

OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE INSTALACIONES DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA MAXIMIZAR EL AHORRO ENERGÉTICO EN ENTORNOS RURALES

E. Sierra, C. Fernández, A. Hossian, H. Chacón, H. Moyano, H. León, D. Lorenzetti, R. Gómez

Laboratorio de Energías Renovables
Unidad Académica Caleta Olivia
Universidad Nacional de la Patagonia Austral
Acceso Norte Ruta Nacional N° 3 – (9011) Caleta Olivia – Santa Cruz
Telefax 0297-4854888 e-mail: dloren@uaco.unpa.edu.ar

RESUMEN: Un sistema fotovoltaico difiere mucho en su filosofía de funcionamiento de un sistema de energía convencional. En este sentido, el cálculo de la energía consumida por día en una instalación fotovoltaica dependerá de la cantidad de horas diarias de operación de cada elemento conectado a la carga. Para el caso de viviendas rurales, este consumo dependerá de las costumbres y características de los usuarios y fluctuará constantemente. A efectos de contribuir a resolver este aspecto de incertidumbre en el diseño y operación del sistema, el presente trabajo presenta un algoritmo de conexión y desconexión automática de componentes de carga a la instalación fotovoltaica de modo de minimizar los consumos de energía acumulada en la batería y maximizar el aprovechamiento de la energía solar. El algoritmo presentado puede ser implementado mediante un PLC (Controlador Lógico Programable) con mínimo impacto en el consumo.

Palabras clave: energía solar, sistema fotovoltaico, ahorro energético, optimización, automatización.

INTRODUCCION

Un sistema fotovoltaico difiere mucho en su filosofía de funcionamiento de un sistema de energía convencional (Aguilera y Lorenzo, 1991) y ello obliga enfocar los problemas de su diseño y puesta en funcionamiento desde una óptica diferente. En general, la experiencia al respecto demuestra que cuando un sistema fotovoltaico no alcanza a cumplir los objetivos para los que fue pensado, en la mayor parte de las ocasiones la causa reside en errores de diseño, fruto de emplear una metodología idéntica a la empleada para diseñar una extensión de la red eléctrica convencional o un generador diesel (Ibáñez Plana et al, 2005).

Un sistema convencional de energía se diseña para que en cualquier momento sea capaz de proporcionar una potencia máxima. La potencia máxima está en relación con la sumatoria de las potencias individuales de los equipos que componen la carga. A partir de ahí, la demanda de energía se atiende consumiendo más o menos combustible en el centro de operación. El problema fundamental que se debe resolver es una ecuación consistente en igualar potencias. La energía consumida en la carga afecta fundamentalmente a la hora de calcular los ingresos procedentes de la venta de energía o los costos recurrentes de funcionamiento.

Un sistema fotovoltaico se diseña para que, a lo largo de su vida útil sea capaz de proporcionar la energía necesaria para el funcionamiento de una determinada carga. El problema básico que se debe resolver es por lo tanto, una ecuación de igualación de energías. La potencia que el sistema debe suministrar en un momento determinado no afecta al tamaño del generador solar (principal componente del sistema), sino únicamente a algunos elementos, como por ejemplo la sección crítica del cableado, cuya importancia económica en el conjunto del sistema es secundaria. Los costos recurrentes de funcionamiento, al no precisar de combustible, son fundamentalmente independientes de la mayor o menor demanda de energía en la carga. En la práctica, la necesidad de razonar en términos de energías se traduce en la necesidad de considerar al sistema no sólo como un generador de energía, sino como un todo que incluye los elementos de la carga.

La definición de un sistema fotovoltaico comporta tres elementos básicos: el generador propiamente dicho, el acumulador y la carga. La Figura 1 representa esta situación. La barrera señalada en ella indica el punto donde debe establecerse la ecuación fundamental:

$$\text{ENERGIA GENERADA} = \text{ENERGIA CONSUMIDA} \quad (1)$$

Para el cálculo de la energía consumida diariamente en la carga, basta con multiplicar la potencia de cada uno de los equipos que la componen por el número de horas de utilización diaria. Por lo tanto, el consumo total de energía por día en una vivienda alimentada mediante una instalación fotovoltaica estará dada por la ecuación (2).

$$E_{cd} = \sum_{i=1}^n P_i x_i \quad (2)$$

E_{cd} = Energía consumida por día

P_i = Energía consumida por cada aparato

x_i = Cantidad de horas de funcionamiento del aparato

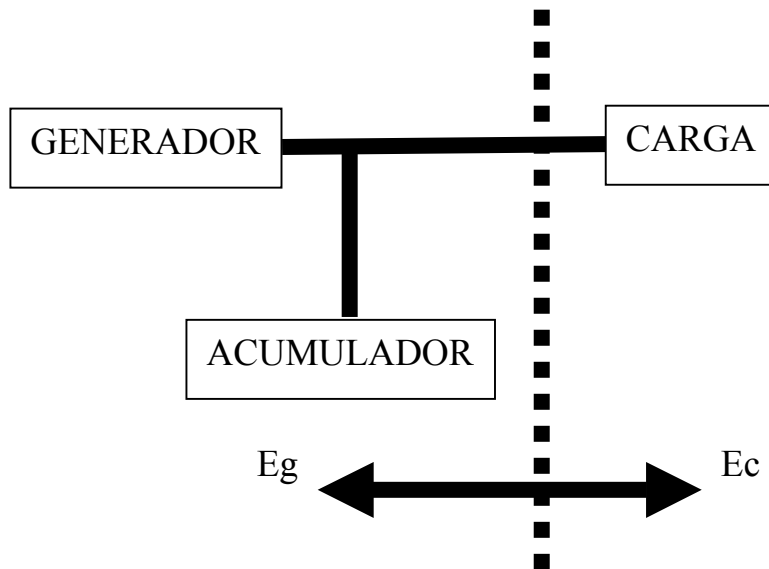


Figura 1: Esquema conceptual de un generador fotovoltaico

La mayoría de las cargas consumen aproximadamente la misma cantidad de energía todos los días, dependiendo de las horas y por esta razón se ha elegido el día de 24 horas como período de cálculo. Este cálculo que aparentemente es sencillo, encierra, sin embargo, una de las mayores incertidumbres que se ha de abordar para realizar el diseño. El número de horas diarias que se utiliza una carga se conoce con precisión sólo en algunos de los casos. En muchos de ellos depende de las costumbres particulares de los usuarios y fluctúa mucho de unos días a otros. El objetivo de este trabajo es determinar esta cantidad de horas en función de las costumbres del usuario por un lado y de la necesidad de optimizar el aprovechamiento y el ahorro de energía, por el otro.

El elevado precio de la energía fotovoltaica aconseja emplear exclusivamente equipos de alta eficiencia en la carga. Además, en los sistemas convencionales, la relación entre el usuario y su fuente de energía se establece, principalmente a través de la facturación mensual. Es decir, el usuario puede consumir tanto cuanto sea capaz de pagar. En los sistemas fotovoltaicos, tal relación se establece en términos muy diferentes, ya que el usuario puede consumir lo que su reserva energética le permite. La experiencia demuestra que esta limitación es generalmente bien aceptada, especialmente en los medios rurales, donde el sentimiento de autonomía está todavía muy arraigado y se traduce en una autodisciplina de consumo que rebaja los niveles de energía consumida y tiene efectos beneficiosos sobre el rendimiento de los sistemas.

Los consumos de energía realizados por las familias con instalaciones de energía solar fotovoltaica muestran diferencias notables según la disponibilidad energética y la corresponsabilidad del consumidor además como productor. En este sentido, el mejor método para predecir la energía consumida en la carga de un sistema fotovoltaico consiste en utilizar los resultados medidos en experiencias pasadas y en situaciones socioculturales y ambientales semejantes.

El cálculo de la energía generada diariamente por el o los módulos fotovoltaicos es un problema que se traduce básicamente en predecir cuál será la radiación solar que llega a la superficie de los módulos. Hay que recurrir a las evaluaciones de carácter estadístico que basadas en las observaciones meteorológicas realizadas durante largos períodos de tiempo, se publican para cada país. El dato normalmente disponible (para cada mes del año) es el valor medio mensual de la radiación diaria sobre una superficie horizontal. La utilidad de este dato es indudable. Permite calcular el número de módulos fotovoltaicos necesarios para que la energía generada durante ese mes iguale a la energía que se pretende consumir en la carga (Soler et al).

La transformación de la radiación solar en electricidad útil pasa por una cadena de elementos que pueden caracterizarse por sus respectivos rendimientos η_G , η_A , η_b , y η_c , definidos, en el caso más general, como indica la Figura 2. Llamando G_d a la irradiación solar incidente sobre los colectores medida en KWh/m² día, puede escribirse la expresión para la energía útil E_{AC} entregada por el sistema:

$$E_{AC} = G_d S \eta_g \eta_A \eta_b \eta_c \quad (3)$$

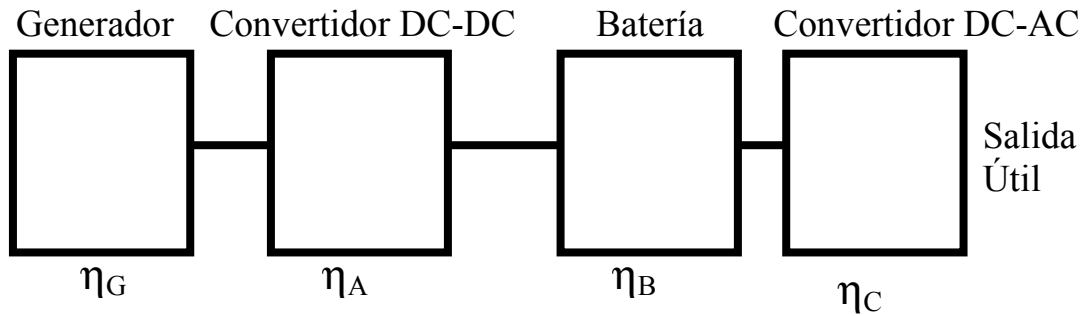


Figura 2: Definición de rendimientos de la cadena de transformación de la radiación solar en energía útil

MÉTODO PROPUESTO DE DIMENSIONAMIENTO

La determinación de las horas de operación de las cargas de la instalación fotovoltaica se basa en las siguientes premisas fundamentales:

- Las preferencias de usuario en cuanto a un perfil de operación mínima de las cargas conectadas a la instalación fotovoltaica, conforme a sus usos, costumbres y estilo de vida.
- La maximización del aprovechamiento de la energía solar, cuando ésta es provista en forma directa a las cargas, pues existe plena disponibilidad de las mismas. Cuando el sistema fotovoltaico se encuentre en este estado, se dice que el mismo está en modo *Energía*.
- La minimización del consumo de energía cuando ésta es provista únicamente por las baterías de la instalación fotovoltaica. En estas condiciones, se asume que no hay provisión o disponibilidad del recurso solar y se dice que el sistema está en modo *Autonomía*.

A continuación se transcriben los pasos del método de dimensionamiento propuesto a efectos de optimizar los aspectos previamente explicitados:

PASO I. Se identifican con el usuario los consumos mínimos en términos de horas de conexión y desconexión de las cargas que serán conectadas a la instalación fotovoltaica. Se establece un esquema de conexiones y desconexiones mínimas para estas cargas. La cantidad de horas de conexión mínima para cada carga se identificarán como $x_{\min 1}$, $x_{\min 2}$, ..., $x_{\min N}$, suponiendo N cargas conectadas.

PASO II. Se determinan las horas x_{A1} , x_{A2} , ..., x_{AN} , que cada carga, cuyos consumos asociados son P_1 , P_2 , ..., P_N , estará conectada a la instalación en modo *Autonomía*, es decir cuando la provisión de energía es suministrada por la batería y la disponibilidad de energía proveniente de la misma es E_B . Esta disponibilidad ya tiene en cuenta el factor de descarga máxima de la batería. Para ello se plantea el modelo lineal:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{MIN} \quad \sum_{i=1}^N P_i x_{A_i} \\
 \text{sujeto} \quad a \\
 \sum_{i=1}^N P_i x_{A_i} \leq E_B \\
 x_{A_1} \geq x_{1 \min} \\
 x_{A_2} \geq x_{2 \min} \\
 x_{A_k} \geq x_{k \min} \\
 \dots\dots\dots \\
 x_{A_N} \geq x_{N \min}
 \end{array} \right. \quad (4)$$

La resolución del modelo lineal (4) permitirá obtener la cantidad de horas de conexión de cada carga $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ que minimizan el consumo de energía, como correspondería en modo *Autonomía*, pero todo ello sujeto a una situación de prestaciones mínimas en cuanto a carga horaria impuestas por las preferencias del usuario. En caso de que el modelo lineal (4) resultara no factible debido a que la sustitución de las horas mínimas en la ecuación de restricción de energía no cumpla que los productos $P_i x_{i \min}$ sumados sean menores que E_B , entonces, en conformidad con el usuario deberán reducirse las pretensiones en cuanto a horas mínimas de operación de algunas cargas, hasta que el modelo lineal (4) resulte factible.

PASO III. Se determinan las horas $x_{E1}, x_{E2}, \dots, x_{EN}$, que cada carga, cuyos consumos asociados son P_1, P_2, \dots, P_N , estará conectada a la instalación en modo *Energía*, es decir cuando la provisión de energía es suministrada directamente por los paneles solares fotovoltaicos (es decir, proviene del generador solar) y la disponibilidad de energía proveniente de los mismos es E_{AC} , conforme a la ecuación (3). En esta etapa el usuario también deberá especificar las horas de conexión máxima para cada carga, es decir: $x_{\max 1}, x_{\max 2}, \dots, x_{\max N}$. A continuación se plantea el modelo lineal (5).

En este modelo se busca maximizar el aprovechamiento de energía proveniente de los paneles, por lo cual se maximizan los consumos acumulados provenientes de multiplicar la cantidad de horas que cada carga estará conectada con las potencias de consumo asociadas a las mismas.

PASO IV. Evidentemente que para una adecuada operación del sistema se debe cumplir para una carga dada que x_{A_i} sea menor que x_{E_i} . Si ello no se cumple, la forma de solucionarlo en el dimensionamiento es adoptar el menor valor, es decir $\min(x_{A_i}, x_{E_i})$, como valor tanto para x_{A_i} como para x_{E_i} .

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{MAX} \quad \sum_{i=1}^N P_i x_{E_i} \\
 \text{sujeto} \quad a \\
 \sum_{i=1}^N P_i x_{E_i} \leq E_{AC} \\
 x_{E_1} \geq x_{1 \min} \\
 x_{E_1} \leq x_{1 \max} \\
 x_{E_2} \geq x_{2 \min} \\
 x_{E_k} \geq x_{k \min} \\
 x_{E_k} \leq x_{k \max} \\
 \dots\dots\dots \\
 x_{E_N} \geq x_{N \min} \\
 x_{E_N} \leq x_{N \max}
 \end{array} \right. \quad (5)$$

PASO V. *Solicitudes adicionales en la operación del sistema.* Una vez en operación, un usuario dado podrá solicitar horas adicionales de consumo para una carga dada, en función de su disponibilidad de márgenes de energía. Para conceder estos consumos adicionales, el sistema deberá chequear si está en modo *Autonomía* o en modo *Energía*. De encontrarse en el modo *Autonomía*, el producto del nuevo consumo adicional por la potencia de la carga en cuestión no debe superar, en conjunto con los consumos existentes, la restricción de la ecuación de energía (E_B), y lo mismo debe ocurrir en el modo *Energía*, lo único que en este caso el condicionamiento de energía exige que el nuevo consumo adicional no supere, en conjunto con los consumos ya existentes, la restricción impuesta por la ecuación de energía (E_{AC}).

UN EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se aplicará el método propuesto al siguiente caso. Se tiene una vivienda rural alimentada por cuatro paneles fotovoltaicos de 50Wpico y que consta de las siguientes cargas: cuatro puntos de luz de 15W, una radio de 20W, un televisor blanco y negro de 30W y un pequeño electrodoméstico de 150W. Dado que los paneles fotovoltaicos tienen un punto real de funcionamiento en 12V y 3A, la potencia real suministrada por los mismos es de 36 W. Se considera que el lugar del emplazamiento de la instalación fotovoltaica tiene una irradiación solar equivalente a 1000 W/m² un promedio de 4 horas diarias. Si además se asume que el producto de los rendimientos $\eta_g \eta_A \eta_b \eta_c$ es igual a 0.9, entonces la energía suministrada por los paneles fotovoltaicos estará dada por:

$$E_{AC} = 4 \text{ paneles} * \frac{36W}{\text{panel}} * 4 \text{ horas} * 0.90 = 518 Wh \quad (6)$$

La batería está diseñada para cuatro días de autonomía, con una capacidad de descarga $C_{50} = 210$ Ah, por cuanto están disponibles 45.4 Ah por día, teniendo en cuenta la capacidad de descarga de la batería. En consecuencia, la provisión máxima de energía que la batería puede suministrar por día es de

$$E_B = 12 * 45.4 = 544.8 Wh \quad (7)$$

Si conforme a las preferencias de usuario cantidad de horas mínimas que estarán activas las cargas son 2, 2, 3 y 1. El sistema debe contemplar que en el peor de los casos, todas las cargas estarán activadas simultáneamente. Es por ello que se plantea el siguiente sistema lineal ilustrado en la Figura 3 en el software LINDO:

```

LINDO - [<untitled>]
File Edit Solve Reports Window Help
MIN 75X1+30X2+20X3+150X4
SUBJECT TO
75X1+30X2+20X3+150X4 <= 544.8
X1 >= 2
X2 >= 2
X3 >= 3
X4 >= 1
END
    
```

Figura 3: Sistema Lineal en Modo Autonomía en el Software LINDO

La solución se puede observar en la Figura 4.

```

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 1
OBJECTIVE FUNCTION VALUE
1) 420.0000
VARIABLE VALUE REDUCED COST
X1 2.000000 0.000000
X2 2.000000 0.000000
X3 3.000000 0.000000
X4 1.000000 0.000000
    
```

Figura 4: Solución al Sistema Lineal en Modo Autonomía en el Software LINDO

Luego se calculan las horas de funcionamiento de las cargas en modo Energía, para ello se relevan las horas deseadas de funcionamiento máximo de cada carga, conforme al deseo del usuario. Si estas horas son 18, 10, 12 y 10 respectivamente se obtiene el sistema lineal ilustrado en la Figura 5.

```

MAX 75X1+30X2+20X3+150X4
SUBJECT TO
75X1+30X2+20X3+150X4<=518
X1>=2
X1<=18
X2>=2
X2<=10
X3>=3
X3<=12
X4>=1
X4<=10
END

```

Figura 5: Sistema Lineal en Modo Energía en el Software LINDO

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 4		
OBJECTIVE FUNCTION VALUE		
1)	518.0000	
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X1	3.306667	0.000000
X2	2.000000	0.000000
X3	3.000000	0.000000
X4	1.000000	0.000000

Figura 6: Solución al Sistema Lineal en Modo Energía en el Software LINDO

Como puede observarse a partir de los resultados, el sistema tiene en el Modo Autonomía, aún suponiendo simultaneidad en la activación de las cargas, margen para, a requerimiento del usuario extender las horas de uso de una carga dada, pues la energía consumida es de 420 Wh frente a 544.8 Wh disponibles como máximo en la batería. Es decir que podría accederse a peticiones de incremento en el horario de disponibilidad de determinadas cargas.

CONCLUSIONES

Los modelos lineales de optimización resultan adecuados para formular las condiciones de operación de un sistema fotovoltaico empleado en la electrificación de una vivienda rural a partir de las restricciones impuestas al mismo por la ecuación de balance de energía (energía generada = energía consumida). Estos modelos pueden emplearse en la fase de diseño de sistemas fotovoltaicos, en donde estimar la cantidad de horas de uso de cada carga constituye uno de los aspectos más complejos. Asimismo, estos modelos pueden emplearse en instancias de operación de un sistema fotovoltaico, por cuanto, ante una solicitud de consumo por parte de un usuario, tendrán la capacidad de verificar si otorgándole el mismo se siguen satisfaciendo o no las ecuaciones de balance de energía. El sistema sería apto para la implementación de las estrategias de automatización mediante un Controlador Lógico Programable (PLC) alimentado con una unidad de bajo consumo autónoma.

REFERENCIAS

- J.Aguilera, E. Lorenzo (1991). Diffusing PV rural electrification in developing Countries. Proceedings of the 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Lisbon, Portugal. Pp. 456-466.
- M. Ibáñez Plana, J. R. Rosell Polo, J. I. Rosell Urrutia (2005). Tecnología Solar. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Soler R, Thomas F, Dahbi N, Bakri M.(2003). Optimizing the place PV Systems in rural electrification planning in Morocco. Photovoltaic Energy Conversion. IEEE. Volume 3 Issue 12. pp. 2574-2577.

ABSTRACT

A photovoltaic system differs much in its philosophy of operation from a system of conventional energy. In this sense, the calculation of the energy consumed per day in a photovoltaic installation will depend on the amount of daily operation hours of each element connected to the load. For the case of rural houses, this consumption level will depend on the customs and characteristics of the users and will fluctuate constantly. With the object of contributing to solve this aspect of uncertainty in the design and operation of the system, this work focuses on an algorithm of automatic connection and disconnection of components to the load as a way to diminish the accumulated power consumptions in the battery and to maximize the profit provided by the direct usage of solar energy. The presented algorithm can be implemented by means of PLC (Programmable Logic Controller) with minimum impact on the consumption levels.

Keywords: solar energy, photovoltaic system, energy saving, optimization, automation