

METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A INVERNADEROS Y SU APLICACIÓN

METHODOLOGY FOR SELECTING AND APPLYING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS FOR GREENHOUSES

Teléforo Martínez-Castellanos; Eugenio Romantchik-Kriuchkova*; Francisco Betanzos-Castillo¹; Efraín Contreras-Magaña; René Martínez-Elizondo; Edilberto S. Poblano-Ortiz

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, MÉXICO.

Correo-e: mactel_x@hotmail.com (*Autor para correspondencia)

RESUMEN

El nivel elevado de contaminación que emana la producción de energía eléctrica generada a partir de combustibles fósiles, ha conducido a la búsqueda de nuevas alternativas energéticas, entre las que se encuentran sistemas fotovoltaicos (SFV). En el presente trabajo se desarrolló una metodología de selección de componentes fotovoltaicos con la finalidad de generar la energía eléctrica demandada por los diferentes sistemas de un invernadero basados en los equipos, horas de uso y consumo de energía. Para la selección de los componentes fotovoltaicos se realizaron catálogos de los equipos de invernaderos, sitios con horas solar pico, módulos fotovoltaicos, baterías, controladores e inversores, además se desarrollaron algoritmos para una selección económica. Se aplicó la metodología desarrollada en los invernaderos, abarcando una superficie de 6,165 m² del campo experimental “Tlapeaxco” de la Universidad Autónoma Chapingo. Se seleccionó e instaló un SFV que incluyó 16 módulos fotovoltaicos con una potencia total de 3.68 kWp, dos controladores de 80 A, 12 baterías de 1800 Ah a 24 V y un inversor/cargador de 7 kW, para generar y suministrar la energía a un sistema de riego con un caudal de 1.15 ± 0.35 litro·s⁻¹ y presión de 0.28 ± 0.02 MPa compuesto por dos motobombas de 2.2 kW y un motor de 1.1 kW para el agitador. Del análisis del sistema eléctrico se detectó un factor de potencia (FP) de 0.8 y se instaló un banco de capacitor de 2kVAR para elevar dicho factor a 0.94. Se monitoreó el SFV y se estimó una producción de energía diaria de 14.5 ± 1.5 kWh en el mes de diciembre, lo que garantizó el suministro de energía al sistema de riego.

PALABRA CLAVE: Energías renovables, módulos fotovoltaicos, factor de potencia, software.

ABSTRACT

High pollution levels resulting from the production of electricity from fossil fuels has led to the search for new energy alternatives, such as photovoltaic (PV) systems. In this work, a novel methodology for selecting PV components in order to generate the electricity demanded by different greenhouse systems based on equipment, hours of use and energy consumption was developed. For the selection of the PV components, catalogs with information on greenhouse equipment, sites with peak solar hours, PV modules, batteries, controllers and inverters were made, and algorithms for an economical selection were also developed. The methodology developed was applied in greenhouses covering a total area of 6,165 m² at the “Tlapeaxco” experimental field belonging to the Universidad Autónoma Chapingo. A PV system, consisting of 16 PV modules with total output of 3.68 kWp, 2 80-A controllers, 12 1800-Ah batteries and a 7-kW inverter/charger, was selected and installed to generate and supply power to an irrigation system with a flow rate of 1.15 ± 0.35 liters/s and a pressure of 0.28 ± 0.02 MPa, composed of 2 2.2-kW pumps and a 1.1-kW motor for the agitator. Power system analysis showed a power factor (PF) of 0.8, so a 2 kVAR capacitor bank was installed to increase this factor to 0.94. The PV system was monitored and a daily energy production of 14.5 ± 1.5 kWh in December, which ensures a sufficient power supply to the irrigation system, was estimated.

KEYWORDS: Renewable energy, PV modules, power factor, software.



INTRODUCCIÓN

La búsqueda de alternativas para el suministro de energía eléctrica ha sido una constante desde hace varios años. Los sistemas fotovoltaicos a nivel doméstico, exclusivos para la tarifa DAC (de alto consumo) ya se están utilizando en México, incluso existen financiamientos por parte del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) y del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) que impulsan el uso de esta tecnología como una medida para reducir las altas tarifas de facturación. Amtmann (2009) presentó un estudio en el que se vislumbró una reducción considerable en los precios de los sistemas fotovoltaicos durante los próximos años lo que permitirá usar más ampliamente esta tecnología en la agricultura en México.

Los sistemas fotovoltaicos en la agricultura han sido ampliamente usados para el bombeo de agua (Sánchez, 2006). La electricidad en los invernaderos, tiene una aplicación importante en el funcionamiento de los equipos eléctricos, tales como motores de bombas de sistemas de riego, electroválvulas, sensores y actuadores para el control climático, temporizadores, moto reductores para el movimiento de mallas, motores eléctricos de ventiladores, extractores, calentadores y lámparas (Romantchik, 2008; Sánchez, 2004).

Los recursos solares en México son en promedio 60% más altos que en Alemania y España, los cuales representan el 67 % de la capacidad fotovoltaica instalada a nivel mundial (FUMEC, 2010). México tiene en promedio cinco horas solar pico, lo cual favorece el uso de sistemas fotovoltaicos en el país (Amtmann, 2009).

Bermejillo (2007) realizó un estudio referente a la puesta en marcha con energía eléctrica convencional y con energía solar fotovoltaica de cuatro motores de consumo de energía de 0.33 kWh, los cuales formaban parte de un sistema de control de temperatura de un invernadero mediante el accionamiento de cortinas cenitales y laterales. En sus resultados mostró que la energía solar por sí sola es suficiente para el accionamiento de los motores. Sánchez (2004) analizó la aplicación de la energía fotovoltaica a diferentes sistemas del invernadero (ventilación, riego, humidificación y pantalla térmica principalmente) con un consumo de 11,490 kWh. Concluyó que no es económicamente viable suministrar toda la energía necesaria para el invernadero mediante SFV y propuso utilizar sistemas mixtos de generación de energía eléctrica para no elevar los costos de los SFV.

Aunque existen varias investigaciones referentes a la aplicación de SFV (Sánchez, 2004; Bermejillo, 2007; Pérez *et al.*, 2011; Escobar, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011), aún, existe poca información referida a la selección de componentes FV. En este sentido, existe el “Programa de evaluación técnica y económica para sistemas fotovoltaicos domésticos” desarrollado por la CONAE, actualmente Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE)

INTRODUCTION

The search for alternative methods of supplying electrical energy has been underway for several years. Home PV systems, for which Mexico's Federal Electricity Commission charges its high-consumption domestic electricity rate, known as DAC, are already being used in Mexico; financing is even offered by two agencies, Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) and Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), that promote the use of this technology as a means of reducing high billing rates. Amtmann (2009) presented a study which foresaw a considerable reduction in PV system prices in the coming years, which will allow this technology to be widely used in agriculture in Mexico.

PV systems have been widely used in agriculture for pumping water (Sánchez, 2006). Electricity has an important application in greenhouses in the operation of electrical equipment such as irrigation system pumps, solenoid valves, sensors and actuators for climate control, timers, gearmotors for moving meshes, electric fan motors, exhaust fans, heaters and lights (Romantchik, 2008; Sánchez 2004).

Solar resources in Mexico are on average 60 % higher than in Germany and Spain, which account for 67 % of PV capacity installed worldwide (FUMEC, 2010). Mexico has on average five peak solar hours, which favors the use of PV systems in the country (Amtmann, 2009).

Bermejillo (2007) conducted a study regarding the use of conventional electricity and solar PV energy to run four motors (0.33 kWh energy consumption), which were used in a greenhouse's temperature control system to actuate zenith and side curtains. Their results showed that solar energy alone is sufficient to run the motors. Sánchez (2004) analyzed the application of PV energy to different greenhouse systems (mainly ventilation, irrigation, humidification and thermal insulation) with 11,490 kWh consumption. He concluded that it is not economically feasible to supply all the energy needed for the greenhouse using a PV system and therefore proposed using mixed electric power generation systems in order not to raise the costs of PV systems.

Although there are several studies concerning the application of PV systems (Sánchez, 2004; Bermejillo, 2007; Pérez *et al.*, 2011; Escobar, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011), there is still little information relating to the selection of PV components. In this regard, there is the “Technical and economic assessment program for home photovoltaic systems” developed by CONAE, now the National Commission for the Efficient Use of Energy (CONUEE), for public use. This software tool selects PV equipment and calculates electrical parameters and the cost of a home PV system. The disadvantage of this system lies in the equipment catalogs, which do not have updated prices and are also obsolete. Although there are other software tools that

para uso público. Este software es una herramienta que selecciona los equipos fotovoltaicos y calcula los parámetros eléctricos y el costo del SFV para un hogar. La desventaja de este sistema se encuentra en los catálogos de los equipos, los cuales no cuentan con precios actualizados, además de ser obsoletos. Aunque existen otros software que ofrecen el análisis y diseño de sistemas, previos a una instalación fotovoltaica o sistemas híbridos (PVSYS, HOGA, HOMER). Se encuentran en su mayoría enfocados a los mercados de europa y EUA, además de que no ofrecen una selección de los equipos fotovoltaicos en México.

El objetivo de este trabajo fue el desarrollo de una metodología de selección de los componentes de un SFV en función de una base de datos con elementos de SFV disponibles en México, de los equipos, horas de uso y consumo de energía de los sistemas de un invernadero, así como su aplicación y evaluación en los invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la metodología de selección de componentes fotovoltaicos se analizaron diferentes configuraciones de sistemas que componen un invernadero, las potencias (P_Q) de los equipos (Q) y horas de funcionamiento (h) para determinar los consumos de energía (kWh). Dichos datos sirvieron para elaborar los catálogos de los equipos (motores de bombas, calefactores, ventiladores, extractores, electroválvulas y lámparas). También se prepararon los catálogos de las horas solar pico de diferentes sitios de México y equipos fotovoltaicos (módulos fotovoltaicos, baterías, controladores e inversores) con sus especificaciones técnicas.

Con la ecuación 1 se calculó el consumo diario de energía ($E_{p,dia}$) (kWh·d⁻¹) de la cantidad (N) de los equipos de los sistemas (n) de un invernadero:

$$E_{p,dia} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{Q,n} * N_{Q,n} * h_{Q,n}}{1000} \quad (1)$$

A partir del resultado de la ecuación 1 se calculó la cantidad de módulos fotovoltaicos, las baterías, controladores e inversores (Ibáñez *et al.*, 2004).

Al analizar la relación mensual de las horas solar pico (H_{sp}) entre el consumo de energía mensual durante un año se seleccionó el mes crítico, en donde la incidencia de radiación solar fue la más baja y se eligió un tipo de módulo fotovoltaico (MFV) del catálogo para disponer de su potencia (P_{mod}) y características eléctricas. A partir de esta información se calculó la cantidad de MFV (N_{mod}) necesarios, considerando un factor de seguridad ($F_s = 1.25$)

$$N_{mod} = F_s \frac{E_{p,dia}}{H_{sp} * P_{mod}} \quad (2)$$

offer system analysis and design, prior to the installation of a PV or hybrid system (PVSYS, HOGA, HOMER), they are mostly aimed at the European and U.S. markets, and in addition to that they do not offer a selection of PV equipment available in Mexico.

The aim of this work was to develop a methodology for selecting PV system components based on a database of PV system elements available in Mexico, equipment, hours of use and energy consumption of greenhouse systems, and their application and evaluation for Universidad Autónoma Chapingo greenhouses.

MATERIALS AND METHODS

To develop the methodology for selecting PV components, different system configurations that make up a greenhouse, the equipment (Q) power ratings (P_Q) and operating hours (h) were analyzed to determine energy consumption (kWh). These data were used to create equipment catalogs (pump motors, heaters, fans, exhaust fans, solenoid valves and lights). Catalogs listing peak solar hours at different sites in Mexico and PV equipment (PV modules, batteries, controllers and inverters) with their technical specifications were also prepared.

With equation 1, the daily energy consumption ($E_{p,daily}$) (kWh·d⁻¹) of the amount (N) of equipment used in a greenhouse's systems (n) was calculated:

$$E_{p,daily} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{Q,n} * N_{Q,n} * h_{Q,n}}{1000} \quad (1)$$

From the result of equation 1, the number of PV modules, batteries, controllers and inverters was calculated (Ibáñez *et al.*, 2004).

By analyzing the monthly ratio of peak solar hours (P_{sh}) over the monthly energy consumption for a year, the critical month, in which the incidence of solar radiation was the lowest, was selected, and a type of photovoltaic module (PVM) was selected from the catalog to make use of its power (P_{mod}) and electrical specifications. From this information, the number of PVMs (N_{mod}) required, considering a safety factor ($S_f = 1.25$), was calculated:

$$N_{mod} = S_f \frac{E_{p,daily}}{P_{sh} * P_{mod}} \quad (2)$$

In the storage subsystem, system voltage (S_V), nominal battery voltage (B_v), stand-alone days (N_d), depth of discharge (D_d) as a percentage and the capacity of a battery (Cb) in Ah were established as initial parameters. Additionally, the necessary Ah capacity (C') and the number of batteries (N_b) were calculated.

$$C' = S_f \frac{N_d * E_{p,daily}}{P_d * V_s} \quad (3)$$

En el subsistema de acumulación se estableció como parámetros iniciales el voltaje del sistema (V_s), el voltaje nominal de batería (V_b), los días de trabajo autónomo (N_d), la profundidad de descarga (P_d) en porcentaje y la capacidad de una batería (Cb) en Ah y se calculó la capacidad necesaria (C') en Ah y la cantidad de baterías (N_b).

$$C' = F_s \frac{N_d * E_{p, diario}}{P_d * V_s} \quad (3)$$

$$N_b = \frac{V_s * C'}{V_b * C_b} \quad (4)$$

La cantidad de reguladores (N_R) para el subsistema de regulación se determinó de la relación de la intensidad de corriente de generación-acumulación ($I_{reg, gen-acu}$) y la intensidad de corriente de un regulador específico ($I_{max, reg}$)

$$N_R = \frac{I_{reg, gen-acu}}{I_{max, reg}} \quad (5)$$

La cantidad de inversores necesarios (N_{inv}) se calculó al elegir un inversor para disponer de su potencia nominal (P_{inv}) y sus características técnicas.

$$N_{inv} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Q,n} N_{Q,n}}{P_{inv}} \quad (6)$$

Los catálogos de los equipos fotovoltaicos se elaboraron con los datos más relevantes para cada equipo (potencia (W), voltaje (V), corriente (A), marcas y costos). Asimismo, se creó el catálogo de la radiación solar de diferentes sitios de los diferentes estados de México. En los algoritmos de selección desarrollados para cada uno de los equipos fotovoltaicos se usó el costo como uno de los criterios de selección. En los resultados de los cálculos de cada uno de los componentes fotovoltaicos se muestran las cantidades, características técnicas y precios.

La metodología de cálculos, catálogos de los equipos de invernaderos, componentes fotovoltaicos, sitios y algoritmos desarrollados fueron la base para el desarrollo del software “Selección de sistema fotovoltaico para invernadero” disponible de uso libre en el siguiente sitio de la red: <http://sistemas.chapingo.mx/empresas/SICF/>. Este software está registrado ante el Instituto Nacional de Derecho de Autor con el ISBN: 978-607-12-0295-6 (Romantchik et al., 2013). Además se analizaron los costos de diferentes SFV en función de su configuración.

La metodología desarrollada se empleó en la selección y aplicación de un sistema fotovoltaico a invernaderos en el campo experimental “Tlapeaxco” de la Universidad Autónoma Chapingo, localizada en el municipio de Texcoco Estado de México, con ubicación en $19^{\circ} 29' 39''$ N, $98^{\circ} 53' 19''$ W a una altitud de 2,260 m. Se aplicó a tres invernaderos de diferentes tamaños que suman una superficie total de 6,165 m². Los invernaderos están equipados con un sistema de riego por goteo automatizado, programa-

$$N_b = \frac{S_v * C'}{B_v * C_b} \quad (4)$$

The number of regulators (N_R) for the regulation subsystem was determined from the ratio of the generation-storage current intensity ($I_{reg, gen-stor}$) and the current intensity of a specific regulator ($I_{max, reg}$)

$$N_R = \frac{I_{reg, gen-stor}}{I_{max, reg}} \quad (5)$$

The number of inverters needed (N_{inv}) was calculated by selecting an inverter for its nominal power (P_{inv}) and its technical specifications.

$$N_{inv} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Q,n} N_{Q,n}}{P_{inv}} \quad (6)$$

The PV equipment catalogs were made with the most relevant data for each piece of equipment, such as power (W), voltage (V), current (A), brands and costs. Also, the catalog denoting the solar radiation at different sites in different states of Mexico was created. In the selection algorithms developed for each piece of PV equipment, cost was used as one of the selection criteria. The results of the calculations for each of the PV components show the quantities, technical specifications and prices.

The calculation methodology, greenhouse equipment catalogs, PV components, sites and developed algorithms were the basis for the development of the software “Selección de sistema fotovoltaico para invernadero” (Selecting a greenhouse PV system), which is available for free use at the following web site: <http://sistemas.chapingo.mx/empresas/SICF/>. This software is registered with Mexico’s National Copyright Institute with the ISBN: 978-607-12-0295-6 (Romantchik et al., 2013). In addition, the costs of different PV systems based on their configuration were analyzed.

The developed methodology was used in the selection and application of a PV system to greenhouses at the “Tlapeaxco” experimental field belonging to the Universidad Autónoma Chapingo, located in the municipality of Texcoco, State of Mexico, located at $19^{\circ} 29' 39''$ N and $98^{\circ} 53' 19''$ W, at an altitude of 2,260 m. It was applied to three different-sized greenhouses, adding up to a total area of 6,165 m². The greenhouses are equipped with an automatic drip irrigation system, programmed to provide timed irrigation applications. The first pump draws water from the rooftop water tank and moves it into the system’s tanks; the second one sends the mixture of minerals to the different sections in the greenhouse and finally the blower mixes the minerals within the tank. Daily energy consumption by the equipment was determined and also a detailed analysis of the site’s peak solar hours and the irrigation system’s power usage efficiency was performed. The parameters of the electrical installation were measured with a Fluke 450 energy analyzer, which is configured to record simultaneous current intensity (A), voltage (V), power factor (PF), power ratings (kW and kVAR) and

do para realizar los riegos por tiempo. La primera bomba extrae el agua del tinaco y la traslada hacia los tanques; la segunda envía la mezcla de minerales a las diferentes secciones del invernadero y por último, el soplador mezcla los minerales dentro del tanque. Se determinó el consumo de energía diario de los equipos y adicionalmente se realizó el análisis detallado de las horas solar pico del sitio y el análisis del uso eficiente de la energía eléctrica del sistema de riego. Los parámetros de la instalación eléctrica se midieron con un equipo Fluke 450, el cual se configuró para registrar datos simultáneos de intensidad de corriente (A), voltaje (V), factor de potencia (FP), potencias (kW y kVAR) y el consumo de energía (kWh). El comportamiento de cada uno de los datos de los parámetros registrados se analizó con el programa Excel. Dicho análisis, mostró que el FP estaba por debajo de 0.9 permitido en México (DOF, 1991). Para corregir el problema se calculó un banco de capacitores, el cual se instaló en paralelo con el sistema eléctrico del sistema de riego. Posteriormente, se llevó a cabo una nueva medición con la finalidad de registrar si existió una mejora en el sistema eléctrico.

De la estación meteorológica automática – Chapingo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se registró la radiación solar desde el mes de septiembre del 2011 hasta el mes de diciembre del 2013 para su análisis diario, semanal, mensual y anual.

Con ayuda del software de selección previamente desarrollado se seleccionaron los componentes del sistema fotovoltaico para los equipos de consumo de los invernaderos de Tlapecaxco. Se instalaron y conectaron cada uno de los equipos fotovoltaicos, respetando la normatividad mexicana (NOM-001-SEDE-2012, artículo 690) y cada uno de los manuales de instalación y de seguridad de los equipos. Se monitoreó el funcionamiento del sistema fotovoltaico, así como la producción y consumo de energía, con ayuda de un sistema automático.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los catálogos generados contienen la ubicación, costo, características, potencias y Hsp de 71 equipos de invernadero (motores, válvulas, focos, etc.) localizados en 53 sitios de la República Mexicana. Además, se incluyen 55 módulos fotovoltaicos, 52 controladores de carga, 53 tipos de baterías y 79 tipos de inversores (Romantchik *et al.*, 2013). Los parámetros principales de los elementos de los SFV se presentan en el Cuadro 1.

Algoritmos de selección de equipos fotovoltaicos

En la Figura 1 se presenta el algoritmo general y en la Figura 2 los algoritmos desarrollados de selección de los elementos del sistema fotovoltaico, los cuales establecen una consecuencia de los cálculos de acuerdo con sistemas y equipos en el invernadero, su consumo de energía, las potencias, tiempo de funcionamiento, el sitio de su uso y los parámetros de los elementos de SFV. Los algoritmos

energy consumption (kWh) data. The behavior of each parameter's recorded data was analyzed using the Excel program. This analysis showed that the PF was 0.9 below the allowed level in Mexico (DOF, 1991). To correct the problem, a capacitor bank was calculated and installed in parallel with the irrigation system's electrical system. Subsequently, a new measurement was made in order to record whether there was an improvement in the electrical system.

The National Weather Service's automatic weather station at Chapingo recorded solar radiation from September 2011 to December 2013 for subsequent daily, weekly, monthly and yearly analysis.

Using the previously developed selection software, the energy-consuming PV system components for the Tlapecaxco greenhouses were selected. Each piece of PV equipment was installed and connected in conformance with Mexican regulations (NOM-001-SEDE-2012, article 690) and its installation and safety manual. Operation of the PV system, as well as energy production and consumption, was monitored using an automatic system.

RESULTS AND DISCUSSION

The catalogs generated contain the location, cost, specifications, power ratings and Psh of 71 pieces of greenhouse equipment (motors, valves, lights, etc.) located at 53 sites in Mexico. In addition, 55 PV modules, 52 charge controllers, 53 types of batteries and 79 types of inverters (Romantchik *et al.*, 2013) are included. The main parameters of the PV system elements are presented in Table 1.

Algorithms for selecting PV equipment

Figure 1 presents the general algorithm and Figure 2 the algorithms developed for selecting the PV system elements, which establish the relationship between the calculations, the systems and equipment in the greenhouse, their energy consumption, power ratings, running time, the site of their use and the parameters of the PV system elements. The algorithms were used as the basis for developing software for the selection of PV system elements.

The power ratings of the equipment in the greenhouse, and the time and the place of their use served as the input data for the software (Figure 3). By using these data in conjunction with the site catalog, the number, specifications, brands and costs of PV modules, batteries, regulators and inverters were obtained. The result provided by the software is only indicative of the possibility of manually choosing an element of preference, based on design criteria, safety, cost and market availability.

Cost determination and analysis with the software

Figure 4 shows the PV system costs of using one, two or three 0.75, 1.5 and 2.25 kW pumps with different hours of operation. The reflected costs include, in all cases, the

CUADRO 1. Parámetros principales de los elementos de SFV en los catálogos para selección.

TABLE 1. Main parameters of the PV system elements in the catalogs created for selection purposes

Núm./ No.	Marca/Brand	Voltaje de salida (V)/ Output voltage (V)	Potencia, capacidad Power, capacity	Costo, \$ M.N./ Cost, \$N.C
Módulos fotovoltaicos / Photovoltaic modules				
1-55	Solar, Techno, Bosch, Conermex, Kyocera	6, 12, 24, 36, 48	10-320 W	300-22 000
Baterías / Batteries				
1-53	Hawker, Surretroll	2, 4, 6, 12	105-4600 Ah	1 625-30 750
Controladores / Controllers				
1-52	Steca, Techio, Victron, Samlesolar, Outback, Schneider	12, 24, 48	20-80 A	4 800-21 000
Inversores / Inverters				
1-79	Xantrex, Studer, Victron, Schneider, TBS, Outback	12-24-48	175-8 000 W	2 350-88 400

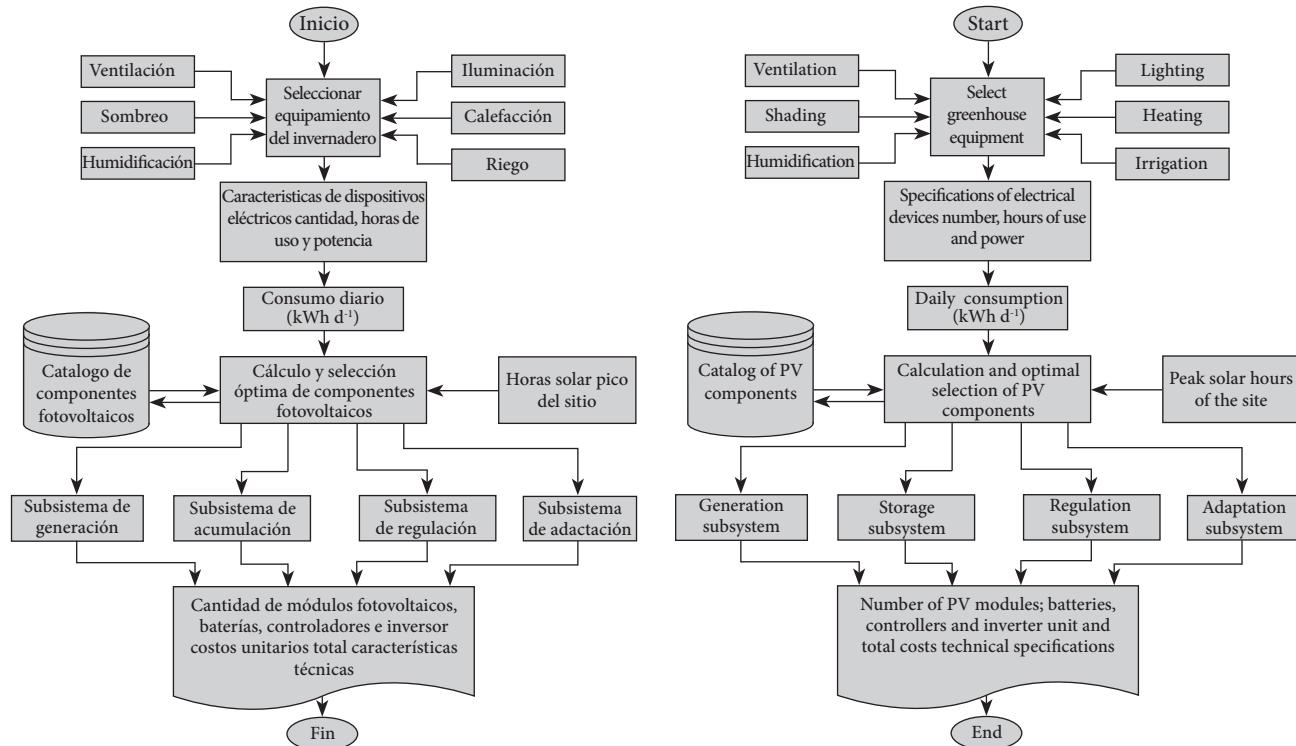


FIGURA 1. Diagrama general del funcionamiento de la selección de componentes fotovoltaicos.

se utilizaron como base para el desarrollo del software de selección de los elementos de un SFV.

Las potencias de los equipos en el invernadero, el tiempo y el lugar de su uso se emplearon como los datos de entrada de software (Figura 3). Al utilizarlos en conjunto con el catálogo de los sitios, se obtuvo la cantidad, características, marcas y costos de módulos fotovoltaicos, baterías, reguladores e inversores. Los resultado que refleja el software únicamente son indicativos de la posibilidad de elegir de forma manual un elemento de preferencia, basado en criterios de diseño, seguridad, costo y la disponibilidad en el mercado.

Determinación y análisis de costos con el software

En la Figura 4 se presentan los costos de SFV de uso de una, dos o tres bombas de 0.75, 1.5 y 2.25 kW con diferentes horas de funcionamiento. Los costos reflejados contemplan

FIGURE 1. General diagram of the system for selecting PV components.

costs of PV modules, batteries for three days of operation, controllers, inverters, and labor.

The cost of a PV system is proportional to the energy used. Therefore, the energy used in the greenhouse will cost the same regardless of the equipment in use. For example, it can be seen in Figure 5 that using a 2.5 kW pump has a similar cost to using three 0.75 kW pumps with the same hours of use. The cost of using a 1.5 kW pump running for three hours per day is \$ 85,500 pesos and if used for 25 years it would consume 41000 kWh ($1.5 \text{ kW} * 3 \text{ hours} * 365 \text{ days} * 25 \text{ years}$). Finally, the cost of a kWh is 2.08 pesos (without considering other operating expenses).

Selecting a type of battery directly affects the total cost of the PV system. Figure 5 shows the economic relationship between the use of different types of batteries for different stand-alone days. The cost of using 2 V batteries for the

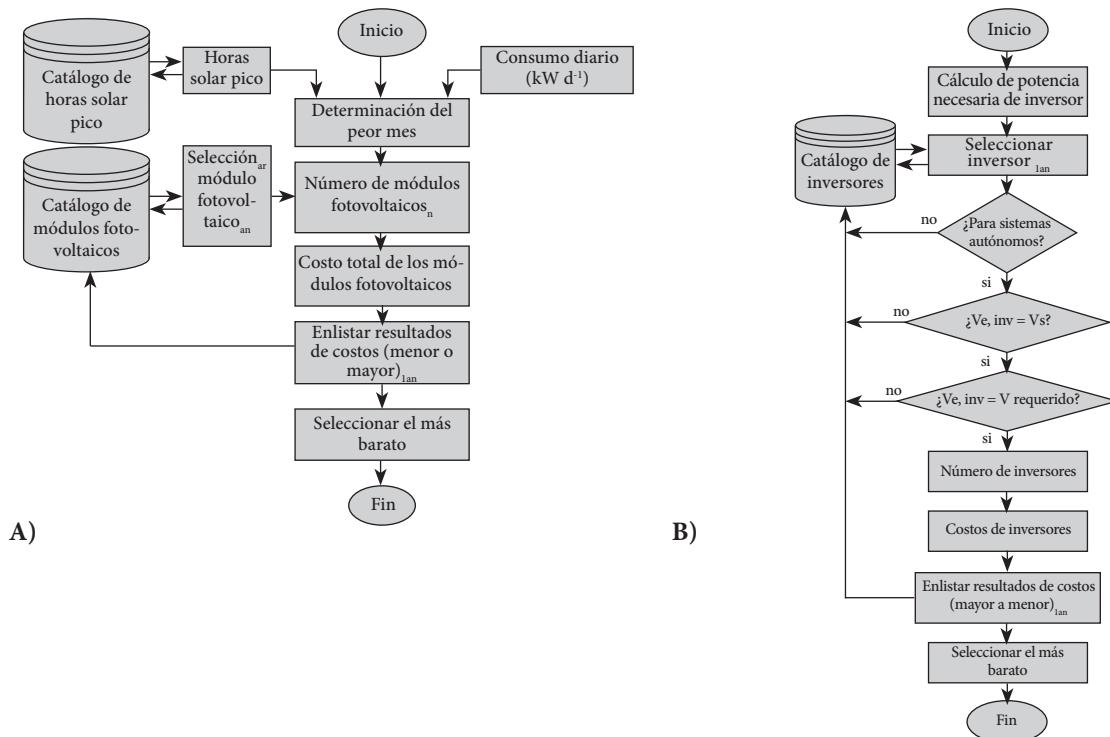


FIGURA 2. Diagramas de selección de los componentes fotovoltaicos: A) Módulos fotovoltaicos, B) Inversores.

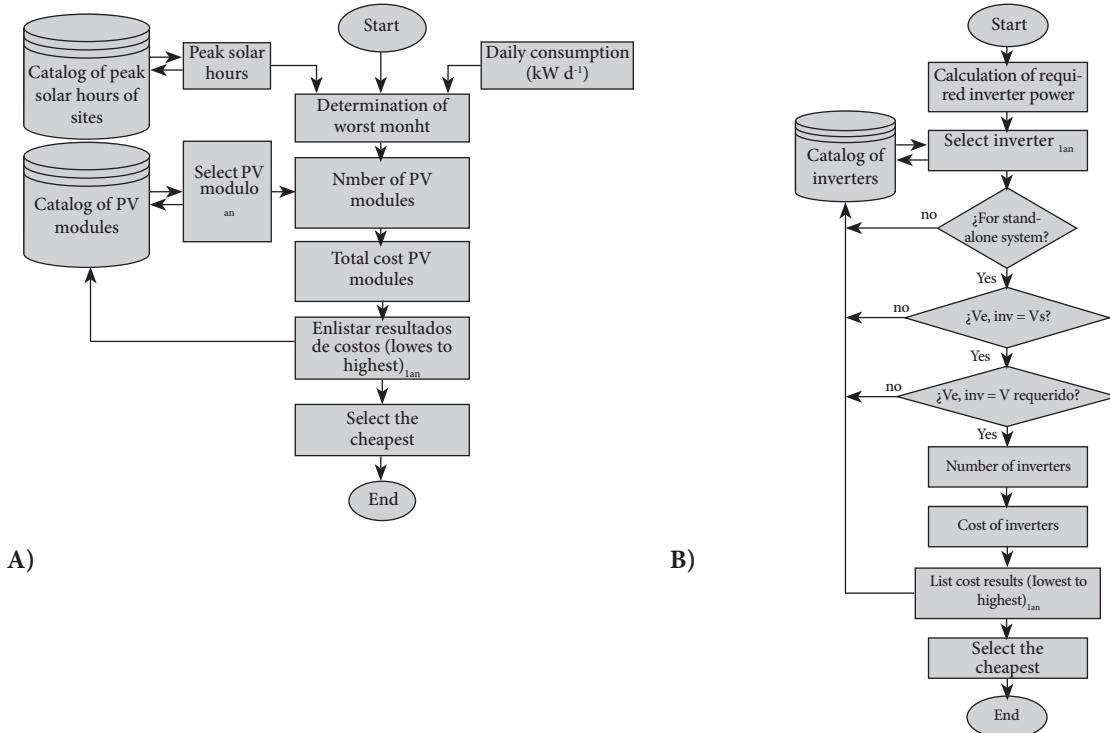


FIGURE 2. PV component selection diagrams: A) PV modules, B) Inverters.

en todos los casos, los costos de módulos fotovoltaicos, baterías para tres días de autonomía, controladores, inversores y la mano de obra.

El costo de un sistema fotovoltaico es proporcional a la energía usada. Por lo tanto, la energía utilizada en el invernadero, tendrá el mismo costo independientemente de

different consumption levels was always higher than when using 6 and 12 V batteries. When the costs of 2 and 6 V batteries are similar, it is preferable to install a 2 V battery. Using 12 V batteries (lower cost) involves connecting them in parallel. The IIE (2010) suggested that connections in parallel tend to be harmful and that it is not appropriate to make such arrays in quantities of more than three batteries.



Selección Sistema Fotovoltaico para Invernadero

Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua
Universidad Autónoma Chapingo

Sistema Autónomo | Sistema red |

SISTEMA AUTÓNOMO

Catalogo

Inventario de Aplicaciones

Datos Generales

Reporte

Nuevo calculo

INVENTARIO DE APLICACIONES

Introduce la potencia de los motores que utilizas en tu sistema de invernadero

Ventilacion | Sombreo | Iluminación | Humidificación | Calefacción | Riego | Accesorios |

FIGURA 3. Pantalla de inicio del software de selección de sistema fotovoltaico.

FIGURE 3. Home page of the PV system selection software.

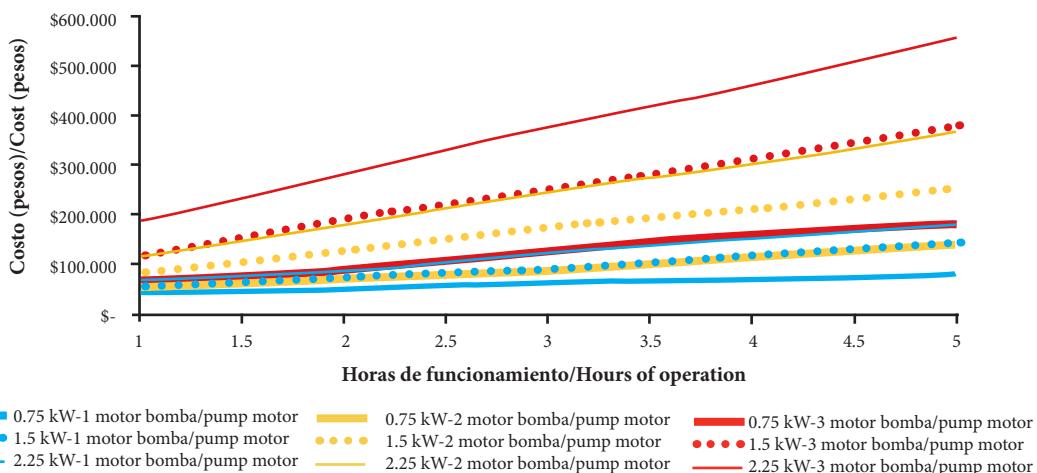


FIGURA 4. Costo de SFC para diferentes horas de uso de 1, 2 o 3 bombas de 0.75, 1.5 y 2.25 kW.

FIGURE 4. PV system cost for different hours of using 1, 2 or 3 pumps of 0.75, 1.5 and 2.25kW.

los equipos en uso. Por ejemplo, se puede observar en la Figura 5 que el uso de una bomba de 2.5 kW tiene un costo similar al de utilizar tres bombas de 0.75 kW con las mismas horas de uso. El costo del uso de una bomba de 1.5 kW funcionando durante tres horas por día, es de \$ 85,500 pesos y si se usa durante 25 años gastaría 41000 kWh (1.5 kW *3 horas *365 días *25 años). Finalmente, el costo de un kWh es de 2.08 pesos (sin contemplar otros gastos de operación).

La elección de un tipo de batería, afecta directamente el costo total del SFV. La Figura 5 muestra la relación económica entre el uso de diferentes tipos de baterías para diferentes días de autonomía. El costo del uso de las baterías de 2 V en los diferentes consumos siempre fue mayor al uso

Analysis of peak solar hours (Psh)

Figure 6 shows that the winter months are the months with the least Psh, with values up to 4 Psh, while in the spring the values reached up to 5.8 Psh. During the months of June, July and August 2012, a decrease in radiation caused by the autumn rains and cloudy days was observed. Because of the above, a week in June (15 to 22) was selected to observe in greater detail the behavior of solar radiation (Figure 7).

The most critical day was Friday, june 21 when $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ was reached, while the Thursday and Saturday were also affected by clouds, with maximum radiation levels of 427 and $441 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ respectively.

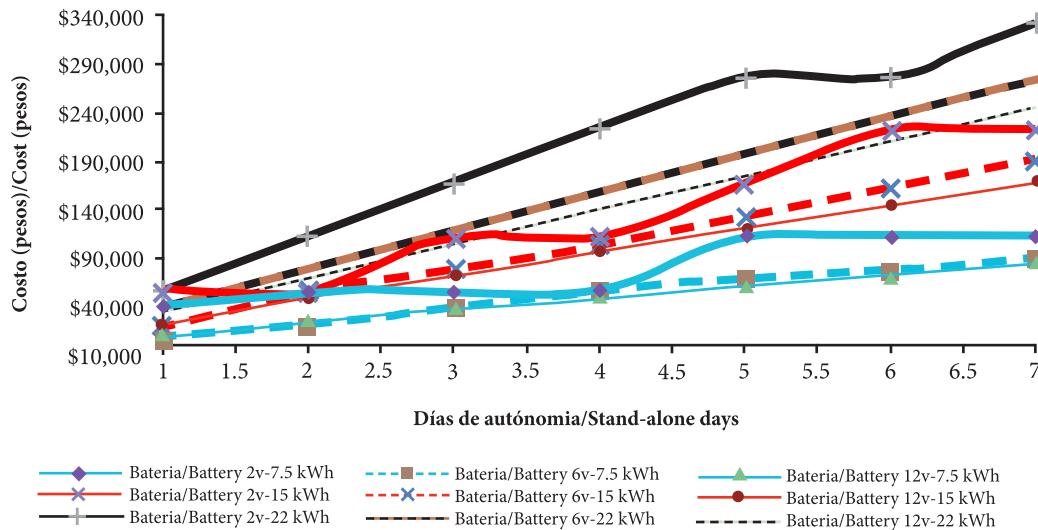


FIGURA 5. Costo de diferentes baterías para $22.38 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$.

FIGURE 5. Cost of different batteries for $22.38 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$.

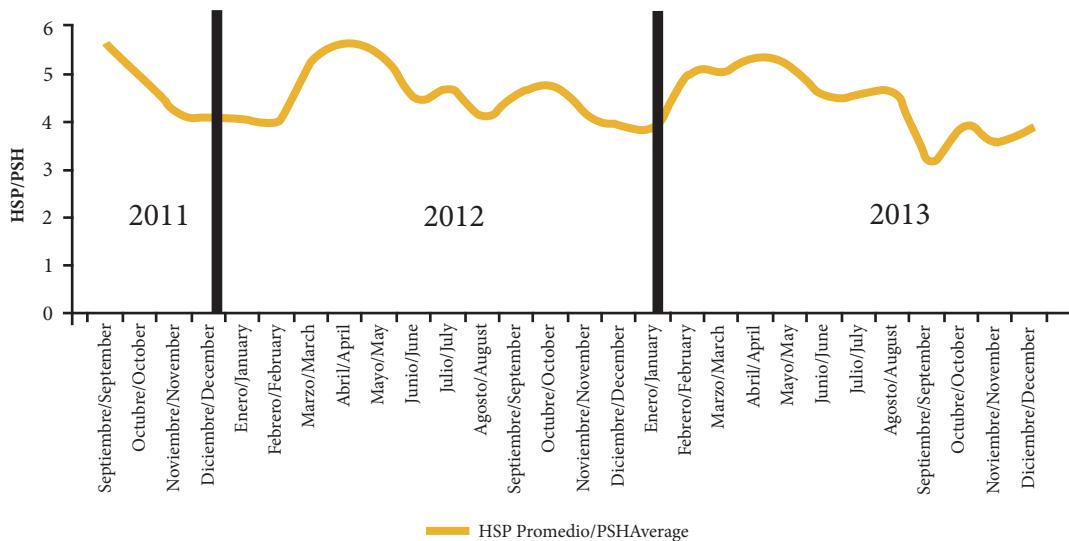


FIGURA 6. Horas solar pico de 2011 a 2013.

FIGURE 6. Peak solar hours from 2011 to 2013.

de baterías de 6 y 12 V. Cuando los costos de baterías de 2 y 6 V sean similares, es preferible instalar una batería de 2 V. El uso de baterías de 12 V (costo más económico) implica conectar la conexión de éstas en paralelo. La IIE (2010) sugirió que las conexiones en paralelo suelen ser dañinas y no es conveniente hacer este tipo de arreglos en cantidades mayores a tres baterías.

Análisis de horas solar pico (Hsp)

En la Figura 6 se observa que los meses de invierno, son los meses con la menor Hsp, con valores hasta de 4 Hsp, mientras que en la primavera los valores alcanzaron hasta 5.8 Hsp. Durante los meses de junio, julio y agosto del 2012 se observó la disminución de la radiación, provocada por las lluvias de otoño y los días nublados. Debido a lo anterior se tomó una semana del mes de junio (15 al

Analysis of electrical parameters

The irrigation system operates at a flow rate of $1.15 \pm 0.35 \text{ liter} \cdot \text{s}^{-1}$, a pressure of $0.3 \pm 0.01 \text{ MPa}$ and a daily consumption of $13,663 \text{ kWh}$ calculated according to the irrigation schedule (Figure 8). It consists of two 2.2 kW pumps and a 1.1 kW blower running 3 and 0.4 hours per day respectively. Watering begins at 9:00 am daily and seven irrigation applications were applied per day.

In total, 2,292 data per second, which is equivalent to 38 minutes to perform the analysis of the electrical parameters, were recorded. The maximum starting current reached 17 A in line 2 and 23 A in lines 1 and 3, reestablishing at $12 \pm 1 \text{ A}$ when the irrigation system became operational, with an average voltage of 211 V in the three lines. In recording the behavior of the powers, the start-up peaks stood out.

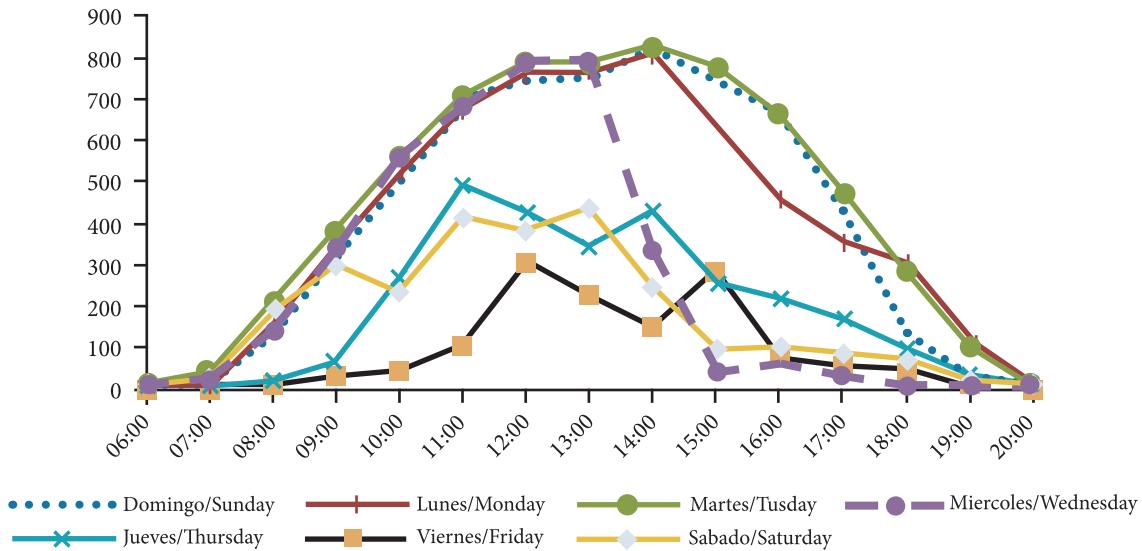


FIGURA 7. Radiación diaria de una semana junio 2013.

FIGURE 7. Daily radiation during a week in June 2013.

22) para observar con mayor detalle el comportamiento de la radiación solar (Figura 7).

El día más crítico fue el viernes 21 donde se alcanzó los $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Mientras que el jueves y sábado también fueron afectados por las nubes, con radiaciones máximas de 427 y $441 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ respectivamente.

Análisis de parámetros eléctricos

El sistema de riego funciona con un caudal de $1.15 \pm 0.35 \text{ litro}\cdot\text{s}^{-1}$, una presión de $0.3 \pm 0.01 \text{ MPa}$ y un consumo diario de $13,663 \text{ kWh}$ calculado de acuerdo con la programación de riego (Figura 8). Consta de dos bombas de 2.2 kW y un soplador de 1.1 kW que trabajan 3 y 0.4 horas por día respectivamente. Los riegos inician todos los días a las 9:00 am y se aplicaron siete riegos por día.

Real power reached $6500 \pm 250 \text{ W}$ for 2 seconds at the start and remained at $5500 \pm 250 \text{ W}$. Reactive power was $2,200 \text{ VAR}$ and the power factor was 0.8 ± 0.01 . The same value was taken into account for verifying the calculation of the 2 kVAR capacitor bank (Figure 9).

The impact of the capacitor bank in improving the electrical system is shown in Figure 10. The measurement was only made for 23 s to detect start-up peaks. The current with the capacitor bank activated decreased by 2 A and the system's starting current reached a peak value of 17 A when the three motors ran together; seconds later, it stood at 13 A . Real power behavior with or without the capacitor bank remained unchanged, i.e., although the billing cost was the same, the main benefit was reflected in evading the penalty for low power factor as set out in the DOF (1991). On the other hand, although there was a de-

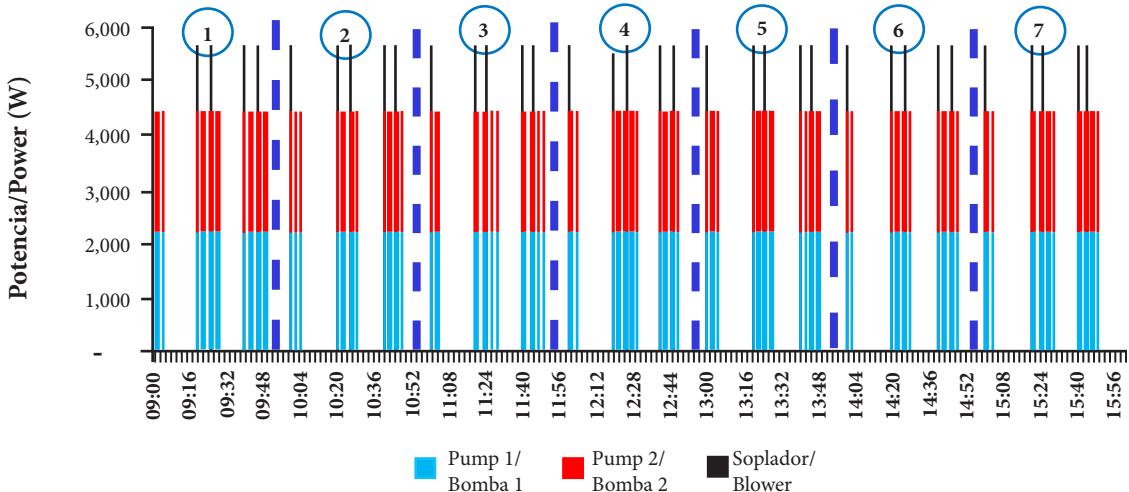


FIGURA 8. Comportamiento del ciclo de riego durante un día normal.

FIGURE 8. Behavior of the irrigation cycle during a normal day.



FIGURA 9. Banco de capacitor conectado a sistema de riego.

FIGURE 9. Capacitor bank hooked up to irrigation system.

Se registraron 2,292 datos por segundo, los cuales equivalen a 38 minutos para realizar el análisis de los parámetros eléctricos. La corriente de arranque máxima alcanzó 17 A en la línea 2 y 23 A en las líneas 1 y 3, restableciéndose a 12 ± 1 A cuando el sistema de riego entró en funcionamiento, con un voltaje medio de 211 V en las tres líneas. En el registro del comportamiento de las potencias resaltaron los picos de arranque. La potencia real alcanzó $6,500 \pm 250$ W durante 2 segundos en el arranque y se mantuvo a $5,500 \pm 250$ W. La potencia reactiva fue de 2,200 VAR y el factor de potencia fue 0.8 ± 0.01 . Ese mismo valor se tomó en cuenta para la verificación del cálculo del banco de capacitor de 2 kVAR (Figura 9).

En la Figura 10 se presenta el impacto del banco de captores en la mejora del sistema eléctrico. La medición se hizo sólo durante 23 s para detectar los picos de arranque. La corriente con el banco de capacitor encendido se disminuyó en 2 A y el arranque del sistema alcanzó un valor pico de 17 A cuando los tres motores funcionaron de manera conjunta, segundos después, se mantuvo en 13 A. El comportamiento de la potencia real con o sin el banco de captores no registró variaciones, es decir, aunque el costo de la facturación fue el mismo, el principal beneficio se reflejó en evadir la penalización por bajo factor de potencia según lo establecido en el DOF (1991). Por otra parte, aunque se observó una disminución de la potencia reactiva, cuando se utilizó un banco de captores fue posible reducirla un 60 %, con lo que el FP se incrementó hasta 0.94.

Selección de componentes fotovoltaicos para Tlapeaxco

Con los datos del sistema de riego de invernadero el software arrojó los parámetros de los subsistemas: el subsistema de generación se compone de dos arreglos fotovoltaicos de 8 MFV marca Solarworld de 230 W cada uno; mientras

crece en reactivo power, when a capacitor bank was used it was possible to reduce it by 60 %, increasing the PF to 0.94.

Selection of PV components for Tlapeaxco

With the data from the greenhouse irrigation system, the software showed the subsystem parameters: the generation subsystem consists of two PV arrays, each made up of eight 230 W Solar World PVMs, while the storage system includes 12 6-V Surrete Rolls Model S-600 batteries connected in series (4) and in parallel (3) to form a 24 V system with a 1,800 Ah capacity and a 100 h discharge regime. The regulation subsystem is composed of two Outback model FlexMax 80 controllers and the adaptation subsystem consists of a Xantrex model XW7024-230-50 charger-inverter, with input of 24 Vdc and output of 220 VAC.

PV design and installation

Two racks for PV arrays with an inclination of 19° and 0° to the south, which covered a total area of 27 m², were designed. In total, 16 PV modules were installed on the roof of the Tlapeaxco fertigation room and connected in parallel with a No. 10 AWG cable.

The batteries were installed in the system control room and No. 4 AWG cable was used for the connections. The regulators were connected to the battery array: each regulator was connected to an array of PV modules with a No. 4 AWG cable. The inverter connection was made with a No. 3/0 AWG cable at a maximum distance of 3 m from the battery array. For the protection and guidance of the connected PVM cables, a conduit pipe with an inch-thick wall was used. A surge protector and 80 A circuit breakers were installed in the control room. The entire PV system was independently grounded (Figure 11).

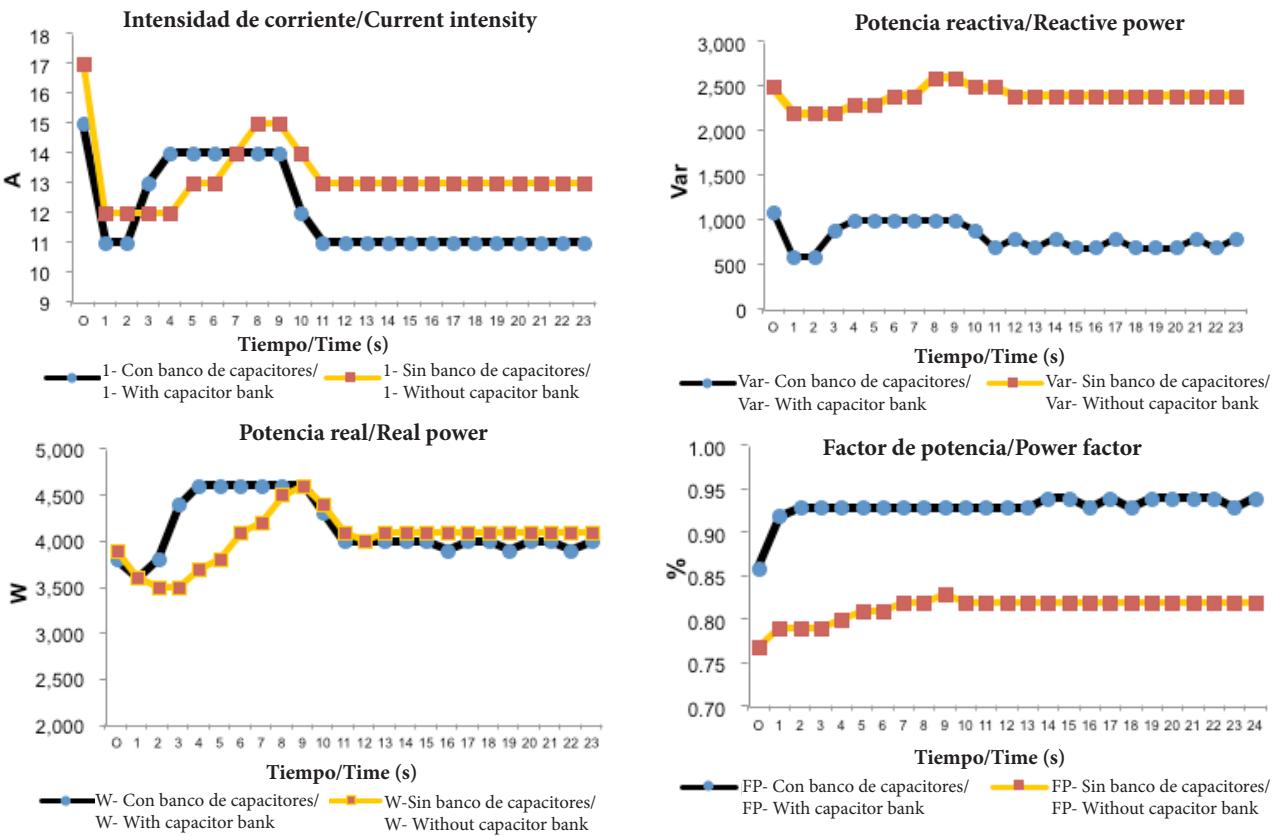


FIGURA 10. Comportamiento de los parámetros eléctricos con o sin banco de capacitores.

FIGURE 10. Behavior of electrical parameters with or without a capacitor bank.

que el sistema de acumulación incluye 12 baterías Surrette Rolls Modelo S-600 de 6 V conectadas en serie (4) y en paralelo (3) para conformar un sistema de 24 V con una capacidad de 1,800 Ah con un régimen de descarga de 100 h. El subsistema de regulación está compuesto por dos controladores Marca Outback, modelo Flexmax 80 y el subsistema de adaptación consta de un cargador-Inversor de la marca Xantrex, modelo XW7024-230-50, con entrada de 24 Vdc y salida de 220 Vac.

Diseño e instalación fotovoltaica

Se diseñaron dos bastidores para los arreglos FV con una inclinación de 19° y 0° al sur, los cuales abarcaron una superficie total de 27 m². Se instalaron 16 módulos fotovoltaicos en el techo del cuarto de fertirriego de Tlapeaxco y se conectaron en paralelo con un cable de calibre 10 AWG.

Las baterías se instalaron en el cuarto de control del sistema y se utilizó un cable de calibre 4 AWG para las conexiones. Los reguladores se conectaron al arreglo de las baterías: cada regulador se conectó a un arreglo de módulos FV con un calibre de 4 AWG. La conexión del inversor se realizó con un cable 3/0 AWG a una distancia máxima de 3 m del arreglo de baterías. Para la protección y la conducción de los cables conectados a los MFV, se utilizó tubería conduit de pared gruesa de una pulgada. En el cuarto de control se instaló una protección contra sobretensiones e interruptores termomagnéticos de 80 A. Toda la instalación fotovoltaica se aterrizó a tierra, instalada exclusivamente para el sistema fotovoltaico (Figura 11).

The real cost of acquiring the PV components is shown in Table 2.

During the 25-year life cycle of the PV components, the batteries are the only components that should be replaced every eight years provided that the other equipment does not develop any faults after their warranty period expires. That is, the batteries should be replaced at least twice more; also, an annual maintenance cost of \$ 1,000.00 is included to check the other PV equipment, raising the cost of the system's useful life to \$ 423,714.70.

The main features of the Tlapeaxco PV system are presented in Table 3. Although the obtained cost of the installed PV system is very similar to the rates charged by Mexico's Federal Electricity Commission (CFE), the latter have increased 4.5 % since 2002. Due to the above, a PV system is profitable in the medium term from an economic standpoint. It is important to note that such systems are more suitable in places far away from the electrical grid.

PV system monitoring

PV system monitoring is optional at installation, although it is important to analyze the system's overall behavior and performance.

Figure 13 presents the results of the PV system charge and discharge monitoring that was carried out in April 2012. Notably the radiation is above 5,000 Wm⁻². The energy

CUADRO2. Costo real del sistema fotovoltaico de Tlapeaxco.
TABLE 2. Real cost of the Tlapeaxco PV system.

	Cantidad / Quantity	\$/Unidad / \$/Unit	Subtotal
MFV / PVMs	16	6,800.30	\$ 108,804.80
Controladores / Controllers	2	9,408.10	\$ 18,816.20
Inversor / Inverter	1	52,903.50	\$ 52,903.50
Baterías / Batteries	12	4,671.95	\$ 56,063.40
Instalación / Installation			\$ 50,000.00
			Total \$286,587.90



1. Arreglo fotovoltaico; 2. Sistema de riego; 3. Interruptor; 4. Supresor de picos; 5. Controlador de carga; 6. Baterías; 7. Inversor; 8. Barra de tierra.
 1. PV array; 2. Irrigation system; 3. Interrupter; 4. Surge protector; 5. Charge controller; 6. Batteries; 7. Inverter; 8. Grounding rod.

FIGURE 11. Componentes del sistema voltaico.
FIGURA 11. PV system components.

El costo real de la adquisición de los componentes FV se muestra en el Cuadro 2.

Durante los 25 años del ciclo de vida de los componentes fotovoltaicos, las baterías son los únicos componentes que deben cambiarse cada ocho años siempre y cuando el resto de los equipos no presenta fallas después de los años de garantía. Es decir, se sustituirán las baterías en al menos dos ocasiones más; además se contempla un costo de mantenimiento anual de \$1,000.00 para la revisión del resto de los equipos FV, con lo que el costo de la vida útil del sistema asciende a \$ 423,714.70.

En el Cuadro 3 se presenta las características principales del SFV de Tlapeaxco. Aunque el costo obtenido del sistema fotovoltaico instalado es muy similar a las tarifas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), estas últimas se han incrementado hasta un 4.5 % desde el 2002. Debido a lo anterior, desde un punto de vista económico un SFV es rentable a mediano plazo. Es importante señalar que este

produced by the PV array is directly proportional to the insolation it receives. Also, consumption behavior is proportional to energy production, which ensured the power supply to the irrigation system. A minimum voltage of 21 V, i.e., electricity supplied with the battery bank, was recorded. The maximum voltage reached a value of 27 V, which made it possible to recharge the batteries after their dis-

CUADRO 3. Costos de producción del sistema fotovoltaico de Tlapeaxco.

TABLE 3. Production costs of the Tlapeaxco PV system.

Concepto/ Item	Valor/ Value
Potencia instalada / Installed power	3.68 kW
Producción estimada diaria / Estimated daily production	18.4 ± 4 kWh
Costo de vida útil (25 años)/ Cost of useful life (25 years)	\$ 423,714.70
Producción estimada durante 25 años / Estimated production over 25 years	167,900 kWh
Costo por kWh / Cost per kWh	\$2.52

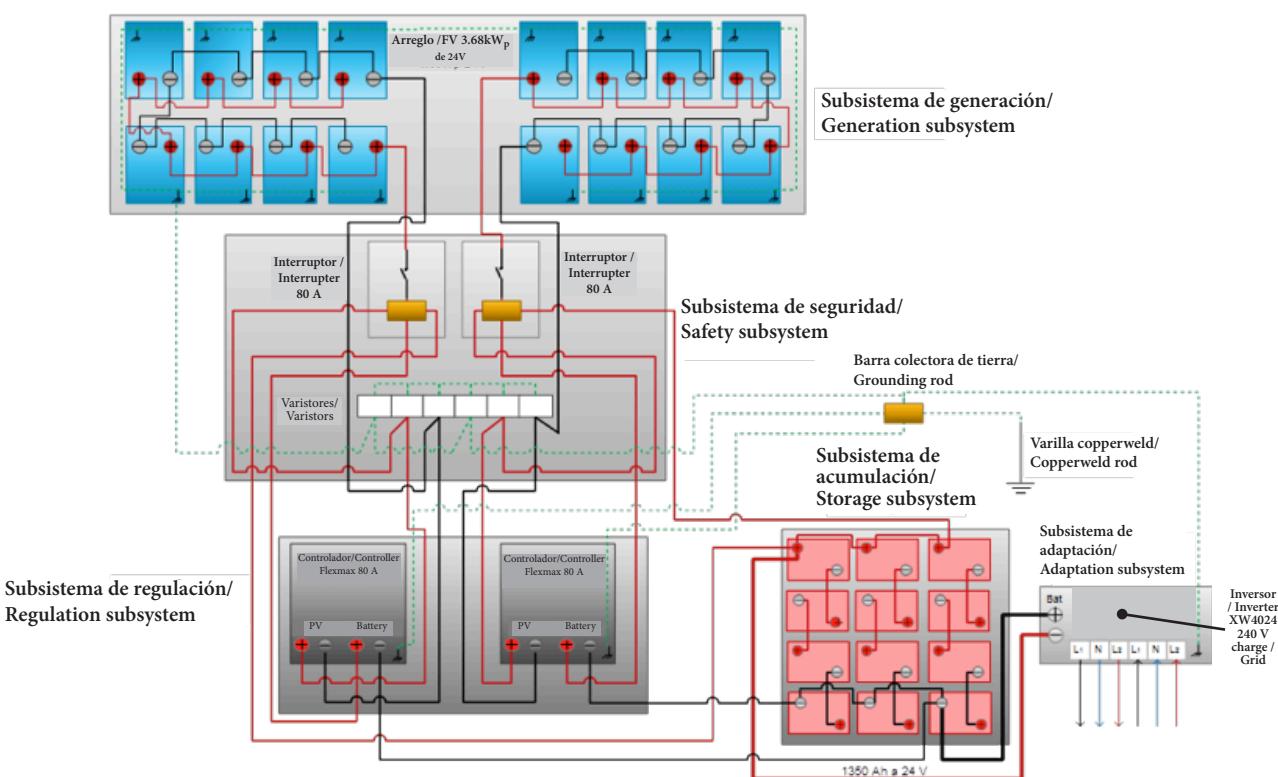


FIGURE 12. Electrical diagram of Tlapeaxco PV system.

FIGURA 12. Diagrama eléctrico del sistema fotovoltaico de Tlapeaxco.

tipo de sistemas son más convenientes en lugares alejados de la red eléctrica.

Monitoreo del sistema fotovoltaico

El monitoreo de un sistema fotovoltaico es opcional a su instalación, aunque es importante para analizar el comportamiento y funcionamiento del sistema en general.

La Figura 13 presenta los resultados del monitoreo de la carga y descarga del sistema fotovoltaico que se realizó en

charge. The PV system consumed 1.5 kWh per day for the operation of the inverter and charge controllers.

CONCLUSIONS

A methodology for selecting the components of a PV system based on the equipment, hours of use and consumption of greenhouse systems was developed. For the selection of the PV components, catalogues listing greenhouse equipment, sites with peak solar hours, PV modules, batteries, controllers and inverters were created,

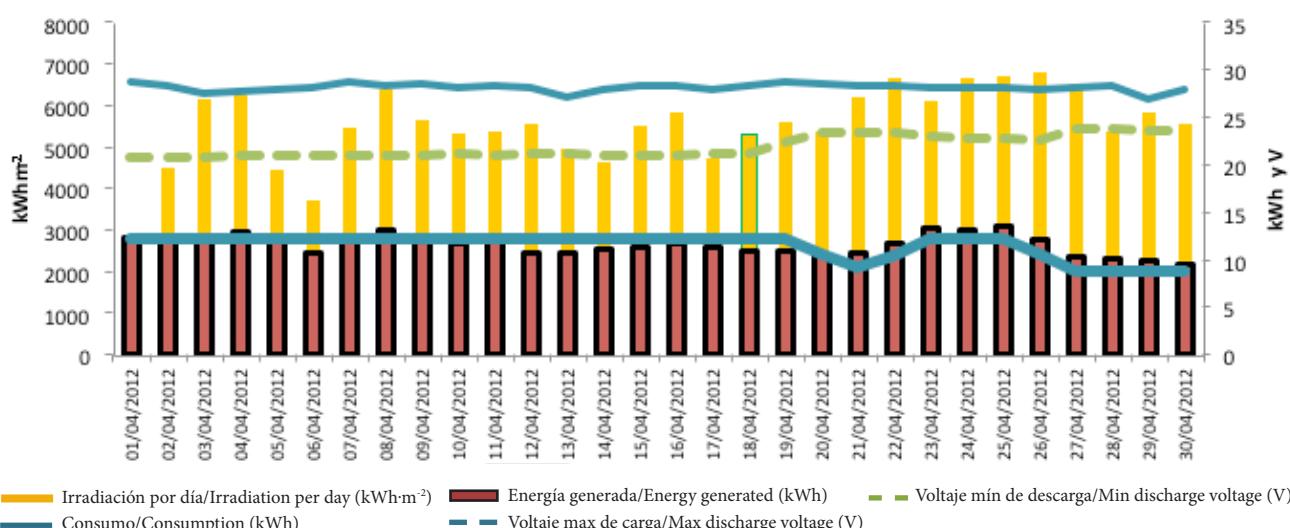


FIGURA 13. Resultado de producción y consumo de energía en el mes de abril 2012.

FIGURE 13. Results of energy production and consumption in April 2012.

abril del 2012. Es notable que la radiación está por encima de $5,000 \text{ Wm}^{-2}$. La energía que produce el arreglo fotovoltaico es directamente proporcional a la insolación que recibe. Asimismo, el consumo tiene un comportamiento proporcional a la producción de energía, lo que garantizó el suministro de energía al sistema de riego. Se registró un voltaje mínimo de 21 V, es decir, se suministró energía eléctrica con el banco de baterías. El voltaje máximo alcanzó un valor de 27 V, lo que permitió recargar las baterías después de su descarga. El sistema fotovoltaico consumió 1.5 kWh diarios para la operación del inversor y los controladores de carga.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología de selección de los componentes del sistema fotovoltaico en función de los equipos, horas de uso y consumo de los sistemas de un invernadero. Para la selección de los componentes fotovoltaicos se realizaron catálogos de los equipos de invernaderos, sitios con horas solar pico, módulos fotovoltaicos, baterías, controladores e inversores y se desarrollaron algoritmos para realizar una selección económica.

La metodología de cálculo, catálogos y algoritmos sirvieron como base para el desarrollo del software “Selección de sistema fotovoltaico para invernadero”, el cual resultó ser una herramienta muy útil y eficaz para el análisis la estimación en costos y la cantidad de equipos fotovoltaicos necesarios para suministrar energía eléctrica a invernaderos. El software podrá seleccionar equipos de una mejor manera una vez que se amplíe y actualice el catálogo de los equipos fotovoltaicos.

La instalación de un sistema fotovoltaico no solamente implica la producción de la energía eléctrica necesaria, sino también el uso consciente de la electricidad. El uso de motores y equipos de alta eficiencia, en conjunto con un análisis previo de la calidad de la energía del sistema eléctrico, que permita detectar fallas y corregir los parámetros eléctricos cuando sea necesario, han demostrado ser prácticas útiles para lograr un sistema óptimo y confiable. Con la instalación del banco de capacitores se garantizó un uso eficiente de la energía al aumentar a 0.94 el factor de potencia y reducir el 60 % de la potencia reactiva.

Se diseñó e instaló un sistema fotovoltaico que comprende un potencia instalada de 3.68 kW_p con una producción diaria de 14.5 ± 1.5 , una capacidad de acumulación para 1,800 Ah reguladas por dos controladores de 80 A y un inversor de 7000 W con salida de 220 V bifásica. El costo del kWh durante 25 años es de \$ 2.54 kWh lo que hace rentable con respecto al costo del kWh (hasta \$ 3 kWh en DAC) de la CFE sin considerar los aumentos anuales de las tarifas eléctricas.

LITERATURA CITADA

- Amtmann, M. 2009. Nichos de mercado para sistemas fotovoltaicos en conexión a la red eléctrica en México. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). 228 p. Disponible en: <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/6942/1/NichosMercSF2009GTZ.pdf>
- Bermejillo C., M. 2007. La energía solar, una alternativa energética viable para el control climático en invernaderos. Vida rural. 248:28-30. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Vrural/Vrural_2007_248_2_30.pdf Diario Oficial de la Federación. 1991. Acuerdo que autoriza el ajuste y restructuración de las tarifas para suministro y venta de energía eléctrica.
- Escobar M., A.;Torres R., C.;Hincapie, I. 2010. Conexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica. Scientia et technica. 16 (44): 31-36. Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistacioncia/article/download/1751/1225>
- FUMEC. Sector energía solar. 2010. Disponible en: <http://fumec.org.mx/v5/htdocs/solar.pdf>
- Ibáñez P., M.;RosellP., J.;RosellU., J. 2004. Energías Renovables, Tecnología Solar. 1^a Edición, Mundiprensa, España. pp: 259-344.
- IIE. 2010. Curso de Capacitación para técnicos en sistemas fotovoltaicos interconectados con la red, Aplicaciones a pequeña escala. 1^a edición. 126 p. NOM-001-SEDE-2012. Instalaciones Eléctricas. Disponible en: <http://dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=11&day=29>
- Pérez R., R.;Pérez L., A.; Martínez A., J. 2011. Optimización de sistemas híbridos de energía para la electrificación rural de comunidades indígenas de México. Ingeniería Agrícola y Biosistemas. 3(1): 33-

39. Disponible en: <http://portal.chapingo.mx/revistas/phpscript/download.php?file=completo&id=MTkwOQ==>
- Rodríguez B., C.; Sarmiento S., A. 2011. Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a electrificación rural. Ingeniería Mecánica. 14(1): 13-21. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v14n1/im02111.pdf>
- Romantchik K., E. 2008. Energía solar para invernaderos. 1er. Simposio Internacional de Invernaderos. pp 129-138.
- Romantchik K., E.; Gómez D., M.; Romero H., M.; Martínez C., T. 2013. Selección de sistema fotovoltaico para invernadero. Software, ISBN: 978-607-12-0295-6. Disponible en <http://sistemas.chapin-go.mx/empresas/SICF/>.
- Sánchez J., A. 2006. Tecnología fotovoltaica aplicada al bombeo de agua. Fideicomiso de Riesgo compartido FIRCO-SAGARPA.
- Sánchez M., I. 2004. La energía solar y los invernaderos en Navarra: aplicación de energías renovables. Navarra agraria. 142: 35-44. Disponible en: <http://www.navarraagraria.com/n142/arsolar.pdf>