

DOI: <http://dx.doi.org/10.30972/eitt.604382>

# Simulación de un sistema fotovoltaico autónomo mediante la herramienta SCILAB

---

V. Marder<sup>1</sup>; C. Cadenas<sup>2</sup>; V. Toranzos<sup>1</sup>

## Resumen:

En el presente trabajo se pone a prueba el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo (Aguilera, 2007) mediante la simulación del mismo utilizando un programa de desarrollo propio en la herramienta informática SCILAB (Campbell, 2006). Este nos permite la predicción de la radiación sobre el plano de los paneles fotovoltaicos a lo largo de varios días en los que arbitrariamente y mediante el uso de factores preingresados se puede simular la disminución de radiación por efectos climáticos. Por otro lado se incorpora el modelo de una curva de consumo para una vivienda rural típica. Obteniéndose como resultado el estado de carga y la tensión hora a hora del banco acumulador en el plazo de varios días.

Al momento esta herramienta es muy rudimentaria pero de gran utilidad y simpleza al momento de evaluar una instalación fotovoltaica autónoma, no habiendo inconveniente en mejorarla de acuerdo a las necesidades del problema en cuestión.

**Palabras clave:** Energía fotovoltaica, dimensionamiento, simulación.

## Introducción

Los sistemas fotovoltaicos autónomos son de particular interés en instalaciones rurales donde resulta inviable la conexión a la red de distribución eléctrica. Los mismos constan de un conjunto de módulos fotovoltaicos encargados de captar la radiación solar y transformarla en corriente eléctrica la

---

1. Departamento de Ingeniería, FACENA, UNNE, Corrientes, Corrientes, CP3400

2. INENCO-Departamento de Física, UNSA | e-mail: victoranzos@gmail.com

que se utiliza para la carga de acumuladores, la gestión de carga es realizada por un regulador electrónico evitando la sobrecarga y consiguiente deterioro de los mismos. La energía almacenada puede ser utilizada directamente de los

acumuladores (en corriente continua y generalmente en voltajes bajos como 12 o 24 voltios) o mediante un inversor que permite ondular y elevar el valor de tensión a 110 o 220 V en 60 o 50 Hz.

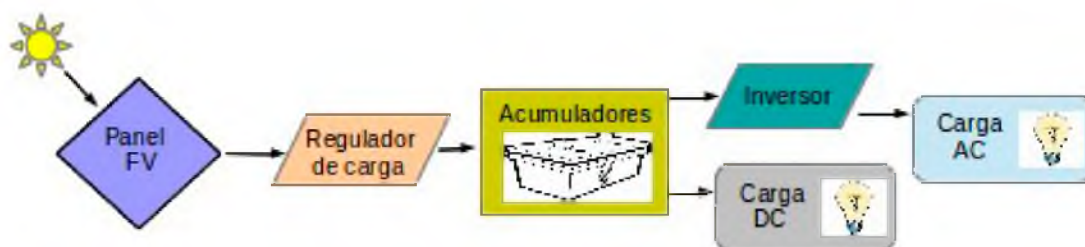


Figura 1: Descripción esquemática de un sistema FV autónomo típico para uso rural.

Los criterios de diseño de estos sistemas son ciertamente variados pero todos permiten el dimensionamiento con cierto grado de confiabilidad existiendo amplio material de lectura a modo de guías de dimensionamiento accesibles a cualquier diseñador. Sin embargo al momento de evaluar el desempeño del sistema el diseñador se encuentra que las herramientas disponibles no son gratuitas o no proveen los algoritmos con que se realiza la simulación resultando dudosas desde el punto de vista del investigador.

Como soporte matemático y computacional existe un gran número de herramientas informáticas que permiten la implementación de algoritmos y cálculos complejos, en especial hemos adoptado la herramienta SCILAB la cual es muy potente y de uso libre.

Mediante la misma se plantea la predicción de la radiación solar sobre la superficie de los paneles como también la curva de demanda (una vivienda rural en nuestro caso) y como resultado se puede predecir el estado de carga de los acumuladores bajo diferentes condiciones.

### Metodología

Para contar con datos de radiación solar se recurrió a las ecuaciones básicas de geometría solar, las que revisaremos de manera rápida.

La órbita de la tierra no es circular por tal motivo definiremos un factor de corrección de la excentricidad de la órbita de la Tierra  $E_0$  que depende del día del año en que se evalúa (1 para el primero de enero y 365 para el 31 de diciembre)

$$E_0 = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{365}\right)$$

La declinación solar (ángulo entre la línea Sol-Tierra y el plano ecuatorial) esta dada por :

$$\delta = \left(23,45 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{(d+284)}{365}\right)$$

Siempre que sea posible se orientan los paneles al norte en el hemisferio sur, por ello se supone esta condición para simplificar las ecuaciones, de esta manera una superficie así ubicada y formando un ángulo  $\beta$  con la horizontal recibiría en ausencia de atmósfera (radiación extraterrestre,  $G_{max} = 1.367 \text{ w/m}^2$ ):

$$G = G_{max} \cdot E_0 \cdot (\sin(\phi + \beta) \cdot \sin(\delta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi + \beta) \cdot \cos(w))$$

Donde  $w$  es el ángulo horario,  $w = -p$  para  $t=0$  y  $w = p$  para  $t=24$ , valiendo  $w=0$  al mediodía.

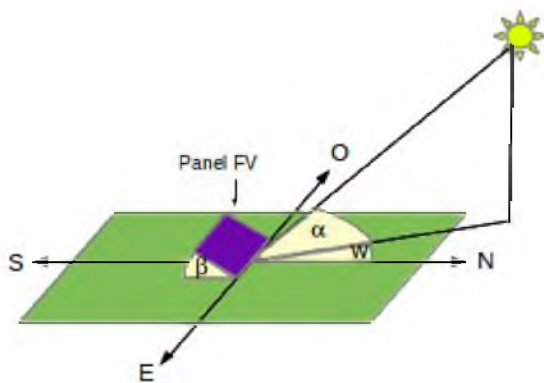


Figura 2: Representación esquemática de la incidencia de los rayos del sol sobre un panel FV con un ángulo de inclinación  $\beta$  sobre la horizontal. Donde  $a$  es la altura solar y  $w$  el ángulo horario.

Por acción de la atmósfera la radiación sufre cierta atenuación y dado la presencia de partículas en el aire existe radiación difusa, ambos factores disminuyen la radiación sobre el plano del panel fotovoltaico. Diversos modelos brindan valores numéricos para la radiación directa y difusa sobre la superficie de la tierra. Para nuestro caso en particular solo definiremos un factor arbitrario que se podrá modificar día a día mediante una tabla preestablecida al momento de la simulación para poder incluir en la misma períodos de radiación escasa, ese factor  $K$  lo definiremos como la radiación extraterrestre  $G$  y la radiación total que llega (directa más difusa) al panel  $G_0$ , siendo  $K$  menor a 0,7.

Para realizar la simulación del sistema debe contarse con la energía diaria consumida (que generalmente se tiene disponible al momento del diseño

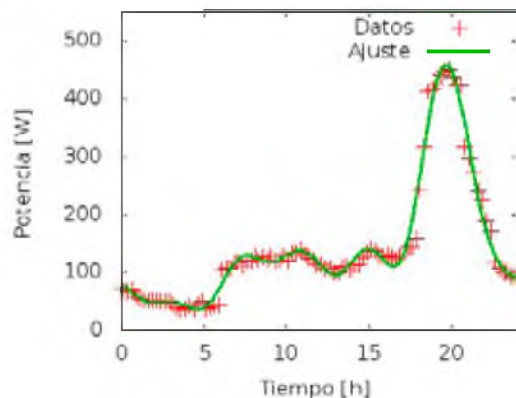


Figura 3: Curva de demanda diaria y el ajuste correspondiente utilizando funciones periódicas.

o se estima) y la curva de demanda diaria. Para el caso de una vivienda rural aislada se tomó como curva de demanda la dada por (Parrondo Pons 2013) la que se ajustó mediante funciones periódicas con la herramienta gnuplot () para contar con una ecuación en lugar de usar una tabla de datos. Los datos y resultados de este ajuste se muestran en la **figura 3**.

Para escalar estos datos al proyecto se deberá aplicar un factor curva que es la relación entre la energía diaria que se estima en el proyecto y la potencia media de la curva de demanda multiplicada por las 24 horas del día:

$$F = E_{\text{diaria}} / P_{\text{curva}} \cdot 24 \text{ hs}$$

Para modelar los acumuladores se trabajó con el parámetro de estado de carga en amper-hora (Ah) suponiendo el modelo básico donde este parámetro resulta independiente del régimen de carga o descarga. Se lo puede expresar de manera porcentual independizándose así del tamaño de los acumuladores.

Dado que el estado de carga es un parámetro de difícil medición se recurrió a una estimación de la tensión en bornes de los acumuladores utilizándose para ello la expresión (Wong, 2017)

$$\text{Estado de Carga \%} = 72,464 \cdot V_{\text{oc}} - 855,07$$

Este valor de tensión (VOC) corresponde a la tensión de vacío o

sea sin corriente, para tener en cuenta la corriente se recurrió al concepto de resistencia interna ( $r_i$ ), el que consiste en una resistencia que se encuentra en serie con la fuente de tensión, esta resistencia en un acumulador real es función de la carga sin embargo en nuestro modelo sencillo se ha considerado constante, para la simulación se buscó en catálogos valores de referencia, por ejemplo para una batería de 12V 200 Ah ese valor es de 4 mW sin embargo la resistencia agregada por los bornes y conexión aumentan notablemente ese valor, para una simulación más realista se eligió un valor de 10 mW.

Por lo expuesto la tensión de acumuladores (V) sobre los bornes durante los estados de carga y descarga será:

$$V = V_{\text{oc}} - I \cdot r_i$$

Para modelar el efecto del regulador de carga se tomaron límites superior e inferior de V como un porcentaje de la tensión nominal.

## Desarrollo

Se implementó un programa en SCILAB haciendo uso de los criterios y datos que se explicaron en la metodología. El programa completo se muestra en la **tabla 1**. El mismo consta de las ecuaciones de geometría solar básicas con las que se obtiene para

un día y a una latitud dada un arreglo con datos de radiación ( $w/m^2$ ) cada un intervalo delta de  $t$  ( $dt$ ) que puede asignarse de manera conveniente, en el ejemplo es de 0,1 hora.

Por otro lado, mediante la ecuación de la curva de carga ( $w$ ) se genera un arreglo de igual tamaño que el de radiación solar y en los mismos intervalos.

La simulación se realizará replicando las condiciones del día elegido, pero aplicando un factor  $K$  para cada día, por lo tanto  $K$  es un arreglo de factores de radiación terrestre, donde se puede simular mediante un factor bajo días

de poca radiación por cuestiones climáticas.

El programa permite ingresar potencia del arreglo FV, factores globales, capacidad del banco de acumuladores y el número de días a simular.

Los resultados se presentan mediante gráficos de dos dimensiones donde el eje x corresponde a las horas de simulación. Se presentan la radiación solar, la curva de consumo, el estado de carga de acumuladores, la tensión y la corriente en bornes de los acumuladores.

|   |   |
|---|---|
| <pre> clear dia=180 // día n 365 E=0 // electricidad solar ws=0 // ángulo de puesta del sol rad dt=0.1 PI=3.1416 DELTA=0 // declinación solar BETA=35*PI/180 // inclinación de panel t=[0:dt:24] // horas de 0 a 24 w=(t-12)*(PI/12) // ángulo horario BO=1/367 // rad extraterrestre FI=27*PI/180 // latitud K=[0.7,0.7,0.1,0.1,0.7,0.2,0.3,0.6,0.7,0.7,0.7,0.7,0.7] // factor de radiación terrestre IO=220 // Capacidad del banco de baterías en Ah dias=11 // Número de días a simular Ipanel=500 // potencia nominal del arreglo de módulos FV FG=0.7 // Factor global VN=12 // Tensión nominal de trabajo // Cálculo de la radiación extraterrestre a lo largo del día DELTA=(23.45*PI/180)*sin(2*PI*(dia+284)/365) EO=1+0.033*cos(2*PI*dia/365) ws=acos(-tan(DELTA)*tan(FI)) G=EO*EO*(sin(FI-BETA)*sin(DELTA)+cos(DELTA)*cos(FI+B ETA)*cos(ws)) F=G&gt;0 G2=F.*G // curva de demanda a=143.404472034474 b=98.4907331582091 c=45.4459177253689 d=90.9362427348832 e=77.4976334179079 f=-46.8752697676544 g=31.691329199366 </pre> | <pre> t(i)=tiemp-dt Iahm=220 Iah(i)=IO Ip(i)=0; Vbat(i)=13 Vbact(i)=13 while (i&lt;=matind) i=i+dt ind=i-1 tiemp=tiemp+dt I(ind)=tiemp if (ind&gt;=mat2) then ind=1 dia=dia+1 end; Iah(ind)=Iah(ind-1)+((K(i,dia)*Ic(ind)*FI-Iah(ind))*dt rad(ind)=G2(ind)*K(i,dia) con(ind)=F(ind) Ip(ind)=-(K(i,dia)*Ic(ind)*FI+Id(ind) Vbat(ind)=-(Iah(ind)*(100-IO))+855.07)/72.464 Vbact(ind)=Vbat(ind)-(Ip(ind))*0.01 if (Vbact(ind)&lt;=(VN*1.109)) then FI=0 end; if (Vbact(ind)&lt;=(VN*1.090)) then FI=1 end; if (Iah(ind)&gt;Iahm) then Iah(ind)=Iahm Ip(ind)=0 end; end este=Iah.*(100-IO) subplot(2,3,1),plot(t,rad,'k') xlabel("hs","fontsize",4); </pre> |
|---|---|

|  |  |
|--|--|
| <pre>f = -46.8752697676544 g = 31.691329299366 h = -42.4506310843432 i = 1.32583007556845 j = 24.7094348277306 k = -0.656907251013622 l = 21.1953625596907 m = 1.10845691253465 f = 0.29*(a-b*cos(0.26*t+c)+d*cos(2*0.26*t+e)+ f*cos(3*0.26*t+g)+h*cos(4*0.26*t+i)+j*cos(5*0.26*t+k)+l*cos (6*0.26*t+m)) // Determinación de las corrientes de carga y descarga Ic = (FG*(Ppanel/1000)/VN).*(G2) Id = (1/VN).*P // Determinación de los niveles de carga de los acumuladores f1 = 1 tmat = 24 [mat1,mat2] = size(Ic) dias = 1 tmatied = mat2*dias ind1 = 1 ind = mat2*2 ltemp = 12</pre> | <pre>subplot(2,3,1),plot(tt,rad,'k') xlabel("hs","fontsize",4); ylabel("w/m^2","fontsize",4); title("Radiación solar sobre los módulos","fontsize",4); subplot(2,3,2),plot(t1,con,'k') xlabel("hs","fontsize",4); ylabel("w","fontsize",4); title("Curva de demanda","fontsize",4); subplot(2,3,3),plot(tt,estc,'k') xlabel("hs","fontsize",4); ylabel("°C","fontsize",4); title("Estado de carga de acumuladores","fontsize",4); subplot(2,3,4),plot(tt,Vbat,'k') xlabel("hs","fontsize",4); ylabel("V","fontsize",4); title("Tensión de acumuladores circuito abierto","fontsize",4); subplot(2,3,5),plot(t1,Vbatc,'k') xlabel("hs","fontsize",4); ylabel("V","fontsize",4); title("Tensión de acumuladores","fontsize",4); subplot(2,3,6),plot(t1,Ip,'k') xlabel("hs","fontsize",4); ylabel("A","fontsize",4); title("Corriente de acumuladores","fontsize",4);</pre> |
|--|--|

Tabla 1: Programa completo en SCILAB para simular un sistema fotovoltaico autónomo.

## Resultados

En la figura 4 se puede ver el resultado de la simulación de un sistema FV autónomo compuesto por cinco módulos de 100 W nominales y un acumulador de 220 Ah.

Para la simulación se eligió un día invernal típico para una latitud de 27° y los paneles FV a una inclinación de 35°, se simuló el sistema a lo largo de 6 días donde se simuló días de escasa radiación.

De la simulación se puede verificar que el sistema tiene una autonomía de dos días alcanzando el 70% de profundidad de descarga de acuerdo se esperaba al dimensionamiento (Aguilera,

2007) del sistema, también se observa la correspondiente recuperación en un día de buena radiación solar.

Por otro lado, y en forma complementaria se gráfica la tensión de acumuladores que fue obtenida por una estimación aproximada (Wong, 2017), pudiéndose mejorar este dato mediante la utilización de otros algoritmos, sin embargo, esta gráfica permite evaluar en que momento el inversor saldría de servicio por baja tensión de acumuladores y el comportamiento del regulador de carga.

## Conclusión

El potencial de herramientas de cálculo y simulación como el de SCILAB

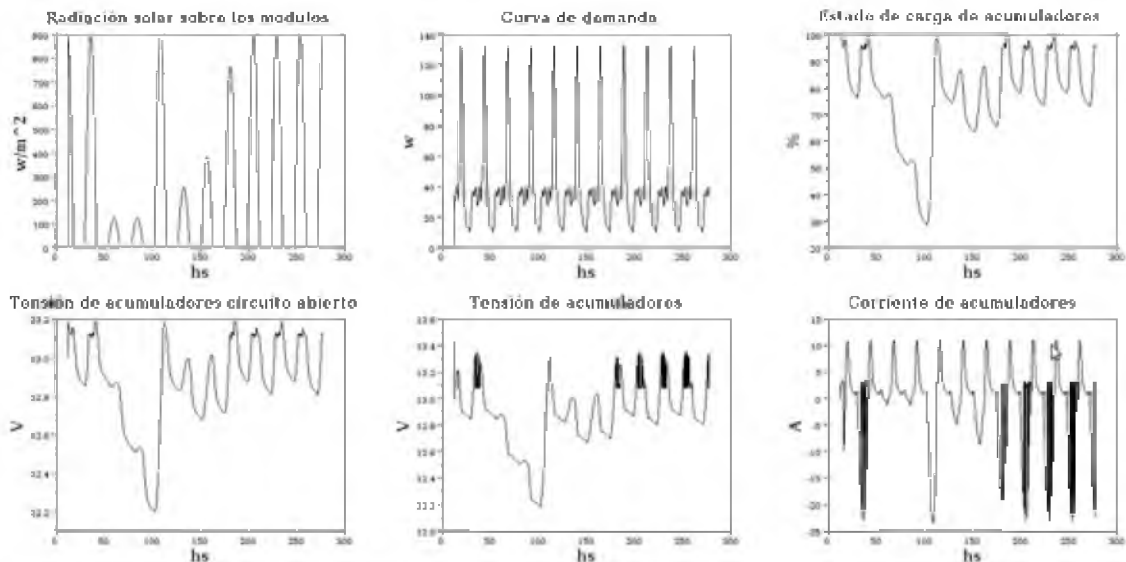


Figura 4: Gráficos que muestran los resultados de la simulación en SCILAB.

es indiscutido, sin embargo, siempre se cuestiona si es ventajoso utilizar un software específico, que seguramente estará validado de alguna forma, o el desarrollo de una herramienta propia.

La ventaja radica en el conocimiento en profundidad de las ecuaciones y algoritmos que componen el programa de desarrollo propio como así la posibilidad de modificación de manera totalmente abierta.

Por otro lado, al utilizar un software de libre distribución como SCILAB posibilitamos que profesionales y alumnos puedan trabajar libremente en esta plataforma.

En el ejemplo de simulación que se plantea se puede ver el potencial que tiene para simular sistemas FV autónomos, sobre todo a los efectos de verificar el dimensionamiento.

## REFERENCIAS

- <https://www.scilab.org/>
- Campbell, S. L., Chancelier, J. P., & Nikoukhah, R. (2006). Modeling and Simulation in SCILAB (pp. 73-105). Springer New York.
- Fajardo, A. C. A., & Osorio, H. C. (2014). Diseño, simulación y análisis, de sistema solar FV para suministro eléctrico en zonas rurales. *Avances Investigación en Ingeniería*, 11(1).
- Lamigueiro, O. P. (2013). Energía solar fotovoltaica. Versión 1.22. Marzo 2011.
- [https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/02\\_radiacion/02\\_intermedio/ej\\_cal\\_radiacion.htm](https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/02_intermedio/ej_cal_radiacion.htm)
- Parrondo Pons, J. L., Eisman Valdés, J., & Díez Maroto, L. (2013). Planificación integrada de electrificación mediante SIG.
- Wong, y., Chong, L., Rajkumar, R. K., Leng, W. Y., & Rajkumar, R. K. (2017). A New State-of-Charge Estimation Method for Valve Regulated Lead Acid Batteries. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(3), 584-595.
- Guembe Zabaleta, J. (2016). Cálculo del estado de carga de baterías: diseño y validación experimental.
- <http://www.systems-sunlight.com/wp-content/uploads/2014/11/spg-12v-200ah.pdf>
- <https://www.aussiebatteries.com.au/deep-cycle-battery-guide/t>
- Blanco, E. (2015). Cálculo y simulación de sistemas de energía fotovoltaica utilizando software PV\* SOL®.
- Aguilera, J., Hontoria, L., & Muñoz, F. J. (2007). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. Jaén, España.