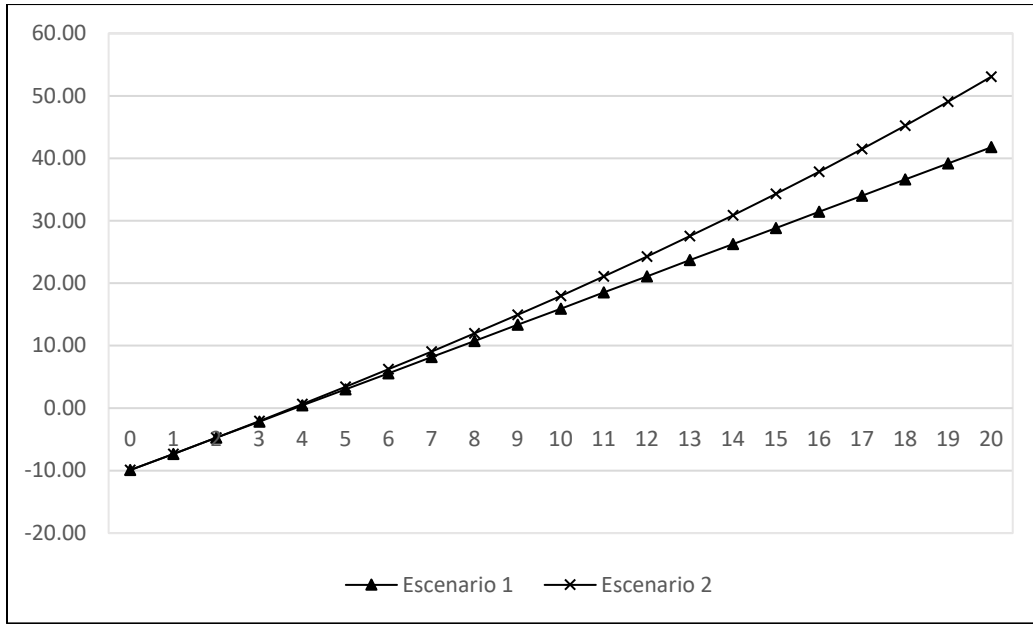


Figura 23. Escenarios de recuperación de la inversión para abatir energía en horario punta
Elaboración propia.

El incremento anual de la tarifa eléctrica influye directamente en la recuperación de la inversión y en este caso también depende de la variación del precio de la demanda.

Con la propuesta de abatir la energía y demanda en horario punta para usuarios en tarifa GDMTH se logra una reducción importante en factura mensual, es importante hacer notar que se puede lograr un valor neto 50 veces el valor de la inversión inicial, en la Tabla 25 se resume el análisis de costos del sistema fotovoltaico.

Tabla 25. Retorno de la inversión del sistema FV (energía y demanda en horario punta).

Inversión	Retorno de inversión	Valor presente neto
\$991,500.00	4 años	\$ 52,000,000.00

Elaboración propia.

Comparando las propuestas y desde el punto de vista económico de las dos opciones de abatir el consumo de energía y demanda se puede ver que es viable el sistema para reducción de horario en punta ya que la recuperación de la inversión se alcanza en los primeros 4 años, lo que hace que el valor presente neto al final de la vida útil del sistema sea mayor para este caso.

Tabla 26. Comparación de la inversión

Sistema FV	Reducción de energía [kWh] mensual	Reducción de demanda [kW] mensual	Reducción en la factura [%]	Inversión [\$]	Valor presente neto [\$]
Intermedio	15,492		63	2,927,500.00	3,310,050.87
Punta	2,283	49	37	991,500.00	52,000,000.00

Elaboración propia.

En la Tabla 26 se presenta a manera de resumen los resultados obtenidos de la metodología de prospección técnica – económica para la instalación de sistemas FV para satisfacer el consumo en horario intermedio y punta; se realiza una comparación de la energía a generar, la demanda a reducir, el porcentaje de reducción en la factura, la inversión y el valor presente neto de la instalación.

En lo que respecta a la reducción de energía en horario punta corresponde al 9% del consumo promedio mensual y la energía en horario intermedio corresponde al 63% de acuerdo con los datos que se presentaron en la Tabla 10. Como se propone sistemas PV para reducir el consumo en cada uno de estos horarios se puede obtener impactos sobre la factura final de 37% al reducir el consumo en punta y de 63% para el consumo en horario intermedio. Entonces se obtiene que al reducir el 9% del consumo de energía en punta tiene un impacto importante en la factura final.

Ahora comparando la inversión requerida para satisfacer los consumos en estos horarios se puede notar que en horario punta se requiere del 34% de inversión respecto a la inversión para el horario intermedio, de esta forma se verifica que al reducir la energía y demanda en horario punta un impacto significativo en la reducción de la factura para usuarios en tarifa GDMTH.

En lo que respecta al valor presente neto el sistema para satisfacer la energía en horario punta tendrá un valor al periodo de la vida útil muy superior al sistema para el horario intermedio, como se puede ver en la Tabla 25.

Al inyectar la energía durante el horario punta se alcanza el objetivo de reducir en un 37% la facturación mensual, el sistema es viable pero también es necesario reducir la demanda no solamente la energía, como se muestra en la Tabla 25.

4.4 CASO DE ESTUDIO: PROTOTIPO DE GENERACIÓN E INYECCIÓN EN HORARIO PUNTA

Para demostrar la funcionalidad de la propuesta de generación fotovoltaica, almacenamiento e inyección de energía de la propuesta: "*Metodología para la inyección de energía y mejora del aprovechamiento energético de sistemas fotovoltaicos interconectados*", se implementó un prototipo que se describe en los apartados 3.3.3 y 3.3.4; a continuación, se presentan los resultados en la reducción de la energía y la demanda en horario punta.

En Figura 24 se muestran las curvas de comportamiento en el consumo de energía en horario punta, las curvas se comparan de forma anual ya que los hábitos de consumo son similares en cada periodo del año. A continuación, se describen cada uno de los casos de análisis:

- Caso "**Anterior**": Se considera el consumo histórico anterior al año de implementación del prototipo.
- Caso "**Transición**": Es el consumo anual del año que se implementó el proyecto y se inició con la inyección de energía a partir del mes de junio.

- Caso "**Posterior**": Es el consumo del año siguiente a la implementación del prototipo.

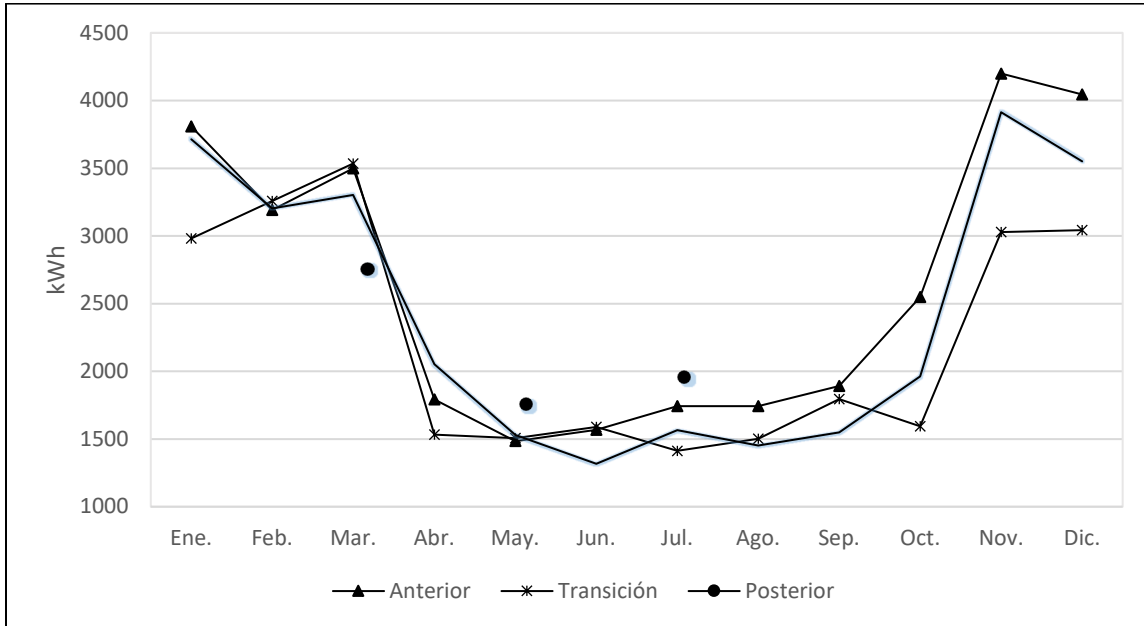


Figura 24. Comportamiento de la energía en horario punta
Elaboración propia.

En la Figura 24 se observa que la curva Anterior y de Transición en los meses de enero a junio se muestra un comportamiento similar con muy poca diferencia, en kWh registrados. A partir del mes de julio estas dos curvas inician a tener una diferencia en su comportamiento, reduciendo la demanda en la curva de transición en un promedio 12 kWh por día.

Comparando ahora la curva de generación en el periodo de Transición con el periodo Posterior, se puede determinar que existe consumo menor a los años anteriores donde no se tenía la implementación del prototipo propuesto. Se puede demostrar que el prototipo inyecta de forma correcta la energía en horario punta ya que se reduce en proporción a la estimación de generación y almacenamiento de la propuesta.

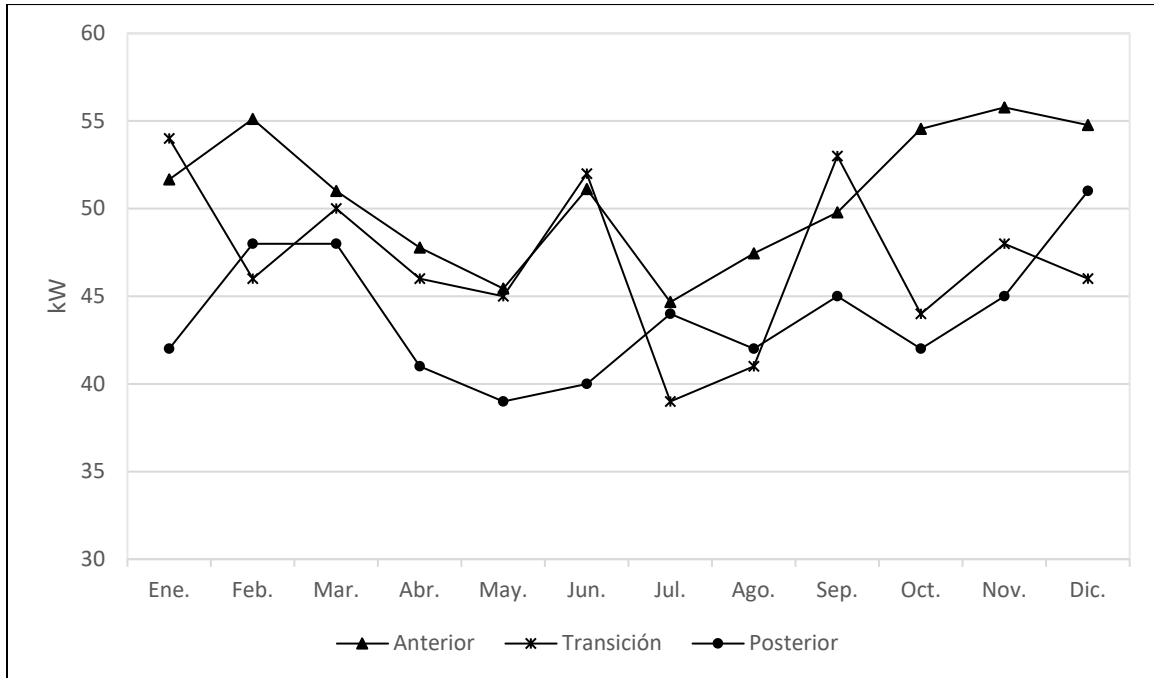


Figura 25. Comportamiento de la demanda en horario punta.
Elaboración propia.

La Demanda máxima para horario punta es el otro rubro de la facturación que se pretende reducir al implementar un sistema de inyección en este horario como se propone en el apartado 3.3.2 y para demostrar que si existe el impacto en la Figura 24 se muestran los resultados el comportamiento de la demanda en este horario para los periodos de antes (Anterior), durante (Transición) y después (Posterior) de la implementación del prototipo.

De la Figura 25 podemos concluir que a partir de la operación del prototipo (mes de julio), existe una reducción en la demanda si se compara la curva Anterior con la de Transición se puede encontrar que la demanda máxima en este horario tiene una reducción promedio de 8 kW. También podemos observar que la curva Posterior mantiene una disminución respecto a la curva Anterior y un comportamiento similar durante todo el periodo a la sección de la curva de transición.

Entonces queda demostrado la funcionalidad de la generación y almacenamiento de energía del prototipo, así como la metodología de inyección de energía de

manera controlada respecto a la hora durante el día; siendo además económicamente rentable implementar este tipo de sistemas para abatir la totalidad de la energía y demanda en este horario.

4.5 MEDICION DE LA INYECCIÓN DE ENERGÍA DE UN SISTEMA FV EN HORARIO PUNTA

La energía que se genera almacena e inyecta a la red por el sistema; se mide utilizando un analizador de redes que se conecta en el centro carga para medir el consumo de energía por la carga. En la Figura 26 se presenta la demanda de energía antes de la instalación del prototipo (Anterior) y después de la instalación y operación del sistema fotovoltaico (Transición); se puede apreciar claramente la disminución de la demanda de energía de la red en el horario punta y se comprueba la correcta operación del sistema propuesto para reducir la demanda de energía de la red en este horario.

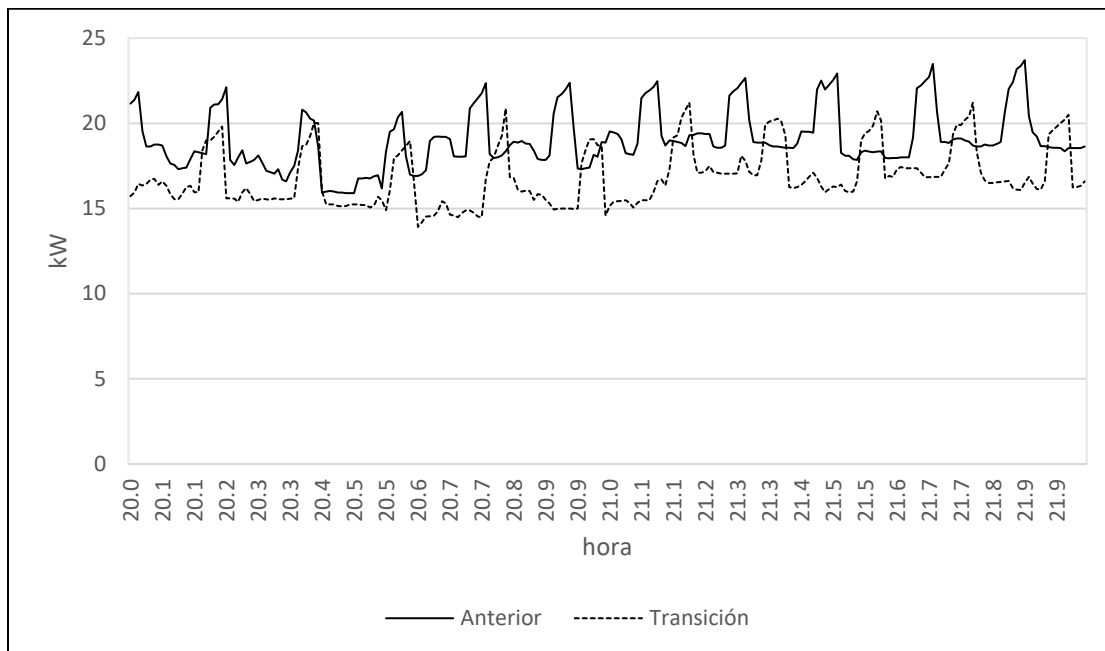


Figura 26. Comportamiento de la demanda de energía en horario punta
Fuente: Elaboración propia.

La reducción de la demanda de energía que se muestra en la Figura 26 para el horario punta coincide con la reducción que se muestra en la Figura 25 que es en promedio de 8 kW. Concluyendo que el sistema fotovoltaico propuesto opera e impacta en la reducción de la energía de forma eficiente.

CONCLUSIONES

En esta investigación se analiza la tarifa en Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH) para reducir la demanda de energía de la red; se propone una metodología de prospección técnica – económica para determinar de acuerdo con un perfil de consumo el sistema fotovoltaico a implementar para el horario de intermedio y de punta. Por último, se verifican los resultados de las estimaciones en la reducción de energía y la factura eléctrica con la implementación de un prototipo para la gestión de la energía en horario punta.

Una vez analizados los resultados de la implementación de sistemas FV para usuarios con tarifa GDMTH y verificando el logro de los objetivos de la investigación se puede decir que se genera la reducción de la factura eléctrica y el retorno de la inversión ocurre en un buen tiempo respecto a la vida útil del sistema.

Se cumplió el objetivo principal del trabajo desarrollar una metodología técnico – económica para reducir el costo de la energía en usuarios con tarifas horarias. Donde se concluye que es factible ya que de forma inmediata se logra una reducción en el consumo y la demanda de energía impactando en el costo de la factura eléctrica mensual en usuarios con tarifas horarias.

Respecto a los objetivos particulares se dimensiona y se implementa un sistema FV conectado a la red con un sistema de monitoreo y control aún básico para la inyección de la energía que en este caso depende de la hora del día; al quedar implementado y operando de manera efectiva se comprueba su funcionalidad con la reducción del consumo de energía y de la demanda máxima en horario punta.

También se desarrolló la metodología de prospección técnico – económica para dimensionar los sistemas PV para abatir la energía durante el horario intermedio y/o punta, donde se considera el perfil de consumo del usuario, la inversión inicial para la implementación, el análisis de los impactos en factura mensual y la factibilidad económica de los sistemas. Se ha encontrado que esta metodología se puede aplicar a tarifas de consumo horarias y aporta información que permite estimar el impacto inmediato en la factura al implementar sistemas PV en usuarios de este

tipo de tarifas; al tener claridad de la inversión y del impacto en la factura abrirá la posibilidad de que se tenga una mayor implementación de estos sistemas para la reducción de la factura en este tipo de usuarios.

Con los resultados obtenidos de las estimaciones que se presentaron para proyectar el consumo de energía en horario intermedio y en punta han demostrado que se puede mejorar el impacto sobre la factura eléctrica en ambos horarios, pero al realizar el análisis de viabilidad económica es mejor alternativa reducir el consumo y la demanda en horario punta ya que con una inversión tres veces mejor se puede reducir el 37% de la factura eléctrica.

Si bien la reducción de la factura al abatir el consumo en horario intermedio es bastante atractiva muestra una desventaja, es posible recuperar la inversión en ocho años y el valor al final de la vida útil es menor que la propuesta para horario punta.

En lo que se refiere a la comprobación de hipótesis en la que se plantea la reducción de los costos de la energía en un 20% se cumple con un amplio margen de tolerancia ya que se proyecta lograr una reducción del 37%.

A manera de resumen; a continuación, se mencionan los desarrollos presentados en esta tesis:

1. Con la propuesta de la metodología técnico – económica para instalaciones fotovoltaicas, se logra obtener un dimensionado donde se considera el perfil de consumo del usuario, los horarios de consumo de energía, la inversión requerida, la proyección económica y la factibilidad; logrando reducir los costos de consumo de energía del usuario.
2. El modelo de gestión de energía para inyección en horario punta busca ser una alternativa con ventajas sobre los sistemas interconectados convencionales que permitirá un aumento en la implementación de sistema FV en usuarios con tarifas con consumo horario.

3. Se implementó el prototipo de generación, almacenamiento e inyección de energía en horario punta y quedó demostrado que se reduce el consumo en este horario.
4. Se demostró que se puede alcanzar una reducción de la factura con la inyección de energía en horario punta.

RECOMENDACIONES

Es necesario continuar con la investigación y desarrollo de sistemas fotovoltaicos interconectados para la gestión de energía considerando cada uno de los esquemas de facturación, como se vio en sistemas fotovoltaicos con consumos horario la propuesta mejora el impacto en la factura por tal razón se recomienda realizar investigación en todos los esquemas tarifarios para determinar la propuesta adecuada a cada uno.

APORTACIÓN DE LA TESIS

La aportación de la presente tesis y la contribución en la generación de conocimiento es la de haber desarrollado y mostrar los resultados de una nueva metodología de prospección técnico – económica para la previsión y la implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados en usuarios con donde la tarifa eléctrica depende de la hora que se consume la energía. Actualmente en la industria implementar sistemas fotovoltaicos interconectados no son una alternativa por la inversión inicial y el tiempo de recuperación; por lo que es necesario que se desarrolle la tecnología y/o metodologías para aprovechar la radiación solar para la generación de energía. En este trabajo se desarrolla una metodología que considera aspectos técnicos y económicos para implementar sistemas fotovoltaicos, se realiza en análisis de la factura eléctrica identificando los consumos de energía en cada uno de los horarios; con esta información se proponen sistemas fotovoltaicos para abatir la energía en horario punta y en horario intermedio, se realiza un análisis económico y de factibilidad identificando que abatir energía en horario punta tiene mejor impacto en la factura eléctrica y en la recuperación de la inversión. Se implemento un prototipo donde se probó esta metodología. Los resultados obtenidos demuestran que con esta metodología es posible dimensionar e implementar sistemas fotovoltaicos que generen un impacto significativo en la factura eléctrica donde el costo de la energía depende del horario de consumo.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

La aportación social de la presente tesis consiste en que se desarrolla un modelo para determinar si es factible la implementación de sistemas fotovoltaicos en usuarios con tarifas eléctricas que dependen de la hora de consumo. Lo anterior posibilita a la industria de nuevas herramientas para la toma de decisiones al momento de implementar esta tecnología para generar su propia energía eléctrica. La generación de energía eléctrica utilizando sistemas fotovoltaicos permitiría reducir el impacto ambiental ocasionado por otros tipos de generación no renovable, así como la reducción de costos en la factura eléctrica, que permita el establecimiento de condiciones para el desarrollo sustentable en la industria.

REFERENCIAS

- A.T. Kearney. (2010). *Unlocking the sunbelt potential of photovoltaics*. European Photovoltaic Industry Association. Brussels - Belgium: EPIA.
- Alizadeh, M., Li, X., Wang, Z., Scaglione, A., & Melton, R. (2012). Demand-side management in the smart grid: Information processing for the power switch. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(5), 55 - 67. doi:10.1109/MSP.2012.2192951
- Antunes, P., Carreira, P., & Mira da Silva, M. (2014, october). Towards an energy management maturity model. *Energy Policy*, 73, 803 - 814. doi:10.1016/j.enpol.2014.06.011
- Aşchilean, L., Cobîrzan, N., Bolboaca, A., Boieru, R., & Felseghi, R.-A. (2021). Pairing solar power to sustainable energy storage solutions within a residential building: A case study. *International Journal of Energy Research*, 45(10), 15495 - 15511. doi:10.1002/er.6982
- Ashok, S., & Banerjee, R. (2001). An optimization mode for industrial load management. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 879 - 884. doi:10.1109/59.962440
- Banerjee, R. (1998). Load management in the Indian power sector using US experience. *Energy*, 23(11), 961 - 972. doi:10.1016/S0360-5442(98)00052-8
- Barzalobre, V., Carrasco, F., Amtmann, M., Rivera, I., & Brailovsky, P. (2012). *Programa de fomento de sistemas fotovoltaicos en México (ProSolar)*. Secretaria de Energía, Distrito Federal.
- Bjork, C., & Karlsson, B. (1985). Load management applications for industrial loads. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(8), 2058-2063. doi:10.1109/TPAS.1985.318781
- BNEF, B. (2019). *Battery pack prices fall as market ramps up with market average at \$156/kWh In 2019*. Shanghai and London: Bloomberg Finance L.P.
- Boonmee, C., Plangklang, B., & Watjanatepin, N. (2009, Febrero). System performance of a three-phase PV-grid-connected system installed in

Thailand: Data monitored analysis. *Renewable Energy*, 34, 384–389. doi:10.1016/j.renene.2008.05.022

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2008, noviembre 28). Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética. *Diario Oficial de la Federación*(DOF: 28/11/2008). México, DF, México.

Centro Nacional de Control de Energía. (2021). *Programa de ampliación y modernización de la red nacional de transmisión y redes generales de distribución del mercado eléctrico mayorista*. Retrieved from https://www.cenace.gob.mx/Docs/10_PLANEACION/ProgramasAyM/Programa%20de%20Ampliacion%20y%20Modernizacion%20de%20la%20RNT%20y%20RGD%202021%20-%2020235.pdf

Chen, H., Ngoc Cong, T., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009, marzo). Progress in electrical energy storage systems: a critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291–312. doi:10.1016/j.pnsc.2008.07.014

Chenlo Romero, F., & Abella, M. (2006). Sistemas fotovoltaicos conectados a red estimación de la energía generada (I). *Era solar Energías renovables*(131), 36-47.

Comisión Federal de Electricidad. (2022). *Conoce tu tarifa*. Retrieved julio 2022, from <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/GranDemandaMTH.aspx>

Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2010, abril 8). Contrato de interconexión para fuente de energía renovable. *Diario Oficial de la Federación*(DOF: 08/04/2010). México, DF, México.

Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2018). Acuerdo A/064/2018. Metodología para determinar el cálculo y ajuste de las tarifas finales de suministro básico.

Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2018). *Tarifas finales del suministro básico*. CRE. Retrieved from

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/409017/5._Tarifas_Finales_del_Suministro_B_sico.pdf

Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2019, 12 16). A/038/2019. Metodología para determinar el cálculo y ajuste de las tarifas finales de suministro básico. Retrieved from <https://drive.cre.gob.mx/Drive/ObtenerAcuerdo/?id=MWRmYzU0NzgtMWI4MCC00MzcyLTc1Mi0zZjgyNTFINjQ0N2E=>

Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2020). Acuerdo de la CRE en el que se determina las tarifas finales del suministro básico. Retrieved from <https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5610650>

Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos. (2012, junio 7). Ley general de cambio climático. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*, DCCV(4), pp. 2 - 29 (segunda sección).

Cruz Silva, O. (2018). *Concentradores dieléctricos con reflexión interna total (DTIRCS) para aplicaciones solares: diseño y análisis de transferencia radiativa*. Retrieved from <https://repositorio.unam.mx/contenidos/63873>

Dale, M. (2013, abril 25). A comparative analysis of energy costs of photovoltaic, solar thermal, and wind electricity generation technologies. *Applied Sciences, Renewable Energy*, 325 - 337. doi:10.3390/app3020325

Di Tommaso, A. O., Genduso, F., & Miceli, R. (2012). Analytical investigation and control system set-up of medium scale PV plants for power flow management. *Energies — Open Access Journal*, 4399 - 4416. doi:10.3390/en5114399

Díaz Santos, R., Gerard, H., Castro Fernández, M., & Herrera Acosta, B. (2012). Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica, su diseño. La Habana.

EA Technology. (2004). *Review of electrical energy storage technologies and systems and of their potential for the UK*. UK: DTI .

- Escobar Mejía, A., Torres, C. A., & Hisaza Hincapie, R. A. (2010, Abril). Conexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica. *Scientia Et Technica*, XVI(44), 31 - 36.
- González, D., & Rojas, A. (2014). Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos autónomos. (6). Retrieved from <http://servicios.fpune.edu.py:83/fpunescientific/index.php/fpunescientific/article/view/89/88>
- González, O., Pavas, A., & Sánchez, S. (2017). Quantification of electrical energy savings in residential customers through demand management strategies. *UIS Ingenierías*, 16(2), 217 - 226. doi:10.18273/revuin.v16n2-2017020
- Guacaneme, J., Velasco, D., & Trujillo, C. (2014). Review of characteristics of energy storage systems for microgrid applications. *Información tecnológica*, 25(2), 175-188. doi:10.4067/S0718-07642014000200020
- Gutiérrez-Villegas, J., Quiroz-Martínez, R., Torres-Nuñez, R., & Mejía-Pérez, G. (2018). Evolución de la normatividad y su impacto en el aumento de los sistemas fotovoltaicos (SFV) instalados en México. *Revista de Operaciones Tecnológicas*, 2(7), 1 - 6.
- Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008, diciembre). Energy storage systems — characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1221–1250. doi:10.1016/j.rser.2007.01.023
- Iliadis, P., Ntomalis, S., Atsonios, K., Nesiadis, A., Nikolopoulos, N., & Panagiotis, G. (2021). Energy management and techno-economic assessment of a predictive battery storage system applying a load levelling operational strategy in island systems. *International Journal of Energy Research*, 45(2), 2709-2727. doi:10.1002/er.5963
- Instituto Mexicano de la Competividad AC. (2006). *Estudio sobre tarifas eléctricas en México. Hacia una estructura tarifaria eficiente que apoye la competitividad de la economía*. México DF: Firmus Consulting.

- IRENA. (2020). *Renewable power generation costs in 2019*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Kelly Kissock, J., & Eger, C. (1998). Measuring industrial energy savings. *Applied Energy*, 85(5), 347-361. doi:10.1016/j.apenergy.2007.06.020
- Li, D., Chui, W., & Sun, H. (2017). Demand side management in microgrid control systems. In M. S. MAHMOUD (Ed.), *Microgrid, advanced control methods and renewable energy system integration* (pp. 203-230). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-101753-1.00007-3
- Lopes Ferreira, H., Garde, R., Fulli, G., Kling, W., & Pecas Lopes, J. (2013). Characterisation of electrical energy storage technologies. *Energy*, 53, 288-298. doi:10.1016/j.energy.2013.02.037
- López Torres, V. G., Alcalá Álvarez, M. C., & Moreno Moreno, L. R. (2012, Enero-Julio). La cadena de suministro de la energía solar. *Conciencia Tecnológica*(43), 18 - 23.
- ManassehObi, & RobertBass. (2016, mayo). Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1082-1094. doi:10.1016/j.rser.2015.12.289
- Mani Paudel, A., & Sarper, H. (2013, April). Economic analysis of a grid-connected commercial photovoltaic system at Colorado State University-Pueblo. *Energy*, 52, 289-296. doi:10.1016/j.energy.2013.01.052
- Mark, M., Lodewijks, P., Ponnette, R., Meinke-Hubeny, F., Valkering, P., Belmans, R., & Poortmans, J. (2018). Managing PV power injection and storage, enabling a larger direct consumption of renewable energy: A case study for the Belgian electricity system. *Progress Photovolt Res*, 27(11), 905-917. doi:10.1002/pip.3084
- Mohamed, A., & Tariq Khan, M. (2009). A review of electrical energy management techniques: Supply and consumer side (industries). (T. E. Town, Ed.) *Journal of Energy in Southern Africa*, 20(3), 14 - 21. doi:10.17159/2413-3051/2009/v20i3a3304

- Muro, C., Saucedo, M. A., De la Torre, J., & Reta, M. (2007, Mayo - Agosto). Análisis de los niveles de radiación solar en el estado de Zacatecas para la implementación de sistemas fotovoltaicos. *Revista Investigación Científica*, 3(2).
- Nasa prediction of worldwide energy resources. (2020, 02 25). (National Aeronautics and Space Administration) Retrieved 04 15, 2020, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Ostadi, B., Moazzami, D., & Rezaie, K. (2007). A non-linear programming model for optimization of the electrical energy consumption in typical factory. *Applied Mathematics and Computation*, 187(2), 944 - 950. doi:10.1016/j.amc.2006.09.138
- Ouédraogo, S., Faggianelli, G., Pigelet, G., Duchaud, J., & Notton, G. (2021). Application of optimal energy management strategies for a building powered by PV/battery system in Corsica Island. *Energies*, 13(17), 1 - 20. doi:10.3390/en13174510
- Outback Power. (2020). *Outback Power Inc.* Retrieved 3 15, 2020, from http://www.outbackpower.com/downloads/catalog/productguide8_catalog.pdf
- OutBack Power Systems. (2020). *Outback Power Inc.* Retrieved 03 25, 2020, from http://www.outbackpower.com/downloads/documents/n_series/FX_series_install.pdf
- Perpiñan Lamigueiro, Ó., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. A. (2012). *Diseño de sistemas fotovoltaicos*. España: Promotora General de Estudios, SA.
- Poder Ejecutivo, Secretaría de Gobernación. (2013, 12 20). Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia energética. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*, pp. 2 - 13.

- Poudineh, R., & Jamasb, T. (2014, april). Distributed generation, storage, demand response and energy efficiency as alternatives to grid capacity enhancement. *Energy Policy*, 67, 222 - 231. doi:10.1016/j.enpol.2013.11.073.
- Prajapat, K.K, Katariya, A, Kumar, A, & Shukla, S. (2011, Oct 9). Simulation and testing of photovoltaic with grid connected system. (C. S. IEEE, Ed.) 692 - 697. doi:10.1109/CICN.2011.150
- R. Wolfe, P. (2018). What is photovoltaics? In *The solar generation: childhood and adolescence of terrestrial photovoltaics* (pp. 9 - 24). Wiley-IEEE Press. doi:10.1002/9781119425618.ch2
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, D., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85, 1580 - 1608. doi:10.1016/j.solener.2010.12.002
- Saldías, H., & Ulloa, H. (2008). *Evaluación comparativa de centrales de generación de energías renovables mediante la aplicación de la nueva ley de energías renovables recientemente aprobada en Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Secretaría de Economía. (n.d.). *Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2018 - 2032*. Retrieved mayo 10, 2021, from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>
- Secretaria de Energía. (2010, abril 8). Resolución RES/054/2010. *Diario Oficial de la Federación*, DCLXXIX(6), pp. 56 - 70 (primera sección).
- Secretaría de Energía. (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones eléctricas (utilización). *Diario Oficial de la Federación*. Retrieved from https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5280607&fecha=29/11/2012
- Secretaria de Energía. (2014, agosto 11). Ley de la industria eléctrica. *Diario Oficial de la Federación (DOF, DCCXXXI)*(8), pp. 44 - 102 (primera sección).

Secretaría de Energía. (2015, diciembre 24). Ley de transición energética. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*, DCCXLVII(20), pp. 25 - 53 (primera sección).

Secretaría de Energía. (2016, 01 26). Acuerdo de carácter general por el que se determina el concepto de demanda. *Diario Oficial de la Federación*(DOF: 26/01/2016).

Secretaría de Energía. (2016, febrero 16). Disposiciones administrativas de carácter general en materia de acceso abierto y prestación de los servicios en la red nacional de transmisión y las redes generales de distribución de energía eléctrica. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*, DCCXLIX(12), pp. 59 - 112 (segunda sección).

Secretaría de Energía. (2016, diciembre 15). Manual de interconexión de centrales de generación con capacidad menor a 0.5 MW. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*, DCCLIX(11), pp. 26 - 52 (segunda sección).

Secretaría de Energía. (2017). Programa especial de la transición energética 2017-2018. *Diario Oficial de la Federación*(DOF: 08/07/2020).

Secretaría de Energía. (2017). *Prospectiva de energías renovables 2017 - 2031*. SENER. Retrieved 08 15, 2021, from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284342/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2017.pdf

Secretaría de Energía. (2018, agosto 6). Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-001-SEDE-2018, Instalaciones Eléctricas (utilización). *Diario Oficial de la Federación*. Retrieved from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5533986&fecha=06/08/2018

Secretaría de Energía. (2020, febrero 7). Acuerdo "Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios". *Diario Oficial de la Federación*(DOF: 07/02/2020), pp. 10-113. Retrieved from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020

Secretaría de Gobernación. (1991). Acuerdo que autoriza el ajuste y reestructuración de la tarifas para suministro y venta de energía eléctrica. *Diario Oficial de la Federación*(DOF:10/11/1991).

Secretaría de Gobernación. (1998). Acuerdo que autoriza el ajuste y modificación de las tarifas para suministro y venta de energía eléctrica. *Diario Oficial de la Federación*(DOF:31/12/1998).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). Aviso: *Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2020*. Registro nacional de emisiones. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/630693/Aviso_FEE_2020.pdf

Sidi Priambodo, P., Sukoco, D., Purnomo, W., Sudibyo, H., & Hartanto, D. (2013). Electric energy management and engineering in solar cell system. In A. Morales-Acevedo, *Solar cells, research and application perspectives*. doi:10.5772/52572

Solartec SA de CV. (n.d.). *Paneles solares. Energía renovable*. Retrieved 03 15, 2020, from <http://i3g.mx/panel/descargas/S36PC.pdf>

Style, O. (2012). *Energía Solar Autónoma: Planificación, dimensionado e instalación de un sistema fotovoltaico autónomo*. (O. Style, Ed.)

Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, & C.V. Nayar. (2006, Nov 10). A grid - connected photovoltaic system with direct coupled power quality control. *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 5203 - 5208. doi:10.1109/IECON.2006.347757

Tejeda Martínez, A., & Gómez-Azpeitia, G. (2015). *Prontuario solar de México*. Enfoque académico.

The World Bank. (2017). *Solar resource data: Solargis*. Retrieved 2018, from <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/mexico>

Trojan Battery Company. (n.d.). *Trojan Battery Company*. Retrieved 25 2, 2020, from https://www.trojanbattery.com/es/product/t-105_plus/

U.S. Department of Energy. (2000). *SunLab*. Retrieved enero 25, 2019, from <https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy97/22835.pdf>

Upasani, M., & Patil, S. (2018). Grid connected solar photovoltaic system with battery storage for energy management. *2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 438 - 443. doi:10.1109/ICISC.2018.8399111

Vazquez, S., M. Lukic, S., Galvan, E., G. Franquelo, L., & Carrasco, J. (2010, diciembre). Energy storage systems for transport and grid applications. *57(12)*, 3881 - 3895. doi:10.1109/TIE.2010.2076414