

## Instalación y evaluación preliminar de un Sistema Fotovoltaico en Zona Costera

COLORADO-GARRIDO, Darío\*†, HERRERA-ROMERO, José, CANELA-NIEVES, Felipe de Jesús y ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris’.

*Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos, Av. Universidad km 7.5, Col. Santa Isabel, C.P. 96535, Coatzacoalcos, Veracruz, México.*

*‘Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables, Universidad Veracruzana, Av. Universidad km 7.5, Col. Santa Isabel, C.P. 9535. Coatzacoalcos, Veracruz, México.*

Recibido Julio 11, 2016; Aceptado Septiembre 1, 2016

### Resumen

Este trabajo presenta la instalación de un sistema fotovoltaico (SFV) de 3.5 kW de generación, para el suministro de energía eléctrica en la Universidad Veracruzana, campus Coatzacoalcos, con el objetivo de buscar una forma alternativa de abastecimiento parcial y económicamente viable. El SFV consta de: 14 módulos de 250W montados sobre una estructura de acero galvanizado, un inversor bifásico, además del equipo de protección eléctrico. Para una mejor generación de energía a lo largo de un año, la instalación del SFV se coloca con una orientación hacia el sur geográfico en un equinoccio de primavera. Una vez instalado, para la toma y análisis de datos, se utiliza un analizador de redes eléctricas, tomando una semana de mediciones a la salida del inversor, y posteriormente se analiza una semana a la entrada del inversor. De las mediciones realizadas, se comprueba que el SFV puede alcanzar hasta 5.5 kW durante las horas de mayor radiación, lo que comprueba que la zona es altamente factible para la instalación de SFV.

**Energías alterna, orientación de paneles solares, factibilidad de instalación, energía solar**

### Abstract

This paper presents the installation of a 3.5 kW photovoltaic system (PVS) for the supply of electricity at the Universidad Veracruzana, campus Coatzacoalcos, in order to seek an alternative form of partial sourcing and economically viable. The PVS consists of 14 modules mounted on a galvanized steel structure, a two-phase inverter and electrical protection equipment. For better power generation over a year, the installation is placed with an orientation towards geographic south in a spring equinox. For the collection and data analysis, a power analyser is used, taking a week of measurements at the inverter output, and then a week at the inverter input. From the measurements, it is found that the PVS can reach up to 5.5 kW during peak hours radiation, which proves that the area is highly feasible for installation of the PVS's.

**Alternative energy, solar panel orientation, feasibility of installation, solar energy**

**Citación:** COLORADO-GARRIDO, Darío, HERRERA-ROMERO, José, CANELA-NIEVES, Felipe de Jesús y ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris. Instalación y evaluación preliminar de un Sistema Fotovoltaico en Zona Costera. Revista de Investigación y Desarrollo 2016, 2-5: 32-41

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: vidherrera@uv.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Desde hace algunos años, el mundo está acosado por una crisis energética debido al desabasto de las reservas mundiales de petróleo que se utilizan como recursos energéticos, frente a esta crisis energética ha surgido la necesidad de aprovechar las fuentes de energía disponibles, dentro de las cuales se encuentran las energías renovables, como la energía solar.

Incluida entre la energía obtenible por la radiación solar esta la energía fotónica o fotovoltaica, donde las celdas fotovoltaicas permiten transformar directamente en electricidad la energía de parte de los fotones que componen el espectro visible de la luz solar, gracias a los materiales semiconductores que están construidas dichas celdas, cuya conductividad se incrementa cuando son alcanzados por los fotones pertenecientes a la radiación solar visible que alcanza la superficie de la Tierra.

Si los fotones que inciden sobre la superficie del semiconductor poseen energía suficiente, son absorbidos por el material y transfieren su energía a los electrones que forman parte de los orbitales enlazantes del semiconductor. Los electrones liberados se mueven caóticamente a través del semiconductor. Lo mismo sucede con los 'huecos' o falta de electrones que quedan tras romperse el enlace. La carga eléctrica de los huecos es positiva ya que se generan en un punto donde se ha separado un electrón. Los huecos actúan como una trampa que atrae a los electrones situados en enlaces contiguos. Cuando un electrón de estos enlaces contiguos se traslada, completando el enlace, el enlace del que partía queda incompleto, y la carga positiva (la falta de electrón o hueco) se desplaza. La presencia de estas cargas libres, de sentidos contrarios, explica el incremento de conductividad que experimenta el material semiconductor bajo iluminación.

Por este motivo es necesario buscar una forma alternativa de abastecimiento parcial o totalmente factible y económicamente viable que permita reducir el consumo y los costos por este concepto. Se propone instalar un sistema fotovoltaico (FV) en el edificio C de la Facultad de Ingeniería, campus Coatzacoalcos de la Universidad Veracruzana, que esté conectado a la red eléctrica de dicho campus.

El presente proyecto se lleva a cabo por la necesidad de economizar y minimizar los efectos ambientales que conlleva utilizar la energía eléctrica convencional, se dispone de un sistema FV de 3.5kW de generación, haciendo mediciones continuas para ver qué tan factible es desde el punto de vista energético instalar paneles solares en esta zona.

## Descripción de sistema fotovoltaico

El sistema consiste de los componentes que se mencionan en la tabla 2.1. A continuación se describe cada uno de ellos:

COMPONENTE	CARACTERÍSTICA
Arreglo fotovoltaico	14 módulos de 250W
Estructura para módulos	De acero galvanizado para montaje de módulos
Porta fusible	10 x 38mm 1000V a 32Amp
Fusible	32 Amp
Inversor	Marca KACO 3502xi (3.5 kW)
Gabinete	Para resguardo del inversor
Cable FV	60 m aproximadamente

**Tabla 1** Componentes principales del sistema fotovoltaico.

*Arreglo fotovoltaico:* Consiste en 14 módulos fotovoltaicos de la marca Solarworld, modelo sunmodule SW 250 mono, conectados en serie para entregar un voltaje de 435 VCD.

Cada módulo generará a máxima potencia 8.05A de corriente (Imp.), 8.06A de corriente de cortocircuito (Isc), 31.1V de tensión de potencia máxima (Vmp), 37.8V de circuito abierto (Voc) y una potencia máxima (Pmax) de 250W, estas especificaciones son en condiciones de prueba estándar (1000W/m<sup>2</sup>, 25°C, 1.5 AM). Cada módulo tiene 60 celdas de tipo mono cristalino [1].

**Estructura para módulos:** Los módulos son instalados en una estructura para soporte de acero galvanizado, la cual está instalada con una altura aproximadamente de 1.83 metros con una pendiente de 20° hasta llegar a nivel del suelo.

**Fusibles y portafusibles:** Consiste en 1 fusible de 32 amperes, se conecta mediante el porta fusible a la fase positiva de los paneles FV para protección eléctrica. El fusible adentro del porta fusible se muestra físicamente en la figura 1, inciso A.



**Figura 1** Inversor montado dentro del gabinete.

**Inversor y gabinete:** El inversor es de la marca KAKO, modelo 3502xi, tiene una capacidad de 3500 W, con un voltaje de operación mínima de 200 VCD hasta 510 VCD, conectado a la red en un sistema bifásico que consta de 2 líneas de alimentación a 120 VCA y un neutro. El inversor se encuentra dentro de un gabinete para resguardo del mismo (ver figura 1, inciso B para identificar el inversor e inciso C para ver el gabinete) [2].

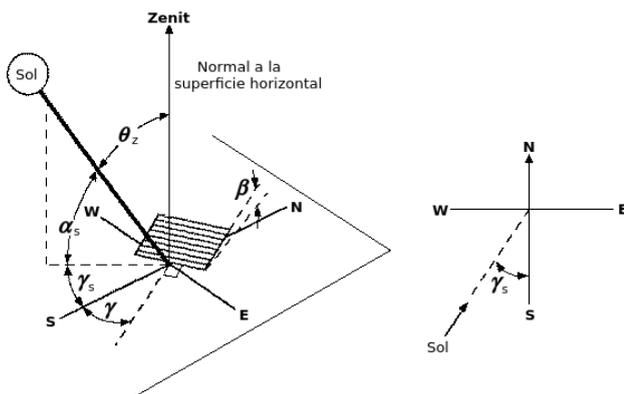
**Cable FV:** Cable calibre 10 AWG, de la marca Advanced Digital, del tipo PV Wire (aplicaciones fotovoltaicas) y se puede observar en la figura 1 inciso D, este cable soporta un voltaje nominal de 600 V [3].

Para monitorear el funcionamiento del sistema FV, un analizador trifásico de calidad eléctrica de la marca FLUKE 433/434 se utiliza para realizar un análisis de la cantidad de energía que generará el panel fotovoltaico y determinar el funcionamiento del sistema FV [4].

### Ubicación y colocación del sistema fotovoltaico

Como primer paso se empezó por ubicar en el techo del edificio C, el área para la instalación del sistema fotovoltaico y su orientación, para esto se utilizó una brújula para determinar la orientación ya que los sistemas FV deben estar orientados hacia el sur geográfico para una mayor captación solar a lo largo del año. Una vez que se determinó el sur magnético, procedemos a determinar el sur geográfico, que será al cual se oriente finalmente los paneles FV ya que los polos magnéticos y geográficos no coinciden en ciertas fechas del año.

Para relacionar el plano de alguna orientación en particular, la tierra en cualquier tiempo y la radiación solar entrante, se puede describir en términos de varios ángulos, que se describen a continuación (figura 2) [5,6]:



**Figura 2** Ángulo zenit, inclinación, ángulo altitud solar, ángulo de superficie azimuth y ángulo solar azimuth de una superficie.

$L$  Latitud, es la localización angular al norte o sur del ecuador, al norte es positivo;  $-90^\circ \leq L \leq 90^\circ$ .

$\delta$  Declinación, es la posición angular del Sol en el medio día solar con respecto al plano del ecuador, al norte es positivo;  $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ . La declinación solar varía con respecto a la fecha del año, se calcula con la ecuación de Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \left( 360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (1)$$

Donde  $n$  es el número de día del año.

$\gamma$  Ángulo de superficie azimuth, es la desviación de la proyección en el plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local, con cero al sur, este negativo y oeste positivo.

$\omega$  Ángulo horario, es el desplazamiento angular del Sol desde el este al oeste del meridiano local, debido a la rotación de la tierra sobre su eje a  $15^\circ$  por hora; negativo por la mañana.

$\alpha$  Ángulo altitud solar, es el ángulo entre el plano horizontal y la línea de los rayos del sol.

$$\sin \alpha = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega \quad (2)$$

$\theta_z$  Ángulo zenit, es el ángulo entre la vertical y la línea de los rayos del Sol.

$\gamma_s$  Ángulo solar azimuth, visto en el plano horizontal, es el desplazamiento angular desde el sur de la proyección de la radiación. Desplazamientos del este al sur son negativos.

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (3)$$

$\tau$  Es la longitud del día, es el doble de la hora de puesta de Sol a partir del mediodía solar y la puesta de Sol. Por lo tanto, la longitud del día en horas es:

$$\tau = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) \quad (4)$$

Con todos los términos anteriores se procede a hacer los cálculos para el equinoccio de primavera. Para la ciudad de Coatzacoalcos, Ver., en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana Campus Coatzacoalcos su latitud es de  $18.14^\circ$  N.

Para encontrar el ángulo azimuth se debe encontrar primeramente la declinación en el 16 de febrero ( $n=47$ ) día de la instalación. De la ecuación 1 se obtiene:

$$\delta = 23.45 \left( 360 \frac{284 + 47}{365} \right) = -12.955^\circ$$

Por otro lado, el ángulo horario al medio día solar local es cero y de la ecuación 2, el ángulo de la altitud solar es:

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin(18.14)\sin(-12.955) + \cos(18.14)\cos(-12.955)\cos(0)) = 58.9^\circ$$

Además, el ángulo solar azimuth es cero. Ahora, para encontrar la longitud del día se calcula con la ecuación 4, el resultado en horas será similar entre el día y la noche; por lo tanto:

$$\tau = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan(18.14) \tan(-12.955))$$

$$= 11.42 \text{ h}$$

Este valor lo dividimos entre dos para obtener las porciones de horas antes y horas después del mediodía, dando por resultado  $5.71 \text{ h}$ . Esto significa que el sol sale a  $12\text{h} - 5.71\text{h} = 6.288\text{h} = 6: 17\text{am}$ ; y se oculta a las  $12\text{h} + 5.71\text{h} = 5: 42\text{pm}$ , en un horario solar.

Con los datos obtenidos, se propone la ubicación de los paneles FV. Como se muestra en la figura 3, procedemos a ubicarlo en el techo del edificio, lugar donde no hay obstrucción por sombras.



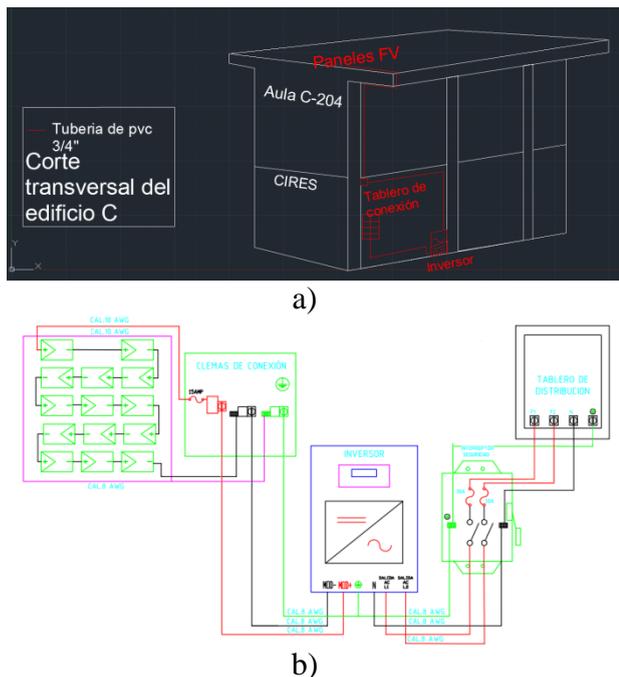
**Figura 3** Ubicación física de los paneles FV.

En la ubicación donde se instalan los paneles fotovoltaicos, se ensambla la estructura donde se colocaran los módulos, dejando un espacio libre igual a la medida de un módulo en la parte inferior central, con el objetivo de minimizar los efectos que pueden causar los vientos de la zona, y conectar los módulos en serie, como se ilustra en la figura 4.



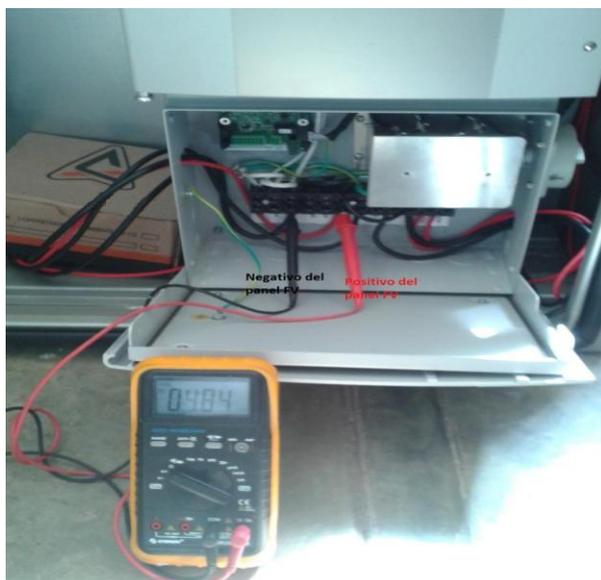
**Figura 4** Vista física de los módulos sobre la estructura.

Para la conexión eléctrica de los paneles hasta el tablero de conexión, se presenta la figura 5a, donde se ve la ruta de la tubería por donde pasan los cables. El inversor que debe estar instalado en un lugar de resguardo, ubicado en la planta baja del edificio. En la figura 5b se muestra el diagrama eléctrico, procediendo con el cableado y posterior conexión del inversor.



**Figura 5** Conexión eléctrica a) ruta del cableado, b) diagrama eléctrico

Después de conectar los paneles FV con el inversor y éste a la red general de corriente eléctrica, se procedió a encender el inversor y realizar una medición de prueba de voltaje con un multímetro a la entrada del inversor; se registro un voltaje de corriente directa de 484 V (ver figura 6), y en la salida del inversor que corresponde a corriente alterna la medición fue de 230V entre línea y línea.



**Figura 6** Prueba inicial de voltaje.

### Toma y análisis de datos

El monitoreo y análisis de datos se realiza con el analizador de redes eléctricas FLUKE® y el software Power Log® [7], respectivamente. Se analiza una semana de mediciones a la salida del inversor y posteriormente una semana de mediciones a la entrada del inversor. El analizador se ajusta para que haga las mediciones en forma de tendencia con intervalos de 1 segundo entre mediciones, éstas se registran en la memoria del analizador, se transfiere a una PC con un cable de datos. En el software Power Log se generan las gráficas y datos de los diferentes parámetros a analizar.

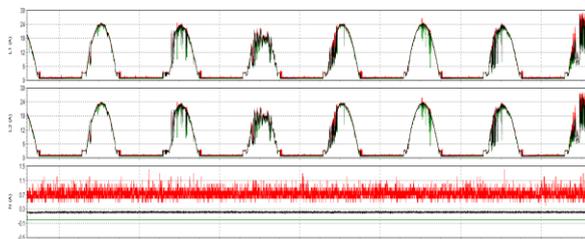
*Análisis datos en la salida del inversor (voltaje de c.a)* Primeramente, se analizan los parámetros de voltaje, corriente y potencia a la salida del inversor. Este periodo de análisis comprende del 20 de febrero del 2014 a las 02:33:49 pm hasta el 28 de febrero del 2014 a las 02:00:28 pm.

El inversor entrega un arreglo bifásico, que consta de dos líneas de 130 V y un neutro. En la figura 7 se muestra la gráfica con los valores correspondientes a los voltajes de las líneas 1 (L1N) y 2 (L2N), así como los valores que corresponden al voltaje en el neutro. Las líneas punteadas verticales representan los días que se efectúan las mediciones, en este caso son 6 días completos y 2 medios días, donde los números que aparecen en la parte inferior de manera horizontal representan el día y el mes en el que se realiza la medición, por ejemplo: 21/2 significa que corresponde al día 21 de febrero. Las líneas punteadas horizontales representan los rangos o valores en los que oscilan los datos de las mediciones. La línea de verde representa voltaje rms (raíz media cuadrática) mínimo, la línea roja representa el voltaje rms máximo y la línea negra representa el voltaje rms medio.

En L1N y L2N se aprecia que el voltaje no varía mucho y el rango del voltaje de la línea 1 no sobrepasa de 134 VCA ni es inferior a 127 VCA, en la línea 2 sucede lo mismo y está en un rango de 137 VCA y 128 VCA. El voltaje que circula por el neutro tiene valores muy pequeños, de un mínimo de 0.02 VCA y 0.04 VCA, que son prácticamente despreciables. Estos valores de voltaje que se presentan están dentro del rango aceptable de voltaje nominal en México, es decir el sistema fotovoltaico tiene los valores adecuados en cuanto a voltaje se refiere.



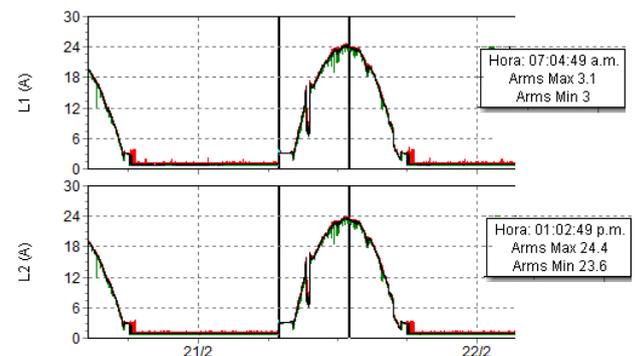
**Figura 7** Gráficas de voltaje de L1N, L2N y neutro.



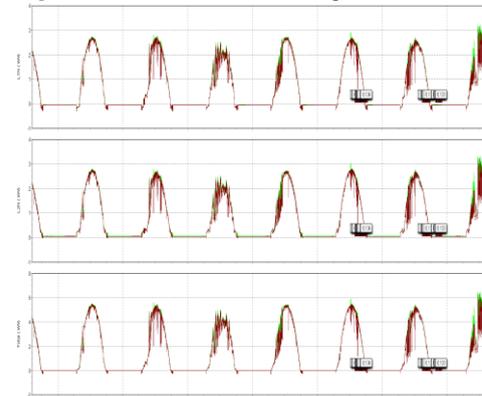
**Figura 8** Gráficas de corriente de L1(A), L2(A) y neutro.

En la figura 8 se muestra la gráfica que presenta los valores obtenidos de corriente durante el periodo de medición. La línea 1, L1(A) y la línea 2, L2(A) son similares; en ambas gráficas la parte plana cercana a cero Amperes corresponde a la noche; donde no hay radiación solar y la parte curva corresponde al día porque ahí es cuando hay radiación solar.

En la figura 9 se muestra un acercamiento de la gráfica de corriente que corresponde a L1(A) y a L2(A), donde se observan dos líneas verticales continuas, cada línea es un cursor que dependiendo de donde esté situada indica la hora y la corriente en amperes en ese instante de tiempo, para la primer línea ubicada en L1(A), el cursor está situado a las 7:04:49 a.m., y muestra una corriente máxima de 3.1 A, indicando el inicio de la curva aproximadamente a las 7 a.m. hora a la cual empieza a incidir la radiación solar sobre el sistema FV. La segunda línea situada en L2(A) presenta el valor 24.4 Amperes y encuentra su punto máximo aproximadamente a la 1:02 p.m. En este punto es donde se asume que la radiación solar incidente sobre los paneles FV está en el punto máximo de ese día. Después de éste punto máximo, la curva empieza a bajar y esto es porque el Sol sigue su curso para el atardecer y con ello baja la radiación solar. Según la gráfica, el punto donde la curva se vuelve plana y el valor de corriente es cercana a cero ocurre aproximadamente a las 6 p.m.



**Figura 9** Acercamiento de la gráfica de corriente.



**Figura 10** Gráfica de potencia en L1N, L2N y Total.

La potencia generada está en función de cuanto radiación capte el sistema fotovoltaico, es por tal razón que si el día está nublado, parcialmente nublado o hay algún tipo de sombra que obstruya total o parcialmente los módulos solares, se verá reflejado en una disminución de la potencia que genera el sistema fotovoltaico, donde la potencia está en función directa del comportamiento de la corriente y voltaje. En la figura 10 se muestra la gráfica correspondiente a la potencia en kW que entrega el sistema fotovoltaico, tanto en la línea 1 (L1N), línea 2 (L2N) y la potencia total (Total) a lo largo del periodo de medición; puntualmente se analiza la potencia en la línea 1 y en ésta se observa que en el día 21 de febrero (21/2) aproximadamente a las 7 a.m. se empieza a registrar un incremento de valores de potencia, cabe destacar que ese día en particular se puede deducir que el día fue despejado, ya que la curva correspondiente a ese día no presenta muchas irregularidades como la presentan los días restantes, tal como se observa en el acercamiento correspondiente a ese día en la figura 11.

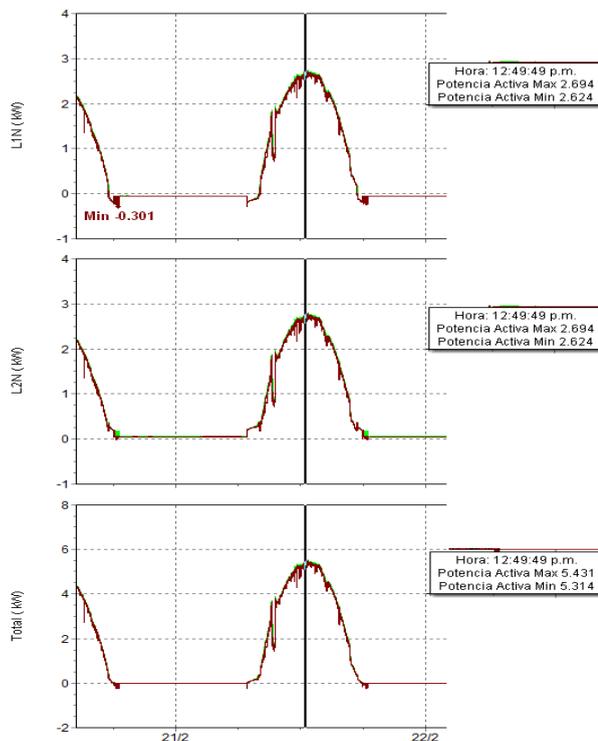


Figura 11 Acercamiento de la gráfica de potencia.

Adicionalmente, para observar la potencia máxima medida en el periodo indicado, se realiza un acercamiento de la gráfica de potencia total en la figura 12, donde se muestra un valor máximo de 6.533 kW medido el día 27 de febrero (27/2).

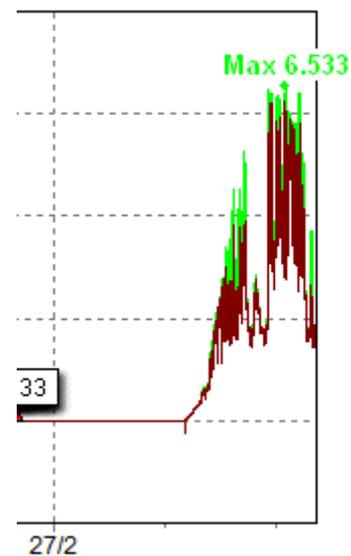
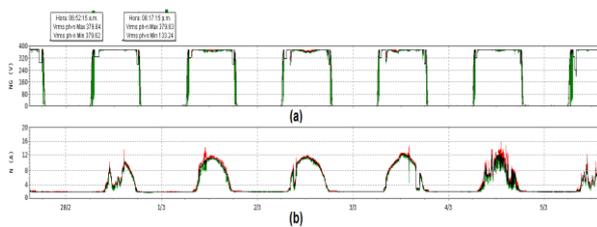


Figura 12 Medición de la potencia máxima registrada.

*Análisis de datos en la entrada del inversor (voltaje de C.D.)* Ahora se analiza los parámetros de voltaje y corriente a la entrada del inversor, es decir, la parte correspondiente a corriente directa (voltaje que entrega directamente los paneles FV). Los datos registrados comprenden del 27 de febrero al 5 de marzo.

Como primer parámetro a analizar, se toma el voltaje de corriente directa. El arreglo fotovoltaico consta de una línea positiva y una línea negativa. En la figura 13a se muestra la gráfica con los valores de voltaje generado por el sistema fotovoltaico, el voltaje máximo aproximado para las 6:52 a.m. es de 379.64VCD y el voltaje mínimo es de aproximadamente 379.62 VCD. Después de ésta hora el voltaje se mantiene constante durante las horas que recibe radiación solar para generar corriente, pero aproximadamente a las 6:17 p.m. comienza a disminuir el voltaje, debido a que a esta hora ya hay muy poca radiación solar (ver figura 13).

La gráfica de corriente de la figura 13b es similar a la analizada en la gráfica de corriente alterna (a la salida del inversor). Las partes curvas corresponden al día porque ahí es cuando hay más radiación solar y las partes planas corresponden a la noche ya que en valores está cercana a cero amperes. En el día 1 de marzo en un horario aproximado de 7:30 a.m. la curva empieza a elevarse hasta llegar a su punto máximo de amperes de 12 Amp a las 12:30 aproximadamente. Después de éste punto la curva empieza a bajar por motivo de que la radiación solar también. Para los demás días las gráficas se presentan con muchos picos y curvas de forma irregular, esto sucede porque la radiación que incide en los módulos FV no es constante, debido a que hay sombras, nubes, etc. que obstruyen radiación solar que llega a la superficie captadora.



**Figura 13** Gráfica de datos medidos a la entrada del inversor a) voltaje, b) corriente

## Conclusiones

La capacidad de generación del sistema fotovoltaico en las condiciones estándar de prueba (con un flujo de radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$ , según la ficha técnica proporcionada por el proveedor) es de 3.5 kW en total (son un total de 14 módulos), en el análisis de potencia de corriente alterna anteriormente expuesto se muestran valores de hasta 3.3 kW de generación por fase (el sistema entrega un arreglo bifásico), si comparamos éste último valor con el de la condición estándar de prueba se llega a la conclusión de que la radiación solar en la ciudad de Coatzacoalcos es mayor del orden de  $1000 \text{ W/m}^2$ , esto hace que la zona sea altamente factible para colocar sistemas fotovoltaicos y así sacar mayor provecho de la energía solar.

Por lo tanto, instalar este tipo de sistemas fotovoltaicos en esta zona traería muchos beneficios, ya que es una energía limpia y amigable con el medio ambiente. Además rentable en esta zona por los datos obtenidos de generación mostrados anteriormente.

Sin embargo como se mostró en los análisis de los parámetros eléctricos el sistema de generación fotovoltaico también tiene algunas limitantes, ya que solo genera energía eléctrica durante el día y muy baja energía cuando está nublado total o parcialmente, así que para obtener buenos niveles de generación eléctrica el día debe de estar despejado.

## Referencias

- [1] SolarWorld. (2013). Sunmodule SW 250 mono. Septiembre 15, 2016, de SolarWorld Sitio web: <https://www.solarworld-usa.com/~media/www/files/datasheets/sunmodule-plus/sunmodule-solar-panel-250-mono-ds.pdf>
- [2] Kaco new energy. (2013). Blueplanet Operating and Installation Instructions 1502xi - 5002xi. Septiembre 15, 2016, de Kaco new energy Sitio web: [http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/USA/Residential\\_Products/02xi/MNL\\_OP\\_bp02xi\\_en\\_01.pdf](http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/USA/Residential_Products/02xi/MNL_OP_bp02xi_en_01.pdf)
- [3] Advanced Digital Cable Inc. (2015). PV photovoltaic cable. Septiembre 15, 2016, de ADC Sitio web: [http://www.adcable.com/images/renewable\\_catalog/ADC\\_600V\\_PV.pdf](http://www.adcable.com/images/renewable_catalog/ADC_600V_PV.pdf)
- [4] Fluke. (2004). Fluke 433/434 Three phase power quality analyzer. Septiembre 15, 2016, de Fluke corporation Sitio web: [http://assets.fluke.com/manuals/434\\_\\_\\_\\_um\\_eng0000.pdf](http://assets.fluke.com/manuals/434____um_eng0000.pdf)

[5] Duffie J.A. y Beckman W.A.. (2013). Solar engineering of thermal processes. Hoboken, New Jersey: Wiley.

[6] Kalogirou S. (2009). Solar energy engineering: processes and systems. USA: Academic Press Elsevier Science.

[7] Fluke Corporation. (2007). Power Log PC Application Software. Septiembre 15, 2016, de Fluke corporation Sitio web: <http://assets.fluke.com/manuals/PowerLogumeng0100.pdf>