

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Gustavo Palma Avila

ASESOR DE INFORME

M. en C. Edgar Baldemar Aguado Cruz



Ciudad Universitaria, CDMX, 2020

Índice

Introducción	3
Objetivo	4
Antecedentes	4
Marco teórico	5
¿Qué es un sistema fotovoltaico interconectado a la red (SFVIR)?	5
Componentes de un SFVIR	5
Inversor.....	6
Red eléctrica.....	7
Funcionamiento.....	7
Definición del problema	8
Metodología	8
Consumo de energía eléctrica	9
Datos meteorológicos	12
Potencia del SFVIR.....	13
Orientación e inclinación.....	14
Diseño.....	15
Características del SFVIR	18
Circuitos eléctricos.	19
Resultados	21
Simulación	21
Corrida financiera.....	23
Conclusiones.....	25
Bibliografía	26

Introducción

Actualmente la mayoría de la electricidad es obtenida por fuentes de energía eléctrica mediante combustibles, causando alzas en su precio, contaminación y el agotamiento de las reservas fósiles; sin embargo, las energías renovables requieren de fuentes naturales, como lo es el sol.

La generación de energía por medio del sol es una alternativa más para obtener electricidad, disminuir el impacto ambiental y un ahorro económico; los sistemas fotovoltaicos cumplen con estas cualidades.

Los sistemas fotovoltaicos debido al gran desarrollo tecnológico y competencia en el ramo han provocado una disminución en su precio de manera considerable. El aumento en las tarifas eléctricas industriales y las tarifas residenciales sin subsidio, hacen que los sistemas fotovoltaicos sea una inversión atractiva para los usuarios.

La energía solar es inagotable y forma parte de un cambio positivo para el planeta e independencia; hasta cierto punto, del suministrador, además de conseguir ahorros a partir de su operación. Los sistemas fotovoltaicos cumplen con esas cualidades, desde su marcha, hasta el tiempo de vida propuesto por el fabricante de cada uno de sus componentes.

Los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red (SFVIR) son sistemas que interactúan con la red eléctrica del suministrador, de tal forma que al trabajar en conjunto se deben cumplir normas para lograr dicho convenio entre el usuario y el suministrador de energía eléctrica. El resultado es producir su propia energía eléctrica por el día y dependiendo de su demanda, el suministrador realiza acciones para que el usuario tenga el servicio de manera ininterrumpida. Los acuerdos entre el suministrador y el usuario se realizan mediante un contrato de interconexión.

El dimensionamiento de un SFVIR se realiza por medio del historial de consumo eléctrico proporcionado por el suministrador y dependiendo de las condiciones del sitio es lo que el cliente podría abastecer. El usuario puede escoger libremente un porcentaje del total de su consumo, sin existir inconvenientes por ambas partes.

Objetivo

Definir los componentes, funcionamiento y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico interconectado a la red (SFVIR), basados en las normativas eléctricas vigentes para instalaciones eléctricas.

Antecedentes

La compañía donde actualmente presto servicios se trata de una empresa mexicana dedicada 100% al mercado fotovoltaico con una trayectoria iniciada en el 2005 por profesionales con más de 30 años de experiencia y socios experimentados en el mercado global. Ejecuta la integración y puesta en funcionamiento de sistemas fotovoltaicos de escala comercial e industrial de hasta 500 kWp.

Tiene la misión de proveer a sus clientes, productos y servicios de calidad competitivos, además de soporte técnico; y al usuario final soluciones completas para la instalación de sistemas solares.

Su visión, ser el proveedor líder en soluciones de energía fotovoltaica en México, ofreciendo una buena contribución a las personas y a los negocios, gracias a los beneficios técnicos, económicos y ambientales en base a sus soluciones.

A lo largo de su trayectoria, se han desarrollado proyectos por toda la República Mexicana, principalmente en el sector industrial y comercial de mediana capacidad, respaldados por las normativas eléctricas nacionales; tanto en ingeniería como en instalación.

En el año 2014, la compañía desarrolló y ejecutó la planta fotovoltaica más grande del sureste del país, con una capacidad de 324 kW, para una empresa fabricante de botanas, abasteciendo el 100% de su consumo eléctrico. El equivalente del consumo de esta empresa es el requerido por 400 casas de interés social.

Marco teórico

¿Qué es un sistema fotovoltaico interconectado a la red (SFVIR)?

Un sistema fotovoltaico interconectado a la red es una fuente renovable que produce electricidad, proveniente de la radiación solar, utilizando dispositivos en conjunto para lograr convertir la energía proveniente del sol en energía convencional. El sistema trabaja en conjunto con la red eléctrica y no es posible su funcionamiento cuando existe ausencia de electricidad proporcionada por el suministrador.

Componentes de un SFVIR

Un SFVIR está conformado por elementos capaces de convertir la radiación solar en energía eléctrica y sus componentes principales para lograr dicho objetivo son los módulos solares, inversor y la red eléctrica.



Figura 1. Componentes principales de un SFVIR.

Módulos solares

Los módulos solares son dispositivos fabricados con materiales semiconductores capaces de convertir la radiación solar en corriente eléctrica continua.



Figura 2. Celda de silicio de un módulo solar

Inversor

El inversor es un equipo electrónico, capaz de convertir la corriente eléctrica continua procedente de los módulos solares en corriente alterna, sincronizándose con los parámetros eléctricos; tales como frecuencia y tensión, de tal modo que pueda interactuar con la red eléctrica del suministrador.

El inversor; para ser interactivo con la red eléctrica, debe cumplir con las especificaciones y lineamientos que el suministrador imponga. Las limitantes y disposiciones por parte del proveedor de la energía eléctrica son respaldados por un contrato de interconexión, el cual depende de la tipología que tomará el cliente para el manejo de su energía.



Figura 3. Inversor CD/CA

Red eléctrica

La red eléctrica es el pilar de un SFVIR; ya que, sin ella, la operación no es posible por las disposiciones impuestas en las normativas eléctricas nacionales e internacionales para los sistemas interactivos con la red eléctrica.

Funcionamiento

El funcionamiento de un SFVIR consiste básicamente en la labor en conjunto de la radiación solar, los módulos, el inversor y la red eléctrica, con el objetivo de generar electricidad. El sistema debe cumplir con las normativas eléctricas nacionales; avalado en algunos casos por una unidad de verificación e inspección, para lograr la interconexión con la red eléctrica.



Figura 4. Funcionamiento de un SFVIR

Para adquirir el mayor provecho del sistema a través de la cantidad de energía solar captada en el transcurso del día se debe contar con la orientación e inclinación de los módulos fotovoltaicos de acuerdo con el movimiento de la Tierra respecto al Sol. La orientación propuesta para los países que se encuentran por encima del Ecuador; como lo es México, deben

dirigirse hacia el sur y con una inclinación correspondiente a la latitud del lugar.

Definición del problema

Se propone abastecer en lo mayor de lo posible el total del consumo eléctrico el inmueble del usuario con un SFVIR, a causa del aumento en las tarifas eléctricas y consumo elevado, provocando un cambio de tarifa sin subsidio en su recibo. El recibo proporcionado por el suministrador de energía eléctrica cuenta con la información suficiente para dimensionar y calcular la viabilidad de un SFVIR.

Las particularidades del sitio son fundamentales para el diseño del sistema y la información obtenida se desarrolla mediante una propuesta preliminar basada en su consumo, disponibilidad de espacio, características de la instalación eléctrica y tipo de acometida.

El usuario tiene la libertad de elegir la capacidad del SFVIR, dependiendo del porcentaje de ahorro que busca alcanzar y se propone realizarlo en un porcentaje no mayor al 90% de su consumo.

La instalación, materiales y componentes del SFVIR deben cumplir con las normativas eléctricas nacionales y requerimientos por parte del suministrador eléctrico para la interconexión del sistema con la red eléctrica.

Para el proveedor del SFVIR, se propone que tenga certificado en el estándar de competencia para instalación de sistemas fotovoltaicos en residencia, comercio e industria y respaldado con fabricantes que cuenten con garantía y soporte técnico que avalen los componentes principales, en caso de existir inconvenientes en el futuro.

Metodología

La metodología consiste fundamentalmente en el dimensionamiento de un SFVIR, basado en su historial de consumo eléctrico, lugar de instalación y características eléctricas de los componentes principales de un SFVIR.

El historial de consumo eléctrico se obtiene por medio del recibo que el suministrador proporciona al concluir el período de facturación y las características eléctricas de los componentes principales se encuentran en las fichas técnicas que el fabricante provee al adquirir sus productos.

Consumo de energía eléctrica

El consumo eléctrico es el dato más importante para el dimensionamiento de un SFVIR y la manera más sencilla y eficaz de obtenerlo es por medio del recibo de luz.

La energía eléctrica consumida diaria es un valor que sirve como base para calcular un sistema fotovoltaico que en el transcurso del día sea capaz de producir la misma cantidad de energía.

En el historial del recibo se toma la media de los consumos realizados por un año para lograr generar la suficiente energía requerida por el cliente en el transcurso del período de facturación.

Datos del cliente

NOMBRE DEL CLIENTE

FRANCISCO JAVIER MINA 23, MIGUEL HIDALGO, C.P. 62748, CUAUTLA, MORELOS

Total a pagar \$1,873.00

(Mil ochocientos setenta y dos pesos)

No de servicio:

Periodo de facturado: 05 MAY 20 - 08 JUL 20

RPU:

Tarifa: 1A

No de medidor:

Multiplicador:

Límite de pago: 24 JUL 20 Corte a partir: 25 JUL 20

Concepto	Lectura actual		Lectura anterior		Total Periodo	Precio (MXN)	SubTotal (MXN)
	Medido	Estimado	Medido	Estimado			
Energía (kWh)	6072		5352		720		
Básico					200	\$ 0.745	\$ 149.000
Intermedio					100	\$ 0.870	\$ 87.000
Excedente					420	\$ 2.976	\$ 1,249.920
Suma					720		\$ 1,485.920



Este gráfico refleja tu nivel de consumo. A menor uso, mayor apoyo.

Subtotal

Concepto	Costos de la energía en el mercado eléctrico mayorista				Desglose del importe a pagar		
	\$	kWh	\$/kWh	Importe (MXN)	Concepto	Importe (MXN)	
Suministro	101.08	0	0	101.08	Energía	\$	1,485.920
Distribución	0	0	975	975	IVA 16%	\$	237.75
Trnasmisión	0	0	120	120	Fac. del Periodo	\$	1,723.667
CENACE	0	0	5.76	5.76	DAP	\$	149.59
Energía	0	0	489.6	489.6	Adeudo anterior	\$	2,012.63
Capacidad	0	0	335.52	335.52	Su pago	-\$	2,012.63
SCnMEM(1)	0	0	4.03	4.03	Total	\$	1,873.26

Apoyo gubernamental \$46.56



\$1,873.00

(MIL OCHOCIENTOS SETENTA Y TRES PESOS M/N)



¡AVISO IMPORTANTE!

Corte a partir del 25 JUL 2020.

Figura 5. Recibo de luz

Obtenido el consumo promedio en el período de facturación y la media de días mensuales, es posible conocer la cantidad de energía eléctrica utilizada por el cliente diariamente.

La expresión para obtener el consumo eléctrico diario es:

$$C_d[kWh] = \frac{\sum_{i=1}^n C_p [kWh]}{30.4167 * m} \quad (1)$$

Donde:

C_d = Consumo diario promedio

C_p = Consumo del período de facturación

n = Número de períodos en el año

m = Meses que corresponden al período de facturación

Sustituyendo los valores mostrados en la **Figura 5**; adquiridos en el apartado del período de adeudos anteriores, en la fórmula (1):

$$C_d[kWh] = \frac{605 + 534 + 495 + 506 + 449 + 755}{\frac{6}{30.4167 * 2}} = 9.16 [kWh] \quad (2)$$

El resultado obtenido refleja un consumo promedio de 9.16 kWh al día, que el cliente requiere para abastecer su hogar de energía eléctrica al día.

Datos meteorológicos

Con las coordenadas geográficas del lugar y consultando un portal web que incluya bases de datos de estaciones meteorológicas cercanas, es posible obtener información importante para el desarrollo de un proyecto fotovoltaico. Los parámetros destacados son los siguientes:

- Latitud: 18° 50' 31.38" N (18.84205 N)
- Longitud: 98° 56' 17.33" O (98.938147 O)
- Temperatura mínima registrada: 0°
- Temperatura máxima registrada: 39°
- Temperatura promedio ambiente: 28°
- Radiación solar promedio incidente en el plano horizontal (proporcional a las horas de radiación solar en el plano horizontal): 6.05 kWh/m²
- Velocidad de viento a 10 metros: 2.46 m/s
- Temperatura promedio a 2 metros: 18.92°C

Las horas promedio de radiación solar en el plano horizontal es un dato de referencia donde se muestra la acumulación de incidencia a pleno cenit durante el día y se obtiene por medio de las coordenadas geográficas del lugar en el portal de información climatológica. El valor obtenido representa el tiempo que el SFVIR trabaja con su mayor capacidad y la energía acumulada por el propio sistema en ese lapso, corresponde a la requerida para abastecer el consumo diario.

Potencia del SFVIR

La potencia del SFVIR es un valor importante en el diseño y para adquirir dicho parámetro, es necesario conocer las horas promedio al día de radiación solar en el plano horizontal del lugar y el consumo diario promedio alcanzado por el cliente.

La potencia de un SFVIR se calcula con los parámetros anteriormente mencionados de la siguiente manera:

$$P_{SFVIR}[kW] = \frac{C_d [kWh]}{H_a [h] * \eta_{sist}}$$

Donde:

P_{SFVIR} = Potencia del SFVIR

C_d = Consumo diario promedio

H_a = Horas promedio de radiación solar en el plano horizontal

η_{sist} = Eficiencia del sistema: La eficiencia del sistema incluye parámetros tales como la caída de tensión, el performance del inversor, la eficiencia de los módulos solares y que dan como resultado un valor aproximado del 80%.

Al sustituir los valores obtenidos en (2) y las horas promedio de radiación solar en el plano horizontal del lugar:

$$P_{SFVIR}[kW] = \frac{9.16 [kWh]}{6.05 [h] * 0.8} = 1.892 [kW]$$

El usuario requiere de un sistema de 1.892 kW para abastecer al 100% de su consumo promedio diario, sin embargo, se propone dimensionarlo al 90% para garantizar el uso total de la energía producida del SFVIR; ya que el suministrador eléctrico resguarda la energía excedente producida en el período de un año para utilizarla y concluido ese lapso, el resguardo inicia en cero de tal forma que se pierde la energía sin obtener un beneficio adicional.

$$P_{SFVIR}[kW] = 1.892 [kW] * 0.9 = 1.702 [kW]$$

El sistema finalmente propuesto para el cliente es de 1.702 kW, con lo que se asegura su uso total de la energía generada por el sistema.

Orientación e inclinación

Los módulos fotovoltaicos son los encargados de captar la energía producida por el sol y para lograr obtener la mayor cantidad de radiación en el transcurso del día, deben orientarse hacia el Ecuador terrestre y una inclinación determinada por la latitud de lugar.

Tomando en cuenta las condiciones y los datos meteorológicos del lugar, los módulos solares se proponen instalarse a una inclinación de 18°, orientados directamente al sur geográfico.

Es posible modificar la orientación e inclinación de los módulos solares en un rango de $\pm 5^\circ$, con la confianza de no tener pérdidas en la producción de energía.

Latitud 18-19°	Pérdidas con respecto a la inclinación óptima													
	E	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	O
Orientación/Inclinación														
0	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7
5	-5.6	-4.9	-4.3	-3.8	-3.4	-3.1	-3.0	-3.1	-3.4	-3.8	-4.3	-4.9	-5.5	
10	-6.0	-4.8	-3.6	-2.6	-1.7	-1.2	-1.0	-1.2	-1.7	-2.5	-3.5	-4.7	-5.9	
15	-6.7	-4.8	-3.2	-1.8	-0.7	0.0	0.0	0.0	-0.6	-1.7	-3.0	-4.6	-6.5	
20	-7.8	-5.4	-3.3	-1.5	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.4	-3.1	-5.2	-7.6	
25	-8.9	-6.1	-3.7	-1.8	-0.2	0.0	0.0	0.0	-0.1	-1.6	-3.5	-5.8	-8.7	
30	-10.7	-7.3	-4.6	-2.5	-0.9	0.0	0.0	0.0	-0.7	-2.3	-4.4	-7.1	-10.4	
35	-12.3	-8.8	-6.0	-3.8	-2.1	-1.1	-0.7	-1.0	-1.9	-3.5	-5.7	-8.5	-12.0	
40	-14.5	-10.6	-7.7	-5.5	-3.9	-2.8	-2.5	-2.7	-3.7	-5.2	-7.3	-10.3	-14.2	
45	-16.7	-12.9	-9.9	-7.7	-6.1	-5.2	-4.9	-5.1	-5.9	-7.4	-9.7	-12.5	-16.5	
Cuernavaca														

Tabla 1. Pérdidas posibles respecto a la orientación/inclinación

Diseño

El diseño es el apartado más importante en el dimensionamiento de un SFVIR, es el punto donde se seleccionan los componentes principales en base a su consumo eléctrico y las características del sitio de instalación.

La cantidad de módulos solares y el modelo del inversor se obtienen de las especificaciones técnicas proporcionadas por los fabricantes y el tipo de red eléctrica con la que se cuenta. En este caso en particular no hay limitantes de espacio y la acometida del cliente es dos fases a 220V, lo que beneficia en el diseño.

El tamaño del sistema es de 1.7 kW para abastecer el 90% del consumo y será necesario localizar los componentes principales en base a la capacidad requerida. En el mercado existen infinidad de marcas y en este caso se proponen equipos con garantía y respaldados con soporte técnico en caso de existir fallas y/o acciones que provoquen una interrupción en la generación de energía.

El equipo propuesto es un inversor de 1.5 kW, el cual debe cumplir con los requerimientos que el suministrador eléctrico y la comisión reguladora de la energía, impuestas en el manual de interconexión de centrales de generación con capacidad menor a 0.5 MW con las siguientes protecciones:

- a) Modo anti-isla
- b) Respuesta dinámica ante condiciones dinámicas o de falla
- c) Operación dinámica Volt/VAR
- d) Control de rampa
- e) Factor de potencia fijo
- f) Condiciones de reconexión automática

Para este caso en particular, el cliente se encuentra clasificado como baja tensión en una red monofásica, por lo que no existe inconveniente en interconectar un sistema; si este no es mayor a 30 kW. Al ser un servicio doméstico, no se requiere de la intervención de una unidad de verificación e inspección para lograr conectarse a la red eléctrica nacional, siempre y cuando el SFVIR no supere el 80% de la capacidad del circuito de distribución o el 80% de la ampacidad de conductores.

DATOS GENERALES		ESTÁNDAR PARA TODOS LOS MODELOS GALVO			
Dimensiones (alto x ancho x largo)	62.7 x 42.9 x 20.6 cm				
Peso	16.4 kg		16.8 kg		
Envolvente	NEMA 4X				
Consumo nocturno	< 1W				
Tecnología de inversor	Transformador de Alta Frecuencia				
Enfriamiento	Ventilador de velocidad variable				
Instalación	Interior y exterior				
Temperatura ambiente admisible	-40 a 50 °C				
Humedad relativa admisible	0 - 100 % (sin condensación)				
Terminales de CD	3 x CD+ y 3 x CD- terminales de tornillo para cable de cobre o aluminio sólido; cobre trenzado o de trenzado fino				
Tamaño de conductor admisible (CA)	AWG 14 a AWG 6 Cobre / AWG 6 – Aluminio sólido				
Certificaciones y cumplimiento de estándares	UL 1741-2010; UL 1998 (para funciones: AFCI, GFDI y monitorización del aislamiento), IEEE 1547-2003, IEEE 1547.1-2003, ANSI/IEEE C62.41, FCC Parte 15 A y B; NEC Artículo 690, C22.2 No. 1071-01 (Septiembre 2001), UL1699B Issue 2-2013, CSA TIL M-07 Issue 1-2013				

DATOS DE ENTRADA CD		GALVO 1.5-1	GALVO 2.0-1	GALVO 2.5-1	GALVO 3.1-1
Potencia FV recomendada (kWp)	1.2 - 2.4 1.6 - 3.2 2.0 - 3.8 2.5 - 4.5				
Rango de tensión MPP	120 - 335 V 165 - 440 V				
Máxima corriente de entrada	13.4 A 17.0 A 16.1 A 18.7 A				
Máxima corriente (usando kit de conector CD)	13.4 A 17.9 A 16.1 A 20.0 A				
Máxima corriente de cortocircuito del arreglo FV	16.7 A 22.4 A 20.1 A 25.0 A				
Tensión de puesta en marcha	140 V 185 V				
Tensión nominal de entrada	260 V 330 V				
Tensión máximo de entrada	420 V 550 V				
Tamaño de conductor admisible CD	AWG 14 a AWG 6 Cobre / AWG 6 – Aluminio sólido				
Número de seguidores MPP	1				

DATOS DE SALIDA CA		GALVO 1.5-1	GALVO 2.0-1	GALVO 2.5-1	GALVO 3.1-1
Potencia nominal de salida CA	1500 VA 2000 VA 2500 VA 3100 VA				
Potencia máxima de salida CA	1500 VA 2000 VA 2500 VA 3100 VA				
240 V	1500 W 2000 W 2500 W 2750 W				
220 V	1500 W 2000 W 2500 W 2650 W				
208 V	1500 W 1900 W 2500 W 2600 W				
Número de fases	1-NPE				
Voltaje Nominal AC	208 V / 240 V				
Precisión de los límites de voltaje	1% de valor nominal				
Corriente nominal de salida AC					
240 V	6.3 A 8.3 A 10.4 A 14.1 A				
220 V	6.8 A 9.1 A 11.4 A 14.1 A				
208 V	7.2 A 9.1 A 12.0 A 12.9 A				
Máxima protección de sobre corriente 208 V - 240 V	20 A				
Frecuencia	60 Hz				
Rango de frecuencia	59.3 - 60.5 Hz				
Precisión de los límites de frecuencia	0.05 Hz				
Distorsión armónica total	< 4 %				
Factor de potencia (cos φ _{av})	1 (ajustable 0.85-1 ind / cap.)				

INTERFACES		ESTÁNDAR PARA TODOS LOS MODELOS GALVO			
WiFi*/ Ethernet LAN	Wireless standard 802.11 b/g/n Fronius Solar.web, SunSpec Modbus TCP, JSON				
Entradas/Salidas Digitales	6 E/S digitales configurables + 4 entradas digitales + 1 contacto de relé				
USB (socket tipo A)	Para memoria USB, registro de datos				
2x RS422 (RJ45 socket) ⁹	Fronius Solar Net, protocolo de interfaz				
Datalogger y servidor web	Incluido				

DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN		ESTÁNDAR PARA TODOS LOS MODELOS GALVO			
Modos de operación	tierra flotante / neg. a tierra / pos. a tierra**				
Desconexión de CD	Sí				
Protección contra polaridad inversa de CD	Sí				
Protección GFDI	Sí				
Comportamiento de sobrecarga	Desplazamiento del punto de operación, limitación de potencia de salida.				
AFCI y NEC 2014	Sí				

**Positivo a tierra conectado mediante un elemento externo al inversor.

EFICIENCIA		GALVO 1.5-1	GALVO 2.0-1	GALVO 2.5-1	GALVO 3.1-1
Eficiencia Máxima	95.8 % 96 %				
Eficiencia CEC					
240 V	94.5% 94.5% 95.0% 95.5%				
220 V	94.0% 94.5% 95.0% 95.0%				
208 V	94.0% 94.5% 95.0% 95.0%				
OCPD/Breaker CA Recomendado	10 A 15.0 A 15.0 A 20.0 A				

Figura 6. Datos técnicos del inversor.

El inversor propuesto para el SFVIR es el modelo GALVO 1.5-1, el cual tiene la capacidad de conectar una potencia fotovoltaica de 1.2 hasta 2.4 kW, a una tensión máxima de 335 V y corriente de corto circuito de 13.4 A.

Considerando los valores de entrada del inversor, es posible calcular el número de módulos solares con la fórmula siguiente:

$$N_{mod} = \frac{P_{SFVIR}}{P_{mod}} \quad (3)$$

Donde:

N_{mod} = Número de módulos solares

P_{SFVIR} = Potencia del SFVIR

P_{mod} = Potencia nominal del módulo fotovoltaico

Los módulos solares propuestos son de una potencia nominal de 400W. Sustituyendo la potencia de los módulos solares en (3):

$$N_{mod} = \frac{1702 [W]}{400 [W]} = 4.255$$

Al redondear al valor superior, se tiene que el SFVIR requiere de 5 módulos solares de 400 W, que en conjunto se tiene una potencia de 2,000 W, la cual se encuentra dentro del rango de operación del inversor.

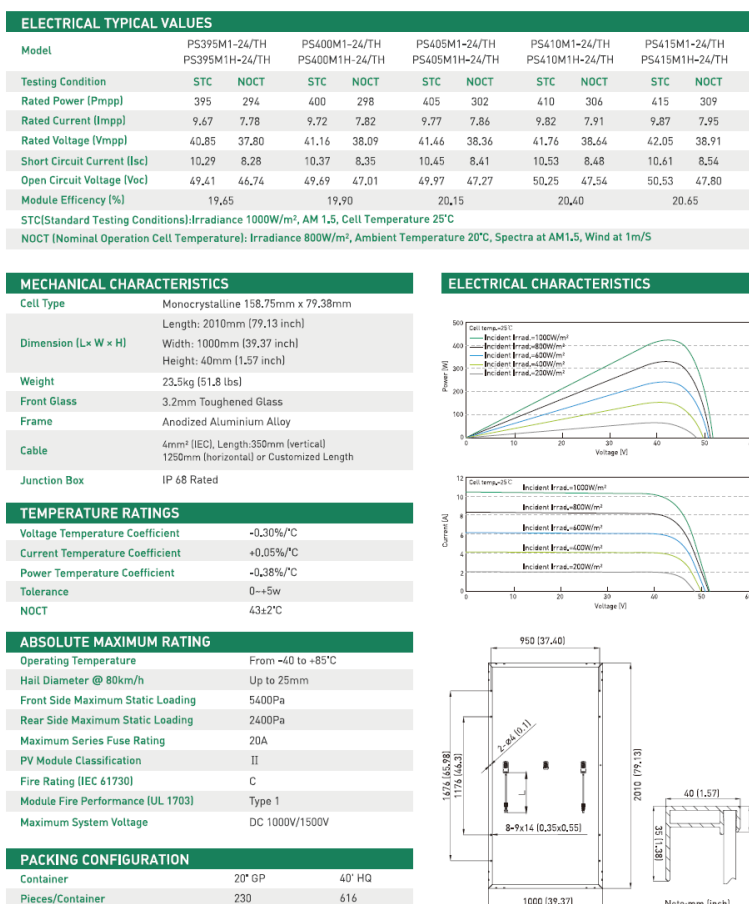


Figura 4. Ficha técnica del módulo solar

La conexión de los módulos solares se realiza en modo serie y para corroborar que el circuito cumpla con las especificaciones eléctricas de entrada del inversor, se debe calcular el voltaje en circuito abierto, así como la corriente de corto circuito y comprobar que los valores no superen a los descritos en su ficha técnica. El voltaje del arreglo fotovoltaico se obtiene de la siguiente fórmula:

$$V_{fv} = V_{oc} * (N_{mod} + C_{tv} * (T_{min} - 25^{\circ})) \quad (4)$$

Donde:

V_{fv} = Voltaje del arreglo fotovoltaico

N_{mod} = Número de módulos solares en serie

V_{oc} = Voltaje de circuito abierto del módulo solar en STC

C_{tv} = Coeficiente de temperatura del módulo solar

T_{min} = Temperatura mínima registrada del sitio.

El modelo de módulos solares con el que se realiza la propuesta es el PS400M1-24/TH y al sustituir valores en (4):

$$V_{fv} = 49.69 * (5 + (-0.003) * (0 - 25)) = 252.17 [V]$$

El voltaje máximo que puede alcanzar el circuito de los módulos solares es de 252.17 V, para la temperatura mínima registrada en el sitio, la cual se encuentra dentro del rango de operación de inversor (120 – 335 V).

Características del SFVIR

El sistema propuesto debe contar con todos los componentes necesarios para lograr protegerlo de condiciones climatológicas no deseadas y posibles fallas en la red eléctrica; provenientes del suministrador o por el propio cliente.

El diseño cuenta con los componentes enlistados a continuación:

- Inversor de CD/CA de 1.5 kW, modelo GALVO 1.5-1
- Arreglo fotovoltaico con 5 módulos solares de 400W cada uno, modelo PS400M1-24/TH
- Estructura soporte a 20°

Existen dispositivos capaces de ser monitoreados de manera remota, mostrando en tiempo real la producción generada por SFVIR, por lo que es recomendable seleccionar equipos que cuenten con estas características.

Circuitos eléctricos.

En un SFVIR existen dos tipos de circuitos, los provenientes de los módulos solares y del inversor. Ambos circuitos requieren de especificaciones eléctricas obtenidas de las fichas técnicas de los fabricantes, la cuales deben de encontrarse dentro de los rangos de operación para evitar mal funcionamiento o daños en los equipos y en la propia instalación del cliente.

Circuito de módulos solares.

El circuito de módulos solares es el resultado de conectar los 4 módulos solares en conexión serie y conectándolos de manera directa a los bornes correspondientes en el bloque de conexiones del inversor, con su respectiva polaridad. Sus características son:

- ✚ Tipo de circuito: Corriente directa (CD)
- ✚ Voltaje máximo (V_{fv}): 252.17 V
- ✚ Corriente máxima (I_{SC}): 10.37 A

Circuito del inversor

El circuito del inversor es el resultado de la producción fotovoltaica en corriente alterna a su salida y se conecta por medio de una protección contra sobre-corrientes en el circuito de distribución eléctrica del cliente. El inversor se sincroniza de manera automática con la red eléctrica proveniente del suministrador. Los valores de funcionamiento son:

- ✚ Tipo de circuito: Corriente alterna (CA)
- ✚ Voltaje de operación: 220/240V \pm 10%
- ✚ Tipo de red: monofásica (2 Φ + N)
- ✚ Corriente máxima: 6.8/6.3A
- ✚ Frecuencia: 60Hz \pm 10%

Conductores y protecciones

Para que un SFVIR pueda ser interconectado a la red eléctrica nacional, debe cumplir con los lineamientos impuestos por el suministrador de energía y las normativas vigentes impuestas por las autoridades involucradas. La norma que rige este tipo de instalaciones es la NOM001-SEDE-2012.

Los cálculos eléctricos para obtener los calibres de los conductores se simplifican en la tabla mostrada a continuación:

Circuito	Corriente máxima	Corriente corregida por Art. 690-8 (a)	Corriente corregida por Art. 690-8 (b) (2)	Factor de temperatura Art 310-15(b)(2)(a)	Factor de ajuste por agrupamiento Art. 310-15(b) (3)(a)	Corriente máxima del circuito	Calibre del conductor AWG Art. 310-15 (b)(16)	Tipo de circuito
Módulos a Inversor	10.37	12.96	16.20	1	1	16.20	12	Corriente directa (CD)
Inversor a interconexión	6.8	8.5	8.5	1	0.8	10.62	12	Corriente alterna (CA)

Tabla 2. Ampacidad y calibre de los circuitos.

El conductor se elige en base a las características físicas y eléctricas de los bornes de conexión, regularmente el rango de temperatura de las conexiones se encuentra a 75°.

Las protecciones son indispensables y su función principal es seccionar de manera segura el sistema con la instalación eléctrica del sitio, además de proteger los equipos de posibles daños.

Para determinar las protecciones contra sobre-corrientes, se toman de los valores obtenidos en la **Tabla 2**, con las siguientes consideraciones:

Circuito	Corriente del conductor	Consideraciones
Módulos a Inversor	16.20	No se requiere por Art. 690-9 (a) excepción
Inversor a interconexión	10.62	Interruptor termomagnético de 15A, dos polos 120/240V

Tabla 3. Protecciones requeridas en el SFVIR.

Resultados

Al dimensionar y diseñar un SFVIR, es necesario demostrar la generación de energía en el transcurso del día y esto puede lograrse con herramientas tecnológicas capaces de obtener la producción diaria, antes de realizar la ejecución del proyecto.

Simulación

La simulación es uno de los apartados más importantes del diseño; ya que es donde se involucran todos los cálculos, componentes y parámetros del lugar.

El objeto de la simulación es calcular la generación de energía producida por el SFVIR y compararla con la obtenida en el consumo diario, reflejado en el historial del recibo. Para este diseño la simulación es realizada por medio de una interfaz web.



Figura 5. Diseño del sitio para simulación de generación

La interfaz web es una herramienta muy completa, donde es posible simular el espacio donde se encontrará el SFVIR, insertar objetos que provoquen sombreados y modificar parámetros eléctricos, de esta manera se puede

mejorar el rendimiento del sistema; así como al agregar los componentes principales basados en los modelos propuestos en el diseño.

Al realizar la simulación, los resultados se muestran a continuación:

⚡ Annual Production			
	Description	Output	% Delta
Irradiance (kWh/m ²)	Annual Global Horizontal Irradiance	2,086.3	
	POA Irradiance	2,182.7	4.6%
	Shaded Irradiance	2,113.9	-3.1%
	Irradiance after Reflection	2,052.4	-2.9%
	Irradiance after Soiling	2,011.4	-2.0%
	Total Collector Irradiance	2,013.3	0.1%
Energy (kWh)	Nameplate	4,025.4	
	Output at Irradiance Levels	4,016.8	-0.2%
	Output at Cell Temperature Derate	3,646.8	-9.2%
	Output After Mismatch	3,459.9	-5.1%
	Optimal DC Output	3,455.6	-0.1%
	Constrained DC Output	3,399.2	-1.6%
	Energy to Grid	3,202.2	-0.2%
Temperature Metrics			
	Avg. Operating Ambient Temp		26.7 °C
	Avg. Operating Cell Temp		39.3 °C
Simulation Metrics			
	Operating Hours		4559
	Solved Hours		4559

Figura 6. Producción anual del SFVIR propuesto.

La producción anual simulada para el diseño sugerido es de 3,202.2 kWh, correspondiente a 8.77 kWh de consumo diario promedio.

Al comparar el consumo diario calculado ($C_d=9.16$ [kWh]) con el obtenido por la simulación el porcentaje de error es:

$$\%e = 1 - \frac{C_d}{C_s} = 1 - \frac{8.77}{9.16} = 4\%$$

Donde:

$\%d$ =Porcentaje de error

C_d = Consumo diario promedio

C_s = Consumo del período de facturación

El sombreado en un SFVIR provoca pérdidas considerables en la producción diaria, causadas por objetos existentes en el área a utilizar o el propio horizonte, alcanzando en este anteproyecto un 3.1%.

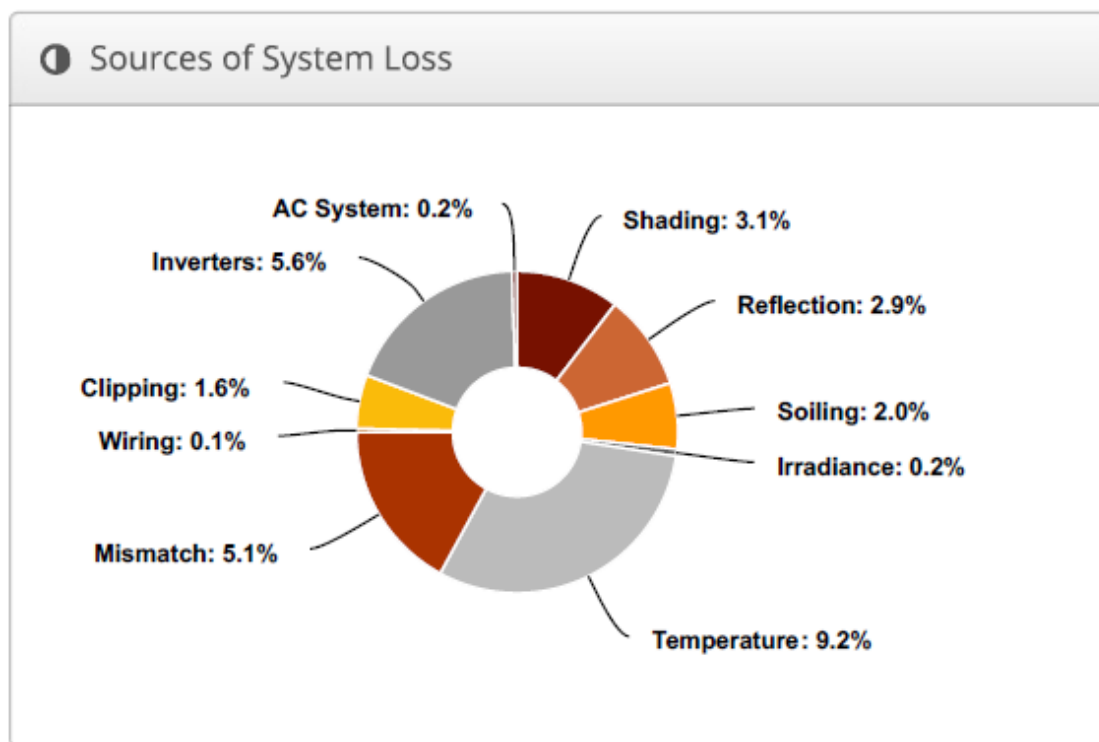


Figura 7. Pérdidas existentes en el SFVIR

Corrida financiera

El retorno de inversión es un tema atractivo para el cliente, ya que con los ahorros obtenidos con la generación de energía del SFVIR, es posible definir el tiempo en que será devuelto el gasto realizado en el proyecto.

En el mercado existe bastante diferenciación en el costo de los SFVIR, debido a la competencia, experiencia y calidad; sin embargo, es posible determinar un valor promedio que cumpla con las expectativas del cliente. Para este proyecto se maneja un precio actual de \$1.75 USD/W, por lo que el costo total para el SFVIR propuesto es de \$3,500.00 USD + IVA, con la peculiaridad de ser 100% deducible de impuestos en el primer año fiscal.

Para el retorno de inversión se considera un tipo de cambio de \$21.50, según el Diario Oficial de la Federación, inflación del 4.3%, degradación de producción de energía anual del 1%, servicios de mantenimiento y el comportamiento financiero por 10 años:

Año	Potencia del SFVIR	Producción anual kWh/año	Costo de la energía básico \$/kWh	Costo de la energía intermedio \$/kWh	Costo de la energía excedente \$/kWh	Costo DAP	Ahorro anual de energía	Ahorro anual DAP	Mantenimiento	Flujo en el año	Flujo acumulado	Tasa interna del retorno (TIR)
										-\$ 75,250.00	-\$ 75,250.00	
2020	100%	3202.2	\$ 0.75	\$ 0.87	\$ 2.98	\$ 149.59	\$ 11,177.89	\$ 897.54	-\$ 752.50	\$ 33,897.93	-\$ 41,352.07	-55%
2021	99%	3170.178	\$ 0.78	\$ 0.91	\$ 3.10	\$ 156.02	\$ 11,459.75	\$ 936.13	-\$ 784.86	\$ 11,611.03	\$ 45,508.96	-45%
2022	98%	3138.156	\$ 0.81	\$ 0.95	\$ 3.24	\$ 162.73	\$ 11,745.18	\$ 976.39	-\$ 818.61	\$ 11,902.97	\$ 23,514.00	-23%
2023	97%	3106.134	\$ 0.85	\$ 0.99	\$ 3.38	\$ 169.73	\$ 12,033.97	\$ 1,018.37	-\$ 853.81	\$ 12,198.54	\$ 24,101.51	-9%
2024	96%	3074.112	\$ 0.88	\$ 1.03	\$ 3.52	\$ 177.03	\$ 12,325.88	\$ 1,062.16	-\$ 890.52	\$ 12,497.52	\$ 24,696.06	0%
2025	95%	3042.09	\$ 0.92	\$ 1.07	\$ 3.67	\$ 184.64	\$ 12,620.64	\$ 1,107.84	-\$ 928.81	\$ 12,799.67	\$ 25,297.19	6%
2026	94%	3010.068	\$ 0.96	\$ 1.12	\$ 3.83	\$ 192.58	\$ 12,917.96	\$ 1,155.47	-\$ 968.75	\$ 13,104.68	\$ 25,904.35	10%
2027	93%	2978.046	\$ 1.00	\$ 1.17	\$ 4.00	\$ 200.86	\$ 13,217.52	\$ 1,205.16	-\$ 1,010.41	\$ 13,412.27	\$ 26,516.95	13%
2028	92%	2946.024	\$ 1.04	\$ 1.22	\$ 4.17	\$ 209.50	\$ 13,518.95	\$ 1,256.98	-\$ 1,053.86	\$ 13,722.07	\$ 27,134.34	15%
2029	91%	2914.002	\$ 1.09	\$ 1.27	\$ 4.35	\$ 218.50	\$ 13,821.86	\$ 1,311.03	-\$ 1,099.17	\$ 14,033.72	\$ 27,755.79	17%
2030	90%	2881.98	\$ 1.14	\$ 1.33	\$ 4.53	\$ 227.90	\$ 14,125.83	\$ 1,367.40	-\$ 1,146.44	\$ 14,346.80	\$ 28,380.52	18%

Tabla 4. Desglose financiero.

A lo mostrado en la **Tabla 4.**, el tiempo de recuperación de la inversión es de 5 años junto con la depreciación. Después de ese periodo y hasta los 25 años de vida del SFVIR; con una degradación en su producción del 25%, serán ahorros totales, en comparación a los anteriores.

Conclusiones

El dimensionamiento realizado y la propuesta de componentes principales del SFVIR, son calculados para abastecer el 90% del consumo total del cliente, contemplando solo las pérdidas propias del sistema. Al realizar el diseño y la simulación del sistema, las pérdidas por sombreados causados por objetos y el entorno de donde se realiza la colocación de módulos, son del 3.1%, por lo que no se puede pasar por desapercibidas las sombras en el transcurso del día en una instalación fotovoltaica.

El cálculo del consumo eléctrico promedio diario basado en el recibo de luz, con el obtenido en la simulación es del 4%. Sustrayendo las pérdidas por sombreado, con el porcentaje de error en el diseño, se tiene que la discrepancia con lo real es del 0.9%, un valor que para el tamaño de sistema no es relevante y el que puede ser causado por la temperatura ambiente del lugar. Las pérdidas por temperatura en la simulación de esta propuesta son del 9.2%.

Los SFVIR son costosos y la inversión que se requiere para obtenerlo es instantánea y recuperable en un periodo de tiempo muy prolongado, lo que hace que el retorno monetario sea lento y compensable con los ahorros reflejados en el recibo de luz al utilizar menos energía eléctrica del suministrador. Para este caso en particular el retorno de inversión llega a realizarse a los 5 años; sin embargo, el tiempo de vida del SFVIR es de aproximadamente de 30 años con degradación anual de energía del 1%.

Es posible disminuir el tamaño del sistema y por lo tanto su costo, gracias a la tarifa doméstica en que se encuentra el cliente, donde por debajo los 300 kW/h de consumo bimestral, la tarifa es subsidiada. La propuesta es generar con un SFVIR la energía excedente promedio a los 300 kW/h, de esta manera el cliente asegura pagar tarifas con subsidio y con lo generado con el sistema complementar su consumo total.

Los cálculos del diseño del SFVIR, son basados en la NOM-001-SEDE-2012, ya que son sumamente importantes para lograr interconectarse con la red eléctrica nacional; requisito por parte del suministrador de energía eléctrica, donde se demuestra en base a cálculos, que la instalación a realizar es segura; tanto para el usuario, como para la propia instalación y sus componentes.

Bibliografía

- AG, S. S. (15 de agosto de 2020). *SMA America*. Obtenido de <https://www.sma-america.com/home-systems/overview.html>
- Comisión Federal de Electricidad. (11 de agosto de 2020). *Comisión Federal de Electricidad*. Obtenido de <https://www.cfe.mx/Casa/InformacionCliente/Pages/Conoce-tu-recibo.aspx>
- Federación, D. O. (11 de septiembre de 2020). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización) : https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5280607
- FIDE. (22 de julio de 2019). *FIDEICOMISO PARA EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA*. Obtenido de http://www.fide.org.mx/?page_id=6936
- Flores Contreras, C. I. (07 de septiembre de 2020). *Conermex*. Obtenido de Conermex: <https://www.conermex.com.mx/blog-desmitificando.html>
- González G., R., Lagunas M., J., & Jiménez G., H. (2003). *Sistemas Fotovoltaicos conectados a la red*. México.
- INEGI. (25 de agosto de 2020). *INEGI*. Obtenido de Transformación de coordenadas: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/traninv/>
- LAB, F. (20 de 09 de 2020). *Helioscope*. Obtenido de Helioscope: <https://www.helioscope.com/>
- López Sancho, J. M., Moreno Gómez, E., & Gómez Díaz, M. (14 de agosto de 2020). *Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades*. Obtenido de Museo Virtual de la Ciencia: <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz9.htm>
- MEXICO, F. (06 de septiembre de 2020). *FRONIUS MÉXICO*. Obtenido de FRONIUS: <https://www.fronius.com/es-mx/mexico/energia-solar/productos/todos-los-productos/inversor/fronius-galvo/fronius-galvo-1-5-1-208-240>
- Planes, O. (22 de julio de 2020). *Energía Solar*. Obtenido de <https://solar-energia.net/>
- SEGOB. (22 de Septiembre de 2020). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: <https://www.dof.gob.mx/>
- SEGOB. (06 de septiembre de 2020). *Gobierno de México*. Obtenido de : <https://www.gob.mx/tramites/ficha/interconexion-de-centrales-electricas-con-capacidad-menor-a-0-5-mw/CFE3143>

Stackhouse, P. (31 de agosto de 2020). *NASA*. Obtenido de POWER Data Access Viewer:
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Technology, P. S. (06 de septiembre de 2020). *Phono Solar*. Obtenido de Phono Solar:
http://www.phonosolar.com/international/Products_TwinPlus.html

Yucatán, N. (28 de julio de 2020). *Novedades Yucatán*. Obtenido de <https://sipse.com/novedades-yucatan/conermex-activan-merida-megaplanta-solar-empresa-botanas-la-lupita-122376.html>