

Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Estudio económico de las celdas fotovoltaicas para implementarse en generación distribuida

An economic study of photovoltaic cells to be implemented in distributed generation

Luis Manuel Aguayo-Pérez, Dulce Celeste López-Díaz, Julio Armando de Lira-Flores

Para citar este artículo: Aguayo-Pérez Luis Manuel, López-Díaz Dulce Celeste, de Lira-Flores Julio Armando, 2023. Estudio económico de las celdas fotovoltaicas para implementarse en generación distribuida. Ciencia Nicolaita no. 89, 221-236. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.697>



Historial del artículo:

Recibido: 27 de octubre de 2022

Aceptado: 2 de mayo de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: dulce.lopez@uaq.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Estudio económico de las celdas fotovoltaicas para implementarse en generación distribuida

An economic study of photovoltaic cells to be implemented in distributed generation

Luis Manuel Aguayo-Pérez, Dulce Celeste López-Díaz, Julio Armando de Lira-Flores

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química, Cerro de las Campanas s/n Col. Las Campanas, Querétaro, Querétaro, 76010, México

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio económico para la selección de paneles fotovoltaicos, con el objetivo de cubrir una demanda específica de energía en un sector industrial. Para ello, mediante la compilación de datos eléctrico – térmicos de 26 celdas solares de silicio (monocristalinos - policristalinos), y los datos de las variables de entrada para cada tecnología, se determinó el costo de capital fijo, capital variable, de operación – mantenimiento e impacto ambiental para poder seleccionar el panel solar que brinde el mejor costo-beneficio. Se encontró que el panel M3 (policristalino) es el que mayor ahorro genera en un lapso de 25 años (vida útil) y las variables de mayor impacto en el análisis de sensibilidad es el costo del sistema de almacenamiento.

Palabras clave: Energía eléctrica, paneles fotovoltaicos, mejor tecnología, costo-beneficio.

Abstract

This article points out the economic study of the variables with the greatest impact on photovoltaic panels, to cover a specific energy demand in an industrial sector. Through the compilation of electrical - thermal data of 26 silicon solar cells (monocrystalline - polycrystalline), and the data of the input variable; the fixed capital cost, the variable capital cost, the maintenance and operation cost, and environmental impact for each of the systems was determined providing the best cost-benefit based on its variables. It was found that the M3 panel (polycrystalline) is the one that generates the greatest savings in 25 years (useful life) and the variable with the greatest impact in the sensitivity analysis is the cost of the storage system.

Keywords: Electric power, photovoltaic panels, better technology, cost-benefit.



Introducción

La demanda creciente de energía en el mundo, debido al aumento de la población en los últimos 10 años, ha provocado dificultades en la distribución de energía eléctrica (IEA, 2022). Por esta razón, hoy en día se están implementando tecnologías que hacen uso de fuentes renovables para la generación de energía eléctrica; por ejemplo, paneles fotovoltaicos, turbinas hidráulicas y aerogeneradores (Nagpaland *et al.*, 2019). Estas tecnologías, amigables con el medio ambiente, se han propuesto para hacer más eficientes las redes de energía eléctrica disminuyendo las pérdidas por distribución y calor mediante el flujo eléctrico.

Uno de los objetivos de la Reforma Energética en México es que el país aumente el interés por el uso de tecnologías amigables con el medio ambiente, un ejemplo de ello es al utilizar la combinación de fuentes de generación de energía eléctrica convencional y renovable; es decir, mediante la utilización de una red híbrida (Noreña, 2015). Para este fin, en México el uso de tecnologías renovables se ha fomentado a través de apoyos económicos y leyes que promueven la sustentabilidad (González-López y Giampietro 2018).

Los costos involucrados en una red eléctrica se han tratado de reducir a través de varios enfoques como: modelos matemáticos, materiales de construcción, balance de costos de entrada – salida en un periodo de tiempo determinado, redes inteligentes y análisis de sensibilidad de ciertas variables (Salim *et al.*, 2019). Un dato importante a resaltar es que en el 2018 se realizó la estimación a 6 y 12 años del panorama energético a nivel nacional, a medida que el país pueda generar el 35 % de energía eléctrica con tecnologías alternas, reduciendo un 22 % las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI por sus siglas en inglés) en función de la reestructura política que se aplica para la generación distribuida en México (Zinaman *et al.*, 2018).

Dentro de las fuentes de energía renovables, la energía solar destaca entre las más utilizadas mediante el uso de paneles fotovoltaicos. Un panel fotovoltaico de este tipo está formado por un conjunto de celdas o células solares que producen electricidad a partir del efecto fotoeléctrico (capacidad de transfor-

mar la energía solar en eléctrica disponible), su eficiencia depende directamente del material, la cristalinidad y los datos de la zona en la que se instalarán (Paul *et al.*, 2017). La energía obtenida a partir de paneles fotovoltaicos ha despertado mucho el interés por la cantidad de radiación solar disponible, el promedio a nivel nacional es de 6 kW/m² (CRE, 2019). Por esta razón, una alternativa para reducir los costos de una red eléctrica es realizar estudios económicos mediante un análisis de sensibilidad de las variables que mayor impactan en la instalación de un parque fotovoltaico (Cheng *et al.*, 2021). A continuación, se señalan algunos trabajos que han estudiado la utilización de energías renovables, y en particular energía fotovoltaica, para reducir los costos y hacer más eficiente la generación y distribución de energía eléctrica.

Domínguez *et al.* (2012) diseñaron un sistema de distribución de energía eléctrica de forma lineal con diferentes acomodos de los equipos en una red eléctrica. Rezaee (2016) propuso una medida para la distribución de los equipos de una red eléctrica para la distribución, conexión y generación de energía utilizando turbinas eólicas para reducir las pérdidas de energía y el costo global. Adeferati y Bansal (2017) propusieron la regla 2/3, que se aplica en la ubicación eficiente de transformadores, líneas de distribución, generadores de energía y subcentrales, con el objetivo de disminuir la cantidad de material o equipos y, por tanto, los costos de la red eléctrica.

Atwa *et al.* (2014) diseñó una red eléctrica en función de paneles fotovoltaicos aplicando la regla de 2/3 para la ubicación de equipos y así reducir la pérdida de energía en un centro de carga estable de 10 paneles. Suarez (2016) determinó mediante un dimensionado lineal de los paneles fotovoltaicos la posición e inclinación ideal de los sistemas con el objetivo de reducir el costo de kW por pérdida de energía en la conducción por reducir la distancia entre equipos. Haupt *et al.* (2017) presentó uno de los primeros sistemas matemáticos para una red eléctrica con turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos, utilizando el software MATLAB, teniendo como objetivo la optimización del dimensionado de las tecnologías y su ubicación para disminuir los costos operacionales. Theo *et al.* (2017) desarrollaron un proceso complejo de cuantificación

de costos de inversión para paneles fotovoltaicos y aerogeneradores, para reducir el costo de producción de energía.

Grossmann *et al.* (2017) presentaron una estrategia para minimizar la potencia eléctrica distribuida a los alimentadores principales de un sistema fotovoltaico de las subcentrales, transformadores y distribuidores de energía en una red eléctrica inestable. Shivarana y Sathish (2018) realizaron un balance de costos entre una fuente de generación eléctrica convencional y una renovable, para encontrar el dimensionamiento de una red eléctrica que reduce costos de inversión y mantenimiento. Hancevic *et al.* (2018) diseñaron un proceso que mide las condiciones ideales de una red eléctrica en función de sus propiedades eléctricas y térmicas al conectar un sistema de paneles fotovoltaicos aislados. Acha *et al.* (2019) desarrollaron un modelo matemático para determinar las condiciones óptimas de una instalación con paneles fotovoltaicos en relación a sus componentes de carga.

Aun cuando existe un gran número de trabajos en esta temática, no se han realizado estudios referentes a la selección de un panel fotovoltaico considerando el factor del impacto ambiental, el análisis de los costos fijos y variables del sistema de generación de energía eléctrica para su compra, instalación y puesta en marcha, esto para analizar el panel fotovoltaico que conviene adquirir dentro de un conjunto de opciones; es decir, si los dueños o accionistas de una empresa, deciden instalar un parque fotovoltaico, tendrían que contestar la pregunta: ¿qué panel fotovoltaico es conveniente comprar de acuerdo a la región o zona en la que se instalará? La respuesta requiere un análisis de los costos de adquisición y operación y como se ven afectados en función de las variables que modifican la eficiencia de una celda fotovoltaica, con la finalidad de satisfacer una demanda (dimensionado) de energía específica de un parque industrial. En este trabajo se realiza un análisis económico teniendo como objetivo implementar un análisis de sensibilidad con las propiedades de los paneles fotovoltaicos para encontrar el costo beneficio mejor evaluado mediante la selección de la mejor tecnología posible de 26 opciones disponibles de distintos proveedores de paneles fotovoltaicos. Para ello, se utiliza una superestructura de decisión que relaciona las variables de entrada y salida del sistema como punto clave (red eléctrica). Por otro

lado, es de importancia mencionar que la energía generada por los paneles fotovoltaicos estará comprendida en un rango del 25 – 35 % de la demanda total.

Metodología, materiales y métodos

La metodología utilizada se muestra en la Figura 1, la primera parte del trabajo fue seleccionar una zona de estudio, en este caso, se tomó como referencia la ubicación geográfica del Parque Industrial Querétaro (PIQ) para la recopilación y análisis de datos ambientales. Después, se hizo una suposición de la demanda de energía eléctrica. La siguiente etapa consistió en la elaboración de un compendio de las fichas técnicas de los 26 paneles fotovoltaicos de silicio con diferente cristalinidad para la identificación de las variables que influyen en los costos totales. En la etapa posterior, se comparó la generación de emisiones de CO₂ de fuentes de energía convencional y fotovoltaica y se elaboró una superestructura de decisión para visualizar el conjunto de variables presentes.

Los costos que comprenden el problema son:

- Costo capital fijo: indica todos los costos de inversión inicial o que solamente se realizan una vez durante todo el proyecto de instalación del parque fotovoltaico, de aquí se deducen los costos de compra de la unidad, instalación, cableado, permisos ambientales o regulatorios.
- Costo capital variable: están en función del periodo de funcionamiento del sistema, se hacen de manera frecuente y depende de las acciones que se lleven a cabo en tiempos indeterminados como la mano de obra y la obra civil requerida para la implementación del parque fotovoltaico.
- Costo de operación - mantenimiento: se consideran tres tipos, el de asignación que hace referencia al arreglo semanal de las bases de datos, el predictivo siendo la limpieza superficial de los paneles fotovoltaicos cada 8 meses promedio (dependiendo del panel y la zona de estudio) y el correctivo que se emplea promedio cada 3 años, el cual hace referencia al cambio total de una pieza del sistema.

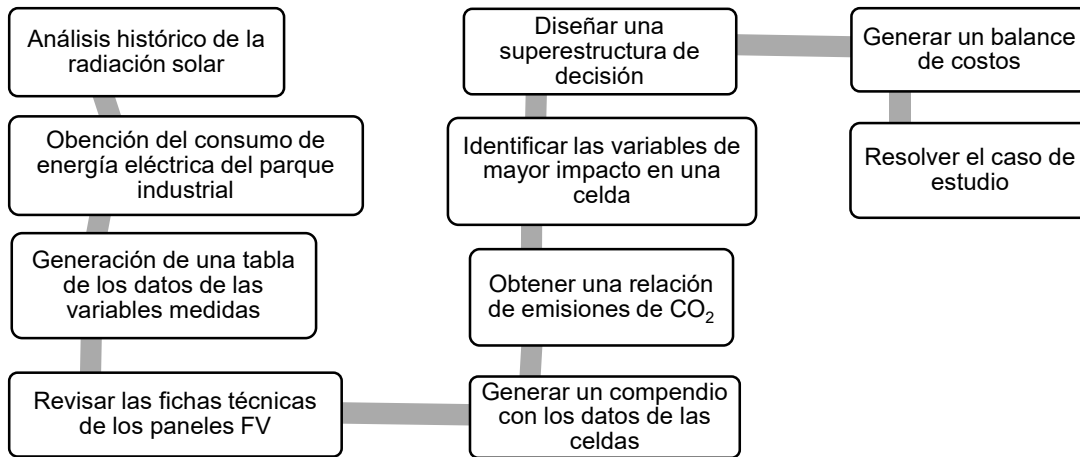


Figura 1. Diagrama de la metodología que se va a emplear para dar solución al problema de maximización de costo – beneficio.

- Costo de remediación ambiental: de forma monetaria se da un valor a las emisiones generadas enfocadas al CO₂ comparando la generación de energía eléctrica con los paneles fotovoltaicos y la red pública.

Obtención de datos de carga

El estudio de las variables ambientales del área de estudio comprende un periodo de cinco años, para reducir el nivel de sesgo. Para ello, se utilizó la base de datos de INEGI para recopilar datos del 2017 – 2022

a)

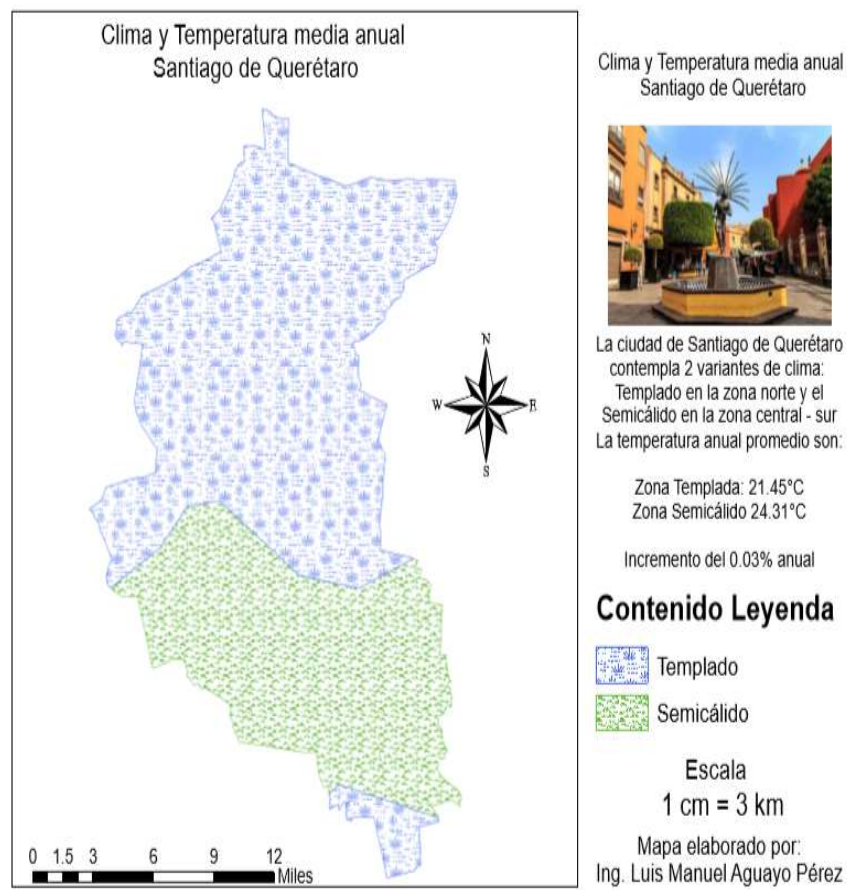


Figura 2. a) Mapa de radiación solar.

b)

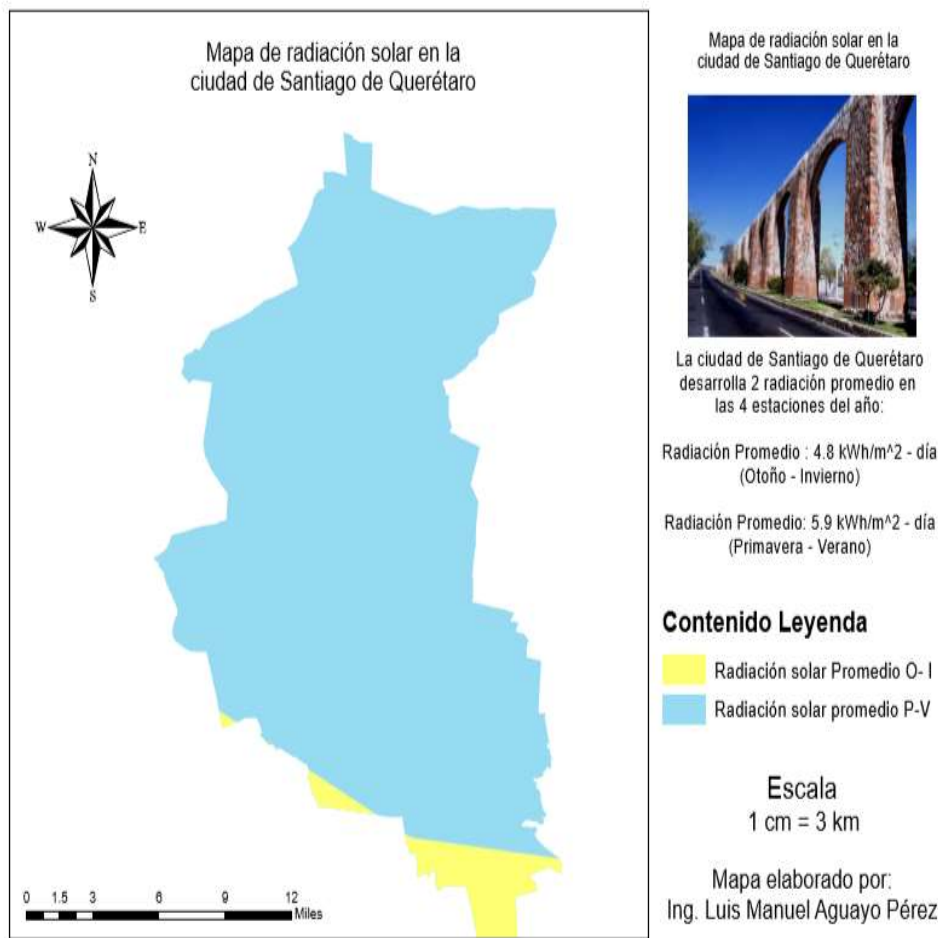


Figura 2. b) Mapa de temperatura de sitio para la zona de estudio del parque industrial.

generando un mapa de oferta de radiación solar disponible. En la Figura 2 se observan dos mapas, uno de radiación solar, a), con un valor promedio de 5.921 kW/m²d con un rango de 6.48 horas sol promedio, (9:00 am – 16:00 pm), con una inclinación fija de 33.545°, cabe resaltar que este ángulo depende directamente de la latitud de la zona de estudio, en la cual se utilizó un ángulo de azimut de 180° y con un promedio de 9.89 meses de luz directa. En la zona, se tiene un valor promedio de 0.25 octas para la nubosidad (¼ de cielo cubierto por nubes). De igual forma, en la Figura 2a se presenta un mapa de temperatura de posición, y Figura 2b, para el área de estudio con el mismo periodo de análisis, obteniendo valores de la base de datos de INEGI – CONABIO, con una temperatura diurna promedio de 29.65 °C, el coeficiente del área con relación a su tipo de vegetación, precipitación y tipo de suelo es de 1.15, bajo condiciones de tipo R dadas por el tipo de relieve.

La demanda de energía eléctrica supuesta de la zona de estudio se determinó considerando un total de 118 industrias, de las cuales 20 son de recurso primario (fabricante de productos), 80 de secundario (subproductos) y solo 18 pertenecen al terciario (caminos, administrativo o zonas verdes). Después, se tomó una muestra representativa de las industrias primarias, con un consumo promedio del 92.4 % del global del parque industrial. En la Tabla 1 se muestran los datos de las 10 industrias seleccionadas en función de su giro industrial, productos que generan y consumo de energía eléctrica diaria. Cabe mencionar que los cuatro giros pertenecen a las industrias Automotriz (Au), Metalúrgica (Me), Textil (Te) y Eléctrica (El); se observa que hay dos industrias que destacan por su alto consumo de energía eléctrica siendo estas la industria eléctrica (electrodomésticos) y la industria automotriz encargada de la elaboración de partes para vehículos de carga mediana con un 68.71 % del global, es decir que fabrican dispositivos de mayor volumen

de uso como refrigeradores, lavadoras, camionetas y grúas ligeras.

El compendio de las propiedades térmicas – eléctricas de los paneles fotovoltaicos de silicio, con diferentes niveles de cristalinidad, se generó tomando en cuenta 26 fichas técnicas de paneles fotovoltaicos otorgadas por diferentes proveedores. Estos paneles tienen una potencia estable de 250 W, con una vida útil promedio de 25 años, y dichas características están relacionadas a condiciones de operación estándar de 25 °C, 1 atm y 21 % de humedad relativa. En la Tabla 2 se muestran las propiedades de estos paneles, adicionalmente se agregaron los valores de los costos de mantenimiento (predictivo – correctivo) y los costos de inversión de compra inicial para cada uno de los sistemas. Es de suma importancia mencionar que se usaron sistemas fotovoltaicos de 250 W debido a que se contaban con las propiedades de entrada reales de los dispositivos como: temperatura nominal de funcionamiento, capacidad nominal, eficiencia bajo condiciones estándar (ideales), y se brindaron de manera directa con los proveedores nacional los datos económicos de producción en función de los costos de capital fija, capital variable, operación – mantenimiento y el factor de generación de gases de efecto invernadero enfocadas al CO₂, con el objetivo de reducir el sesgo de error por el uso de datos no específicos.

Diseño de la superestructura y planteamiento de las ecuaciones

La superestructura ayuda a relacionar las variables en la toma de decisiones de un problema dado. En la Figura 3 se muestra la superestructura utilizada para reducir los costos asociados al uso de paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica renovable. Las variables consideradas incluyen el mantenimiento, la inversión, las emisiones de CO₂, el análisis de variables climáticas y el tipo de tecnología. En la Figura 4 se hace un desglose de los costos fijos y anuales de los paneles fotovoltaicos. A continuación, se detallan las ecuaciones utilizadas para determinar estos costos en función de la demanda energía eléctrica en un porcentaje entre un 25 y 35 % del total.

Costo beneficio

El costo-beneficio es la respuesta que deseamos encontrar mediante un análisis de sensibilidad de los paneles fotovoltaicos de este problema. Esta ecuación toma en cuenta costos fijos y anuales:

$$C_{ben} = \left((C_{prod} + C_{amb}) - C_{man} \right) PVE - C_{inv} \quad (1)$$

Tabla 1

Consumo de energía eléctrica en función del tipo de industria para la zona de estudio y su actividad principal.

Industria	Actividad o producto	Consumo de energía MW/d
A (EI)	Manufactura de herramientas	0.99
B (EI)	Equipos eléctricos complejos	1.773
C (EI)	Electrodomésticos	10.37
D (EI)	Partes de los electrodomésticos	1.49
E (Me)	Bases metálicas	0.98
F (Me)	Cableado de cobre – aluminio	0.59
G (Au)	Vehículos recreativos motorizados	1.47
H (Au)	Vehículos de carga mediana	10.43
I (Au)	Direcciones hidráulicas	2.42
J (Tex)	Pintado de vehículos	0.73

Tabla 2
Compendio de las propiedades económicas, eléctricas y térmicas de 26 paneles fotovoltaicos de silicio (mono-cristalinos y poli-cristalinos).

Características del panel fotovoltaico	Tipo de panel fotovoltaico																									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26
Temperatura nominal de la celda (°C)	45	48	47.5	48	46	47	46	47	46	46	45	45	48	49	47	47	45	48	49	48	48	48	46	43	47	48
Tiempo de vida útil (años)	25	25	25	20	25	25	25	25	23	25	23	25	25	25	25	25	20	25	20	25	25	25	23	25	25	25
Eficiencia de la celda (%)	18.7	19.4	19.9	18.8	19	18.2	19.1	17.6	17.9	18	18.4	18.4	18.6	13.2	12.4	12.8	13.5	12	12.4	12.6	13	12.8	11.4	11.8	11	12.7
Costo de mantenimiento USD/m² año	0.00081 (Se realiza cada 12 meses)													0.00029 (Se realiza cada 12 meses)												
Costo de inversión USD	678	710	771	642	694	713	679	750	732	748	673	652	631	339	305	368	461	331	397	358	424	344	307	401	328	371

Dónde C_{prod} es la diferencia entre los costos de producir un kW mediante una fuente convencional menos el costo de producir la misma energía, con una fuente renovable. C_{amb} es costo ambiental (remediación) y se determina con la diferencia que existe entre la cantidad de emisiones de GEI (CO₂) generadas por

utilizar una fuente convencional de energía y una renovable. C_{ener} es el costo que se genera al instalar los paneles fotovoltaicos a la red en función de la distribución de energía en una distancia determinada, el tipo de conexión que se tiene entre los paneles y la interconexión de celda – celda en el mismo sistema.

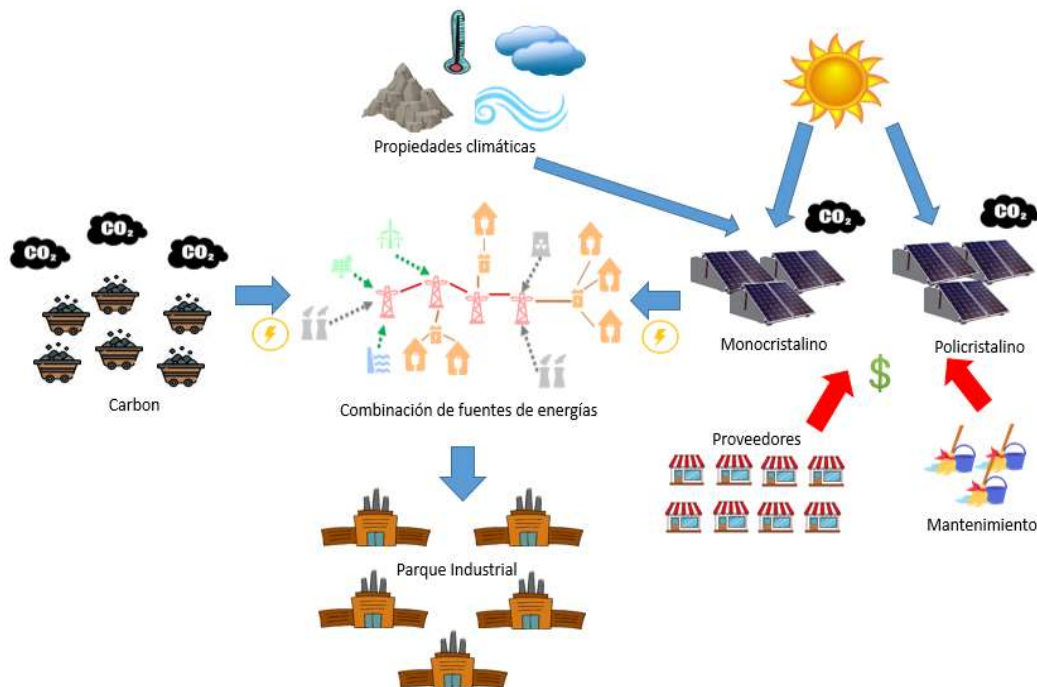


Figura 3. Superestructura de decisión para el problema de maximización del costo beneficio de una red eléctrica con paneles fotovoltaicos.

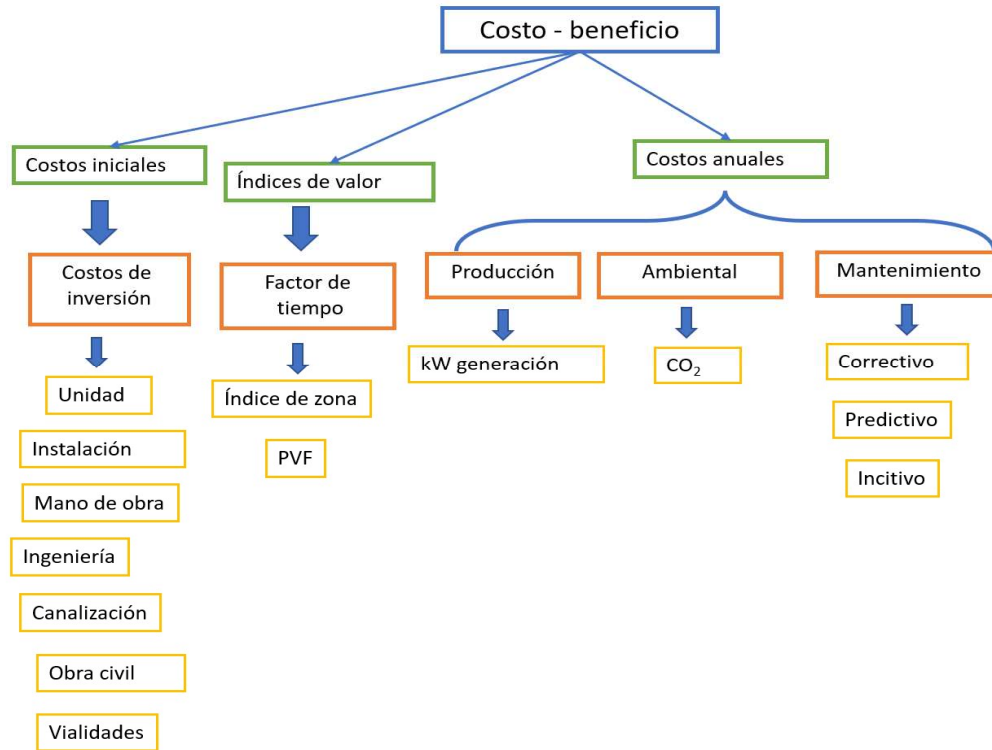


Figura 4. Esquema de las variables de mayor impacto para la aplicación de paneles fotovoltaicos en una zona específica.

C_{zona} es el costo que se produce por el impacto de las variables climáticas – ambientales como: la temperatura y la nubosidad en la eficiencia de transformación de energía directa de un panel fotovoltaico. El C_{man} es el costo de mantenimiento que se le da al panel solar de forma predicativa y correctiva durante un lapso de 25 años y el C_{inv} es el costo de comprar un panel fotovoltaico con ciertas propiedades eléctricas – térmicas, esta se hace con un proveedor de forma directa. PVE es el factor de valor presente, el cual multiplica los costos anuales, con un interés, R , del 0.05 % a un plazo, t , de 25 años con la ecuación (2).

$$PVE = \left(\frac{1 - (1 - R)^t}{R} \right) \quad (2)$$

Costos fijos o de inversión

El costo de inversión inicial o costo capital fijo son los valores que solamente serán adquiridos al inicio del proceso de instalación y verificación del proceso, los cuales incluyen los costos de unidad por panel fotovoltaico, los costos de instalación del equipo, los costos del cableado y los costos de ingeniería, siendo

los que hacen referencia a los permisos de ubicación de un sistema de generación eléctrica con alguna energía alterna. La ecuación 5 y 6 hacen alusión al dimensionamiento de los equipos, ya que es algo que se desea buscar de igual forma en el problema, este factor se señala mediante la ecuación 3 - 6:

$$C_{inv} = C_{inver} \cdot N_p \quad (3)$$

$$CCost = CCost^{PV} + CCost^{BS} \quad (4)$$

$$C_{Cost}^{PV} = \sum_{p=1}^{P=\delta} (\vartheta_p^{PV} \cdot N_p + \xi_p^{PV} \cdot W_p^{PV-cl}) \quad (5)$$

$$C_{Cost}^{BS} = \vartheta^{BS} + \xi^{BS} \cdot E^{BS} \quad (6)$$

Dónde C_{inver} es el costo de cada panel fotovoltaico con su instalación, puesta en marcha y el equipo de forma completa (panel fotovoltaico y batería) ϑ_p^{PV} depende de cada uno de los proveedores y N_p hace

referencia al dimensionado o número de paneles en un espacio determinado, el costo de inversión del panel $CCost^{PV}$ depende de la energía eléctrica generada del factor de costo por kWh ξ_p^{PV} y del dimensionado del sistema, mientras que la batería se relaciona $CCost^{BS}$ con el factor de costo por kWh almacenado ξ^{BS} y distribuido al cliente de forma directa E^{BS} en función de los días de operación ϑ^{BS} .

Costos anuales o dinámicos

Los costos anuales o dinámicos corresponden aquellos que están sujetos a cambios por factores como intereses o impuestos que puedan hacer que exista una modificación en su valor durante un tiempo establecido, para el cálculo de una red eléctrica en función de dos tecnologías es importante conocer la potencia generada de forma activa, para ello en la ecuación 7 se muestra la forma de calcularse:

$$G_{ijm} = V_o \cdot I_o \cdot FF_o \tag{7}$$

Dónde G_{ijm} es la potencia activa generada por un panel fotovoltaico, la cual depende directamente de las propiedades eléctricas que presenta el dispositivo como la corriente inicial I_o , el voltaje inicial al poner en marcha la tecnología V_o y al factor de llenado FF_o cuándo comenzará a construir la curva de potencia I – V. De igual forma, para el dimensionado de un sistema fotovoltaico en función de las propiedades ambientales de una zona en específico se calcula mediante la aplicación de las ecuaciones 8 y 9:

$$N_p = \left(\frac{Factor_p}{\frac{HrsSol}{CoefZona}} \right) \tag{8}$$

$$Factor_p = \left(\left(\frac{Pactiva}{P_{ot}} \right) + \left(\frac{Pactiva}{P_{ot}} \right) \cdot E_f \right) \tag{9}$$

Dónde N_p depende del factor de potencia del panel fotovoltaico $Factor_p$, el cual es una medida de la eficiencia o rendimiento del sistema eléctrico, este indicador mide el aprovechamiento de la energía eléctrica desde el punto de generación hasta el sistema de

consumo, considerando la energía que realmente llega al cliente, de la cantidad de horas de radiación disponible $HrsSol$ y del coeficiente de zona para una zona de estudio en específico $CoefZona$. Mientras que el $Factor_p$ está en función de la potencia activa que se genera en el celda solar $Pactiva$, la potencia nominal o inicial de la celda P_{ot} y la eficiencia real de equipo E_f . En este problema solo nos enfocamos en la selección del panel fotovoltaico en función de las propiedades económicas y ambientales de la zona, lo que no nos lleva a considerar el inversor o alguno otro sistema como auxiliar, dado el caso que estamos hablando de una tecnología intermitente lo que lleva al uso de una sistema de almacenamiento (batería de ácido – plomo), en donde de igual forma se busca su capacidad.

Los costos anuales se dividen en costos de producción, impacto ambiental, propiedades de zona y características eléctricas de un panel fotovoltaico: Costos de producción: es la diferencia que se genera al producir un kW de energía eléctrica con una fuente convencional y con una fuente renovable (celdas solares), se calcula mediante la ecuación 10 (Sánchez *et al.*, 2023):

$$C_{prod} = Demanda_{Co} \cdot 0.042 - Demanda_{Re} \cdot 0.042 \tag{10}$$

Dónde C_{prod} depende de la demanda de energía eléctrica que se cubrirá con una fuente convencional $Demanda_{Co}$, el costo de producción de un MW con esta tecnología 0.042 USD y de la demanda de energía eléctrica generada con los paneles fotovoltaicos $Demanda_{Re}$ y su costo por MW 0.042 USD, se utiliza el mismo margen de precio para evitar un sesgo de error al evaluar el mercado energético.

Costo ambiental: este costo se relaciona con el ahorro que existe entre producir un kW con energía convencional y al incorporar a la red eléctrica una fuente alterna como los paneles fotovoltaicos en función de las emisiones de CO_{2eq} colocando un impuesto al carbono, se calcula mediante la ecuación 11 (Kommalapati *et al.*, 2017):

$$\begin{aligned} Camb = & Demanda_{CO_2} \cdot 983 \text{ gCO}_{2eq}/kWh \\ & - Demanda_{Re} \cdot 275 \text{ gCO}_{2eq}/kW \end{aligned} \quad (11)$$

Dónde $Camb$ está en función de la $Demanda_{CO_2}$ y $Demanda_{Re}$ con sus respectivos precios de remediación para el CO_2 $983 \text{ gCO}_{2eq}/kW$ y $275 \text{ gCO}_{2eq}/kW$ respectivamente.

Costo de mantenimiento: el mantenimiento de los paneles fotovoltaicos $Cman$ se dividen en tres aspectos, el primero se conoce como mantenimiento de asignación (limpieza de software), el cual es considerado como $0.00008 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles monocristalinos y $0.00003 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles policristalinos, el mantenimiento predictivo es aquel que se hace de manera superficial en las celdas para eliminar el polvo o residuos que se puedan generar y que puedan ser factores que disminuyan la eficiencia de conversión, este valor se encuentran en $0.00029 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles monocristalinos y $0.00011 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles policristalinos, el mantenimiento correctivo, el cual es el arreglo parcial de alguna parte esencial del panel fotovoltaico, como el cambio de una celda o una falla en el cableado, es un cambio en la funcionalidad de la generación de energía eléctrica, el valor es de $0.00048 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles monocristalinos y $0.00015 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles policristalinos, el mantenimiento global es la suma de los tres mantenimientos dados por la generación para cada kWh, en función del dimensionado del sistema, se calcula mediante la ecuación 12:

$$Cman = C_{mant} \cdot N_p \quad (12)$$

Análisis de resultados

En esta sección se muestran los resultados al utilizar paneles fotovoltaicos para satisfacer un porcentaje de la demanda supuesta de energía eléctrica del parque industrial seleccionado en la ciudad de Santiago de Querétaro, la demanda global a cubrir es de 31 MW para 10 industrias primarias de producción activa manejando un rango de penetración con la fuente de energía renovable del 25 – 35 %. De esta forma, se determinó el costo beneficio de utilizar cada uno de los paneles en 25 años de vida útil con la información

presentada en la sección 3 de las propiedades ambientales y las fichas técnicas de los paneles fotovoltaicos (características térmicas, eléctricas y de costos).

El valor de la respuesta del costo-beneficio para este caso de estudio corresponde a 89, 879 USD siendo para el panel fotovoltaico monocristalino “M3”, que se seleccionó como la mejor alternativa de la muestra de las 26 opciones. En la Figura 5 se muestran los valores de la solución para una penetración del 25 – 35 %. Al considerar el factor más alto de 35 %, se genera un mayor ahorro en un lapso de tiempo más corto. Existe la posibilidad de seleccionar otro panel fotovoltaico en caso de que el seleccionado no se encuentre por alguna razón o circunstancia ajena, estos valores pueden modificarse si las condiciones del área se alteran o si se aplican en otro lugar, ya que dependen directamente de las variables climáticas; también indica qué paneles sufren cambios notables en su eficiencia de conversión eléctrica.

La red de energía mixta IP, que aplica la celda solar M3 seleccionada, genera una tasa de recuperación simple de 14 años con 7 meses; es decir, en este tiempo se recuperarán los que se invirtieron al 100 %, a partir de este momento, se indica que el ahorro de energía y valor monetario que se tiene en el sistema será una ganancia directa para el Parque Industrial, que se puede utilizar por compañías secundarias con un GDRM (Generación Distribuida Renovable Mixta) a menor capacidad. Por lo tanto, el ahorro anual de la generación distribuida implementada durante la vida útil del sistema FV será de 988, 669 USD, lo que representa un ahorro significativo para el sector industrial. El panel M3 que se seleccionó tiene una baja sensibilidad a la nubosidad y altas temperaturas de posición (12-21 % respectivamente), y su eficiencia de conversión es del 19.9 % (siendo la más alta en el compendio del panel PV).

La Figura 6 muestra el resultado de las variables analizadas dadas por estación del año, teniendo en cuenta la vida útil del sistema de 25 años. El factor de mayor relevancia en la red eléctrica GDRM es la nubosidad, ya que está relacionado con factores de eficiencia de conversión directamente en sistemas como: temperatura, energía suministrada y factor de estabilidad celular. De manera similar, la temperatura del sitio tiene un impacto considerable en la producción de la potencia efectiva real del sistema GDRM y la que tiene el menor impacto es la remediación inclinada al

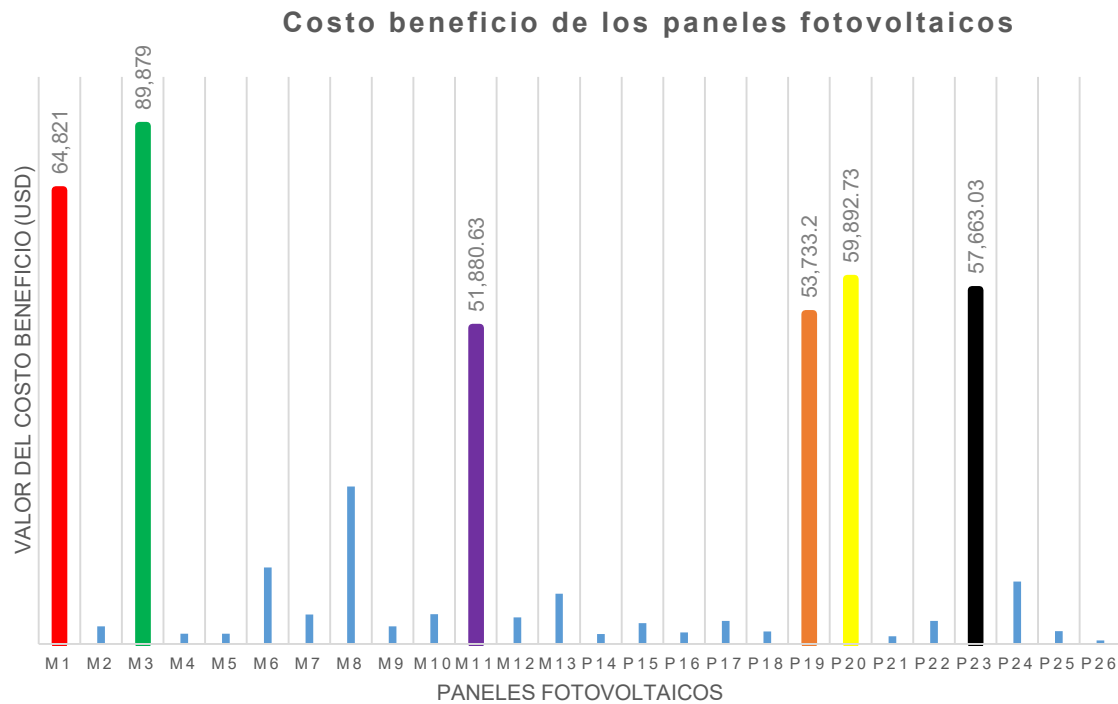


Figura 5. Costo beneficio para los paneles fotovoltaicos.

CO₂, ya que tiene un valor promedio de 320 USD. Sin embargo, dado que tiene una importancia socio ambiental en cooperación con los créditos de carbono, es de suma importancia tener en cuenta. En la temporada de primavera es cuando hay un mayor beneficio de costo para la cantidad de radiación disponible para ser transformada a electricidad, el índice de nubes es bajo y se puede dar una utilización del 100 %. Por otro

lado, en invierno hay un bajo uso de radiación solar para el número promedio de horas efectivas de radiación de 4.23 (reduce la eficiencia general).

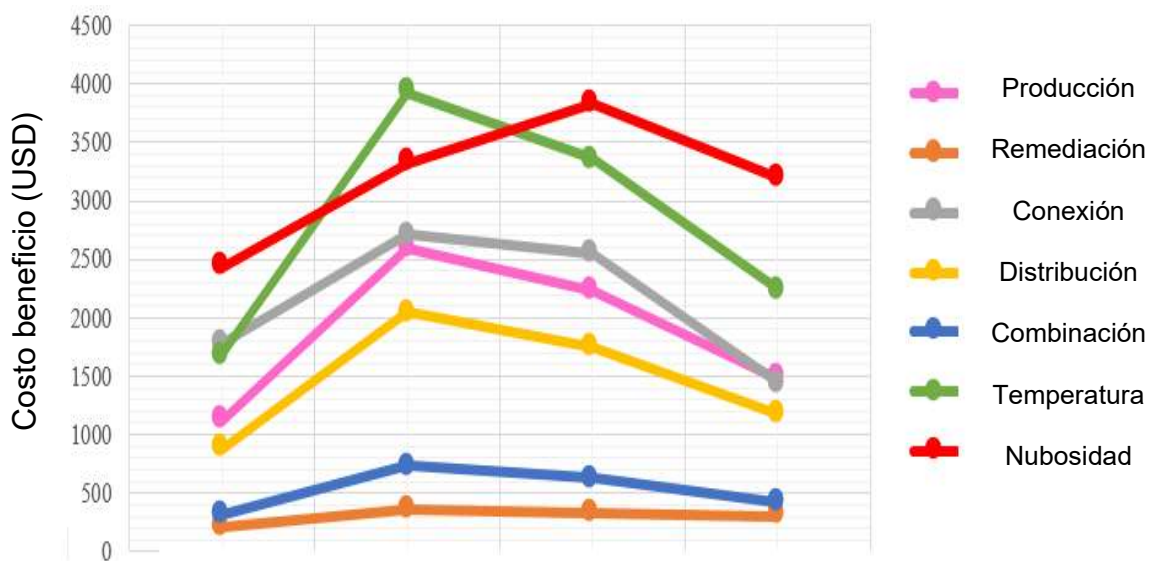
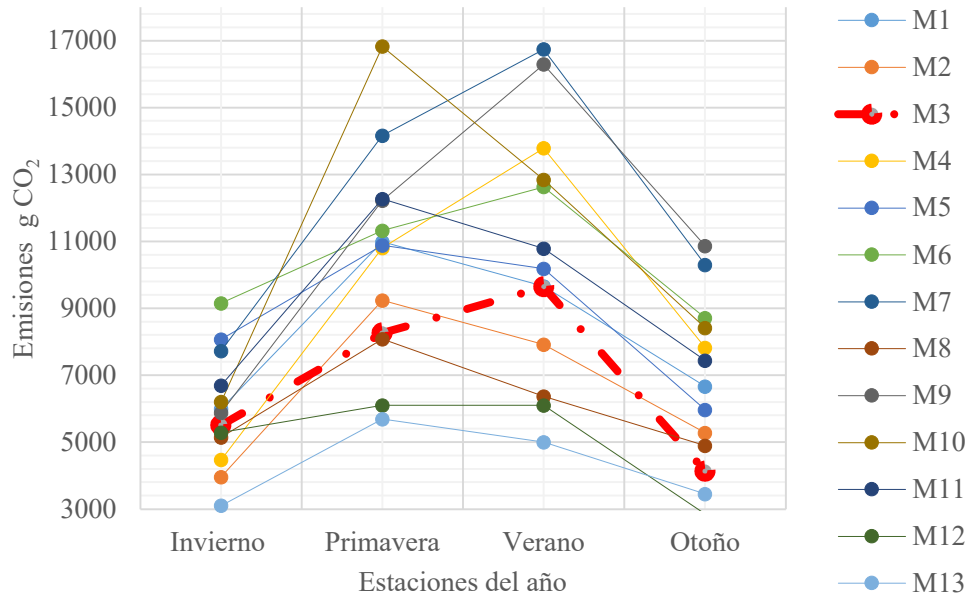


Figura 6. Impacto de las variables en el costo beneficio de una celda fotovoltaica.



Emisiones de CO₂ para los paneles monocristalinos



Emisiones de CO₂ para los paneles policristalinos

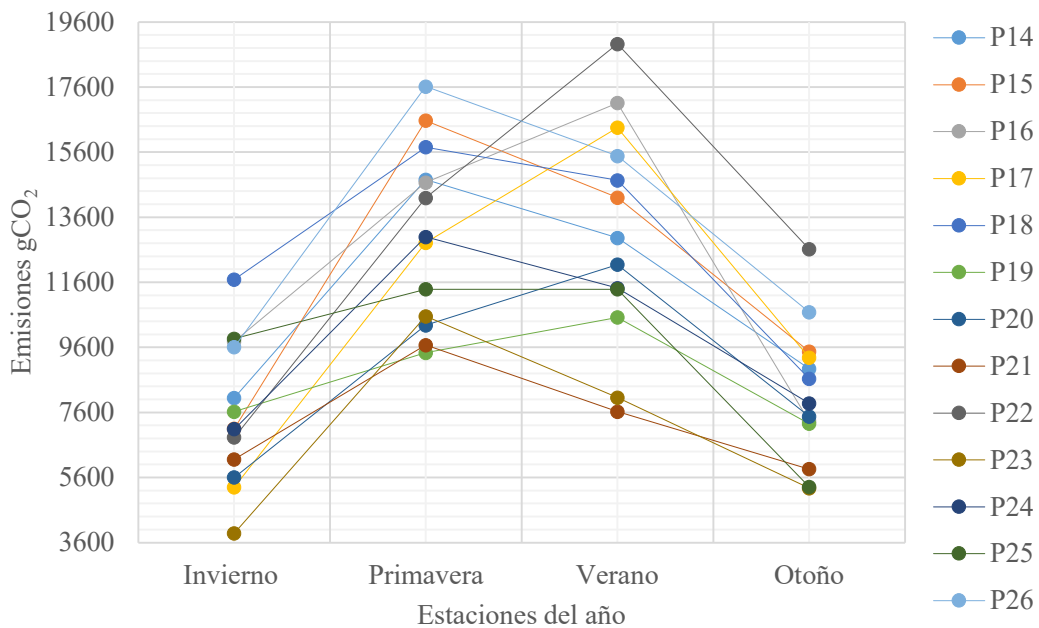


Figura 7. Factor de impacto ambiental para las celdas fotovoltaicas.

El valor del costo beneficio obtenido se debe, de manera porcentual, a la nubosidad 28.6 % y temperatura 21.89 % de la zona, tipo de conexión 16.31 %, producción de energía renovable 12.82 %, de distribución en la red 11.35 %, la combinación de 6.86 % de energías de generación y 2.17 % de remediación o factor ambiental. A la luz de esta información, concluimos

que no siempre el panel con mayor potencia activa será la mejor opción, ya que se deben considerar otros factores que tienen influencia en la producción de energía eléctrica, como los aspectos climáticos ya que modifican la eficiencia de transformación de energía.

La Figura 7 muestra la cantidad de emisiones que no se generaron por el uso de energía fotovoltaica en

combinación con la convencional, en la primera figura Se analizan las emisiones de CO₂ en paneles monocristalinos, destacando que hay un ahorro promedio de 11 toneladas para la vida útil de 25 años de los paneles fotovoltaicos, para el panel M3 (seleccionado) tiene un valor promedio de 8.14 toneladas, es decir, no es el que tiene la mayor cantidad de emisiones, ya que depende directamente del tipo de material, la producción de energía eléctrica y los coeficientes de temperatura.

En la segunda figura, se analizan las emisiones de CO₂ para los paneles fotovoltaicos de material policristalino, donde hay un promedio general de 12.75 toneladas de ahorro de emisiones contaminantes, siendo mayor que para el otro tipo de cristalinidad con un promedio de 12.87 toneladas y el que genera la menor contribución es el invierno con un valor de 7,62 toneladas, si la lógica de seleccionar el panel que ahorra la mayor cantidad de emisiones de CO₂ se guarda durante la vida útil de un sistema eléctrico o si ese fuera el objetivo del proyecto P22, M10 y M7 sería cada vez más seleccionado, ya que el M3 que se obtuvo como resultado es el duodécimo panel de los 26 presentados.

Conclusiones

El área seleccionada como zona de estudio para implementar el balance de costos en celdas fotovoltaicas para cubrir una demanda específica fue el Parque Industrial Querétaro ubicado en la ciudad de Santiago de Querétaro.

Se generó un mapa de disponibilidad de energía solar (radiación) en la zona de estudio con un promedio de 5.91 kW/m², de igual forma se diseñó un mapa de temperatura media con un factor de 29.81 °C promedio día. Se preparó un compendio de las propiedades eléctricas – térmicas de 26 paneles fotovoltaicos de silicio con diferente cristalinidad. Se diseñó una superestructura de decisión que muestra las variables de mayor impacto a la hora de implementar una tecnología fotovoltaica como abastecedor de energía para una zona en específico en combinación con una fuente convencional.

El mejor panel fotovoltaico seleccionado para el estudio de caso es el del material monocristalino llamado M3, que es óptimo, lo que genera un beneficio

de costo de 89,879 USD con un tiempo de recuperación simple de 14 años con 7 meses, el ahorro global del periodo de vida útil del sistema eléctrico es de 988,669 USD. El panel M3 ha generado una reducción de 6,812.5 gCO₂ de emisiones en el año con un costo de remediación global de USD 21,289.96. El panel M3 seleccionado tiene un factor de relleno de 0.824, con una eficiencia del 19.9 %, con un factor de capacidad de 0.159. Cuanto mayor sea el límite de penetración en la red eléctrica, mayor será el costo beneficio, esto depende de las propiedades termoeléctricas de los paneles fotovoltaicos, para este caso el porcentaje de penetración que proporcionó la mejor solución es del 35%.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma de Querétaro, y en especial a la Facultad de Química por darnos la oportunidad de desarrollar el proyecto en sus instalaciones y hacer uso de sus equipos computacionales. En particular, se le agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Secretaría de Energía (SENER), por el apoyo financiero mediante la BECA nacional de posgrado que se dio para llevar a cabo el proyecto durante un periodo de dos años.

Referencias

- Acha, S., Mariaud, A., Shah, M., Markides, C.N., 2018, Optimal design and operation of distributed low-carbon energy technologies in commercial buildings, *Energy*, 142: 578-59. ISSN: 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.066>.
- Ackermann, T., Andersson, G., Söder, L., 2001, Distributed generation: a definition, *Electric Power Systems Research*, 57(3): 195-204. ISSN 0378-7796. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8).
- Adefarati, T., Bansal, R.C., 2017, Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation, *Applied Energy*, 185: 158-171. ISSN: 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.087>.
- Conti, S., Rizzo, S.A., El-Saadany, E.F., Essam, M., Atwa, Y.M., 2014, Reliability assessment of distribution systems considering telecontrolled switches and microgrids, *IEEE Transactions on power systems*, 29(2): 598-607. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2287301>.

- Carpinelli, G., Rizzo, R., Caramia, P., Varilone, P., 2018, Taguchi's method for probabilistic three-phase power flow of unbalanced distribution systems with correlated Wind and Photovoltaic Generation Systems, *Renewable Energy*, 117: 227-241. ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.048>.
- Cheng, Y., Sinha, A., Ghosh, V., Sengupta, T., Luo, H., 2021, Carbon tax and energy innovation at crossroads of carbon neutrality: Designing a sustainable decarbonization policy. *Journal of Environmental Management*, 294: 112957, ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112957>.
- CRE, 2019, "Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética." Comisión de Energías, 1, 12 - 24 para: <http://www.cre.gob.mx/documento/3870.pdf>.
- Domínguez, H., 2012, Diseño de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en el COBAEV 26 XALAPA: Msc Thesis, *Universidad Veracruzana*, 17-32.
- González-López, R., Giampietro, M., 2018, Relational analysis of the oil and gas sector of Mexico: Implications for Mexico's energy reform. *Energy*, 154: 403-414. ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.134>.
- Haupt, S. E., Dettling, S., Williams, J.K., Pearson, J., Jensen, T., Brummet, T., Kosovic, B., Wiener, G., MacCandless, T., Burghardt, C., 2017, Blending distributed photovoltaic and demand load forecasts, *Solar Energy*, 157: 542-551. ISSN 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.049>.
- Hussan, S.M, 2018, Design and implementation of a solar power system in rural Haiti: Msc Thesis, *Massachusetts Institute of Technology*. 14-23.
- IEA, 2022, Unlocking the potential of distributed energy resources – power system opportunities and best practices. techreport, International Energy Agency – Energy Efficiency Division, May 2022. URL https://iea.blob.core.windows.net/assets/3520710cc8284001911cae78b645ce67/UnlockingthePotentialofDERs_Powersystemopportunitiesandbestpractices.pdf.
- Israel, L.M., 2010, La generación de energía eléctrica y el ambiente, *Gaceta Ecológica* 1(6): 02-09.
- Kommalapati, R., Kadiyala, A., Shahriar, M., Huque, Z., 2017, Review of the life cycle greenhouse gas emissions from different photovoltaic and concentrating solar power electricity generation systems. *Energies*, 10(3): 350, ISSN 1996-1073. <https://doi.org/10.3390/en10030350>
- Lara, C.L., Mallapragada, D., Papageorgiou, D., Venkatesh, A., Grossmann, I.E., 2017, Electric power Infrastructure Planning: Mixed-Integer Programming Model and Nested Decomposition Algorithm, *European of Operations Research*, 2: 1-35.
- Machida, S., Hirai, H., Kawamura, T., Yamamoto, Y., Yagi, T., 2008, Structural changes of filled ice Ic structure for hydrogen hydrate under high pressure, *The Journal of Chemical Physics*, 129(22): 224-505. <https://doi.org/10.1063/1.3013440>.
- D. Nagpaland, B. Parajuli, Ferroukhi, R, 2019, Off-grid renewable energy solutions to expand electricity access: An opportunity not to be missed. techreport, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, United Arab Emirates
- Noreña, L. F. G., 2015, Diseño y operación de sistemas de distribución bajo un ambiente de redes inteligentes: Msc Thesis, *Universidad Tecnológica de Pereira*. 34 – 48.
- Arevalo, P.A.A., 2017, Impact of distributed generation and energy storage systems in electrical power distribution systems, *IPL technologies*, 12: 35 – 87.
- Rezaee Jordehi, A., 2016, Allocation of distributed generation units in electric power systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56: 893-905. ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.086>.
- Salim H.K., Stewart R.A., Sahin, O., Dudley M., 2019, Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 211:537–554, 2019. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.229>.
- Sánchez L., Echeverría, D., Wooders, P., Kuehne, K., Lean, T., Beaton C., Shama, S., Oharenko, Y., 2018, Improving and refocusing energy subsidies – options for optimization in Mexico. techreport, CONECC – BMU – SEMARNAT – SENER – International Institute for Sustainable Development – The German-Mexican Energy Partnership.
- Shivarama Krishna, K., Sathish Kumar K., 2018, Generation System Reliability Assessment Incorporating Photovoltaic Energy, *Advances in Power Systems and Energy Management*. 436: 647-654.

- Singh, B., Sharma J., 2017, A review on distributed generation planning, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76: 529-544. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.034>.
- Suarez, D. F. P., 2014, Diseño óptimo de sistemas de distribución: Tesis de Maestría, *Universidad Nacional de Colombia*. 148 – 153.
- Theo, W. L., Lim, J.S., Ho, W.S., Hashim, H., Lee, C.T., 2017, Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67: 531-573. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.063>.