

## Simulación e implementación de prototipo de estación solar de carga eléctrica

Gloria Stephanie Cuevas Muñoz, Maximiliano Hedekel Zapata Ortega, Rodolfo Vargas Romo, Silvia Teresa Padilla Cendejas, Víctor Mazzocco Zago, José Merced Lozano García.

Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. gs.cuevasmunoz, mh.zapataortega, r.vargasromo, st.padillacendejas, v.mazzoccozago, jm.lozano@ugto.mx

### Resumen

Los sistemas empleados para la generación de energía eléctrica a partir de energía solar siguen posicionados como una tecnología muy atractiva y de gran potencial en nuestro país, debido a su facilidad de implementación, confiabilidad, cada vez más bajo costo, y enorme disponibilidad de recurso solar. En este sentido, en el presente trabajo se propone el diseño de una Estación Solar de Carga (ESC) basada en la utilización de Paneles Fotovoltaicos (PFV), y dispositivos electrónicos de potencia para la conversión de energía, con la finalidad de aprovechar de mejor manera este recurso natural, además de tratar de cubrir una necesidad de la sociedad moderna que consiste en contar con tomas de suministro eléctrico para cargas electrónicas de bajo consumo, prácticamente en cualquier lugar. Una vez diseñada, se realizaron simulaciones numéricas de los principales elementos de la ESC, con la herramienta Simulink® de Matlab, para verificar su dimensionamiento y la calidad de las señales eléctricas generadas, dado que se utilizará para el suministro de cargas no lineales principalmente. La operación de la ESC, así como la forma de onda de las señales obtenidas en simulación, se corroboraron mediante un prototipo de nivel laboratorio, construido con módulos didácticos de la marca LabVolt®. Finalmente, se llevo a cabo un análisis económico de la propuesta para determinar la factibilidad de la instalación de la ESC en la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca (DICIS), por lo que se utilizó información meteorológica de la ciudad de Salamanca para el análisis energético, así como información de la tarifaria eléctrica que se tiene contratada en la División. Los resultados obtenidos validan la instalación del sistema propuesto.

**Palabras clave:** Energías renovables, Estación solar de carga, Electrónica de potencia, Análisis económico.

### Introducción

Generar energía eléctrica a partir del uso de combustibles fósiles, con el tiempo se ha vuelto una problemática a nivel mundial debido al alza en precios de venta y a la contaminación ambiental asociada. Considerando las graves consecuencias que podría tener el seguir contaminando el planeta, diversos países han apostado por el uso de energías renovables para la generación de energía, fomentando su utilización mediante la subvención de proyectos y programas de investigación diseñados para incrementar la cantidad de sistemas instalados, así como mejorar la calidad y el potencial de estas fuentes. El Gobierno Mexicano también se ha unido a esta iniciativa buscando nuevos esquemas de generación que apoyan el uso de fuentes renovables implementando proyectos energéticos que lleven hacia la sustentabilidad energética nacional (Sánchez-Juárez, 2017). En general, todas las tecnologías basadas en fuentes renovables de energía han recibido una gran atención por ingenieros e investigadores de todo el mundo; no obstante, las tecnologías solares se han popularizado a mayor escala, al grado de haber logrado un desarrollo tecnológico muy por encima de los demás sistemas de generación. La generación fotovoltaica es el sector que más ha evolucionado debido a un crecimiento medio superior del 40% durante los últimos años, lo cual hace que esta alternativa sea competitiva en el mercado. Cabe recalcar que al utilizar un sistema de generación fotovoltaica se tendrían emisiones de dióxido de carbono de entre 25 y 32 g/KWh (Resch, 2022), una cifra relativamente baja en comparación con las centrales que utilizan combustibles fósiles. Asimismo, los sistemas fotovoltaicos (SFV) pueden operar en conexión con la red eléctrica o de manera aislada, siendo ésta una de sus principales ventajas operativas, ya que pueden ser utilizados en áreas remotas donde no es factible instalar una extensión de la red principal, o en cualquier lugar donde se requiera de suministro de energía (Messenger et al., 2017).

Por otro lado, el desarrollo tecnológico en el área de los equipos electrónicos de comunicación como computadoras personales, teléfonos celulares, tabletas digitales, etc., han modificado el estilo de vida de la sociedad moderna. Estos dispositivos se han convertido en elementos esenciales en la vida diaria de cualquier persona. Bajo este escenario, el abastecimiento de energía eléctrica que requieren este tipo de equipos para su operación es una problemática actual a la que se enfrentan los desarrolladores de tecnologías, y para la cual se han propuesto soluciones con un enfoque hacia el mejoramiento de los sistemas de almacenamiento de energía. Sin embargo, la necesidad de contar con tomas de suministro prácticamente en cualquier lugar sigue siendo una demanda social que no ha sido atendida por completo.

En este sentido, empresas como Strawberry Energy en Europa (Strawberry Energy, 2022), ha propuesto varios productos bajo el concepto de Estaciones Públicas de Carga (EPC), basadas en PFV aislados, y han logrado comercializarlos en varios países. En México, este tipo de tecnologías aun no son utilizadas de forma masiva, a pesar del extenso conocimiento que se tiene de sus beneficios y de las excelentes condiciones climatológicas con que se cuenta. Por este motivo, y tratando de contribuir con el desarrollo tecnológico nacional, en el presente trabajo se propone el diseño, simulación e implementación a nivel prototipo, de una Estación Solar de Carga. La propuesta de la ESC se hace para su instalación en una institución educativa de nivel superior, donde para la comunidad estudiantil el contar con tomas de suministro eléctrico en cualquier área común sería muy cómodo y benéfico desde el punto de vista productivo. Finalmente, se incluye un análisis económico que permite validar la factibilidad de la propuesta y que permite cuantificar los beneficios económicos que se tendrían, además de los beneficios ambientales inherentes a este tipo de tecnologías.

## Concepto de la ESC

Una Estación Solar de Carga, Figura 1, se puede considerar como un sistema fotovoltaico aislado que genera y provee energía eléctrica en la forma de Corriente Directa (CD) y Corriente Alterna (CA), para recarga rápida de diferentes equipos eléctricos/electrónicos o baterías eléctricas. Normalmente, el voltaje que genera en CD es de 12 V y en CA de 127 V, estos voltajes se generan a través de un convertidor de energía.



Figura 1. Estaciones de Carga.

En el mercado existen empresas como Green Energy, Ambiente Soluciones, Bticino, Renovar Energía, ArchiExpo, ZANO y Elyr, entre otras, que comercializan ESC's. La mayoría de estas empresas incluyen únicamente el PFV con la batería, el cableado hacia los estantes de carga, collarín de montaje y puertos USB o tipo C; sin embargo, el poste de montaje, así como los bancos o elementos para sentarse y hacer uso de la estación, los venden por separado.

Los dispositivos fundamentales, y a tomar en cuenta para el diseño de la ESC son los siguientes:

- i) **Panel Fotovoltaico o Solar.** Un panel solar es un dispositivo diseñado para la producción de energía eléctrica partir de la conversión de la radiación solar, gracias al efecto fotovoltaico. Normalmente, este tipo de dispositivo están compuestos por Silicio y aprovechan la energía de los fotones presentes en la luz solar para hacer saltar un electrón en un átomo de Silicio. La suma de varios electrones es lo que

provoca el flujo de una corriente eléctrica (Zeman, 2012). Los PFV generan electricidad en CD, por lo que generalmente requieren convertidores electrónicos de potencia, ya sea para regular el nivel el voltaje de CD generado o para generar señale eléctricas en CA. Los PFV pueden construirse de Silicio monocristalino o Silicio Policristalino, Figura 2, teniendo los primeros una mayor eficiencia (17 a 22%), mayor vida útil y mantenimiento de sus propiedades.



Figura 2. (Izquierda) Panel monocristalino. (Derecha) Panel policristalino.

- ii) *Baterías*. Las baterías de ciclo profundo para paneles solares almacenan la energía generada por los PFV a través reacciones químicas, para ser utilizada durante los periodos en que no hay energía solar u otra fuente de energía. Este tipo de baterías están diseñadas para descargarse casi en su totalidad y, de forma regular, entregar entre 50% y 80% de su capacidad. Conforme a su espectro estructural, estas baterías tienen las placas y separadores de mayor grosor y están constituidas por combinaciones de los siguientes elementos: Ion-Litio, Plomo Ácido, Níquel-Hidruro de meta y Níquel-Cadmio (Zeman, 2012).
- iii) *Inversor solar*. Los inversores solares fotovoltaicos son equipos que se encargan de transformar la energía producida en una instalación fotovoltaica, que se genera en forma de CD, a CA para suministro de cargas eléctricas convencionales. Se pueden encontrar distintos tipos de inversores como los inversores de onda senoidal, utilizados para cargas domesticas de baja potencia, o los inversores de onda senoidal modificada, empleados para cargas que disponen de motores eléctricos como bombas de agua o equipos industriales como tornos, taladros, etc.

## Desarrollo de la ESC

### A. Diseño de la ESC

En general, la finalidad de diseñar una ESC es para aprovechar la energía solar para generar energía eléctrica, reduciendo de esta manera un poco el costo por concepto de consumo de energía y la emisión de contaminantes, pero, además, se espera contar con un sistema cómodo y útil para a comunidad estudiantil de la DICIS. Por esta razón, lo que se propone tener como producto final es una ESC que tenga incorporada una mesa de trabajo, en donde los estudiantes puedan conectar sus dispositivos/equipos electrónicos y a la vez tener un espacio para realizar sus actividades académicas, aprovechando además la sombra que proporcionarán los paneles utilizados.

Para el diseño de la ESC se opta por un estilo sencillo que reduzca la utilización de materiales para que resulte económico en su construcción, tal y como se muestra en la Figura 3. Para este diseño se tomaron en cuenta las condiciones de la ubicación geográfica elegida, considerando la latitud en la que se encuentra la DICIS (20.507316) se calcula el ángulo de inclinación al que se pondrán los paneles. Además, considerando el comportamiento del sol en esa zona, se opta por que el panel solar tenga su dirección hacia el sur.

Para el arreglo del sistema fotovoltaico propuesto, se considera la utilización de dos paneles de 330 W conectados a un inversor con capacidad para 700 W, que generará un voltaje de salida en CA de 110 V. A las terminales de salida del inversor se conectar directamente 4 contactos eléctricos empotrados a la mesa de trabajo. En la Figura 4 se presenta esquemáticamente la interconexión entre cada uno de los elementos considerados para la ESC, desde la captación irradiancia solar, hasta los contactos eléctricos a utilizar por el usuario.

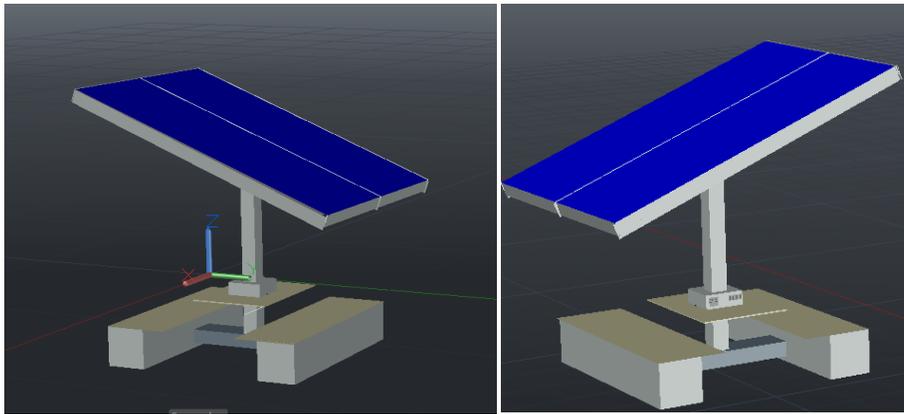


Figura 3. Vistas del diseño en 3D de la ESC propuesta.

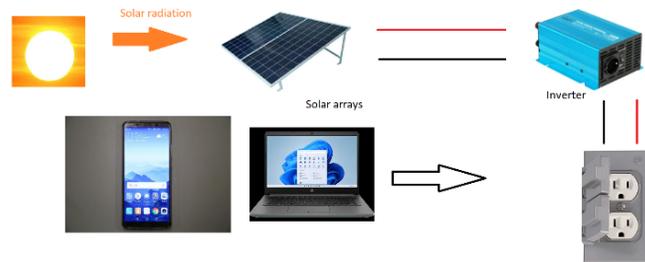


Figura 4. Esquema de la interconexión de los elementos en la ESC.

## B. Simulación de la ESC

Para la realización de la simulación numérica de la ESC que se desea implementar, se utilizó la herramienta Simulink® de Matlab, la cual permite determinar el comportamiento del sistema a partir del análisis de las señales generadas. La ventaja de este tipo de programas computacionales es que contiene modelos matemáticos relativamente precisos tanto de equipos/dispositivos eléctricos y electrónicos, y esto hace posible tener una idea muy cercana del tipo de señales que se obtendrán con una implementación real. Un diagrama del sistema simulado se exhibe en la Figura 5.

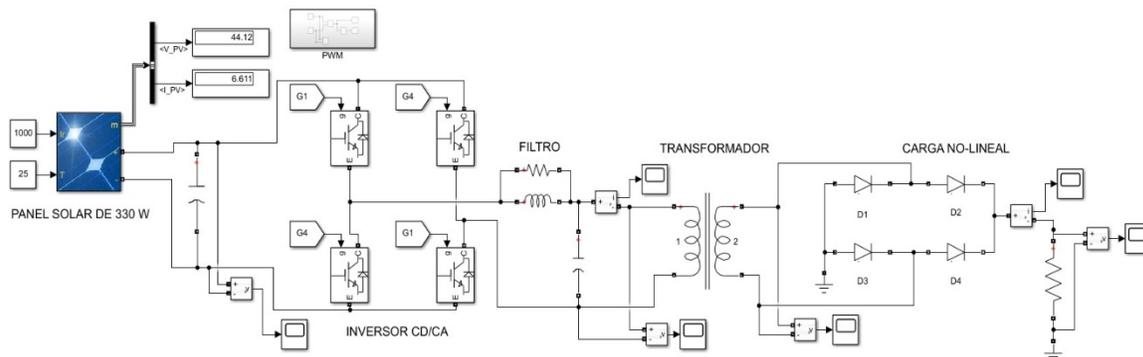


Figura 5. Esquema para la simulación del ESC en Simulink® de Matlab.

Primeramente, en la simulación se configuró el modelo de PFV que cumpliera con las características del módulo solar considerado para la aplicación. A continuación, se coloca un capacitor entre el modelo del PFV y el inversor, Figura 5, debido a que se requiere un elemento que fije el voltaje en las terminales del PFV a no incluir un modelo de batería. Para la simulación se consideran las condiciones de prueba estándar para el

panel, que son, 1 kW/m<sup>2</sup> de irradiancia y 25 °C de temperatura, para corroborar los valores nominales de los parámetros eléctricos del PFV.

Un elemento fundamental para la operación completa de la ESC es el inversor de voltaje. Este dispositivo se encarga de generar señales eléctricas en CA a partir del voltaje en CD generado por el PFV, por lo que determina la calidad de las señales de suministro, y por ende, el comportamiento de las cargas conectadas a la ESC. El inversor considerado opera bajo una técnica de modulación denominada Modulación por Ancho de Pulso (PWM, por sus siglas en inglés). Básicamente, la técnica PWM empleada en inversores de voltaje se encarga de controlar las conmutaciones de los interruptores que conforman el inversor, y de esta manera, controlan la ganancia del dispositivo y la forma de onda de su voltaje de salida. El criterio de operación de la estrategia PWM consiste en la comparación de dos señales, una señal moduladora (senoidal) de baja frecuencia, y una señal portadora (triangular) de frecuencia elevada, de tal forma que, cuando la señal moduladora es mayor que la señal portadora, se genera un pulso igual a un 1 lógico, mientras que, cuando la señal moduladora es menor que la señal portadora, se genera un pulso igual a un 0 lógico (Mohan et al., 1995).

Las señales empleadas para la modulación en la simulación tienen las siguientes características: *i) señal moduladora*, señal sinusoidal de amplitud unitaria con una frecuencia de 60 Hz, y *ii) señal portadora*, señal triangular de amplitud unitaria y frecuencia igual a 17 kHz. Dado que la frecuencia de la señal portadora determina la frecuencia de conmutación de los interruptores, en este caso los interruptores conmutarían a 17 kHz. Los bloques utilizados para la generación de las señales moduladora y portadora, y para implementar la lógica del esquema PWM, se muestran en la Figura 6, así como las señales generadas.

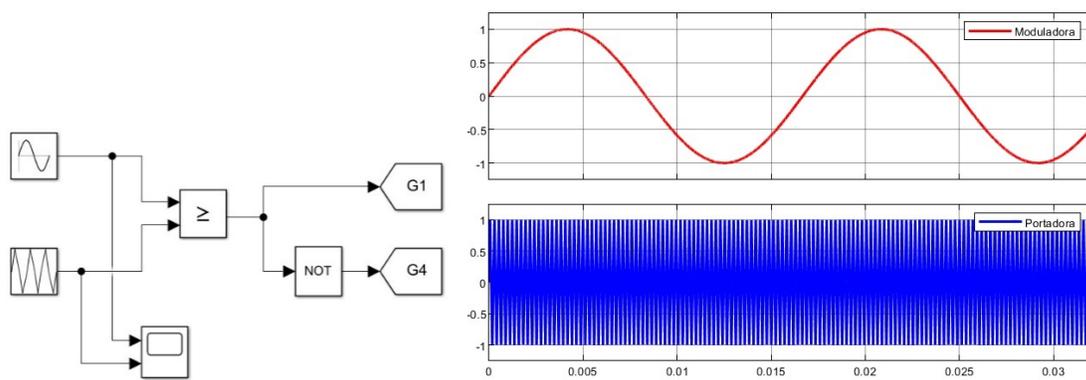


Figura 6. (Izquierda) Implementación del esquema PWM. (Derecha) Señales moduladora y portadora.

Como se observa en la Figura 5, como inversor se implementó un puente H conformado por 4 transistores IGBT y un diodo en anti-paralelo. Las señales de conmutación generadas por la estrategia PWM serán utilizadas para controlar la operación de los IGBTs. Como se mencionó anteriormente, la frecuencia de la señal portadora establece la frecuencia de conmutación y los interruptores, mientras que la frecuencia y forma de onda de la señal moduladora determinan el voltaje de salida del inversor. En este caso, se espera tener un voltaje a la salida del inversor con un contenido energético variante en tiempo de acuerdo con la forma sinusoidal de la señal moduladora, de 60 Hz, y con una componente fundamental determinada por la ecuación (1),

$$V = V_{cd} \cdot M \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

donde  $V_{cd}$  es el voltaje de CD a la entrada del inversor,  $M$  es la relación entre la amplitud de la señal moduladora y la señal portadora,  $\omega$  es la frecuencia angular y  $\theta$  es el ángulo de fase de la señal moduladora, respectivamente.

El espectro armónico del voltaje de salida del inversor además de la componente fundamental incluye una sumatoria de componentes armónicos cuyas frecuencias serán múltiplos enteros de la frecuencia de la señal portadora, por esta razón, es necesario conectar un filtro pasivo a la salida del inversor. En este caso se consideró un filtro de segundo orden, diseñado para una frecuencia de corte de 1 kHz. El circuito utilizado para el diseño del filtro se presenta en la Figura 7. La función de transferencia que resulta del análisis del circuito está dada por la ecuación (2),

$$H(s) = \frac{sL+R}{s^2RLC+sL+R} \quad (2)$$

donde  $R$ ,  $L$  y  $C$  son los valores del resistor, inductor y capacitor, respectivamente, que conforman el filtro.

En cuanto a la frecuencia de corte, ésta se determina a partir de la siguiente ecuación,

$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Para una frecuencia de corte de 1kHz, se eligen los siguientes valores para los elementos del filtro:  $R = 50 \Omega$ ,  $L = 5.06 \text{ mH}$  y  $C = 5 \mu\text{F}$ . En la Figura 7, se observa el comportamiento del filtro en el dominio de la frecuencia, para los valores seleccionados, y resulta evidente que servirá para mitigar los componentes armónicos del voltaje de salida del inversor, que serán de 17, 34, 51, etc., kHz.

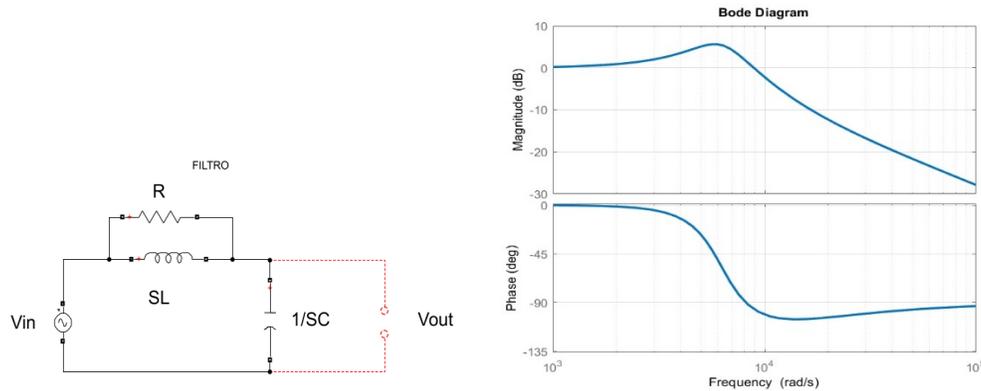


Figura 7. (Izquierda) Circuito del filtro de segundo orden. (Derecha). Comportamiento del filtro en el dominio de la frecuencia

A la salida del filtro se conecta un transformador elevador, con una relación de transformación de 1:4, para aumentar el nivel del voltaje en CA, ya que para las cargas se requiere un voltaje de 110 Vrms. Asimismo, se incluye en la simulación una carga no-lineal constituida por un rectificador monofásico de onda completa y una resistencia, para representar el adaptador de cualquier dispositivo electrónico que se encarga de convertir el voltaje de CA a CD. En la simulación se evita incluir el transformador reductor que normalmente incluyen estos adaptadores, ya que solo se requiere comprobar el dimensionamiento y comportamiento de la ESC ante este tipo de cargas.

Es importante mencionar que en este primer prototipo de la ECS se ha decidido utilizar solamente salidas en CA con el mismo nivel estándar de voltaje, pensando en que los usuarios utilizarán los adaptadores convencionales de sus aparatos electrónicos. No obstante, se considera como trabajo futuro incorporar convertidores CD/CD a la ESC para contar con un suministro híbrido y que brinden salidas en CD para voltajes estándar de 5 Vcc y 12 Vcc, y evitar así la doble conversión de energía.

### C. Implementación del prototipo de la ESC

La implementación del prototipo experimental se realiza mediante los módulos didácticos del LabVolt® contenidos en el sistema 'Home Energy Production Training System'. En la Figura 8, se pueden observar los módulos de los elementos requeridos para implementar el sistema ECS-carga no-lineal, simulado y expuesto en la Figura 5. Una imagen del prototipo del sistema interconectado se observa en la Figura 9, junto con una imagen del software *LVDAC-EMS aplicación estándar*, utilizado para el control del inversor y la adquisición de parámetros medidos en el sistema.

## Resultados

### A. Resultados de simulación y pruebas experimentales

Una vez implementada la simulación del sistema mostrado en la Figura 5, se obtienen las gráficas presentadas en la Figura 10. La gráfica de la izquierda muestra la señal de voltaje obtenida a la salida del inversor antes de ser filtrada, por lo que aun presenta un nivel de distorsión armónica considerable, ya que es un voltaje formado por los pulsos generados por la conmutación de los IGBTs sobre el voltaje constante del PFV. En esta gráfica se observa el tipo de forma de onda logrado con la estrategia PWM, que como se

mencionó anteriormente, contiene un espectro armónico formado por componentes de frecuencias múltiples de la frecuencia de conmutación, en este caso 17 kHz.



Figura 8. (a) Panel fotovoltaico de Silicio monocristalino. (b) Inversor de IGBTs. (c) Interfaz de control y adquisición de datos. (d) Capacitores/Inductores para filtrado. (e) Cargas resistivas. (f) Fuente trifásica de CA/CD variable. (g) Rectificador de diodos.



Figura 9. (Izquierda) Sistema ECS-carga no-lineal interconectado. (Derecha). Monitore de software para control del inversor y adquisición de parámetros medidos.

Además, es posible comprobar que la amplitud de los pulsos del voltaje de salida depende del voltaje de CD generado por el PFV, que en este caso es de 45 V en circuito abierto. Por otro lado, la gráfica del lado derecho muestra una señal de voltaje con forma de onda predominantemente sinusoidal, lo que deja en claro la adecuada operación del filtrado. De esta manera, es posible concluir que al conectar el filtro pasivo a la salida del inversor es posible obtener señales de voltaje de buena calidad en los contactos de la ECS, y con esto se evita el tener que adquirir un inversor con filtrado interno, aspecto que generalmente incrementa el costo

del inversor en las aplicaciones fotovoltaicas. Además, se observa la acción elevadora del transformador utilizado, ya que la amplitud del voltaje llega a un nivel de 157 V pico, equivalentes a 111 Vrms, lo que cumple con el diseño de la ESC

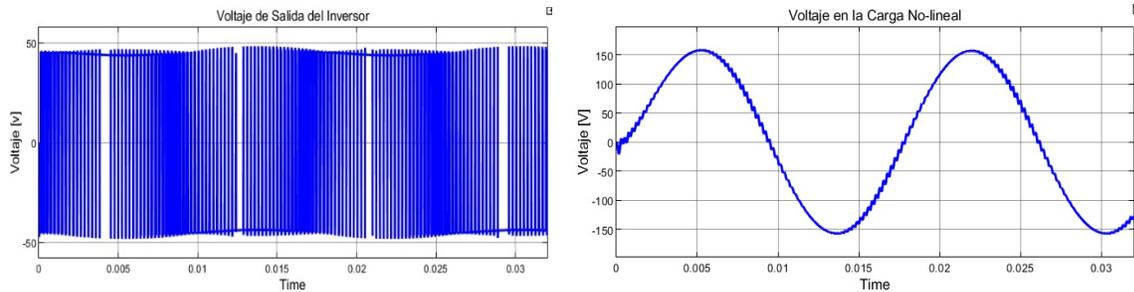


Figura 10. Señales obtenidas del sistema ECS-carga no-lineal simulado. (Izquierda) Voltaje a la salida del inversor. (Derecha) Voltaje en las terminales de la carga no-lineal.

Por otro lado, las señales obtenidas a partir del prototipo experimental del sistema ECS-carga no-lineal y monitoreadas en el osciloscopio, se muestran en las Figuras 11 y 13. La Figura 11 exhibe la señal del voltaje medida en las terminales de salida del inversor, antes de la etapa de filtrado, a partir de la cual se puede apreciar la forma de onda característica de las señales moduladas por PWM. Para la medición se utilizó un transductor de relación 30:1, y el osciloscopio configurado como 1 V/div y 5 ms/div, la frecuencia de conmutación utilizada fue de 17 kHz, mientras que la frecuencia de la señal moduladora fue de 60 Hz y se utilizó un índice de modulación del 100%. Además, se utilizó como entrada para el inversor un voltaje continuo de 48 V, de acuerdo con el PFV considerado, por lo que la señal mostrada en la Figura 11 es aún de bajo voltaje. Dado que no se contaban con un módulo de transformador elevador, se decidió alimentar la carga no-lineal con este bajo voltaje, simplemente para comparar las formas de onda de las señales obtenidas mediante la simulación.

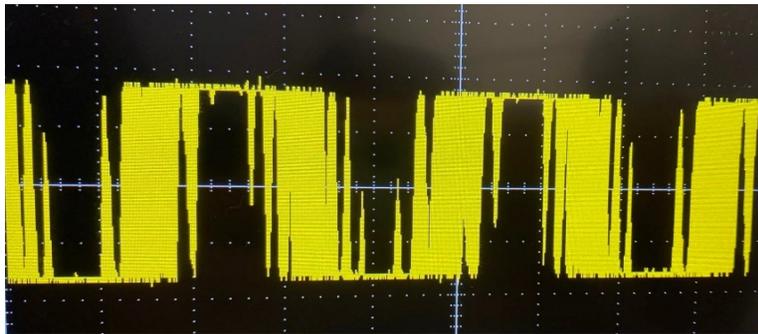


Figura 11. Voltaje medido en las terminales de salida del inversor antes de la etapa de filtrado

En la Figura 12 se presenta el espectro armónico de la señal de voltaje antes de la etapa de filtrado, obtenido con la función de Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) del osciloscopio., el cual estaba configurado en 10 dB/div y 12.5 KHz/div. A partir de la figura se puede corroborar que los armónicos presentes en la señal de voltaje generado por el inversor y la estrategia PWM, contienen componentes armónicos a la frecuencia de conmutación y sus múltiplos enteros (17 kHz, 34 kHz, 51 kHz, etc.).

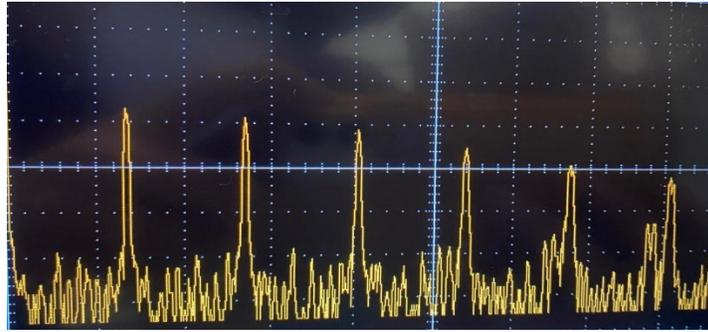


Figura 12. Espectro armónico de la señal de voltaje antes de la etapa de filtrado.

Finalmente, en la Figura 13 se presenta la señal de voltaje después de la etapa de filtrado. Es evidente que se ha reducido considerablemente el contenido armónico y que la componente sinusoidal fundamental de 60 Hz es totalmente predominante. En este punto, es importante señalar que se utilizó el módulo de filtrado del LabVolt® con valores fijos de inductancia y capacitancia, por lo que no se obtuvo la operación de filtrado esperada, adiferencia de la simulación. Sin embargo, se puede concluir que las señales obtenidas tanto en la simulación como en la implementación experimental mantienen el mismo comportamiento, por lo que, técnicamente se verifica la factibilidad de la implementación de la ECS propuesta.

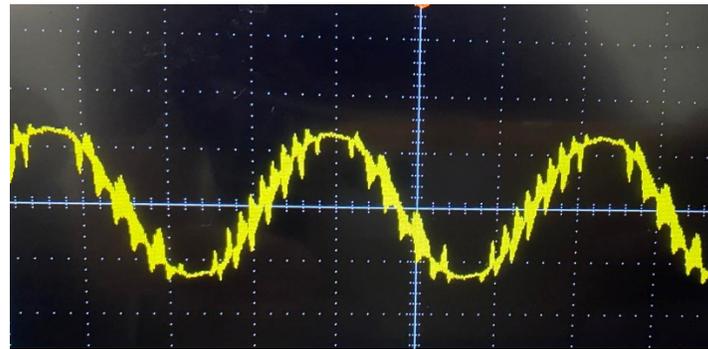


Figura 13. Voltaje medido después de la etapa de filtrado.

## B. Análisis económico y resultados

Una vez concluido el análisis técnico de la ECS propuesta, y habiendo verificado su factibilidad operativa, se da paso a la evaluación de la viabilidad económica del proyecto, para estimar que tan rentable puede llegar a ser la ECS, considerando su construcción e instalación física en la DICIS.

A partir de una base de datos con valores de irradiancia solar captada cada hora durante diez años sobre la ciudad de Salamanca, proporcionada por el Centro de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Guanajuato, se realizó la caracterización de irradiancia solar sobre la ubicación en donde se desea instalar la ECS durante un año promedio. De esta manera, es posible determinar una estimación de la cantidad de energía eléctrica que producirá la ECS durante cada hora del año promediado, y sobre todo de la energía aprovechada por los usuarios, por lo que, para este análisis se tomaron en cuenta cada día de cada mes, a excepción de los fines de semana (sábado y domingo), debido a la nula actividad en las instalaciones de la DICIS. Considerando que la ECS incluye dos paneles de 1.940352m<sup>2</sup> de área efectiva, con una eficiencia de 17.01%, y una potencia nominal de 330 W, mediante la ecuación (3) es posible determinar la potencia generada por la estación (Herrera-Salcedo, 2013),

$$P = \eta AG \quad (4)$$

Donde P es la potencia máxima generada,  $\eta$  es la eficiencia del panel, A es el área de incidencia y G representa la irradiancia. Con esta relación se obtiene la potencia generada por la ECS, y al multiplicar por el tiempo de generación se determina la energía.

A continuación, se analiza el esquema de facturación utilizado por Comisión Federal de Electricidad (CFE) para estimar la rentabilidad para la estación de carga. Como referencia para los cálculos se utiliza la información de la tarifa GDMTH (Gran Demanda en Media Tensión Horaria), dado que es la tarifa contratada por la DICIS. Este dato es muy relevante para el estudio, ya que a partir de este se pueden determinar las variaciones del costo de la energía durante el día, en cada temporada, y esto a su vez permite hacer estimaciones del ahorro económico real que se tendría durante la vida útil de los PFV. La Tabla 1 da a conocer la energía generada, así como el ahorro económico que se tendría para cada mes, y el total para el año promedio.

Sabiendo que los paneles tienen una estimación de vida para 25 años en operación, se hace una proyección de ahorro a futuro si se utiliza la estación. Es importante mencionar que los PFV tienen un porcentaje de degradación que se va incrementando conforme se acercan al final de su vida útil; no obstante, al ser un porcentaje relativamente bajo, en el presente trabajo se considerará que la generación es la misma durante toda su vida útil. Asimismo, tomando en cuenta que los valores de irradiancia se obtuvieron como los valores promedios de una base de datos de 10 años, podemos estimar que se tendrá un valor similar durante los próximos 20 años, por lo que también se consideran los mismos valores utilizados para el año promedio, en el cálculo proyectado de la energía generada durante los siguientes 24 años. Asumiendo las consideraciones mencionadas, los valores de la tabla 1 se pueden utilizar para obtener una proyección de producción de energía y ahorro económico durante los 25 años de vida útil del PFV, llegando a un total de 23,499.15 kWh generados, lo que corresponde a un ahorro económico de \$38,377.05 MXN.

Para determinar la amortización económica del prototipo propuesto es necesario conocer la inversión inicial, Tabla 3, con lo cual se definirá el tiempo en que se cubrirá este gasto.

**Tabla 1.** Datos energéticos y económicos

Mes	Energía (kWh)	Ahorro en la factura (MXN)
Enero	64.77	101.32
Febrero	69.567	109.52
Marzo	96.37	152.12
Abril	92.479	150.58
Mayo	85.838	140.36
Junio	90.953	153.78
Julio	91.247	152.67
Agosto	77.757	129.87
Septiembre	76.671	125.44
Octubre	70.464	115.01
Noviembre	66.448	109.16
Diciembre	57.402	95.19
<b>Total</b>	<b>939.966</b>	<b>\$ 1,535.08</b>

**Tabla 3.** Inversión total en la construcción de la ECS

Inversión Inicial			
Cantidad	Elemento	Especificaciones	Costo (MXN)
2 PZAS	Panel Solar	Policristalino de 330 W	7,160.00
1 PZAS	Inversor de energía solar	Capacidad de 700 W, @ 48 V DC a 110 V AC	1,340.87
10 ft	Cables de conexión	Rojo y negro, calibre 10 AWG	1,040.00
4 PZA	Contactos	Sencillo de 2 polos	104.00
4 PZA	Placa de protección	Placa de intemperie	92.00
1 PZA	Capacitor	5 $\mu$ F	13.18
1 PZA	Inductor	5 mH	90.00
2 PZAS	Silla Banca Industrial desarmable	Banca de madera y metal diseñada para exteriores e interiores	2,796.00
1 PZA	P.T.R. 4"	Calibre 7, 6 mts	3,150.00
10 kg	Soldadura	6013 1/8 kg	660.00
1	Mesa de madera	-	1,290.00
<b>Total</b>			<b>17,736.05</b>

Después de observar el presupuesto determinado para la construcción de la ESC, se proponen dos alternativas posibles para la implementación de la estación, la primera opción incluye básicamente el servicio del sistema fotovoltaico individual, considerando que se aplica la instalación fotovoltaica en una estructura que ya se posee y solo requiere de una fuente de energía. La segunda opción consiste en el servicio completo, donde se instala también la mesa de trabajo como parte de la ECS. La propuesta de las opciones mencionadas es simplemente para hacer notar que la recuperación económica del proyecto depende únicamente de la instalación fotovoltaica, y que la mesa de trabajo es un servicio adicional que se brindaría al usuario, al igual que como lo hacen algunas de las empresas que ofrecen estos productos.

Así, conociendo la inversión requerida para cada una de las alternativas mencionadas, es posible calcular de manera simple cual sería el tiempo en que el financiamiento del proyecto se liquida, simplemente hay que dividir el costo del capital invertido entre la cantidad del recurso ahorrado durante un año.

$$\text{Tiempo de recuperación opción 1: } \frac{\$9,840.05}{\$1535.081/\text{año}} = 6.41 \text{ años} \quad (5)$$

$$\text{Tiempo de recuperación opción 2: } \frac{\$17,736.05}{\$1535.081/\text{año}} = 11.56 \text{ año} \quad (6)$$

Posterior, al cálculo del tiempo de recuperación se puede determinar el ahorro económico total para el cliente. Dado que se tiene una retribución monetaria hasta los 25 años de vida útil de los PFV, la utilidad del sistema está dada por la diferencia entre el ahorro económico por concepto de la producción de energía de los PFV en su tiempo de vida útil, menos la inversión inicial. Las relaciones (7) y (8) muestran la utilidad para cada alternativa propuesta:

$$\begin{aligned} \text{Utilidad del sistema a 25 años opción 1:} \\ \$38,377.03 - \$9,840.00 = \$28,537.03 \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Utilidad del sistema a 25 años opción 2:} \\ \$38,377.03 - \$17,736.05 = \$20,640.98 \quad (8) \end{aligned}$$

Por cada estación solar implementada se pronostica una utilidad de \$28,537.03 MXN y \$20,640.98 según sea el caso, con esto se corrobora que no existirían pérdidas en especie por implementar la ECS, sino que se reduce un poco el monto a pagar por concepto de consumo de energía eléctrica.

## Conclusiones

Gracias a la atención que ha recibido la generación de energía por medios fotovoltaicos, y a la gran cantidad de desarrollos tecnológicos propuestos en ésta área, con el paso del tiempo los precios en el mercado se han vuelto más accesibles, facilitando la implementación de este tipo de sistemas a cualquier escala. Ventajas como el que no requieran de un constante mantenimiento, y que su implementación sea relativamente simple, al grado de que en el mismo lugar que se instalan se genera y se aprovecha el recurso, los hacen muy atractivos para lugares con gran potencial solar como México. Por esta razón, y buscando contribuir con propuestas tecnológicas que fomenten la utilización de los recursos renovables, que además atiendan una problemática de la sociedad moderna, es que en este trabajo se propuso el diseño, simulación e implementación de un prototipo de Estación Solar de Carga, para su instalación en la DICIS. La propuesta partió del diseño en un software de dibujo en 3D, tomando como bases propuestas ya comerciales en otros países, pero adaptándolas a las necesidades de los posibles usuarios, considerando la ubicación geográfica del lugar propuesto para su instalación, y con el objetivo de obtener un sistema de bajo costo. El diseño inicial permitió el dimensionamiento del sistema y la estimación de la inversión.

Para verificar la operación de la ESC ante las cargas no-lineales a las que se estará suministrando energía, así como para corroborar el dimensionamiento, se realizaron algunas simulaciones numéricas con la herramienta Simulink® de Matlab. Los resultados obtenidos en esta etapa dejan en claro que el elemento central en la operación de la ESC, y que es posible, en una siguiente etapa del proyecto, desarrollar como tecnología propia tanto la topología de este, como su control y etapa de filtrado, esto con la finalidad de disminuir el costo total del sistema. Por otro lado, las pruebas realizadas en Lab-Volt, corroboran los resultados obtenidos en simulación y la viabilidad técnica de la propuesta.

Como última etapa se realizó un análisis de factibilidad económica para el proyecto, concluyendo que además de los beneficios ambientales, inherentes a estas tecnologías, que se obtendrían, desde el punto de vista económico, se tendría un ahorro a largo plazo tras su instalación. Aunque la inversión inicial sería considerable si se instalarán varias estaciones, el retorno individual se daría a los 6 años de su instalación, para el sistema fotovoltaico y a 11 años para la ESC completa. En este punto, es importante señalar que en instituciones educativas como la DICIS, el contar con equipamiento para áreas comunes es imperativo, por lo que la ESC propuesta serviría para mejorar el aprovechamiento de recursos. Finalmente, es importante mencionar que a partir de los valores en utilidad que se generan durante el tiempo de vida estimado, se puede considerar la ESC propuesta tiene gran potencial para su instalación en escuelas, parques, áreas recreativas, etc., y contribuir de esta manera con las metas nacionales en el sector energético dirigidas hacia la utilización de las energías renovables a gran escala.

## Referencias

- Sánchez-Juárez, A., Martínez-Escobar, D., Santos-Magdaleno, R. de la L., Ortega-Cruz, J., y Sánchez-Pérez, P. A. (2017). Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial. Instituto de Energías Renovables, UNAM.
- Resch R. (2022). La promesa de la energía solar: Estrategia energética para reducir las emisiones de carbono en el siglo XXI, Naciones Unidas, <https://www.un.org/es/chronicle/article/la-promesa-de-la-energia-solar-estrategia-energetica-para-reducir-las-emisiones-de-carbono-en-el#>.
- Messenger, R., & Abtani, A. (2017). Photovoltaic Systems Engineering. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Strawberry Energy. (Julio 22, 2022). <http://www.strawberrye.com>.
- Zeman, M. (2012). Photovoltaic Systems. Delft University of Technology.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (1995). Power Electronics: Converters, Applications and Design. John Wiley and Sons.
- Herrera-Salcedo, R. (2013). Modelado y caracterización de paneles fotovoltaicos [Tesis de Maestría]. Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2338/1/ROBERTO%20HERRERA%20SALCEDO.PDF>