

SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO RURAL RESIDENCIAL

Andrés Leonardo Jutinico Alarcón

Ingeniero Electrónico, Magister en Automatización Industrial, Universidad Antonio Nariño.
ajutinico@uan.edu.co

Carlos Andrés Arredondo

Ingeniero Eléctrico, PhD en Ciencias - Física, Universidad de Medellín
caarredondo@udem.edu.co

Recibido: 02-05-2014, aceptado: 03-07-2014, versión final: 02-05-2014

RESUMEN

La reducción en el costo de paneles fotovoltaicos hace que la implementación de sistemas energéticos autónomos sea un hecho económicamente viable hoy día. El presente artículo expone el diseño, análisis e implementación de un sistema de abastecimiento energético residencial, funcional para zonas rurales o aisladas de la red eléctrica convencional, basado en energía solar fotovoltaica. Se presenta el cálculo promedio del consumo energético de un ambiente residencial de dos pisos, basado en el uso de electrodomésticos convencionales y se realiza el cálculo del consumo energético del sistema de iluminación, obteniendo así el consumo total promedio, para dimensionamiento del sistema. Se obtuvo un consumo energético real de 5822 W correspondientes a 11 paneles solares de 120 W cada uno, con la posibilidad de obtener un sistema interconectable a la red eléctrica pública para entrega de la energía no utilizada.

Palabras clave: *energía solar, almacenamiento de carga, panel fotovoltaico.*

ABSTRACT

Nowadays, the cost reduction of photovoltaic panels allows an economically implementation of autonomous energy systems, granting viability. This paper presents the design, analysis and implementation of an energy supply system for residential use based on solar energy, functional for rural or remote areas of conventional electrical grid. Calculation of the average energy consumption of a two floors residence, based on use of conventional home-electronics appliances, it is calculated the energy consumption of the lighting system, obtaining the average total consumption for system dimensioning. It is obtained an energy consumption of 5822 W corresponding to 11 solar panels of 120 W each, with the possibility of a system interconnection to electrical grid so as to deliver unused energy.

Keywords: *solar energy, solar panel, power calculation, illumination.*



1 INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente demanda a nivel mundial en el consumo de energía, la cual es generada por el crecimiento poblacional e industrial, en los últimos años, se ha acentuado la prioridad en el desarrollo de fuentes alternas para la generación de energía eléctrica, enfocado principalmente hacia las fuentes de tipo renovable, dado que conllevan una baja contaminación ambiental en contraposición a los tradicionales combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón que a la par de ser recursos no renovables presentan un impacto ambiental contaminante.

Según el “Renewables 2012, Global Status Report” del REN21 (Renewable Energy police Network for the 21st Century), la generación de energética mundial derivada de las fuentes de energías renovables es del 16,7%, la cual aun cuando es una porción menor frente a los combustibles fósiles, va en aumento. De forma particular, dentro del 16.7% las energías renovables, la generación obtenida a partir de energía fotovoltaica corresponde a un 0.9%, que aunque pareciera insignificante, este tipo de generación corresponde a la de mayor crecimiento anual en el periodo del 2006 a 2012, en un factor de 74%, denotando un ávido interés en su desarrollo (REN21, 2012).

La implementación y uso de energías alternativas como la solar, requieren investigación y desarrollo en cada una de las etapas del proceso de adquisición, conversión, distribución y uso de este tipo de energía. Es así como en (Casas, 2013) se presenta el diseño de un pirómetro para medición de la radiación solar, en (Cristaldi, 2012) se presenta un modelo para caracterizar paneles solares necesario en el diseño de sistemas PV, en (Tatis, 2012) se presenta el diseño de un sistema de monitoreo de variables para un sistema de suministro de energía solar. En (Wang, 2013) se presenta un análisis de la corriente de salida y sus respectivos armónicos,

en el diseño de un sistema PV, aplicando una técnica de espacio de control vectorial para el lazo de voltaje, a fin de establecer requerimientos para interconexión a la red. En (Li, 2013) y en (Sugihara, 2013) se presentan una forma de regular las fluctuaciones de potencia derivadas de las características propias en la implementación de fuentes de energía solar mediante sistemas de almacenamiento.

Finalmente en (Miyamoto, 2012) se presenta una evaluación del uso de energía PV en una red residencial por un periodo de un año, sin considerar las fluctuaciones derivadas de las características de irradiancia solar, por factores como cambios climáticos (estaciones). Recopilando así los procesos de medición, captación de energía, caracterización del modelo, almacenamiento, supervisión y evaluación, requeridos en los sistemas de energía solar y sus aplicaciones.

Una aplicación de interés en el campo de la energía solar, son los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica (SFVCR), los cuales en Colombia son de gran relevancia dada la futura (2015) interconexión internacional de transmisión de sistemas de alto voltaje DC (HDVC) con Panamá (ISA, 2010). A nivel de suministro convencional de energía fotovoltaica con interconexión a la red eléctrica, recientes estudios (Stauth, 2013), (Seung, 2012) y (Hongrae, 2013) presentan nuevos conceptos y diseños que permiten integrar circuitos electrónicos en las llamadas redes inteligentes (Awad, 2012) (Balog, 2012).

En la implementación de un sistema de suministro de energía fotovoltaica para interconexión a la red eléctrica es fundamental el seguimiento de las variables que influyen el sistema, entre ellas tenemos la radiación solar, la temperatura, el voltaje y la corriente, entre otros. Trabajos similares como los presentados en (Rao, 2012) y (Ananth, 2012), presentan diferencias claras las cuales radican en que por ejemplo para el primer caso, se consideran

las características ambientales para estimar la radiación solar global en un día, no analizando los efectos de entrega de energía a una carga. Para el segundo caso no se validan las condiciones ambientales, presentando una brecha en la incidencia de estos factores en la supervisión y control del sistema de energía solar.

En general se encuentran bastantes trabajos relacionados con respecto a cada uno de los aspectos de los sistemas de energía solar fotovoltaica, resaltando así su gran relevancia. En el estado del arte se verifica como se analizan muchos de los aspectos pero se deja de lado un dimensionamiento puntual para un caso de consumo real de un ambiente residencial beneficiario de este tipo de sistemas, el cual se trata a continuación.

En adelante el artículo se encuentra estructurado en 4 secciones, la sección 2 corresponde al dimensionamiento de potencia, la sección 3 al diseño del sistema PV, la sección 4 al análisis de resultados derivados de la implementación del sistema y finalmente en la sección 5 se exponen las conclusiones.

2. DIMENSIONAMIENTO DE POTENCIA

Para el dimensionamiento de la potencia requerida y que ha de ser suministrada por el sistema de paneles fotovoltaicos, se establece un marco referencial, en el que se tienen diferentes dispositivos de consumo convencionales. Para el caso se evalúa el consumo de potencia para un área residencial de dos pisos con la distribución mostrada en la figura 1.

Dentro de esta área residencial se establece un televisor por habitación, el uso de un computador de escritorio, el uso de una plancha, un horno microondas, una lavadora y una nevera, de igual forma se deben considerar las bombillas necesarias para la iluminación. En la tabla 1 se presenta la relación de consumo típico de los electrodomésticos que se acaban de establecer.

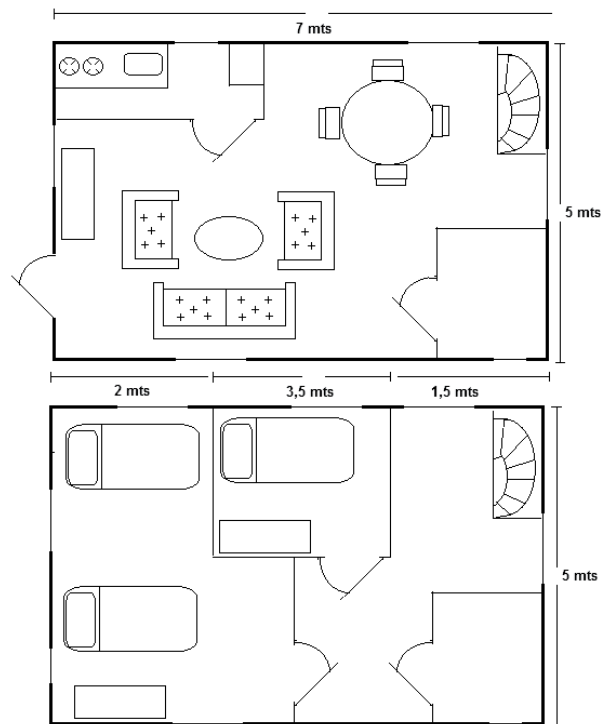


Figura 1.
Área residencial

Tabla 1.
Consumo típico residencial

Elemento	Consumo (Wh)
Televisor	200
Nevera	200
Computador	300
Horno microondas	800
Plancha	800
Lavadora	2500
Iluminacion	Referente al número y tipo de luminarias.

En el caso más extremo de consumo, es decir con todos los electrodomésticos funcionando, se tiene un consumo aproximado de 4.7KWh sin contar luminarias. Para tener un valor total se procede a realizar el cálculo de la iluminación del lugar.

El procedimiento a seguir se basa en los estándares de la comisión internacional de iluminación (CIE), la cual establece los diferentes parámetros que se deben tener en cuenta para

el cálculo de alumbrado en interiores. El flujo luminoso total necesario para un ambiente determinado, se puede establecer mediante la ecuación 1 (Rea, 2000).

$$\Phi T = (E \cdot S) / (\eta \cdot f_c) \quad (1)$$

Donde E corresponde a la iluminación media deseada, S a la superficie a iluminar en metros cuadrados, f_c al factor de conservación del lugar y η al factor de utilización. La iluminación media deseada (E) se referencia de las tablas del CIE y están especificadas en el estándar ISO 8995, de igual forma estas tabulan el factor de conservación. Para el caso del factor de utilización se requiere conocer el índice local k, el cual depende del tipo de iluminación y del área a iluminar, una vez conocido se puede calcular por medio de la tabla mostrada en la figura 2.

Tipo de aparato de alumbrado	Índice del local k	Factor de utilización (η)												
		Factor de reflexión del techo												
		0.8			0.7			0.5			0.3			0
		Factor de reflexión de las paredes												
		0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.3	0.1	0	
	0.6	.39	.35	.32	.38	.34	.32	.38	.34	.31	.33	.31	.30	
	0.8	.48	.43	.40	.47	.42	.40	.46	.42	.39	.41	.38	.37	
	1.0	.53	.49	.46	.52	.48	.45	.51	.47	.45	.46	.44	.41	
	1.25	.58	.54	.51	.57	.53	.50	.55	.51	.49	.50	.48	.45	
	1.5	.62	.58	.54	.61	.57	.54	.58	.55	.52	.53	.51	.48	
	2.0	.66	.62	.59	.64	.61	.58	.61	.59	.57	.56	.55	.52	
	2.5	.68	.65	.63	.67	.64	.62	.64	.61	.60	.59	.57	.54	
	3.0	.70	.67	.65	.69	.66	.64	.65	.63	.61	.60	.59	.56	
	4.0	.72	.70	.68	.70	.69	.67	.67	.66	.64	.63	.61	.58	
	5.0	.73	.71	.70	.71	.70	.68	.68	.67	.66	.64	.63	.59	

H_m : altura luminaria-plano de trabajo

Figura 2:

Factor de utilización. Tomado de <http://edison.upc.edu/curs/llum/iluminacion-interiores/ejercicios.html>

Tomando como base la figura 1 y estableciendo una altura por piso de 2 metros, se puede estimar el valor medio de luminancia mediante el método de lúmen (Chapa, 2004), donde se establece un valor del índice local para iluminación semi indirecta e indirecta (k), como se aprecia en la ecuación 2.

$$k = (3 \cdot a \cdot b) / (2 \cdot h \cdot (a + b)) \quad (2)$$

Donde a corresponde al ancho del área, b al largo y h a la altura de la fuente de iluminación.

Dado que se cuentan con nueve ambientes, los cuales son: una sala, un comedor, una cocina, dos baños, dos habitaciones, una escalera y un pasillo. Los cálculos del índice local de cada uno, se ilustran en la tabla 2.

Ambiente	Área	k
Habitación 1	3.5 X 2.5	1.09
Habitación 2	5 X 2	1.07
Baño 1, 2	2 X 1.3	0.59
Escalera	0.5 X 1.3	0.27
Pasillo	3 X 1.5	0.75
Comedor	2.5 X 2.5	0.93
Cocina	3 X 2	0.9
Sala	3 X 2.5	1.02

En función a la figura 2, se toma como base de color de techo, paredes y suelo un color claro, con coeficientes de reflexión de 0.5, 0.5 y 0.3 respectivamente. Tomando un factor de conservación de 0.8, correspondiente a una estructura limpia, y una iluminación media para dormitorios de 100 y para áreas comunes de 200, se puede calcular el flujo de iluminación total por ambiente mediante la ecuación 1, tal como se ilustra en la tabla 3.

Ambiente	η	ΦT
Habitación 1	0.51	2144
Habitación 2	0.51	2450
Baño 1, 2	0.38	855
Escalera	0.38	213
Pasillo	0.46	2445
Comedor	0.51	3063
Cocina	0.51	2941
Sala	0.51	3676

Para el sistema de iluminación se utilizaran bombillas ahorradoras fluorescentes de la marca Phillips cuyas características son: base E27, tipo de luz clara, 15 y 20 W, 760 y 1040 respectivamente. Donde el número de Bombillas requeridas es:

Ambiente	Potencia Bombilla	Num_ Bomb.
Habitación 1	20 W	2
Habitación 2	20 W	2
Baño 1, 2	15 W	1
Escalera	15 W	1
Pasillo	20 W	3
Comedor	20 W	3
Cocina	20 W	3
Sala	20 W	4

Por lo tanto la potencia total requerida para abastecer un total de 19 bombillas es:

$$P=20W*17 + 15W*2= 370W$$

Donde la potencia total requerida según la tabla 1 es de 5170 W.

3. DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

El diseño del sistema fotovoltaico permite establecer el número de paneles solares requeridos, en función a las horas pico de radiación solar (HPS) y el consumo real energético (Er) que tendrá el sistema, el cual está definido por la ecuación 3.

$$Er=ET/R \tag{3}$$

Donde ET corresponde al consumo energético teórico total, para el caso 5, 17KW, mientras que R corresponde al factor de rendimiento de la instalación fotovoltaica, determinado mediante la ecuación 4.

$$R=(1-(Kb+Kc+Kv))(1-(Ka*N)/Pd) \tag{4}$$

Donde Kb es 0.1 para sistemas de descarga profunda como este, Kc depende del inversor será 0, 05 para inversores senoidales puros trabajando en régimen óptimo, Kv representa las pérdidas varias no particularizables y cuyo valor mínimo es 0.05, Ka depende del tipo de baterías, para el caso se utilizan baterías estacionarias de Pb-ácido cuyo valor Ka es de 0.005, N corresponde al número de días de autonomía, para

el caso 1/3 y finalmente Pd que corresponde a la descarga diaria de la batería, para el caso 0.7. De aquí se tiene:

$$R = (1 - (0 . 1 + 0 . 0 0 5 + 0 . 0 0 5)) * (1 - (0.005*1/3)/0.7)=0.887$$

Por lo que Er = 5822W, donde la capacidad del banco de baterías (CB), para un voltaje (V) nominal de batería de 18V, deberá ser de:

$$CB=(Er*N)/(V*Pd) = 154Ah$$

El número de paneles bajo estas consideraciones, se calcula mediante la ecuación 5.

$$NP=Er/(0.9*Wp*HPS) \tag{5}$$

Que da por resultado 11 paneles solares de una potencia (Wp) cada uno de 120W, con un promedio de 5 Horas pico de radiación solar. Tomando como referencia el panel policristalino YB156P36-120W, cuyas dimensiones son 1480×680, se deberían ubicar como ilustra la figura 3, cuyas dimensiones se ajustan por debajo ilustrada en la figura 1. Este arreglo permite ubicar los paneles en el techo de la vivienda.

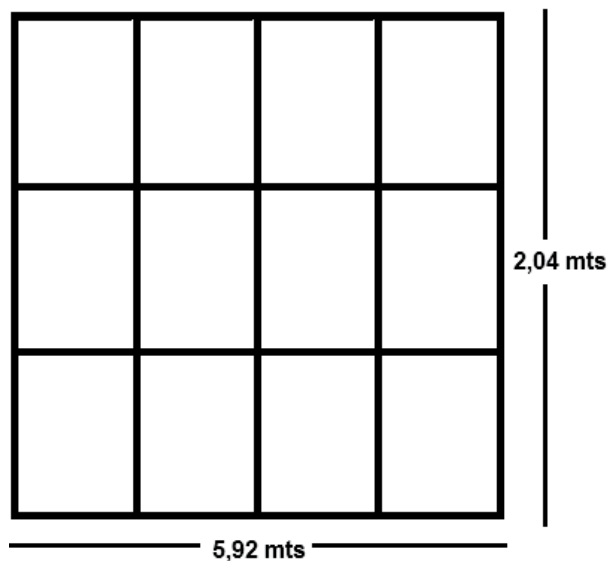


Figura 3. Área distribución paneles solares

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El esquema general implementado está representado mediante la figura 4, para este se calcularon los valores de consumo de iluminación bajo la reglamentación correspondiente, se estimaron los valores de consumo estándar para electrodomésticos típicos de uso residencial y finalmente, en función a la energía total resultante, se calcularon la cantidad de paneles requeridos.

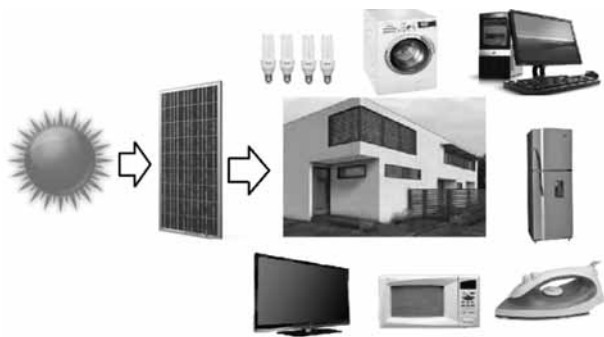


Figura 4.
Esquema general

El costo de implementación del sistema energético autónomo resultante, oscila alrededor de los diez millones de pesos (\$10.000.000), para una estructura de paneles fijos, paneles, inversor dc-ac, ductos y cableado, elementos de protección y referentes. Sin incluir el sistema de almacenamiento de baterías. Esto para el caso extremo de consumo simultáneo de cada elemento previsto.

Si se realizase una planeación para el uso energético, por ejemplo utilizar la lavadora en horas diurnas cuando el consumo por iluminación es mínimo y a su vez cuando no se cocine, lo cual incluso es usual. Se podría reducir el posible consumo instantáneo del sistema cerca de 1200W, con una reducción a 8 paneles y dos millones y medio de pesos menos de inversión.

Otra alternativa es la interconexión del sistema a la red pública para inyectar la energía no utilizada, pero esto que debería implicar un ingreso al dueño del sistema, no está reglamentado en Colombia, por lo cual se haría sin lucro alguno.

En cualquiera de los dos casos expuestos el consumo promedio semanal estaría por los 1.5KWh, dejando libre más del 50% de la capacidad de generación de energía aprovechable, parte de está utilizada para almacenamiento y la otra restante como uso potencial.

5. CONCLUSIONES

Los cálculos realizados para el diseño tanto del sistema de iluminación como para el fotovoltaico, permitieron obtener una implementación funcional de uso residencial para un ambiente residencial típico en Colombia, el cual es auto sostenible energéticamente.

Con el tiempo las variaciones de las medidas del lugar reducirán la capacidad lumínica final, lo que cambiara las condiciones de luminosidad dentro de la vivienda, esto dado las condiciones ideales tomadas del ambiente de las paredes, techo y suelo.

Es de prever dado el comportamiento fluctuante de la radiación solar, que no se tenga 5 horas de radiación uniformes en el año. Una disminución de este valor decrementa la producción energética final, más dado que el consumo promedio es muy inferior a la capacidad máxima, esto no debería presentar ningún inconveniente en los requerimientos energéticos de la vivienda.

REFERENCIAS

- Renewable Energy Police for the 12st century, REN21. "Renewables 2012, Global Status Report". Renewable Energy Police for the 12st century. Paris, Recuperado de: <http://ren21.net/>
- Casas A., Robinson J. M., Jutinico A., (2013). "Desing and construction of a pyranometer". Fifth International Symposium on Energy, Puerto Rico Energy Center (PREC)-LACCEI. Puerto Rico.
- Cristaldi L., Faifer M., Rossi M., Ponci F., (2012). "A Simple Photovoltaic Panel Model: Characterization Procedure and Evaluation of the Role of Environmental Measurements, " Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol.61, no.10, pp.2632, 2641.
- Tatis A.S., Jiménez M.R., Jutinico A., (2012). "Diseño e implementación de un prototipo para el seguimiento de variables en un sistema de energía solar". 5to Congreso Internacional de Matemáticas Aplicadas-APPLIEDMATH 5. México.
- Wang J.M, Zhi T.F, Zhang X.E, (2013). "Control Strategy of Inverter in Power Plant Based on a New Way of PV Module Operation" Intelligent System Design and Engineering Applications (ISDEA), 2013 Third International Conference on , vol., no., pp.482, 486, 16-18.
- Li X., Hui D., Lai X., (April 2013). "Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations, " Sustainable Energy, IEEE Transactions on , vol.4, no.2, pp.464, 473,
- Sugihara H., Yokoyama K., Saeki O., Tsuji K., Funaki T., (2013). "Economic and Efficient Voltage Management Using Customer-Owned Energy Storage Systems in a Distribution Network With High Penetration of Photovoltaic Systems" Power Systems, IEEE Transactions on, vol.28, no.1, pp.102, 111.
- Miyamoto Y., Hayashi Y., (2012). "Evaluating improved generation efficiency: One year using residential PV voltage control with a clustered residential grid-interconnected PV" Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on, vol., no., pp.1, 8, 14-17.
- ISA S.A. E.S.P, (2010). "Actualización del estudio de conexión proyecto interconexión eléctrica Colombia-Panamá 600 MW" Medellín.
- Stauth J.T., Seeman M.D., Kesarwani K., (2013) "Resonant Switched-Capacitor Converters for Submodule Distributed Photovoltaic Power Management," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.28, no.3, pp.1189, 1198. doi: 10.1109/TPEL.2012.2206056.

- Seung M.L., Woo C.L., Taeck K.L., (2012) "High efficiency for grid-connected modular photovoltaic power conversion system," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012 IEEE , vol., no., pp.1394, 1399, 9-12. doi: 10.1109/VPPC.2012.6422606.
- Hongrae Kim; Parkhideh B., Bongers T.D., Heng G., (2013) "Reconfigurable Solar Converter: A Single-Stage Power Conversion PV-Battery System, " Power Electronics, IEEE Transactions on, vol.28, no.8, pp.3788, 3797. doi: 10.1109/TPEL.2012.222939.
- Awad A., German, R., (2012) "Self-Organizing Smart Grid Services," Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (NGMAST), (2012) 6th International Conference on, vol., no., pp.205, 210, 12-14. doi: 10.1109/NGMAST.2012.27.
- Balog R.S., Weaver W.W., Krein P.T., (2012). "The Load as an Energy Asset in a Distributed DC SmartGrid Architecture," Smart Grid, IEEE Transactions on, vol.3, no.1, pp.253, 260.
- Rao K.D.V.S.K., Rani B.I., Ilango G.S., (2012)"Estimation of daily global solar radiation using temperature, relative humidity and seasons with ANN for Indian stations, " Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON), 2012 International Conference on , vol., no., pp.1-6, 3-6. doi: 10.1109/EPSCICON.2012.6175254.
- Ananth D.V.N. (2012) "Performance evaluation of solar photovoltaic system using maximum power tracking algorithm with battery backup, " Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES , vol., no., pp.1-8, 7-10. doi: 10.1109/TDC.2012.6281402.