

Cómo citar este artículo:

Cruz Arellano, M. & Castillo Tellez, M. (2021). Planteamiento de un modelo energético descriptivo aplicable a la instalación de sistemas solares fotovoltaicos interconectados a la red mediante generación distribuida: caso de estudio en Nuevo Laredo. *Project, Design and Management*, 3(1), 112-137. doi: 10.29314/pdm.v3i1.587.

**PLANTEAMIENTO DE UN MODELO ENERGÉTICO
DESCRIPTIVO APLICABLE A LA INSTALACIÓN DE SISTEMAS
SOLARES FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS A LA RED
MEDIANTE GENERACIÓN DISTRIBUIDA: CASO DE ESTUDIO
EN NUEVO LAREDO**

Martin Cruz Arellano

Universidad Internacional Iberoamericana (México)

mcruzautnl@outlook.com · <https://orcid.org/0000-0003-0623-5217>

Margarita Castillo Tellez

Universidad Autónoma de Campeche (México)

mcastill@uacam.mx · <https://orcid.org/0000-0001-9639-1736>

Resumen. El consumo de energía a nivel mundial continúa incrementándose debido al aumento demográfico y desarrollo tecnológico, sin embargo, el 73 % de la energía utilizada proviene de fuentes fósiles altamente contaminantes para el planeta y cuyas reservas mundiales se reducen aceleradamente, utilizando únicamente un porcentaje menor de energías limpias o renovables que mitiguen el calentamiento global, el cambio climático y aseguren la sustentabilidad energética mundial. Conscientes de esta problemática nacional y mundial, se propone un modelo energético descriptivo que incluya metodológicamente los pasos a seguir para determinar la viabilidad de instalar sistemas solares fotovoltaicos en cualquier región del mundo, mediante el análisis del recurso energético renovable disponible, de las variables medioambientales y eléctricas y, de los recursos humanos, materiales y financieros. El modelo propuesto se desarrolla y diseña mediante la recopilación, integración y análisis de diversas fuentes y trabajos de investigación relacionados al tema, conjuntado como un sistema integral que muestra gráficamente y describe los bloques de información que deben considerarse. Como un caso particular de estudio el modelo se aplica en Nuevo Laredo, para demostrar que existen las condiciones necesarias para instalar sistemas fotovoltaicos. Se considera la medición de variables in situ mediante instrumentos especiales y las obtenidas de bases de datos o software especial, se analizan y se comparan con normas, especificaciones de fabricantes, regulaciones y parámetros de referencia, lo que permite determinar la viabilidad de la región para instalar sistemas solares fotovoltaicos. Finalmente, la aplicación del modelo requiere elaborar un reporte técnico de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Sistema fotovoltaico, generación distribuida, modelo energético, radiación solar, variables meteorológicas.

PROPOSAL OF A DESCRIPTIVE ENERGY MODEL APPLICABLE TO THE INSTALLATION OF SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS INTERCONNECTED TO THE GRID THROUGH DISTRIBUTED GENERATION: CASE STUDY IN NUEVO LAREDO

Abstract. World energy consumption continues to increase due to population growth and technological development; however, 73 % of the energy used comes from fossil sources highly polluting for the planet, whose world reserves are being rapidly reduced. Using at least a smaller percentage of renewable energy could mitigate global warming and climate change and ensure global energy sustainability. Aware of this national and global problem, a descriptive energy model is proposed that methodologically includes the steps to follow to determine the viability of installing photovoltaic solar systems in any region of the world, through the analysis of the renewable energy resource available, of the environmental and electrical variables and, human, material and financial resources. The proposed model is developed and designed to collect, integrate, and analyze various sources and research work related to the joint subject as a comprehensive system that graphically displays and describes the information blocks to be obtained. As a particular case study, the model is applied in Nuevo Laredo, concluding that the necessary conditions exist to install photovoltaic systems. The measurement of variables in situ using special instruments and those obtained from databases or special software is considered. They are analyzed and compared with standards, manufacturer specifications, regulations, and reference parameters, making it possible to determine the region's viability to install photovoltaic solar systems. Finally, the application of the model requires preparing a technical report of the results obtained.

Keywords: photovoltaic system, distributed generating, energetic model, solar radiation, meteorological variables.

Introducción

Actualmente el consumo energético mundial ha tenido un crecimiento de 13,975 Mtoe, donde el 73 % proviene de fuentes fósiles y el 27 % de energías renovables (ENERDATA, 2020), alcanzando el consumo un incremento mundial de energía del 2.35 % en el año 2018 (World Energy Markets Observatory, 2019) y, en México a inicios del año 2018 solo quedaban 6,464 millones de barriles de petróleo como reservas probadas (Kühne et al., 2019), los cuales alcanzan para 9 años según los consumos actuales. Adicionalmente el aumento en los últimos 10 años del costo de las tarifas eléctricas (Flores Contreras, 2018, p. 32), obliga a buscar alternativas de ahorro de electricidad que reduzcan el consumo y emisiones de CO₂.

Bajo estas condiciones, aunque algunos países de diversas regiones del mundo ya están implementando programas que coadyuven a la sustentabilidad y sostenibilidad energética mediante las energías renovables, aún existe mucha área de oportunidad, particularmente en México por sus altos índices de radiación solar en todo su territorio según datos del Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables en México y del Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2010). Observando valores de irradiación en la mayoría de los estados superior a los 5 kW/m² alcanzando valores máximos de 6.89 kW/m², reflejando la gran cantidad de recurso solar disponible en la mayor parte del año. Esta ventaja competitiva de México motiva a la generación de energía eléctrica mediante la implementación de sistemas solares fotovoltaicos de generación distribuida.

Adicionalmente, en la actualidad se ha alcanzado la “paridad de red”, que significa que los sistemas fotovoltaicos (SFV) son económica y ambientalmente competitivos y superiores a los sistemas de producción de energía convencionales.

El calentamiento global, la contaminación ambiental y la creciente necesidad de energía que demandan las regiones debido al crecimiento demográfico y a su desarrollo tecnológico, obliga a buscar soluciones que aseguren su disponibilidad a precios competitivos. Particularmente el caso de Nuevo Laredo situado en la región de la cuenca de Burgos, donde existen grandes yacimientos de gas y petróleo, que para extraerlo las empresas demandan gran cantidad de energía, lo que motiva al desarrollo de este tipo de estudios. Por esta razón el gobierno de Tamaulipas tiene mucho interés en formar capital humano altamente capacitado para realizar estudios y proyectos energéticos, proveer de energía a las empresas que pudieran instalarse en la ciudad con el objetivo de extraer estos recursos del subsuelo.

Como una respuesta al problema descrito, se plantea el desarrollo de un modelo energético descriptivo que permita determinar la viabilidad para instalar, interconectar a la red y optimizar SFV de generación distribuida en cualquier región del mundo. Logrando esto mediante el análisis de las variables de entrada/salida de SFV con capacidades desde 1 kW y menores a 0.5 MW, identificando los tipos de instalaciones fotovoltaicas (FV), considerando el dimensionamiento de los componentes, materiales y equipos FV, así como los recursos humanos, materiales, financieros y las especificaciones y normatividad aplicable

Actualmente no existe una metodología que englobe y describa en un solo bloque los aspectos más relevantes considerados en el diseño de SFV, aun existiendo información de diversas fuentes como estudios, proyectos, informes técnicos, modelos teóricos, tesis doctorales u otras fuentes en temas afines. La mayoría tratan sobre temas específicos sin una visión global de los factores que intervienen, lo cual posibilita la exclusión de variables o aspectos importantes que deban considerarse, ya que omitirlos ocasionaría un diseño final incompleto afectando la operación del SFV.

La tabla 1 hace mención a trabajos de investigación tomados como referencia y describe los aspectos adicionales que se consideran en el modelo energético propuesto que no son abordados en estos trabajos y, que son relevantes considerar en el diseño y puesta en marcha de SFV interconectados (SFVI) de generación distribuida.

Tabla 1
Comparativo de estudios de referencia y el modelo propuesto en el presente estudio

Modelos y estudios de referencia	Problemática que atienden	Aspectos adicionales que atiende el modelo propuesto
Modelo de planificación energética sostenible usando técnicas de optimización multicriterio (Falcón Roque, 2018).	Planificación energética de una región con energías renovables aplicando técnicas multicriterio y considerando el acceso universal a la energía en comunidades rurales aisladas, tomando en cuenta aspectos económicos, sociales y medioambientales, formulando análisis abstractos mediante funciones objetivo para maximizar el uso de energías renovables sobre las provenientes de recursos fósiles, reducir las emisiones contaminantes, minimizar los costos y sugerir la mejor fuente renovable para cierta región.	El modelo propuesto considera el análisis del recurso renovable y las variables medioambientales locales, cuya valoración determina si es viable o no instalar sistemas de energías renovables en la región. El modelo de planificación energética analiza de manera general diferentes tipos de recursos energéticos renovables de la región enfatizando en aspectos tecnológicos, de aplicación, de planificación y ambientales sin considerar mediciones in situ ni el análisis detallado y comparativo cada variable que afecta la generación de energía según el recurso energético disponible.
El estudio “Energía solar fotovoltaica, competitividad y evaluación económica, comparativa y modelos” (Collado Fernández, 2009).	Analiza de manera general el estado actual de la energía solar fotovoltaica en el mundo: capacidad instalada, demanda, generación, su contribución en la reducción de gases de efecto invernadero, marco regulatorio, costos vs la energía a base del gas, usuarios y el retorno de la inversión.	El modelo propuesto considera además de estos aspectos el análisis detallado de cada variable de la región que afecta la generación del SFV, lo que permite determinar la viabilidad de su implementación.
El estudio “Contribución a la integración de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: recurso solar y producción de generación” (Masa Bote, 2014).	Analiza la predicción de generación de energía eléctrica en la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios en entornos urbanos en comparación con sistemas centralizados, considerando afectaciones por sombras y modelos de predicción meteorológica.	El modelo de referencia se centra principalmente en el análisis de pérdidas por sombras y analiza la radiación, el efecto de la temperatura y la eficiencia del inversor en la generación de electricidad, sin considerar otras variables como la velocidad del viento, la humedad, la precipitación, la normatividad aplicable y demás recursos humanos, materiales y financieros que si son señalados en el modelo propuesto.
El estudio “Análisis de factibilidad para la instalación de un sistema de energía limpia mediante celdas fotovoltaicas para la alimentación eléctrica del edificio 4 en el ITSLV” (Hernández Gallegos, 2017)	Analizar la factibilidad de instalar un sistema de energía limpia mediante celdas fotovoltaicas que provea de electricidad al edificio 4 del Instituto Tecnológico Superior de la Venta, a fin de reducir los costos por concepto de facturación de energía eléctrica, considerando los tipos de tecnologías de celdas fotovoltaicas, consumos energéticos, espacios disponibles y el costo beneficio.	Aunque el estudio de referencia incluye aspectos señalados en el modelo propuesto, no hace referencia al análisis detallado de algunas variables medioambientales que afectan la generación de los SFV como la humedad, la precipitación pluvial y el granizo, sino más bien enfatiza sobre el costo beneficio del SFV en su conjunto. Aunque señala aspectos sobre la velocidad del viento no hace referencia a especificaciones de fabricantes que deben cumplirse que asegure la operación continua del SFV, tal como se indica en el modelo que se propone.

Nota: Fuente: Elaboración propia.

Método

Diseño

El diseño y desarrollo del modelo energético se definió mediante la investigación conceptual, estudios, mediciones y análisis de proyectos FV, integrando toda esta

información en un solo bloque funcional. El modelo relaciona diversos aspectos y variables de entrada/salida que intervienen en la generación de energía eléctrica FV, describiendo la forma en que cada variable afecta el proceso de generación FV, permitiendo reducir las afectaciones y mejorar la eficiencia global del SFV.

La aplicación ordenada y metodológica del modelo permite obtener, graficar, analizar y comparar los valores de las variables de la región bajo estudio, con las normas aplicables y las especificaciones de fabricantes de componentes FV, incluyendo el dimensionamiento de dichos componentes y las regulaciones de interconexión.

La metodología del modelo implica elaborar un reporte técnico con los resultados obtenidos, el cual permite inferir si es factible o no instalar SFV en una región particular, o bien, si es posible optimizar la generación de energía del SFV en caso de estar operando.

Como caso particular el modelo se aplica para demostrar que en Nuevo Laredo, Tamaulipas, México, el recurso solar, los parámetros meteorológicos y demás componentes que incluye el modelo, son los adecuados para instalar SFV de generación distribuida, promoviendo además el uso de energías renovables y mitigando la contaminación ambiental de la ciudad, debido al cruce diario entre México y Estados Unidos de más de 12,930 camiones de carga (Duarte, 2017) que consumen diesel altamente contaminante. Nuevo Laredo se ubica en el margen sur del Río Bravo límite fronterizo entre México y los Estados Unidos de América, con 405,000 habitantes según el censo de 2018. El clima es el más seco y extremo del estado, una temperatura promedio anual de 22,6 °C con grandes oscilaciones que varían desde los 2.5 °C en invierno, hasta los 40.50 °C en verano; su precipitación pluvial media anual es de 472,5 mm y los vientos predominantes provienen del sur.

Para el estudio se consideran dos SFV, uno de 3 kW y otro de 4 kW ubicados en diferentes puntos de la ciudad, ambos SFV usan tecnología policristalina e inversores centrales de las capacidades mencionadas.

Participantes.

El recurso humano integrado por profesores investigadores, estudiantes y mediante el apoyo de algunas dependencias del gobierno para facilitar información y, de particulares propietarios de SFV usados en el estudio. Adicionalmente, las facilidades de la Universidad Tecnológica de Nuevo Laredo para realizar pruebas en los SFV y mediciones con equipos de laboratorio.

Instrumentos.

Las variables definidas en el modelo se recopilan mediante formatos ad hoc y se comprueban con los instrumentos mostrados en la tabla 2:

Tabla 2
Instrumentos para la recopilación de los datos

Equipo	Descripción	Rango de operación
Uso de Tablas ad hoc o de formatos oficiales existentes.	Para la recogida de los datos medidos in situ y, los obtenidos mediante software o de bases de datos.	Aplicable a todas las variables.
Dos SFV usados como muestra.	Con tecnología policristalina, para la toma in situ de variables eléctricas de entrada/salida.	SFV de 3 kW y 4 kW.
Multímetro Fluke.	Para mediciones del voltaje y de la corriente eléctrica.	CAT III, 600V, VCA \pm (1,0 %+3), VDC \pm (0,5 %+2).
Medidor de radiación solar.	Marca Amprobe modelo Solar-100.	Rango: 1999 W/m ² ; precisión de \pm 5-10 W/m ² ; resolución 0.1W/m ² .
Analizador de la calidad de la energía Fluke 434-II (ACE-Fluke 434-II).	Para medir la variable de distorsión armónica, potencia y energía eléctrica generada por los SFV.	Precisiones: Tensión: 0.5 % del voltaje nominal, Corriente: 0.5 %, Potencia: 1 %, Frecuencia: 0.01 Hz).
Estación meteorológica.	Modelo PCE-FWS 20 con acceso remoto de datos desde una PC.	Resolución 0.1 °C (0.2 °F); rango de temperatura -40 °C - +65 °C, rango de la velocidad del viento 0 – 240 km/h (0 ~ 100 mph).

Nota: Fuente: Elaboración propia.

Análisis de los datos

Los datos de cada variable medida in situ son graficados para su análisis comparativo e interpretación, observando tendencias mensuales y anuales, infiriendo el grado de afectación en la generación del SFV y proponiendo acciones de mejora del sistema bajo estudio, el análisis permite:

- a. Observar tendencias, comportamientos, medias, rangos y límites,
- b. Establecer comparaciones con las normas aplicables y especificaciones de los fabricantes para optimizar el SFV,
- c. Sugerir acciones de mejora, proponiendo equipos y materiales que soporten las condiciones climatológicas de la región asegurando un buen funcionamiento durante la vida útil del SFV,
- d. Emitir recomendaciones o rediseñar el SFV para que opere óptimamente.

VARIABLES

Las variables descritas en el modelo son analizadas y graficadas para determinar su impacto en la generación FV, los datos obtenidos con instrumentos de medición y los obtenidos de fuentes oficiales como RetScreen, Meteonorm, CONAGUA u otras fuentes disponibles en internet, son registrados en tablas ad hoc.

Las variables definidas en el modelo son del tipo cuantitativas (Hernández Sampieri et al., 2010), se toman múltiples mediciones en varios momentos, analizándose gráficamente para conocer su impacto y tomar acciones que optimicen la generación FV, como se menciona en estudios relacionados (Caamaño Martín, 1998) y en (García Barrios, 2018). Estudios similares analizan las variables medioambientales y sus efectos en los SFV (Vigil Galán et al., 2018).

VARIABLES DE ENTRADA DEL SFV

Son variables meteorológicas y de irradiación solar disponibles en la región bajo estudio, analizadas durante la etapa de diseño del SFV para conocer su tendencia y, que pueden ser determinantes para instalar SFV en un determinado lugar, refiérase a la tabla 3.

Tabla 3
Variables de entrada del sistema fotovoltaico

<p>a. La irradiación solar (G) medida en kWh/m², variable independiente cuantitativa y continua.</p> <p>Se obtienen mediciones promedio diarias in situ mediante el sistema de monitoreo Apsystem de dos SFV usados como muestra durante los 12 meses del año y, de datos promedio mensual de otras fuentes como RetScreenExpert y Meteonorm V7.1, el promedio determina si la región cuenta con suficiente radiación solar que garantice una generación FV óptima.</p>
<p>b. La temperatura ambiente (T) medida en °C, variable independiente cuantitativa y continua.</p> <p>Se obtienen mediciones promedio diarias in situ durante los 12 meses del año mediante una estación meteorológica, y de la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional de Nuevo Laredo (EMAINL) durante un periodo de 20 años de monitoreo. Se obtiene la media de las mediciones de T, se comparan los valores mínimos, medios y máximos para inferir el grado de afectación en la generación del SFV.</p>
<p>c. La velocidad del viento (VV) medida en km/h, variable cuantitativa continua e independiente.</p> <p>Se obtienen mediciones promedio diarias tomadas in situ durante los 12 meses del año mediante una estación meteorológica, y de la EMANL durante un periodo de 20 años de monitoreo, se obtiene la media de las mediciones de la VV, se comparan los valores mínimos, medios y máximos para sugerir el grado de robustez que deben tener las estructuras de montaje de los módulos FV (MFV) y, la resistencia a cargas de viento que deben soportar los MFV instalados en la región.</p>
<p>d. La humedad relativa (HR) medida en porcentaje, variable independiente.</p> <p>Se obtienen mediciones promedio diarias tomadas in situ durante los 12 meses del año mediante una estación meteorológica, y de datos obtenidos del sistema meteorológico nacional en promedios mensuales, estos se promedian y comparan para conocer su grado de dispersión. Valores altos de HR implican corrosión prematura y mayor afectación por degradación por potencial inducido (PID), ocasionado por la filtración de humedad dentro del encapsulado reduciendo el rendimiento del SFV hasta en un 30 % en el mediano plazo (Sol Energy, 2018). En lugares donde la HR es alta se recomienda utilizar estructuras de aluminio anodizado y MFV aprobados en PID.</p>
<p>e. La presión atmosférica (Pr) medida en hPa, variable cuantitativa continua e independiente.</p> <p>Se obtienen mediciones promedio diarias tomadas in situ durante los 12 meses del año mediante una estación meteorológica y de la EMANL, se comparan los valores promedio para inferir posibles afectaciones del rendimiento del SFV ocasionadas por la humedad. Presiones inferiores a la presión típica del lugar originan tormentas y en consecuencia aumenta la humedad afectando al SFV.</p>
<p>f. La precipitación pluvial (PP), variable medida en mm.</p> <p>Se obtienen mediciones promedio diarias tomadas in situ durante los 12 meses del año mediante una estación meteorológica y de la EMANL, se promedian y comparan gráficamente los datos para conocer los niveles de precipitación que permitan recomendar el tipo de MFV con PID más adecuados, ya que altos índices implican mayor humedad y consecuentemente mayores posibilidades de filtración y corrosión. Sin embargo, también existe una mayor limpieza de manera natural de los MFV reduciendo la frecuencia del mantenimiento debido a la acumulación de polvo u otros residuos.</p>
<p>g. Granizo y nieve (GN), variable independiente medida en número de eventos por año.</p> <p>Su análisis determina la frecuencia de ocurrencia de este fenómeno, lo que permite emplear MFV que cumplan con la norma IEC 61215 ed.2 y evitar daños irreparables.</p>
<p>h. Las horas solares pico (HSP), variable medida en h.</p> <p>La HSP (Pérez Martínez et al., 2017) es una variable obtenida de la irradiación solar de la región dividida entre el valor estándar de prueba de los MFV (STC) equivalente a 1,000 W/m². Multiplicando la capacidad del SFV por las HSP de la región se obtiene la producción diaria de energía eléctrica.</p>

Nota: Fuente: Elaboración propia.

Variables de salida del SFV

Los valores se obtienen cuando el SFV está operando, su análisis permite realizar ajustes para un funcionamiento óptimo, dichas variables se muestran en la tabla 4 indicando sus unidades de medida, el periodo de monitoreo, la fuente de las mediciones y proporcionando una breve explicación sobre la interpretación, el análisis y el uso de los datos.

Tabla 4
Variables de salida del sistema fotovoltaico

<p>a. El voltaje generado medido en Volts (V), corresponde a mediciones diarias tomadas en periodos de 15 minutos durante una semana.</p> <p>Variable medida en el punto común de conexión (PCC) del SFV y la red mediante un multímetro o un ACE-Fluke 434-II. Se verifica que el nivel V_{AC} se encuentre dentro de las especificaciones de distorsión señaladas por la norma para SFV interconectados. El V_{DC} corresponde al voltaje generado medido en las terminales de los MFV.</p>
<p>b. La corriente generada medida en Amperes (A), variable medida diariamente en periodos de 15 minutos durante una semana.</p> <p>Se mide en el PCC del SFV y la red mediante un amperímetro o un ACE-Fluke 434-II. Se verifica que la señal de I_{AC} demandada por las cargas se encuentre dentro de los límites de distorsión armónica permitida por la norma aplicable. La I_{DC} corresponde a la corriente generada medida en las terminales de los MFV.</p>
<p>c. La potencia eléctrica generada (P), medida en Watts (W), corresponde a mediciones diarias tomadas en periodos de 15 minutos durante una semana.</p> <p>Variable medida en el PCC del SFV y la red mediante un ACE-Fluke 434-II. Se verifica que la potencia generada corresponda a la capacidad del SFV.</p>
<p>d. La energía eléctrica generada (EE) medida en kWh, corresponde a mediciones diarias tomadas en periodos de 15 minutos durante una semana.</p> <p>Variable medida en el PCC del SFV y la red mediante un ACE-Fluke 434-II. La energía entregada por el SFV dependerá de las cargas conectadas al circuito, comprobando que el SFV entregue la energía eléctrica según la capacidad de diseño.</p>
<p>e. La distorsión armónica total (THD) medida en porcentaje, corresponde a mediciones diarias tomadas en periodos de 15 minutos durante una semana.</p> <p>Variable medida en el PCC del SFV y la red mediante un ACE-Fluke 434-II, parámetro importante que debe cumplir con las normas aplicables según el país, que para México es la CFE L0000-45.</p>

Nota: Fuente: Elaboración propia.

Resultados

El diseño y desarrollo del modelo energético se constituye mediante una serie de bloques funcionales compuestos por variables de irradiación solar, climatológicas y eléctricas, dimensionamiento de componentes FV, normatividad aplicable, especificaciones de los fabricantes, tipos de usuarios, recursos humanos, materiales, financieros y tecnológicos, todos recopilados de diversas fuentes bibliográficas e integrados en un solo diagrama esquemático de información mostrado en la figura 1.

El modelo desarrollado además de considerar el análisis de las variables de entrada/salida, también incluye el estudio de otros aspectos complementarios como regulaciones gubernamentales para interconexión a red, permitiendo una visión completa de los aspectos inherentes que afectan y/o benefician el desempeño de SFV coincidiendo con el estudio (Masa Bote, 2014) y, complementando con el análisis de variables adicionales como la VV, la HR, la Pr y la PP.

Mediante la aplicación metodológica de cada bloque y analizando la tendencia de las variables que refiere el modelo, se puede inferir si la región bajo análisis ubicada en cualquier parte del mundo reúne las condiciones necesarias y suficientes para instalar

SFVI a la red de generación distribuida. Permitiendo realizar acciones de mejora a los SFV que están operando si los resultados muestran condiciones vulnerables que no se consideraron durante la etapa de diseño del sistema o, por la degradación prematura de sus componentes. Cada bloque podrá desglosarse según el diagrama de flujo de la figura 2 y, podrán utilizarse herramientas de cálculo o software existentes que faciliten el análisis del SFV. Se describe la función de los principales bloques del modelo propuesto en los incisos siguientes.

a. Descripción de bloques del modelo energético descriptivo

La figura 1 muestra todos los bloques que intervienen en el proceso de generación de energía eléctrica solar fotovoltaica, describiendo la función e impacto de cada uno. Es importante señalar que la aplicación correcta del modelo implica considerar el análisis de todos los bloques evitando omitir alguno de ellos, permitiendo obtener un resultado completo que refleje la realidad de las condiciones energéticas de la región y/o del SFV actual, que determinen la factibilidad de instalar nuevos SFV, o bien permitan realizar mejoras a los existentes.

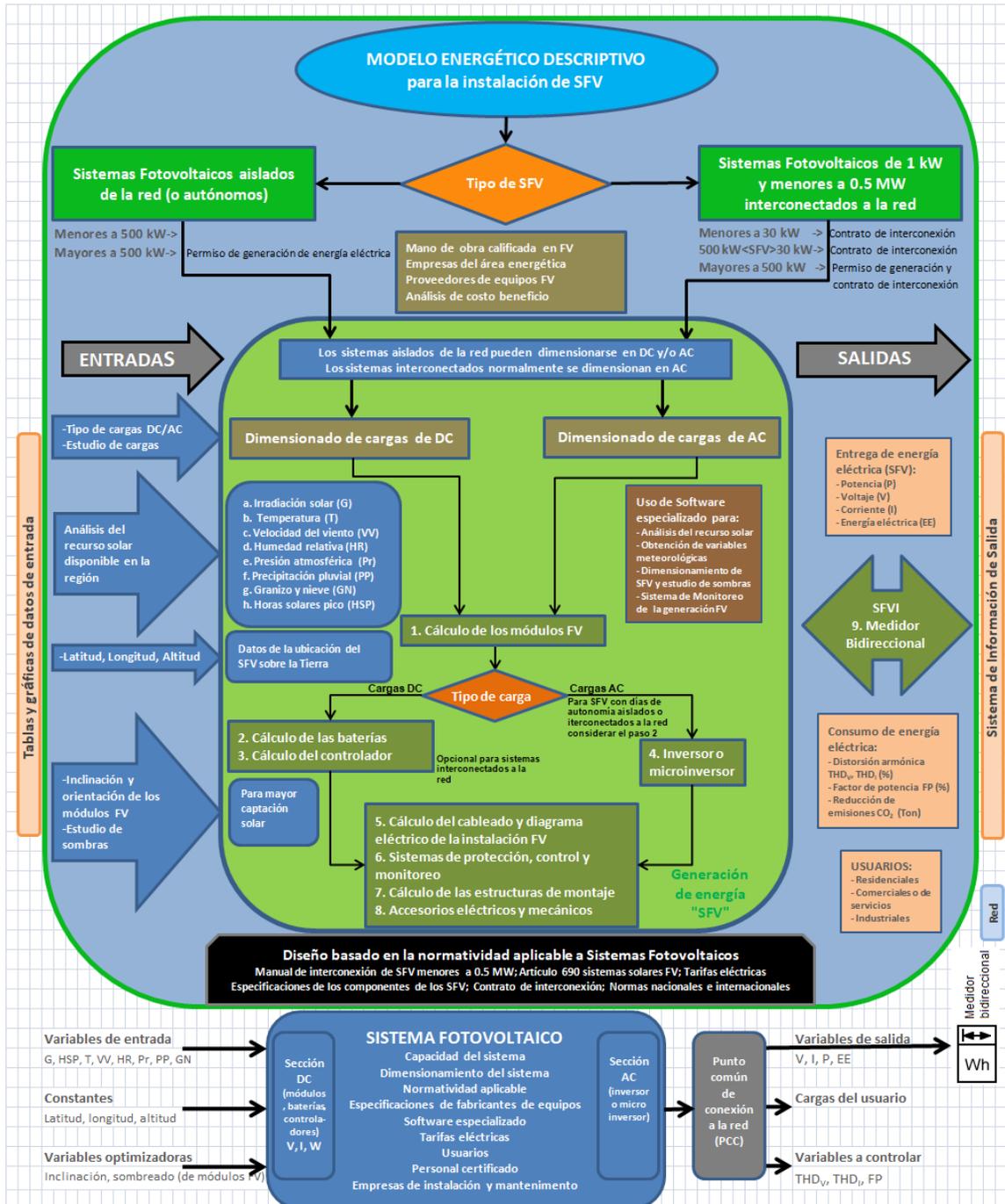


Figura 1. Modelo descriptivo de un sistema energético solar fotovoltaico interconectado a la red.

Nota: Fuente: Elaboración propia.

b. Tipo de sistema fotovoltaico

En todo SFV existen dos características relevantes según su conexión con la instalación que alimentará las cargas del usuario, siendo necesario definir si el sistema será del tipo autónomo o interconectado a la red, ya que según corresponda los componentes y dimensionamiento del SFV serán diferentes.

c. Mano de obra calificada, empresas y proveedores de SFV

La metodología establece la importancia de contar con mano de obra especializada en la instalación de SFV, siendo conveniente revisar la disponibilidad de personal certificado en la región. Asimismo, es relevante la existencia local de empresas de servicios de instalación o proveedores de equipos y materiales FV, que permita obtener un mejor costo beneficio y post servicio durante la operación del SFV y, se facilite la aplicación de las garantías.

d. Uso de software especializado

Aunque el modelo establece la medición de las variables in situ, también se considera usar datos históricos de dichas variables obtenidos de base de datos mediante software de uso libre o con licencia, permitiendo obtener promedios entre estos valores y los medidos in situ, razón por la cual la metodología del modelo hace referencia sobre su uso.

e. Dimensionamiento del SFV en corriente directa y corriente alterna (DC/AC)

El diseño FV en comercio, industria o residencia, debe considerar las cargas alimentadas en DC o AC, ya que si únicamente se alimentarán cargas en DC no se requiere instalar un inversor debido a que pueden conectarse directamente en el circuito de DC. Si el SFV alimentará cargas en AC debe dimensionarse correctamente el inversor. Utilizando algún software o mediante cálculos manuales se dimensionan los componentes del SFV según se enumeran en la figura 1 (módulos, baterías, controlador, inversor, cableado, sistemas de protección, estructuras y accesorios eléctricos y mecánicos).

f. Diseño basado en la normatividad aplicable a SFV

Este bloque destaca la importancia de diseñar SFV de conformidad con las normas aplicables según la región o el país donde se instalarán, incluyendo tanto la normatividad nacional como internacional correspondiente aplicable a los equipos, materiales, al nivel de distorsión permitida de las variables eléctricas, inclusive a las normas de seguridad personal que deben observarse al momento de realizar la instalación del SFV. El considerar todas las normas aplicables asegura confiabilidad y funcionalidad del proyecto, facilitando el registro y la conexión a la red del SFV al cumplir con todos los requisitos requeridos por las dependencias gubernamentales.

g. Datos de la ubicación del SFV sobre la Tierra (latitud, longitud y altitud)

Es importante definir el lugar donde se instalará el SFV, siendo necesario conocer las coordenadas geográficas del lugar definidas por la latitud, longitud y la altitud. Particularmente para Nuevo Laredo se tienen los siguientes valores:

Latitud Norte: 27°29'48'' (27.43°),

Longitud Oeste: 99°30'01'' (-99.56°),

Altitud=138 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Estos tres parámetros son valores constantes usados para ubicar un punto sobre la Tierra, sin embargo, para la elección exacta del lugar de ubicación ya sea a nivel del suelo, en techo o en fachadas, implica considerar otros factores que se describen en el inciso h.

h. Para una mayor captación solar

El modelo sugiere considerar las principales variables que afectan la captación de la radiación solar durante la operación del SFV, siendo algunas de ellas la inclinación de los MFV según la temporada del año y necesidades del usuario y, la orientación hacia el

sur para sistemas ubicados en el hemisferio norte, u orientados hacia el norte para SFV ubicados en el hemisferio sur.

Otra variable que afecta la captación es la proyección de sombras sobre los MFV, siendo necesario realizar un estudio de sombras para analizar posibles afectaciones. Existe software especializado para estimar las pérdidas ocasionadas por el sombreado de los MFV, en caso de no poder evitarlas en su totalidad por obstáculos físicos como edificios o árboles.

i. Tipo de usuarios

Considerando que esta investigación se refiere al estudio de SFV con capacidades menores a 0.5 MW de generación distribuida, es importante distinguir que el mayor mercado de usuarios para la instalación de SFV proviene de usuarios residenciales y de pequeños o medianos comercios. Por esta razón, los programas de apoyo gubernamentales de fomento a las energías renovables deben focalizarse según el tipo de usuarios al que vayan dirigidos.

j. Análisis del recurso solar y variables meteorológicas

Este bloque relevante del modelo incluye la recopilación de datos y el análisis de cada variable de la región bajo estudio según se indica en el diagrama de flujo de la figura 2, particularmente ejemplificado para Nuevo Laredo.

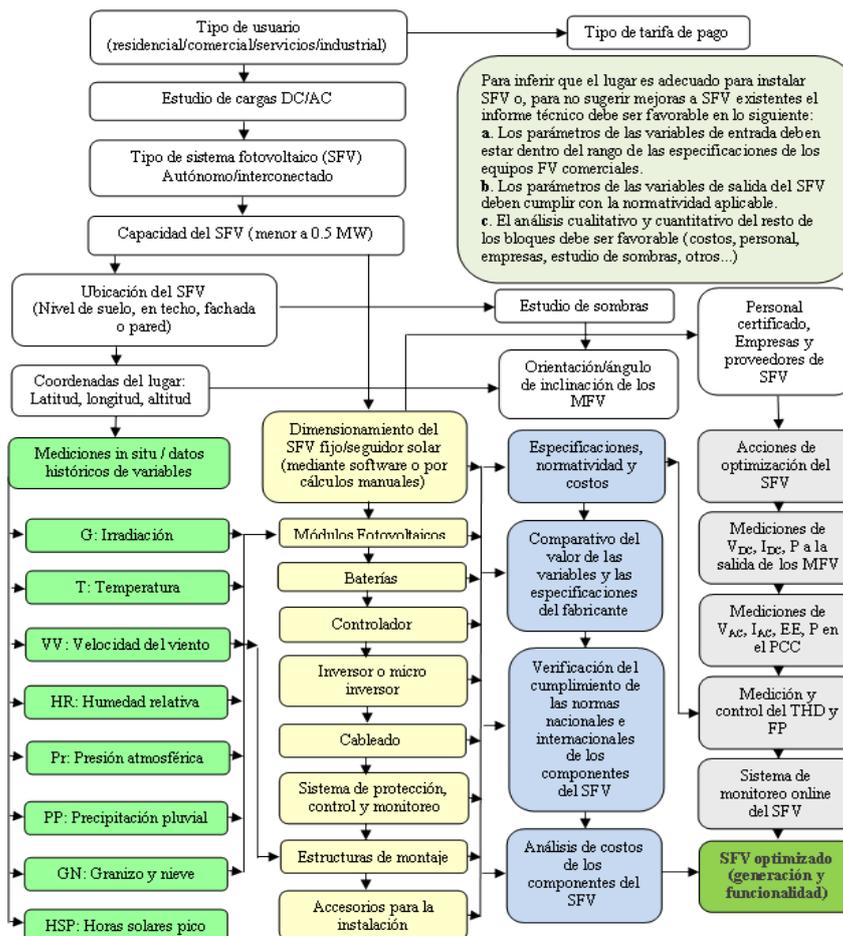


Figura 2. Diagrama de flujo de un sistema energético FV interconectado a la red

Nota: Fuente: Elaboración propia.

j1: La Irradiación solar (G)

La obtención de esta variable según la metodología descrita en secciones previas, demuestra que Nuevo Laredo cuenta con una irradiación promedio de 4.81 kWh/m² durante el año, superando este valor en los meses de mayo a agosto con valores de hasta 5.19 kWh/m² según (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2010).

La figura 3 muestra los valores de irradiación solar medidos in situ y los obtenidos mediante el software RETScreen y Meteonorm en promedios mensuales, observándose un rango de los datos de 0.70 kWh/m² durante los 12 meses del año. En la figura 3 se observa la congruencia de los datos de las fuentes referidas mismos que pueden utilizarse para el cálculo de producción del SFV, reafirmando el gran potencial de radiación global, difusa, y albedo de la región (De Juana Sardón et al., 2009).

La figura 3 también muestra lecturas de radiación solar tomadas in situ durante los 12 meses del año bajo condiciones de cielo despejado a ligeramente nublado, usando el medidor Amprobe Solar-100. Observándose valores promedio de 940 W/m² y 1,163 W/m² medidos a 27° y perpendicular al sol respectivamente, superior al parámetro STC (condiciones estándares de prueba) de 1,000 W/m² usado por los fabricantes para probar la eficiencia de los MFV y, un NOCT (temperatura de operación nominal de la celda) de 800 W/m² (Messenger y Ventre, 2005).

En regiones de alta radiación solar pueden usarse celdas con tecnologías de rendimiento medio y de costo accesible (Vigil Galán et al., 2018), manteniéndose aún niveles altos de generación motivando la inversión local de proyectos FV, al instalar SFV de buen rendimiento y menor costo. Las tecnologías FV con rendimientos altos son más costosas y se recomiendan en lugares con niveles bajos de irradiación solar.

Para instalar SFV autónomos se requiere una radiación solar promedio de 3 kW/m²/día a 4 kW/m²/día y, para SFV interconectados a la red una radiación solar superior a los 4 kW/m²/día (Vanegas Chamorro et al., 2015), condición que se cumple para Nuevo Laredo.

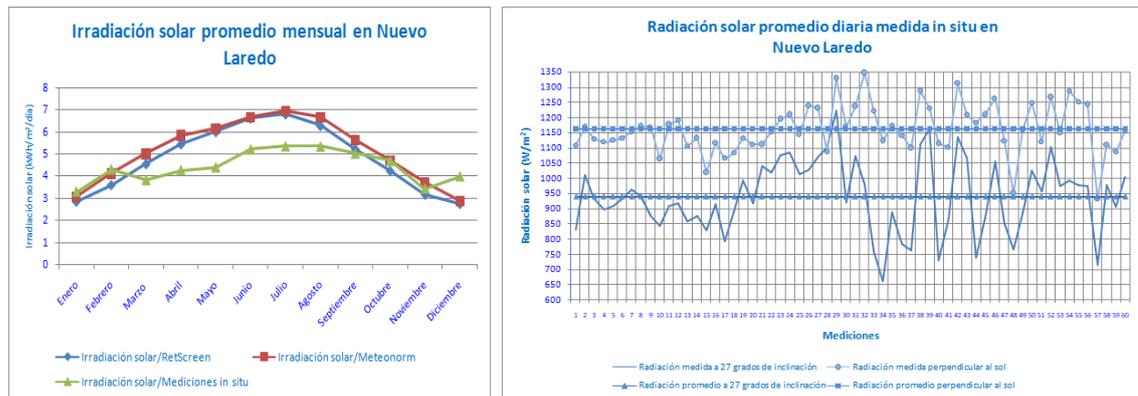


Figura 3. Medición de irradiación y radiación solar

Nota: Fuente: Elaboración propia con datos del software RetScreen, Meteonorm y mediciones in situ.

j2: La Temperatura (T)

La obtención de esta variable según la metodología descrita previamente se muestra gráficamente en la figura 4, alcanzando temperaturas promedio máximas de 40.50 °C en los meses más calurosos y de 2.5 °C en los meses más fríos, causando posibles afectaciones en la generación FV si la selección de los componentes FV no es la adecuada, debido que a temperaturas de operación superiores a 25 °C se generan pérdidas apreciables en el rendimiento de las celdas (Mazón Hernández, 2014).

La temperatura real de operación de un MFV normalmente alcanza entre 15 °C y 20 °C arriba de la temperatura ambiente (Pérez Regalado, 2010), existiendo la necesidad de usar MFV con coeficientes térmicos altos que soporten el nivel de temperatura de la región. Altas temperaturas reducen el voltaje y la potencia generada y, a temperaturas de cero o bajo 0 °C el voltaje generado se incrementa según un factor especificado en el artículo 690.7 de la National Electric Code hasta en un 20 %, pudiendo afectar la operación del inversor y causar fallas de todo el SFV. Existe una amplia gama de MFV e inversores comerciales con coeficientes de temperatura lo suficientemente amplios para usarse en cada región y afectar en menor grado el rendimiento del SFV.

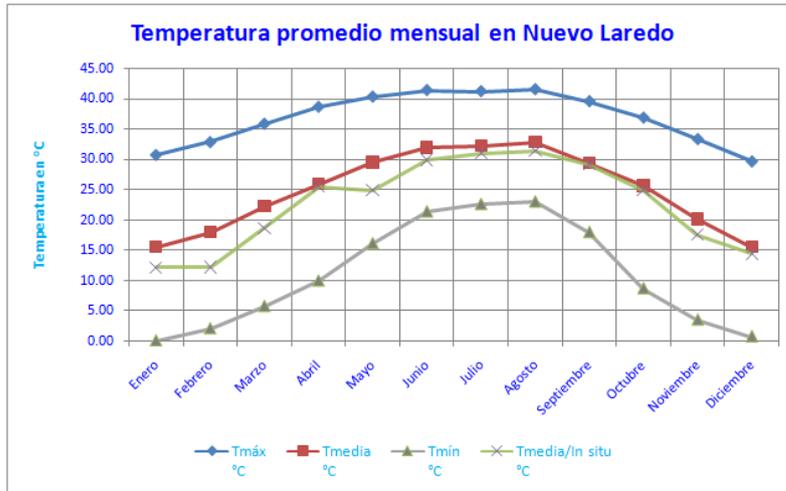


Figura 4. Tendencia mensual de la temperatura.

Nota: Fuente: Elaboración propia con datos de la EMANL y mediciones in situ.

La figura 5 muestra que el 47 % de 42 fabricantes de MFV analizados presentan un coeficiente de temperatura en potencia ($P_{máx}$) superior al 0.4 %/°C, significando que por cada grado centígrado superior a los 25 °C en la temperatura de trabajo de la celda, se pierde un 0.4 % de la potencia nominal generada por cada celda del MFV.

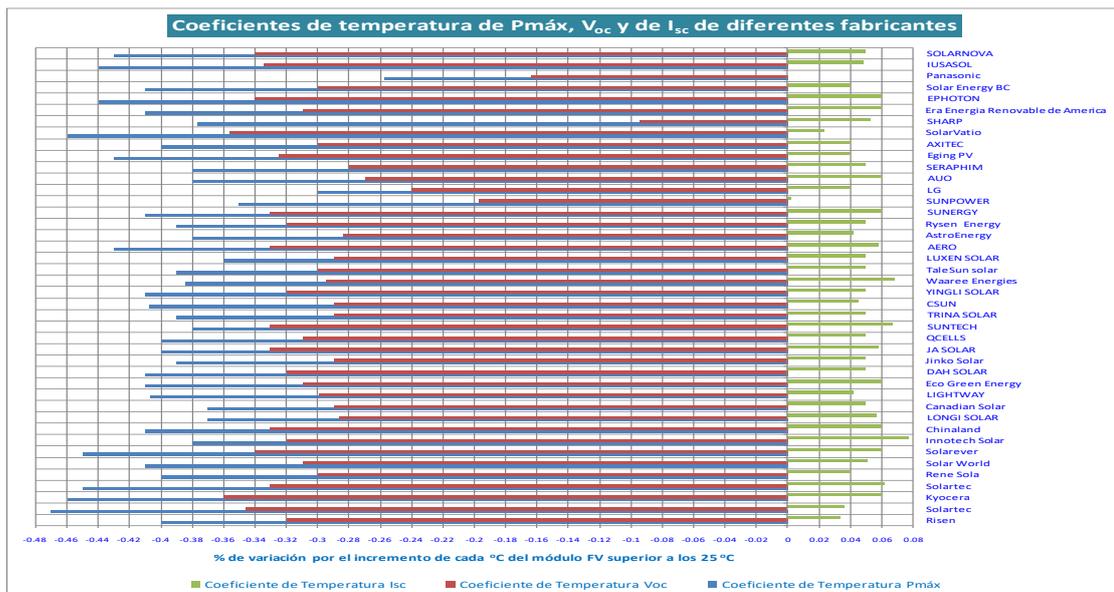


Figura 5. Coeficientes de temperatura de MFV (I_{sc} : corriente de corto circuito; V_{oc} : voltaje de circuito abierto)

Nota: Fuente: Elaboración propia con datos de fichas técnicas del fabricante.

Se recomienda usar módulos con coeficientes de temperatura en potencia bajos, evitando aquellos con coeficientes más altos ya que presentan mayores pérdidas reduciendo la potencia. Por esta razón, se sugiere que en Nuevo Laredo se empleen módulos con coeficientes de temperatura de $-0.4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ o menores, garantizando mejores rendimientos. La temperatura nominal de operación de los MFV también afecta su rendimiento, la figura 6 muestra que el 78 % de los MFV de los 42 fabricantes mencionados soportan temperaturas de operación de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$, el 5 % de -40°C a $+80^{\circ}\text{C}$ y, un 17 % soportan rangos de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$.

Conforme al análisis de temperatura expuesto se observa que los MFV de los 42 fabricantes cumplen con el parámetro de temperatura requerido para Nuevo Laredo, aún si la temperatura del módulo alcanza los 60.50°C ($40.50^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C}$), valor dentro del rango de operación que puede soportar cualquier MFV mostrado en la figura 6, condición que también se cumple ampliamente para temperaturas bajo cero.

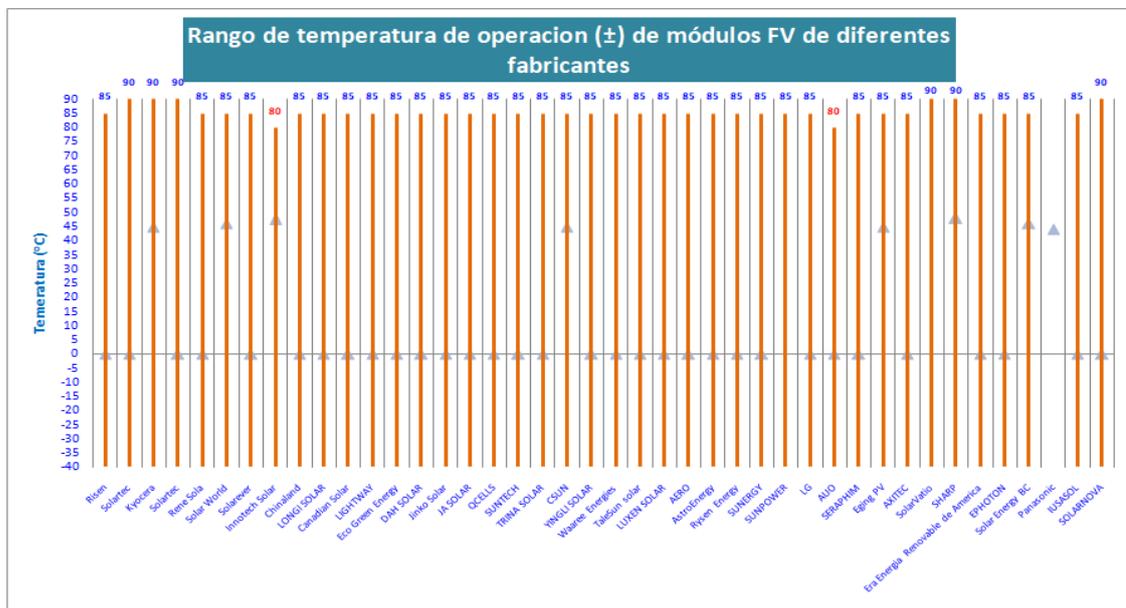


Figura 6. Temperatura de operación de MFV

Nota: Fuente: Elaboración propia con datos de fichas técnicas del fabricante.

j3: La velocidad del viento (VV)

La velocidad del viento y su fuerza mecánica de impacto (Reguera Gil, 2015) es otra variable relevante que debe considerarse al planificar y desarrollar proyectos de generación distribuida o centralizada fotovoltaica, esta variable se obtiene según la metodología descrita previamente en este artículo. La figura 7 muestra que la VV máxima promedio oscila entre los 39 km/h con rachas máximas de hasta 55 km/h, siendo todavía una velocidad moderada sin mayor riesgo como fuerza mecánica de impacto sobre los MFV y sus estructuras, ya que se encuentra dentro de los límites señalados por los fabricantes, fungiendo únicamente como un sistema de enfriamiento natural del SFV cuando su velocidad se incrementa (Mazón Hernández, 2014).

Conociendo la VV media y las ráfagas máximas de la región, en este caso para Nuevo Laredo, se comparan con las especificaciones de diferentes MFV en cuanto a su capacidad de resistencia a cargas de viento. La figura 8 muestra la capacidad de carga ocasionada por la fuerza del viento y la nieve que soportan los MFV según especificaciones de 42 fabricantes, observándose que soportan fuerzas del viento de 2,400 Pa a 5,400 Pa, de conformidad con la norma europea IEC 61215 que indica un valor

estándar de 2,400 Pa. El valor máximo de 5,400 Pa es relevante en zonas donde la VV es muy alta durante el año, no siendo el caso para Nuevo Laredo. Para estas VV se recomienda el uso de estructuras de aluminio anodizado para el montaje de los MFV por su alta resistencia a la fuerza mecánica y a la corrosión.

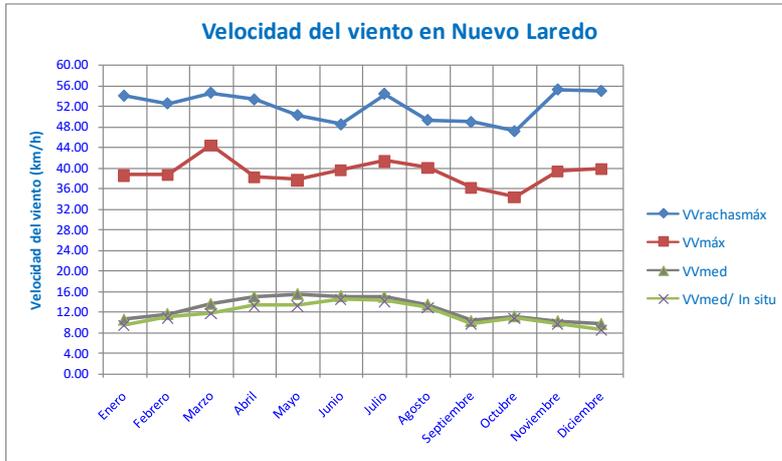


Figura 7. Velocidad media, máxima y rachas máximas de viento
 Nota: Fuente: Elaboración propia con datos de la EMANL y mediciones in situ.

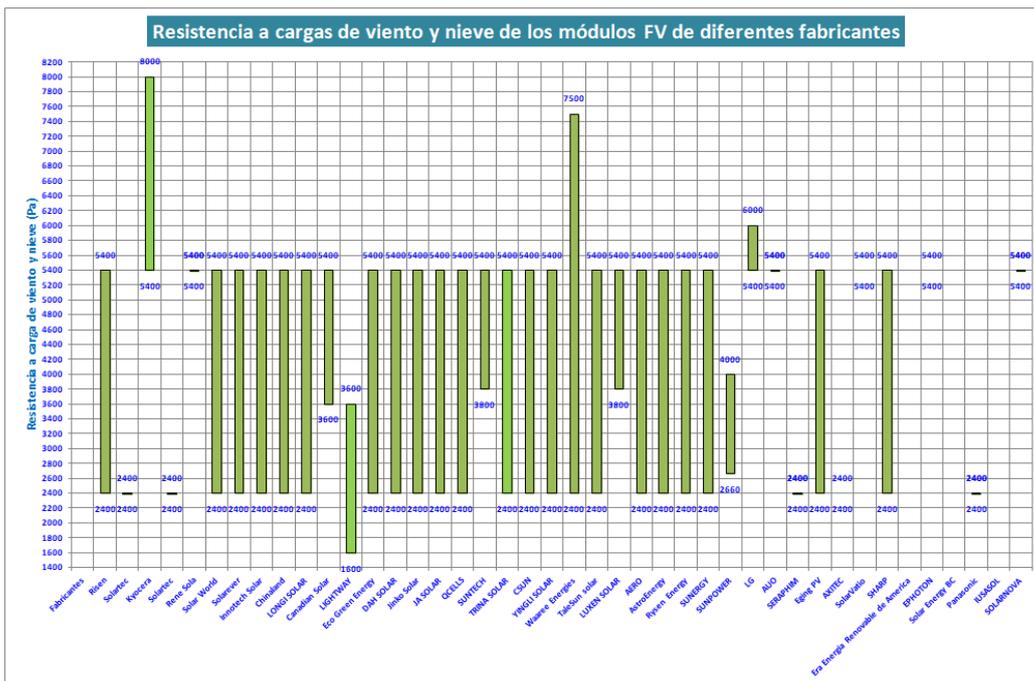


Figura 8. Resistencia a cargas mecánicas de los MFV
 Nota: Fuente: Elaboración propia con datos de fichas técnicas del fabricante.

J4: La humedad relativa (HR)

En la figura 9 se muestra el comportamiento mensual y anual de la humedad relativa de Nuevo Laredo con datos tomados in situ y de la estación meteorológica del aeropuerto internacional de Nuevo Laredo (EMANL). Se observa que el promedio general se ubica entre el 55 % al 60 % lo cual es aceptable debido a que Nuevo Laredo tiene un clima seco extremo con grandes oscilaciones de temperaturas desde -3 °C en invierno a los 46 °C en verano, siendo agosto el mes más caluroso y enero el mes más frío (Instituto para la Competitividad y el Comercio Exterior de Nuevo Laredo, 2021).

Aunque el valor máximo de la humedad oscila entre el 85 %, la frecuencia de ocurrencia al mes es de 1 a 3 días y mayormente se presenta en los meses más fríos del año, prevaleciendo los valores promedio de HR que no causan oxidación prematura ni falla de los MFV por degradación por potencial inducido (PID) originado por filtración de humedad en los encapsulados de los MFV.

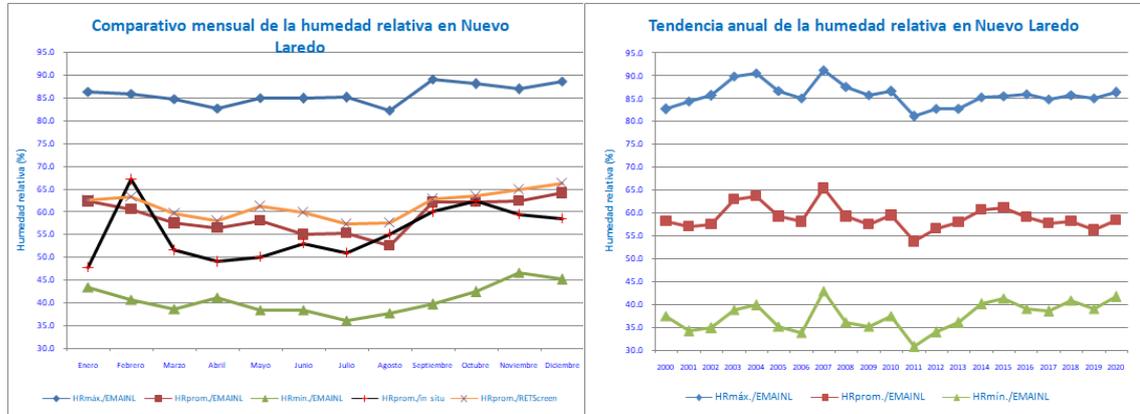


Figura 9. Tendencia de la humedad relativa en Nuevo Laredo

Nota: Fuente: Elaboración propia con datos medidos in situ y de la EMAINL.

J5: Presión atmosférica

La presión atmosférica sobre el nivel del mar es de 1,013.25 hPa y en zonas más elevadas se reduce a menos de 700 hPa, dado que Nuevo Laredo tiene una altitud sobre el nivel del mar que varía de 138 m a 150 m, el efecto es despreciable y no se considera una afectación mayor en el rendimiento de los SFV que se instalen en esta región de Tamaulipas. Al disminuir la presión por debajo de la presión atmosférica del lugar se generan tormentas o mal tiempo, lo cual no es típico en Nuevo Laredo donde la mayor parte del tiempo el clima es seco y de baja precipitación.

La figura 10 muestra una tendencia muy estable en la variación de la presión lo cual se atribuye en gran medida al clima semidesértico en Nuevo Laredo, manteniendo un promedio mensual de 997 hPa. Esta variable no es considerada en las especificaciones de los fabricantes debido a que no afecta de manera directa a los MFV, sino más bien a través de sus efectos sobre todo cuando presenta un rango de variación muy amplio.

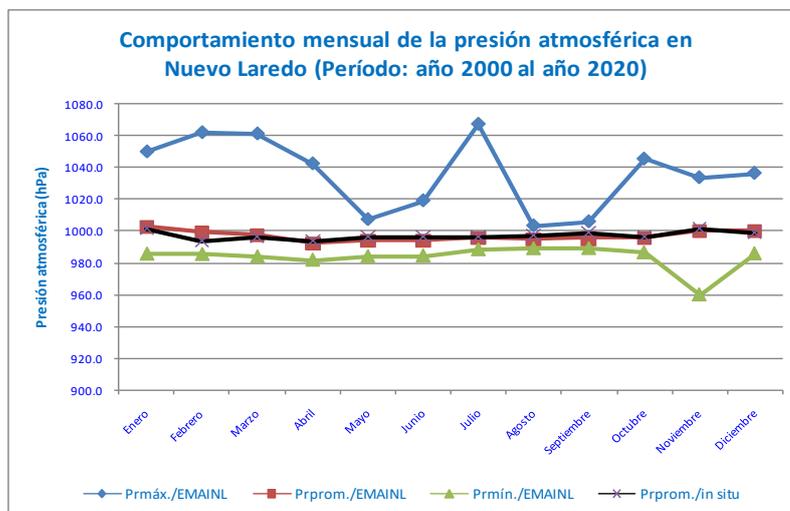


Figura 10. Tendencia de la presión atmosférica en Nuevo Laredo

Nota: Fuente: Elaboración propia con datos medidos in situ y de la EMAINL.

J6: Análisis de la precipitación pluvial

La precipitación en Nuevo Laredo varía de 550 mm a 600 mm (Protección Civil Tamaulipas, 2011), observándose en la figura 11 que durante los meses de mayo a octubre la precipitación es más alta, alcanzando un promedio anual de 553.8 mm. Debido al clima semidesértico de Nuevo Laredo, la lluvia durante la mayor parte del año es escasa con un promedio diario de aproximadamente 45 días durante un periodo de análisis de 20 años, es decir, solo el 12 % de días del año son de lluvia.

La lluvia es un medio natural de limpieza de los MFV, pero al ser muy frecuente ocasiona oxidación en las estructuras de soporte, por esta razón se utiliza frecuentemente el aluminio anodizado y, en raros casos se emplean estructuras de fierro. Según este análisis la precipitación en Nuevo Laredo no representa un problema mayor que cause oxidación prematura o problemas de PID en los MFV. Sin embargo, para asegurar larga duración se recomienda el uso de estructuras de aluminio anodizado para la fijación de los MFV.

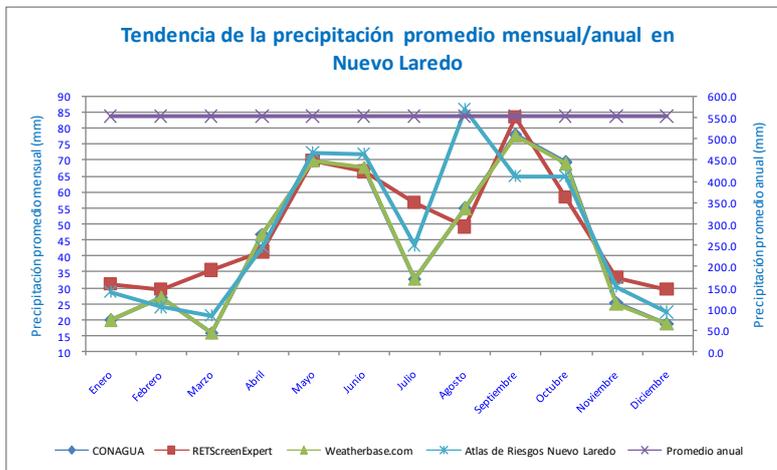


Figura 11. Tendencia de la precipitación pluvial en Nuevo Laredo

Nota: Fuente: Elaboración propia con datos de diferentes fuentes de bases de datos.

J7: Análisis del granizo y la nieve

En la figura 12 se muestra la tendencia de caída de granizo en Nuevo Laredo y la región, observándose poca recurrencia siendo una variable de bajo riesgo, sin embargo, es conveniente que los MFV cumplan ciertas normas a la fuerza de impacto. En la figura referida se observa un máximo anual de 2 días por año, siendo normalmente un día al año, inclusive durante varios años no se presenta caída de granizo.

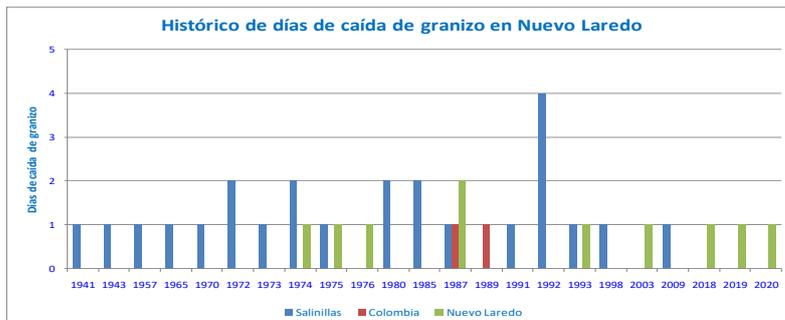


Figura 12. Comportamiento anual de caída de granizo en Nuevo Laredo.

Nota: Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema Meteorológico Nacional (SMN).

Como referencia regional se grafica la caída de granizo en 2 municipios vecinos ubicados a menos de 50 km observándose una tendencia similar.

Nuevo Laredo no es una zona de nevadas y en raras ocasiones ha caído una ligera capa de nieve, por lo cual su análisis es irrelevante.

J8: Horas solares pico

La HSP (Pérez Martínez et al., 2017) es una variable obtenida de la irradiación solar de la región dividida entre el STC de los MFV equivalente a $1,000 \text{ W/m}^2$. El promedio de HSP en Nuevo Laredo se obtiene de la insolación promedio dividida entre el valor STC resultando en 5.0 h según monitoreo de datos tomados in situ durante un periodo de 18 meses y, de 5.027 h en promedio anual según software SAM (system advisor model) como se observa en la figura 13, siendo ambos valores similares y aceptables para módulos con eficiencias superiores al 16 % que se instalen en Nuevo Laredo.

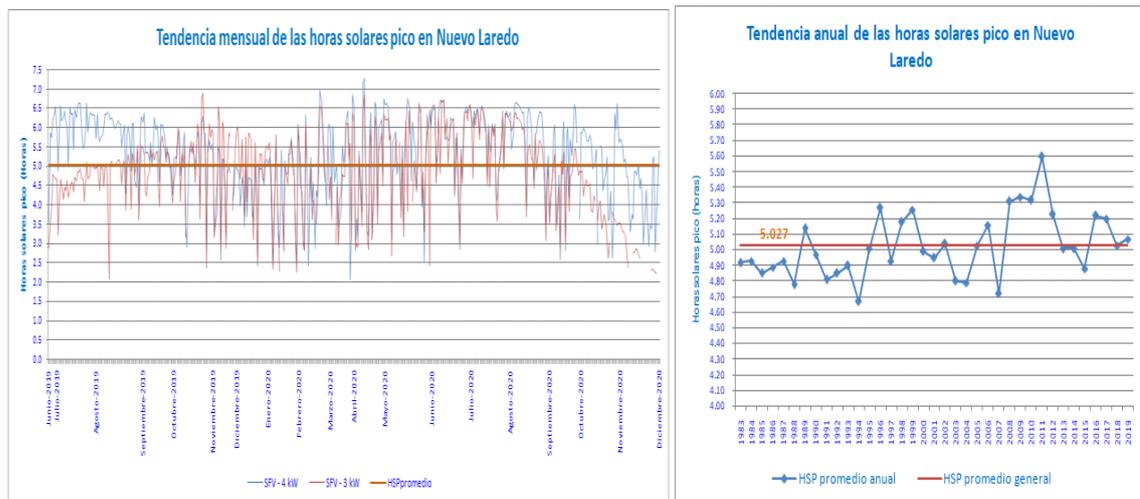


Figura 13. Tendencia mensual y anual de las HSP en Nuevo Laredo

Nota: Fuente: Elaboración propia con datos tomados in situ y del software SAM.

J9: Análisis de la correlación entre variables

El análisis que refiere el modelo energético considera revisar la correlación existente entre variables con el objetivo de analizar el comportamiento del SFV. La figura 14 muestra las capacidades de generación de energía eléctrica por hora de dos SFV usados como muestra, ubicados a una distancia de 25 km uno del otro, durante un periodo de muestreo del 31-mayo al 23-junio-2020.

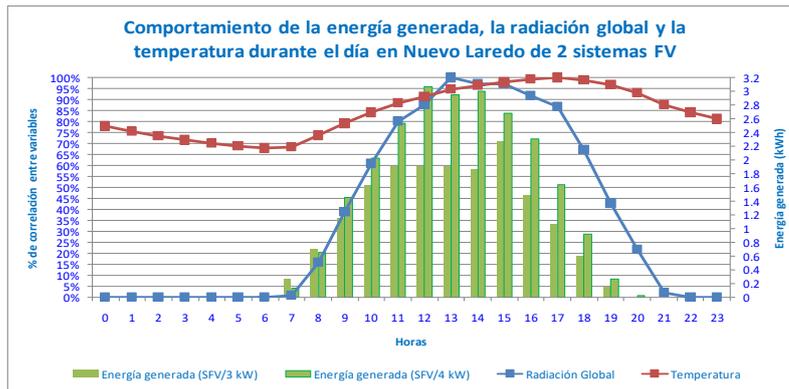


Figura 14. Comparativo de variables meteorológicas y la energía FV generada

Nota: Fuente: Elaboración propia con datos de

<https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/export/nuevo-laredo> y Apsystem.

Se observa que al incrementarse la irradiación también lo hace la temperatura y la energía generada en ambos SFV (Granda Gutiérrez et al., 2013), sin embargo, a partir de cierta hora del día aunque la temperatura aún permanece alta, la radiación se reduce y también la energía generada en ambos SFV de forma proporcional. Comprobando que la energía generada depende directamente de la radiación y, en este caso la temperatura tiene un efecto menor debido a que el coeficiente de temperatura de los módulos utilizados es menor a $-0.4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$.

Discusión y conclusiones

Discusión

El análisis detallado de las variables referidas en el modelo energético propuesto, permite considerar los parámetros más importantes al diseñar un SFV que asegure una generación óptima, al seleccionar los materiales y equipos con las especificaciones más apropiadas para soportar las condiciones medioambientales de la región bajo estudio y, determinar si el lugar es viable o no para instar SFV.

El modelo considera la mayoría de las variables que afectan u optimizan la generación de energía eléctrica FV que aseguren un diseño robusto, confiable, y que garantice el retorno de la inversión de los usuarios residenciales, comerciales, de servicios e industriales mediante análisis financieros (Caamaño Martín, 1998).

La tabla 5 muestra los parámetros obtenidos al aplicar la metodología según el modelo propuesto, observando que el lugar es viable para instalar SFV.

Tabla 5
Variables de entrada del SFV para Nuevo Laredo

Variable	Rango promedio de la variable	Comentario
Irradiación (G)	4.81-5.03-5.19 kWh/m ²	Valor promedio alto de la república mexicana.
Temperatura (T)	10 °C promedio mínimo 25 °C promedio 37 °C promedio máximo	Aunque existen valores extremos ocasionales de -3 °C en invierno y hasta 45 °C en verano, los valores promedio son los indicados y están dentro de las especificaciones de los fabricantes de MFV.
Velocidad del viento (VV)	30-39-45 km/h de velocidad promedio máxima	Aunque existen rachas ocasionales de hasta 55-80 y raramente de 100 km/h estos valores aún están dentro de las especificaciones de los fabricantes de MFV.
Humedad relativa (HR)	55 % – 60 %	Existen valores ocasionales de 85 %, sin embargo el promedio se ubica en el 55 % lo que no es un riesgo de humedad alta que acelere la oxidación o el filtrado en los encapsulados de los MFV.
Presión atmosférica (Pr)	987.1 - 1,012.2 - hPa	Poca variación, sin mayor efecto por la poca altitud de la región de 138 msnm. Promedio mensual 997 hPa.
Precipitación pluvial (PP)	550 – 553.8 - 600 mm	Valores bajos que no representan riesgos para el deterioro de los MFV.
Granizo y nieve (GN)	20 – 50 mm de ϕ	Diámetro del granizo de textura porosa, caída ocasional de una vez al año
Horas solares pico (HSP)	4.81 - 5.027 - 5.19 h	Valor alto de insolación

Nota: Fuente: Elaboración propia.

Al utilizar este modelo como una guía metodológica para el diseño y desarrollo de proyectos FV, podrán reducirse los riesgos de un mal funcionamiento del sistema durante su tiempo de vida útil al considerar las especificaciones de los fabricantes. En el estudio “Estrategias de mejora para la generación de energía eléctrica distribuida con equipos solares, eólicos o híbridos” (Cadena et al., 2012), se menciona la factibilidad de utilizar recursos renovables para cubrir la demanda de energía eléctrica analizando el recurso disponible en la región, sin embargo, solo hace referencia a ciertas variables que intervienen en los SFV mismas que ya son consideradas en el modelo propuesto.

Este modelo pretende cubrir la brecha existente entre sistemas que integren a la mayoría de las condiciones necesarias para diseñar e instalar SFV y, la información de diversos estudios que existen en la actualidad de manera separada, es decir, la información existente se encuentra de manera aislada y no está concentrada o integrada en un solo

bloque funcional que permita una visión integral u holística de los aspectos que deben considerarse.

La utilización de software comercial o de uso libre complementa y facilita el desarrollo de cada bloque del modelo, resultando en un informe técnico final que podrá utilizarse para decidir instalar o mejorar el proyecto FV bajo estudio.

Conclusiones y trabajo futuro

El análisis de cada bloque del modelo propuesto aplicado a Nuevo Laredo, permite inferir que la región reúne las condiciones necesarias y suficientes para la instalación de SFV según la tabla 5. Se demuestra que la mayoría de las variables analizadas se encuentran dentro de los rangos aceptables al cumplir con las especificaciones comerciales de equipos FV, asegurando la viabilidad del proyecto.

Al desglosar y desarrollar cada bloque del modelo propuesto, realizando las mediciones y los cálculos de las variables indicadas, compararlos con normas y regulaciones aplicables según la región o el país, considerar las especificaciones de fabricantes de equipos FV, diferenciar los tipos de usuarios para realizar estudios de planificación de la demanda (Falcón Roque, 2018) y dimensionar correctamente el sistema, se estará asegurando un diseño robusto y completo que haga viable el desarrollo del proyecto FV.

Adicionalmente, el modelo requiere la toma de datos in situ de la radiación solar, información que se carece en la mayoría de las regiones de México, contándose únicamente con datos obtenidos de estaciones de medición más próximas a la zona de estudio que distan varios kilómetros, o de datos satelitales que presentan ciertos porcentajes de error (Grossi Gallegos, 1999). En el estudio (Osseweijer et al., 2017) se considera la importancia del involucramiento de la industria (proveedores, consumidores), la academia (para realizar investigación y formación de mano de obra calificada) y, el gobierno (para establecer regulaciones) como partes interesadas en el uso y promoción de los SFV, condiciones que se incluyen en el estudio propuesto.

Actualmente en Nuevo Laredo existen más de 100 SFV instalados con capacidades desde un kW hasta 202 kW. Sin embargo, aún existe un mercado cautivo de 126,127 usuarios domésticos, 9161 en tarifa PDBT6 (pequeña demanda en baja tensión), 1754 con tarifa GDMTO6 (gran demanda media tensión ordinaria) y 644 usuarios en GDMTH6 (gran demanda media tensión horaria) para implementar proyectos FV de generación distribuida.

Al desarrollar e integrar en un informe final todos los aspectos incluidos en cada bloque del modelo y acorde al diagrama de flujo de la figura 2 previamente mencionado, los resultados además de usarse para los fines descritos, también podrían utilizarse como referencia y complemento para el desarrollo de investigaciones futuras, que requieran analizar las variables y demás características y aspectos inherentes a SFV resultando en estudios más completos.

Como trabajos futuros y complementarios a este proyecto de investigación, se propone un análisis abstracto de las variables y su representación matemática en función de aquellas que son afectadas por el comportamiento de otras, siendo un ejemplo la potencia generada del SFV (P) como función directa de la irradiación (G) incidente en los MFV y, de la temperatura de operación del sistema (T), es decir, $P \rightarrow (G, T)$. En trabajos posteriores se deberá considerar el uso de ecuaciones tanto para el dimensionamiento como para el cálculo de variables meteorológicas y eléctricas.

El desarrollo de modelos matemáticos sobre la degradación de los MFV (Reguera Gil, 2015) según la región donde se instalen son también temas de interés y complementarios a este proyecto.

Referencias

- Becerra López, H., Agredano Díaz, J., y Huacuz Villamar, J. (2010). *Guía de usuario Sistemas Fotovoltaicos Interconectados con la Red, Aplicaciones de Pequeña Escala* (No. 1). Instituto de Investigaciones Eléctricas. <https://www.ineel.mx/flipbook/libros/SFVI.pdf>.
- Caamaño Martín, E. (1998). *Edificios fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: caracterización y análisis*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/1322/>.
- Cadena, C., Salazar, G., Javi, V., y Tilca, F. (2012). *Estrategias de mejora para la generación de energía eléctrica distribuida con equipos solares, eólicos o híbridos*. In *IV Congresso Brasileiro de energia solar e V Conferencia de Latinoamericana da ISES*. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/15092/CONICET_Digital_Nro.17885.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Collado Fernández, E. (2009). *Energía solar fotovoltaica, competitividad y evaluación económica, comparativa y modelos* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Educación a Distancia. <http://www.ieec.uned.es/PersonalDIEEC/archivos/tesis-doctoral-eduardo-collado.pdf>.
- De Juana Sardón, J. M., de Francisco García, A., Fernández González, J., Santos García, F., Herrero García, M. A., y Crespo Martínez, A. (2009). *Energías Renovables para el desarrollo* (1ª. ed.). Paraninfo.
- Duarte, E. (2017, 23 mayo). Puente III de Nuevo Laredo, el gigante del comercio. *T21mx*. <http://t21.com.mx/logistica/2017/05/23/puente-iii-nuevo-laredo-gigante-comercio>.
- ENERDATA. (2020). *Anuario estadístico mundial de energía 2020: Cuota de energías renovables en la producción de electricidad*. <https://datos.enerdata.net/energias-renovables/produccion-electricidad-renovable.html>.
- Falcón Roque, E. J. (2018). *Desarrollo de un modelo de planificación energética sostenible usando técnicas de optimización multicriterio: una aplicación a la provincia de Cajamarca, Perú*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.52109>.
- Flores Contreras, I. (2018). Nuevo esquema de tarifas eléctricas y su viabilidad en proyectos fotovoltaicos (CONERMEX, Ed.). <https://www.conermex.com.mx/webinar/webinar-05-nuevo-esquema-tarifas%20ele%CC%81ctricas.html>.
- García Barrios, F. A. (2018). *Efecto de los factores ambientales en la eficiencia de arreglos de paneles solares fotovoltaicos* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma del Caribe. <http://hdl.handle.net/11619/3786>.
- Granda-Gutiérrez, E. E., Orta, O. A., Díaz-Guillén, J. C., Jiménez, M. A., Osorio, M., y González Albarrán, M. A. (Eds.). (2013). *Modelado y simulación de celdas y*

- paneles solares. In *Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica ELECTRO 2013*. (17-22). Instituto Tecnológico de Chihuahua. https://www.researchgate.net/publication/265767005_MODELADO_Y_SIMULACION_DE_CELDAS_Y_PANELES_SOLARES?channel=doi&linkId=541ad2180cf25ebee988c4ec&showFulltext=true.
- Grossi Gallegos, H. (1999, enero). Comparación de los valores satelitales del “surface solar energy (sse) data set versión 1.0” con datos de tierra de la red solarimétrica. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6, 1-6. <https://www.researchgate.net/publication/279752278>.
- Hernández Gallegos, R. (2017). *Análisis de factibilidad para la instalación de un sistema de energía limpia mediante celdas fotovoltaicas para la alimentación eléctrica del edificio 4 en el ITSLV*. (Tesis de Maestría). CIATEQ México]. <http://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/97>.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, M. P. (2010). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill.
- Instituto para la Competitividad y el Comercio Exterior de Nuevo Laredo. (2020, febrero). *Prontuario socioeconómico binacional 2020 Región Laredos* (No. 4). <http://www.iccedenuevolaredo.org/prontuario/condiciones.html>.
- Kühne, K., Sánchez, L., Roth, J., Tornel, C., y Gerasimchuk, I. (2019, junio). *Más allá de los combustibles fósiles: Transición fiscal en México*. <https://www.iisd.org/system/files/publications/combustibles-fosiles-transicion-fiscal-en-mexico.pdf?q=sites/default/files/publications/combustibles-fosiles-transicion-fiscal-en-mexico.pdf>.
- Masa Bote, D. (2014). *Contribución a la integración de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: recurso solar y predicción de generación*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid]. http://oa.upm.es/29110/1/DANIEL_MASA_BOTE.pdf.
- Mazón Hernández, R. (2014). *Estudio de la influencia de la refrigeración con aire de forma natural e inducida en el comportamiento de instalaciones fotovoltaicas* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cartagena Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. <http://hdl.handle.net/10317/4780>.
- Messenger, R. A. y Ventre, J. (2005). *Photovoltaic Systems Engineering*. CRC Press LLC.
- Osseweijer, F. J. W., van den Hurk, L. B. P., Teunissen, E. J. H. M., y van Sark, W. G. J. H. M. (2017). A review of the Dutch ecosystem for building integrated photovoltaics. *ELSEVIER*, 111, 974-981. https://www.researchgate.net/publication/315976225_A_Review_of_the_Dutch_Ecosystem_for_Building_Integrated_Photovoltaics.
- Pérez Regalado, M. J. (2010). *Estudio termográfico de la influencia de la temperatura en los módulos fotovoltaicos*. (Tesis de Ingeniería). Universidad Carlos III de Madrid]. <https://docplayer.es/8249240-Universidad-carlos-iii-de-madrid.html>.
- Pérez Martínez, M., Morales Rodríguez, I. C., y Castro, E. (Mayo, 2017). La hora solar pico equivalente, definición e interpretación. *Revista de Ingeniería Energética*, XXXVIII(2), 126-131. <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/506>.

- Protección Civil Tamaulipas. (2011). Atlas de riesgos del Municipio de Nuevo Laredo. <https://www.tamaulipas.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/36/2011/12/ATLAS-DE-RIESGOS-DE-NUEVO-LAREDO.pdf>.
- Reguera Gil, F. J. (2015). *Análisis de la degradación de módulos fotovoltaicos*. (Tesis de Maestría). Universidad Internacional de Andalucía]. <http://hdl.handle.net/10334/3524>.
- Sol Energy (Febrero, 2018). *Degradación en Paneles Solares por Potencial Inducido (PID)*. <https://www.solenergy.mx/es/principal/blog/degradacion-en-paneles-solares-por-potencial-inducido-pid#>.
- Vanegas Chamorro, M., Villicaña Ortiz, E., y Arrieta Viana, L. (2015, junio). Cuantificación y caracterización de la radiación solar en el departamento de La Guajira-Colombia mediante el cálculo de transmisibilidad atmosférica. *PROSPECTIVA*, 13(2). <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496250642007.pdf>
- Vigil Galán, O., Jiménez Olarte, D., Contreras Puente, G. (2018). Efecto de las condiciones medioambientales de México en el desempeño de módulos fotovoltaicos de distintas tecnologías. *Revista Eficiencia Energética*, 4(17), 13-16. http://www.fide.org.mx/wp-content/uploads/2018/05/eficiencia_energetica-17/.
- World Energy Markets Observatory. (2019). *La crisis como oportunidad*. <https://www.capgemini.com/es-es/world-energy-markets-observatory-2019/>.

Fecha de recepción: 05/04/2021

Fecha de revisión: 15/06/2021

Fecha de aceptación: 30/06/2021