

Sistemas solares DC en aplicaciones off grid, estudio técnico económico con relación a sistemas solares AC

DC solar systems in off-grid applications, technical-economic study in relation to AC solar systems

Álvaro Leiva^(a), Gustavo Rivas^(a, b)

^(a) Grupo de Pesquisa em Engenharia de Sistemas de Energia e Sustentabilidade (GPESES). Foz do Iguaçu, Paraná, BR

^(b) Universidad Federal da Integração Latinoamericana (UNILA). Foz do Iguaçu, Paraná, BR

Autor de correspondencia: alvarol684@gmail.com

Vol. 02, Issue 02 (2023): December
Special Issue:
Energy efficiency and sustainability
DOI: 10.53591/easi.v2i2.2516
ISSN 2953-6634
Submitted: October 30, 2023
Revised: December 15, 2023
Accepted: December 15, 2023

Engineering and Applied
Sciences in Industry
University of Guayaquil. Ecuador
Frequency/Year: 2
Web:
revistas.ug.edu.ec/index.php/easi
Email:
easi-publication.industrial@ug.edu.ec

How to cite this article:

Leiva, A. y Rivas, G. (2023). Sistemas solares DC en aplicaciones off grid, estudio técnico económico con relación a sistemas solares AC. EASI: Engineering and Applied Sciences in Industry, 2(2), 24-28.
<https://doi.org/10.53591/easi.v2i2.2516>

Articles in journal repositories are freely open in digital form. Authors can reproduce and distribute the work on any non-commercial site and grant the journal the right of first publication with the work simultaneously licensed under a CC BY-NC-ND 4.0.

Resumen. El acceso a la electricidad actualmente es considerado como un servicio básico; pese a eso, en determinadas regiones la distribución mediante red se torna inviable, por motivos geográficos o económicos. Sistemas en los que se aplican energías renovables se presentan como una solución, entre los que se destaca el uso de la energía solar *off grid*, sin embargo, estos son considerados sistemas caros y de poca eficiencia energética; ya que dependen de diversas conversiones: corriente continua/corriente alterna (DC/AC) y AC/DC para alimentar cargas domésticas generalmente en AC, proceso en el que se pierde una gran parte de la energía generada. El sistema solar *off grid* (OGH) propuesto se basa en el uso directo de DC, para aprovechar la energía solar fotovoltaica en forma eficiente. Con esta solución, la demanda mínima de potencia para el sistema fotovoltaico se redujo en 15%, y consecuentemente el valor de la inversión disminuyó en 20,3%, con relación a los sistemas convencionales.

Palabras claves: Off grid, Off grid dc, energía solar, sistemas aislados.

Abstract. Electricity access is currently considered a basic service; however, for geographical or economic reasons, in certain regions network distribution becomes unviable. Thus, systems applying renewable energy emerge as a solution, with off-grid solar energy being notable among them. Nevertheless, these are still expensive and energy-inefficient systems, since they depend on various DC/AC and AC/DC conversions to power domestic loads, generally AC, a process in which a large part of the energy generated is lost. The proposed off grid solar system (OGH) is based on the direct use of DC, to efficiently harness photovoltaic solar energy. With this solution, the minimum power demand for the photovoltaic system was reduced by 15%, and consequently the value of the investment decreased by 20.3%, in relation to conventional systems.

Keywords: off grid, off grid dc, solar energy, isolated systems.

1. INTRODUCCIÓN

En medio de la era digital, 675 millones de personas a nivel mundial todavía no tienen acceso a electricidad. Pese a que en la última década la cobertura de ese servicio básico pasó del 84 al 91% de la población IEA (2022); habitantes de zonas rurales y remotas representan el 84% de la población desabastecida, debido a que las cargas se encuentran alejadas de la red de distribución principal y el alto coste de ampliación de esta (de Almeida et al., 2020).

Aplicaciones de energía solar son comúnmente aprovechadas para atender esa demanda mediante sistemas solares sin conexión a la red (*off grid*) que, generalmente están compuestos por módulos fotovoltaicos (PV), controlador de carga, baterías e inversor (Kaur et al., 2015).

Ese tipo de soluciones dependen de diversas conversiones: DC/AC y AC/DC. Una vez que los módulos fotovoltaicos generan DC y deben alimentar cargas AC, que son las más comunes en el sector residencial. Las

pérdidas se maximizan porque pese a que los aparatos electrónicos se conectan en AC, en la mayoría de ellos, su funcionamiento es en DC, lo que resulta en otra conversión interna. Esa serie de conversiones tornan el sistema altamente ineficiente en términos energéticos (de Almeida et al., 2020).

La distribución de energía DC viene siendo usada desde la invención de las redes eléctricas, pero ha sido limitada a una variedad de aplicaciones de nicho, como transportes ferroviarios, aplicaciones marítimas, vehículos, telecomunicaciones y aplicaciones fuera de la red. En las últimas décadas, productos y usos DC también están siendo utilizadas en aplicaciones conectadas a la red.

En base a las cuestiones enunciadas, el uso de OGH sin inversor es una opción para utilizar de forma optimizada la energía generada directamente en DC, de esta manera se minimizan las pérdidas relacionadas a las conversiones. Sistemas OGH sin inversor son aplicados principalmente para suplir necesidades de iluminación, en zonas rurales de escasos recursos económicos; así como también para alimentar electrodomésticos y cargas básicas residenciales (Jhunjhunwala et al., 2015). Su uso se viene incentivando, porque la menor cantidad de equipamientos disminuye el costo y dificultad del mantenimiento.

El aumento de la demanda por equipamientos para generación de energía solar ha provocado una caída global de precios; sin embargo, en países en vías de desarrollo todavía son limitantes, principalmente cuando se trata de áreas alejadas de los centros urbanos. Por este motivo, disminuir la inversión, facilitar la manutención de los componentes y optimizar la energía generada es fundamental.

En este trabajo se analizó el desempeño técnico-económico de un sistema OGH sin inversor (Caso 2), para satisfacer las necesidades básicas de una residencia rural en Brasil, en comparación con un sistema convencional OGH (Caso 1).

2. METODOLOGÍA

La contextualización del área de estudio y las necesidades demandadas se describen en esta sección. Además, son presentados los métodos y normas adoptados para el dimensionamiento del sistema.

2.1 Área de estudio

El objeto de estudio se encuentra localizado a 890 metros sobre el nivel del mar, en la comarca de Mandembo, municipio de Rio Manso - Minas Gerais. Los valores promedio del lugar son temperatura ambiente 20,6 °C, índice de irradiación solar de 5,09 kWh/m². día y 5.01 horas sol/día (CRESESB, 2023; INMET, 2023; Pereira et al., 2017).

2.2 Estructura del sistema

El sistema OGH fue dimensionado para satisfacer las necesidades de una casa convencional padrón para el estado de Minas Gerais (CEMIG, 2021), sumando algunas cargas específicas del usuario Tabla 1. El pre-proyecto fue elaborado para una autonomía de 2 días sin generación y profundidad de descarga de 30%. También fue previsto un aumento de consumo de 20% sobre la carga demandada. Las eficiencias y pérdidas de los equipos fueron obtenidas de los *datasheets* suministrados por los fabricantes.

El dimensionamiento fue realizado siguiendo la normativa (ABNT, 2019), donde se establece el memorial de descriptivo (normas y ecuaciones) e hipótesis para cada región de Brasil. La eficiencia energética de cada sistema fue calculada mediante la ecuación de la energía y en el estudio económico se aplicó el concepto de valor presente líquido.

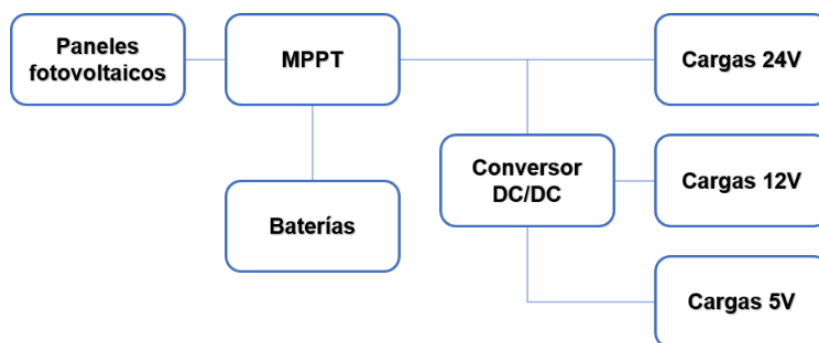
Tabla 1. Carga diaria y mensual instalada

Ítem	Cantidad	Potencia (w)	VDC (V)	Tiempo de uso	Consumo (w/día)	Consumo (w/mes)
Reloj + balanza*	1	-	1,5/3	24h	-	-
Celular	4	5	5	2h	40	1.200
Radio + equipo de sonido	1	10	5/12	12h	120	3.600
Focos LED internos	20	9	12	4h	720	21.600
Focos LED externos*	4	9	12	12h	432	12.960
Licuadaora	1	70	12	5min	5,8	174
Bomba de agua*	1	80	12	2h	160	4.800
Smart TV + modem satélite	1	35	12	6h	210	6.300
Plancha de cabello	1	25	12	10min	4,167	124,98
Proyector LED*		24	12	2h	48	192
Computador	2	30	19	4h	240	7.200
Refrigerador 280 L	1	80	24	12h	960	28.800
Cámaras de seguridad, receptor Elsys y modem wifi*				24h	10	300
Total					2.790	87.250

• Cargas específicas del usuario

El OGH Caso 1 se trata de un sistema convencional con inversor. Los módulos fotovoltaicos se usan para cargar el banco de baterías a través del controlador de carga con MPPT, tecnología que permite controlar la tensión entre ellos; así evitamos sobrecarga o descarga excesiva. Las cargas DC son directamente alimentadas, mientras que por medio del inversor se debe asegurar la potencia pico del sistema, considerando un factor de seguridad del 30%, por lo que este realiza la conversión DC/AC para alimentar las cargas AC.

El esquema general del OGH Caso 2 se muestra en la Fig. 2. En esta configuración se excluye el inversor de potencia y se trabaja directamente en DC. El proceso entre los módulos fotovoltaicos, controlador y baterías es análogo al del OGH Caso 1. Pero en este sistema, las cargas instaladas requieren varios niveles de tensión, las cargas de 24V son alimentadas directamente y para las demás necesidades se realiza el ajuste mediante convertidores DC/DC (5V – 19V).

**Figura 2.** Sistema *off grid* DC.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La potencia mínima requerida que considera las hipótesis enunciadas es de 3,33 kWh/día. En la Tabla 2 se muestran los resultados del pre-proyecto para los dos casos, la potencia mínima demandada para los paneles fotovoltaicos del Caso 2 es 15% inferior a la del Caso 1; esto se debe a la ausencia del inversor de potencia que minimiza las pérdidas de energía, por lo tanto, disminuye la cantidad de PVs.

La capacidad del banco de baterías calculada fue la misma para ambos casos, siendo propuesta una conexión en el esquema (2 serie x 4 paralelo); de esta manera se satisface la demanda y se garantiza autonomía de 2 días.

Considerando la configuración en paralelo de los módulos fotovoltaicos, a partir de sus características eléctricas, se realizaron los cálculos posteriores. La corriente mínima del controlador es superior para el Caso 1, por la influencia de la cantidad de PVs. Por último, para el Caso 1, fue determinada la capacidad del inversor, cuya potencia mínima calculada fue de 1.248W. En el caso 2, los convertidores DC/DC que suministran energía en los otros padrones de tensión tienen un consumo insignificante.

Tabla 2. Resultados del dimensionamiento del sistema OGH

	OGH Caso 1	OGH Caso 2
Potencia mínima PV	931,7 W	791,9 W
Cantidad PV	6	5
Capacidad banco de baterías	925 Ah	
Cantidad baterías	8 (2 x 4)	
Corriente del controlador	74A	62A
Potencia del inversor	1.248W	

En la Tabla 3, tenemos la lista de equipos con su valor promedio en el mercado brasileño. Para los dos casos fueron usados PVs de 160W de potencia nominal. El controlador de carga seleccionado es del tipo MPPT, con 84A para ambos casos, la corriente es superior a la requerida para dar más seguridad a la instalación de los otros equipamientos.

El banco de baterías es el componente más caro del sistema, representa el 61,85% del total en el Caso 1 y 77,61% del Caso 2. Cabe recalcar que para el Caso 2 la capacidad requerida del banco de baterías es menor, pero se dejó la misma cantidad para aumentar la autonomía del sistema.

En el caso 1 fue utilizado un inversor de 2.500W para soportar futuros aumentos de demanda; además que el costo beneficio es superior a los de potencias inferiores. El precio de los cables conectores para el banco de baterías es el mismo en ambos casos. Mientras que, la estimativa para el resto de cableado, mc4, cabos flexibles, etc., para el caso 2 es superior por la inclusión de los convertidores DC/DC.

El costo total del OGH Caso 2 es 20,3% inferior al del Caso 1, lo que demuestra la gran influencia del valor del inversor de potencia y los componentes esenciales para su incorporación en el sistema.

Tabla 3. Precios de los principales componentes del sistema OGH

Equipo	OGH Caso 1		OGH Caso 2	
	Cantidad	Precio	Cantidad	Precio
PV 160W	6	2.700 R\$	5	2.250 R\$
Baterías 234Ah 12V	8	12.000 R\$	8	12.000 R\$
Controlador MPPT 84A 12/24V	1	514 R\$	1	514 R\$
Inversor 2,5kW <i>Growatt</i>	1	3.550 R\$		
Par cables conectores baterías	4	279.6 R\$	4	279.6 R\$
Cables y otros		359,99 R\$		419,26 R\$
TOTAL		19.402,59 R\$		15.462,86 R\$

4. CONCLUSIONES

La ausencia de seguridad energética todavía es visible en regiones donde la red de distribución eléctrica no llega, sea por motivos geográficos o económicos. En este trabajo se propuso un sistema OGH *off grid* DC (Caso 2), cuyo desempeño técnico y económico fue comparado con un sistema OGH *off grid* convencional (Caso 1).

El sistema propuesto, Caso 2, resultó ser más eficiente en términos energéticos, con una reducción en las pérdidas de energía del 15%, con esto, la necesidad de energía fotovoltaica para alimentar las cargas es menor. De la misma forma, la capacidad del banco de baterías podría ser reducido sin comprometer el funcionamiento del sistema, mas, en este caso se optó por mantener la configuración, lo que se refleja en más horas de autonomía. También fue demostrado que el Caso 2 es económicamente más viable, su costo de implementación es 20,3% inferior a la del Caso 1; lo que se encuentra en el rango del 15 al 25% calculado por Ghenai & Bettayeb (2020), para la influencia del precio del inversor en sistemas off grid.

El sistema propuesto fue instalado en el local de estudio, para lo cual la distribución eléctrica de la residencia fue adaptada con el fin de soportar tensión DC y satisfacer la demanda de una casa tradicional padrón. Al tratarse de un sistema adaptable, independiente, replicable, eficiente y económicamente viable, facilita su implantación en áreas alejadas de la red de distribución. Aunque el uso de aparatos electrónicos DC todavía es limitado a aplicaciones específicas, lo que puede dificultar la instalación de este sistema en otros países.

Aparatos electrónicos DC disponibles en el mercado son más eficientes que sus homólogos AC. Sin embargo, los precios actuales de electrónicos DC son superiores a los de sus equivalentes AC, debido al estatus de nicho de mercado y, por ende, bajo volumen de producción (Vossos et al., 2022).

Cada vez más, los aparatos electrónicos DC se van introduciendo en nuestros hogares, debido a que su precio de producción en la mayoría de los casos es inferior a los AC, por el menor número de piezas y diseño simplificado. Pese a eso, en áreas conectadas a la red de distribución, el dominio de la red AC es considerable; así que su incorporación en sistemas *on grid* todavía resulta económicamente inviable.

REFERENCIAS

- de Almeida, A., Moura, P., & Quaresma, N. (2020). Energy-efficient off-grid systems—review. *Energy Efficiency*, 13(2), 349–376. <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09813-y>
- De Distribuição, N. (n.d.). Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária – Rede de Distribuição Aérea – Edificações Individuais.
- Ghenai, C., Bettayeb, M. Design and optimization of grid-tied and off-grid solar PV systems for super-efficient electrical appliances. *Energy Efficiency* 13, 291–305 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09773-3>
- International Energy Agency. (2022). World Energy Outlook 2022. www.iea.org/t&c/
- Jhunjhunwala, A., Vasudevan, K., Narasamma, L., & Ramamurthi, B. (2015). Technological and Deployment Challenges and User-Response to Uninterrupted DC (UDC) deployment in Indian homes.
- Instituto Nacional de Meteorología - INMET. (2023). Instituto Nacional de Meteorología - INMET. Atlas Brasileiro de Energia Solar 2a. Edição Revisada e Ampliada, (2017). <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>,
- P. Kaur, S. Jain, and A. Jhunjhunwala, "Solar-DC deployment experience in off-grid and near off-grid homes: Economics, technology and policy analysis," 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Atlanta, GA, USA, 2015, pp. 26-31, doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152004.
- PROGENSA. (1993). Valores medios de irradiación solar sobre suelo horizontal: base de datos internacional H-WORLD = Mean values of solar irradiation on horizontal surface: international H-WORLD database. Biblioteca de Ingenierías Industriales Depósito FTZ-4-c/Val(D).
- Rocha Álex. (n.d.). ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROJETOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS (OFF-GRID). Retrieved December 19, 2023, from <https://repositorio.unesp.br/items/dd7420dc-9523-4219-aab3-18e8ac89f00f>
- Vossos, V., Pantano, S., Heard, R., & Brown, R. (2017). DC Appliances and DC Power Distribution A Bridge to the Future Net Zero Energy Homes. Recuperado de <https://scholarship.org/uc/item/0j43x1r3>