

INDICADORES DE CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AISLADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE TRABAJO ÓPTIMA. UN ESTUDIO PRELIMINAR.

R. Fernández ¹, C. Cadena ².

¹ Centro de Sistemas de Control y Electrónica de Potencia (CESYEP) - Instituto de Tecnologías Aplicadas
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías – UNSE. Av. Belgrano (s) 1912 – CP4200 – Santiago del Estero
Tel: 54-385-4509500 Int. 1912 – e-mail: raf@unse.edu.ar

² INENCO, UNSa, CONICET - Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta –
Av. Bolivia 5150 - A4408FVY - e-mail: cadenacinenco@gmail.com

Recibido 15/08/14, aceptado 26/09/14

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es encontrar indicadores de caracterización, que operen como herramientas para determinar la tensión de trabajo más conveniente de un sistema fotovoltaico aislado. El estudio se realizó, tanto desde el punto de vista económico como técnico, buscando una referencia de costos y eficiencia en relación con la capacidad de energía instalada. Se describe el análisis de sistemas, diseñados con el mismo software, en iguales condiciones meteorológicas, variando la carga (700-1400W) y las configuraciones de diseño según las tensiones de alimentación de las cargas (12V-24V-220VCA). No se utilizó la tensión de 48V, ya que en el mercado no hay disponibilidad de cargas eléctricas. Se encontró algunos índices útiles y otros no adecuados para la caracterización pretendida. El índice Costo por Configuración muestra que la configuración 24V-220V es la más económica en el rango de potencias analizado. Es necesario ahondar este análisis con nuevos estudios, incluyendo otras variables con mayor peso e influencia.

Palabras clave: fotovoltaico, tensión del sistema, topología, indicadores, sistemas aislados.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica a partir de las energías renovables (solar, eólica, mareomotriz, hidroeléctrica, geotérmica, biomasa y biocombustibles) es una práctica habitual hoy en día y aplicable casi en cualquier lugar del mundo por conocimiento y disponibilidad de las distintas tecnologías para lograrlo. Sin embargo, las características del lugar, en general, tienen una gran influencia en la determinación de cuál de estas fuentes energéticas es la más conveniente técnica y económicamente. En relación con la disponibilidad del recurso energético sobre la superficie de la tierra en cualquier lugar del planeta, la energía solar tiene una ventaja frente a las demás aun cuando esta disponibilidad está afectada por otras variables como la presencia de nubes o turbidez de la atmósfera. Es posible disponer de ella todos los días y sin costos demandados por su presencia. Estas razones hacen muy atractiva su utilización.

En los últimos años, la investigación sobre sistemas de generación eléctrica híbridos aislados, basados en energías renovables, han llamado la atención significativamente. Uno de los aspectos más importantes para llegar a tener un sistema rentable es la optimización de su dimensionado (Maleki, A. y Askarzadeh, A. 2014)

La generación de energía eléctrica a partir de la energía solar, se basa en la conversión de la radiación solar luminica en electricidad de corriente continua mediante las celdas fotovoltaicas a través del fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico. La cantidad de energía que generan es directamente proporcional a la irradiancia solar que incide sobre la superficie fotovoltaica colectora. Esto hace importante conocer el mapa de radiación solar en la ubicación geográfica correspondiente, que es el recurso disponible que determina en gran parte el dimensionamiento de los distintos sistemas fotovoltaicos.

Para ello, “Se tiene un razonable conocimiento de la energía solar disponible y de su distribución geográfica aunque hay regiones del país que deberían ser estudiadas con mayor detalle, por lo que se requiere continuar la medición del recurso mejorando la cobertura espacial y la instrumentación utilizada. De todas maneras, se considera que las cartas existentes responden adecuadamente a los datos disponibles en Argentina” (Energías Renovables. Diagnóstico, Barreras y Propuestas. Junio 2009).

La producción de electricidad mediante paneles solares es especialmente interesante en aquellos puntos de consumo aislados en los que resulta costoso instalar una línea eléctrica. Son también interesantes las instalaciones solares eléctricas conectadas a la red, en las que se vierte toda la electricidad generada a dicha red, estos dos tipos de sistemas son los que se reconocen como los sistemas fotovoltaicos aislados (SFVA) y los sistemas fotovoltaicos conectados a red (SFVCR). Estos últimos sistemas, en general, trabajan sin elementos acumuladores, determinando la tensión de trabajo del sistema por las características del inversor utilizado y por la red misma. Por esta razón en este trabajo solo nos referiremos a SFVA.

Si se trata de un sistema fotovoltaico conectado a la red su objetivo es generar la máxima electricidad posible. Si se trata de un sistema fotovoltaico autónomo su objetivo será asegurar la disponibilidad de electricidad durante el máximo tiempo posible (Prat Viñas, L. 2011).

Los sistemas aislados, por el hecho de no estar conectados a la red eléctrica, pueden estar equipados con sistemas de acumulación de la energía producida, como es el caso de viviendas o sistemas de emergencia. La acumulación es necesaria porque el generador fotovoltaico puede proporcionar energía sólo en las horas diurnas, mientras que en general la mayor demanda de los usuarios de casa habitación se concentra en las horas de la tarde y de la noche. Durante las horas de insolación es necesario prever una acumulación de la energía, que será proporcionada a la carga cuando la generada es reducida o incluso nula.

En particular, en sistemas aislados de la red pública, una instalación diseñada con la tecnología solar fotovoltaica es un sistema capaz de suministrar energía eléctrica a una carga predeterminada convirtiendo la energía irradiada por el Sol utilizando el efecto fotovoltaico. Se conforma un sistema de estructura simple y muy flexible, en el que los módulos fotovoltaicos son los elementos esenciales del sistema, aunque normalmente es necesario un conjunto de elementos adicionales para el manejo y adecuación de la energía a una forma útil para su uso o almacenamiento. Estos elementos adicionales tienen una gran influencia en el costo final del sistema. La determinación de la tensión de trabajo es muy importante, ya que está relacionada con estos elementos adicionales para la adecuación del nivel de tensión de trabajo de la red que será alimentada y también afecta a los costos y rendimiento del sistema, con lo cual se hace necesaria la determinación del valor más conveniente económica y técnicamente.

La Figura 1 muestra un esquema básico de sistema fotovoltaico aislado, en donde se puede destacar en principio, la existencia de tres niveles de tensión diferentes:

- 1) Tensión en bornes del grupo FV generador.
- 2) Tensión en bornes de la batería, red de alimentación de carga de corriente continua e inversor.
- 3) Tensión en bornes de la red de alimentación de la carga en corriente alternada

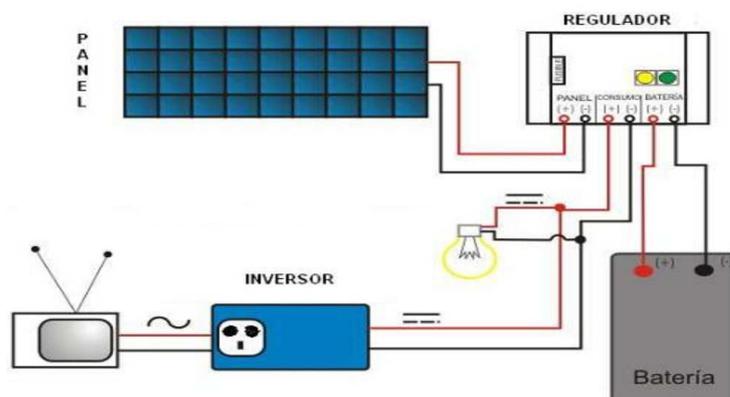


Figura 1: Esquema básico de un Sistema FV aislado: (ANPASOL, 2010)

Una configuración de este tipo implica que el generador fotovoltaico debe estar dimensionado de forma que permita, durante las horas de insolación, la alimentación de la carga y la recarga de las baterías de acumulación.

Entre la información que se dispone no es común encontrar la que determine cuál es el valor más conveniente de tensión de trabajo del sistema fotovoltaico que se diseña, por lo general, la que se encuentra, recomienda tensiones de 12 V para potencias menores a 1,5 kW, 24 o 48 V para potencias entre 1,5 y 5 kW y 48 V para potencias mayores a 5 kW (Alonso Abella, M. 2004), por lo que se propone realizar un análisis técnico que permita encontrar indicadores de caracterización de instalaciones fotovoltaicas aisladas, que sean una herramienta que permita determinar la mejor tensión de trabajo, económica y técnicamente, del sistema aislado y otorgue una referencia respecto de costos y eficiencia en su relación con la producción de energía.

En el presente trabajo se describe el análisis de múltiples sistemas fotovoltaicos autónomos diseñados con el mismo software y adoptando las mismas condiciones meteorológicas en todos los casos. La potencia de carga eléctrica fue variando en forma creciente en el rango de los 700 a 1400 W y la configuración de los diseños fue variando de acuerdo a las tensiones de trabajo del sistema desde 12 V, pasando por 24 V y hasta 48 V y variando desde 12 V, pasando por 24 V y hasta 220 V de tensión alterna para alimentar las cargas posibles. Entre estas últimas alternativas no se utilizó 48 V ya que se consideró que no existen en disponibilidad cargas eléctricas de estas características en el mercado. El objetivo es encontrar indicadores de caracterización de instalaciones fotovoltaicas aisladas, que sean una herramienta que permita determinar la tensión de trabajo adecuada, económica y técnicamente, del sistema aislado y otorgue una referencia respecto de costos y eficiencia en su relación con algún parámetro de referencia, como la cantidad de potencia de la carga o de potencia pico instalada.

DIMENSIONADO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AISLADOS

Independientemente de que la energía solar fotovoltaica permita generar electricidad limpia, siempre se debe buscar una reducción del impacto de nuestro consumo energético sobre el medio ambiente local y global haciendo un uso más eficiente de la energía.

El dimensionado del sistema FV nos remite a la determinación de las características de los dispositivos y elementos que lo componen (básicamente generador FV, baterías, regulador de carga, inversor, cableado y protecciones), para proveer la

energía necesaria a una carga eléctrica predeterminada. Esto implica el balance entre dos objetivos normalmente contrapuestos, máxima fiabilidad y mínimo costo.

El correcto dimensionado de un SFVA implica la armoniosa selección de los componentes, particularmente generador y batería, aunque se debe tener en cuenta que existen múltiples combinaciones de estos elementos que conducen a soluciones adecuadas. En general el dimensionado de SFVA ha sido objeto de numerosos estudios teóricos que han dado como resultado múltiples procedimientos de cálculo, desde simples a muy complejos.

Existen básicamente dos criterios utilizados para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos aislados:

- Se dimensiona para que la producción del generador fotovoltaico sea igual al consumo (en valores promedio)
- Se dimensiona para que la batería pueda abastecer el consumo cuando no hay sol durante un determinado número de días consecutivos (M. Alonso Abella, 2010).

El concepto básico que se sigue cuando se dimensionan SFVA, no es tanto el producir la máxima energía sino que aparece el concepto de fiabilidad. El dimensionado en este caso se hace atendiendo más a la fiabilidad del sistema, entendiendo por fiabilidad el asegurar el buen funcionamiento del mismo procurando que los fallos en el sistema sean mínimos.

Un procedimiento simple, el que denominaremos “amperios-hora”, esencialmente calcula cuantos amperios-hora por día son necesarios del generador FV, de acuerdo con la carga de diseño y las condiciones climáticas. Otro procedimiento basado en el concepto de “*Loss of Load Probability*” LLP o probabilidad de pérdida de carga, indicador de que el sistema falle o no sea capaz de suministrar el consumo requerido, se utiliza para determinar la cantidad de baterías de almacenamiento. Por ejemplo una LLP del 1% indicaría que a largo término la disponibilidad del sistema para el consumo de diseño sería del 99%. Mientras que el primer procedimiento se puede realizar con cálculos simples “a mano”, el segundo requiere cálculos realizados con el auxilio de computadora.

En este trabajo utilizamos un programa informático denominado DIMAS PV-3.0 (Waliki, 2009) de uso gratuito basado en el software Excel de Microsoft. Para dimensionar el generador FV se basa en el cálculo del consumo diario en amperios-hora. La batería se dimensiona teniendo en cuenta el “número de días de autonomía” y un índice generado en función de la probabilidad de pérdida de carga. Para el dimensionamiento del generador FV son necesarios los datos de irradiación del lugar de la instalación, adoptándose la Ciudad de Santiago del Estero, República Argentina, hemisferio sur, latitud -27,78°, longitud -64,26° y altura sobre el nivel del mar 181 m. Los datos de irradiación se obtuvieron de <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen>. El programa admite elegir si la instalación tendrá un uso calificado o general (de fin de semana, de meses de verano, de algún régimen de uso a definir o de uso todo el año), se supuso el caso más general de consumo, estacionario durante el año, en cuyo caso se necesitan los valores diarios medios en el plano del generador para el peor mes del año y el ángulo óptimo de inclinación. El programa calcula y recomienda según las características de uso de la vivienda, y la información aportada, el ángulo de inclinación óptimo. En este caso recomendó 23° y fue el utilizado. También permite elegir el azimut adoptándose 180°, con lo que se indica la dirección hacia el norte.

METODOLOGÍA EMPLEADA

Para realizar este estudio preliminar se utilizaron cinco configuraciones circuitales diferentes, para cada una de las cuales se emplearon cinco estados de carga distintos. El análisis de los resultados obtenidos permitió encontrar variada información para tener en consideración así como datos que generan nuevas incógnitas y que deberán ser analizados con nuevos estudios.

Se utilizó como carga inicial un consumo domiciliario medio compuesto de 15 lámparas de bajo consumo de 28,6 W, un TV de 99 W, un radiocasetera de 5,5 W, un refrigerador de 110 W, una PC de 83,5 W totalizando 727 W. Para generar cuatro nuevos estados de carga se agregó una bomba de agua de 198 W y se varió las cantidades de componentes iniciales logrando con ello 925, 1035, 1145 y 1354 W, todas ellas aptas para ser alimentadas con 12V, 24V de CC y 220 V de CA. Las cinco cargas distintas se utilizaron con igual configuración de tensión nominal del sistema y tensión de alimentación a las cargas, que en primera instancia fue de 12V de CC para ambas tensiones.

Posteriormente se utilizaron los mismos diseños de cargas y se cambió la configuración de tensiones de sistema y alimentación utilizándose distintas combinaciones con 12, 24 y 48 V, resultando en total cinco configuraciones circuitales diferentes. La tabla 1 muestra el resumen de las configuraciones analizadas.

Tensiones del sistema	Tensiones de alimentación de las cargas		
	12 V CC	24 V CC	220 V CA
12 V	xx		xx
24 V		xx	xx
48 V			xx

Tabla 1: Resumen de configuraciones distintas analizadas

En todos los casos se evaluaron los costos de generador FV, batería, regulador de carga, estructura de soporte y cables y llaves de conexión. A los efectos de poder hacer un análisis comparativo económico y ante la imposibilidad de obtener información de precios en el país, se utilizó la lista proporcionada por la empresa Techno Sun a través de su página web <http://www.technosun.com/es/descargas/index.php> con la transformación de euros a pesos con la cotización del día. Para el

caso de TV, heladera, bomba de agua, radio y luminarias se amplió la lista con los precios de la empresa Mundo Solar también obtenidos a través de la página web <http://www.mundosolar.com.ar>.

Se graficaron en valores porcentuales los costos relativo de cada componente respecto del costo total de la instalación de cada configuración versus la potencia de la carga en W y también se graficó el costo total relativo a la potencia de la carga en \$/W versus la potencia de carga en W, obteniéndose las Figuras 2 a 6, para cada caso, y Figura 7 respectivamente. Para todas estas figuras, los puntos discretos obtenidos fueron unidos por una curva continua siguiendo una aproximación lograda con el software Excel.

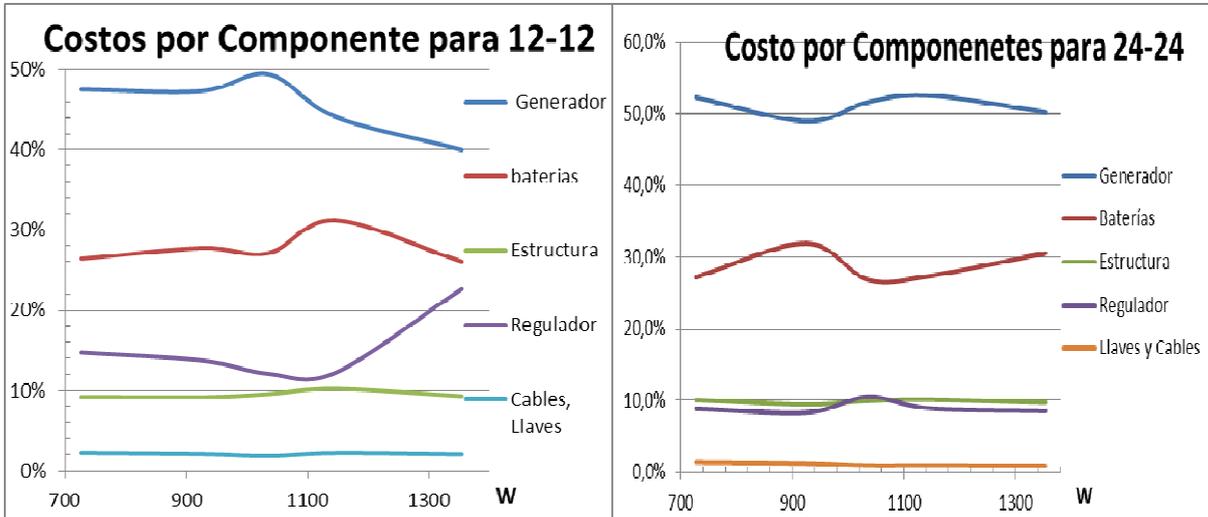


Figura 2: Costos para configuración 12 V – 12 V

Figura 3: Costos para configuración 24 V – 24 V

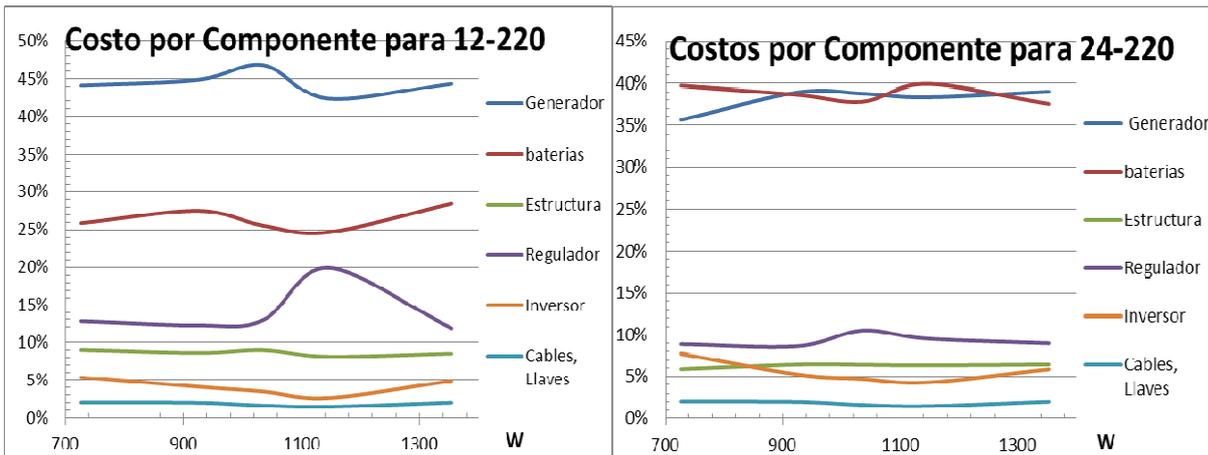


Figura 4: Costos para configuración 12 V – 220 V

Figura 5: Costos para configuración 24 V – 220 V

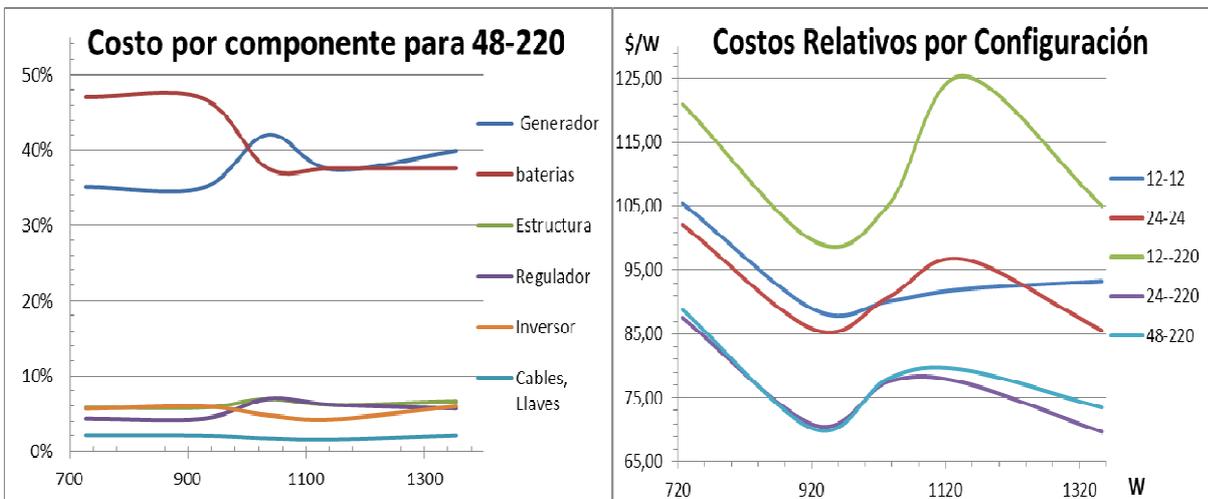


Figura 6: Costos para configuración 48 V – 220 V

Figura 7: Resumen Costos \$/W total por configuración

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Del análisis de las gráficas de las Figuras 2 a 6 se puede establecer que para este procedimiento de diseño y en el rango de potencias preestablecido los costos de cables y llaves y estructura de soporte están en el 10% del costo total de inversión del SFVA o por debajo, para todas las configuraciones empleadas y con valores prácticamente constantes. En consecuencia el peso relativo de estos componentes en el análisis general muestra que su variación no es significativa al objeto de este estudio. Por el contrario los restantes componentes muestran variaciones importantes para las distintas potencias y configuraciones circuitales y serán los determinantes para el análisis.

Las mismas figuras analizadas muestran que los costos de los componentes “Generador FV” y “Baterías” son los de mayor peso relativo y variación más significativa, sin superar esa variación el 10% para “Generador FV” y 5% para “Baterías” según la potencia de consumo prevista en cada caso, para cada configuración. Estos componentes junto al “Regulador de Carga” que tiene variaciones en el costo relativo entre 3% y 22.7% en general, son los que más influyen en la determinación de la configuración más adecuada según la potencia de consumo.

Analizando los costos de los componentes relativos a la inversión total para un SFVA y en forma aislada para cada una de las potencias consideradas se obtuvieron los resultados representados en las Figuras 8 a), b), c), d) y e).

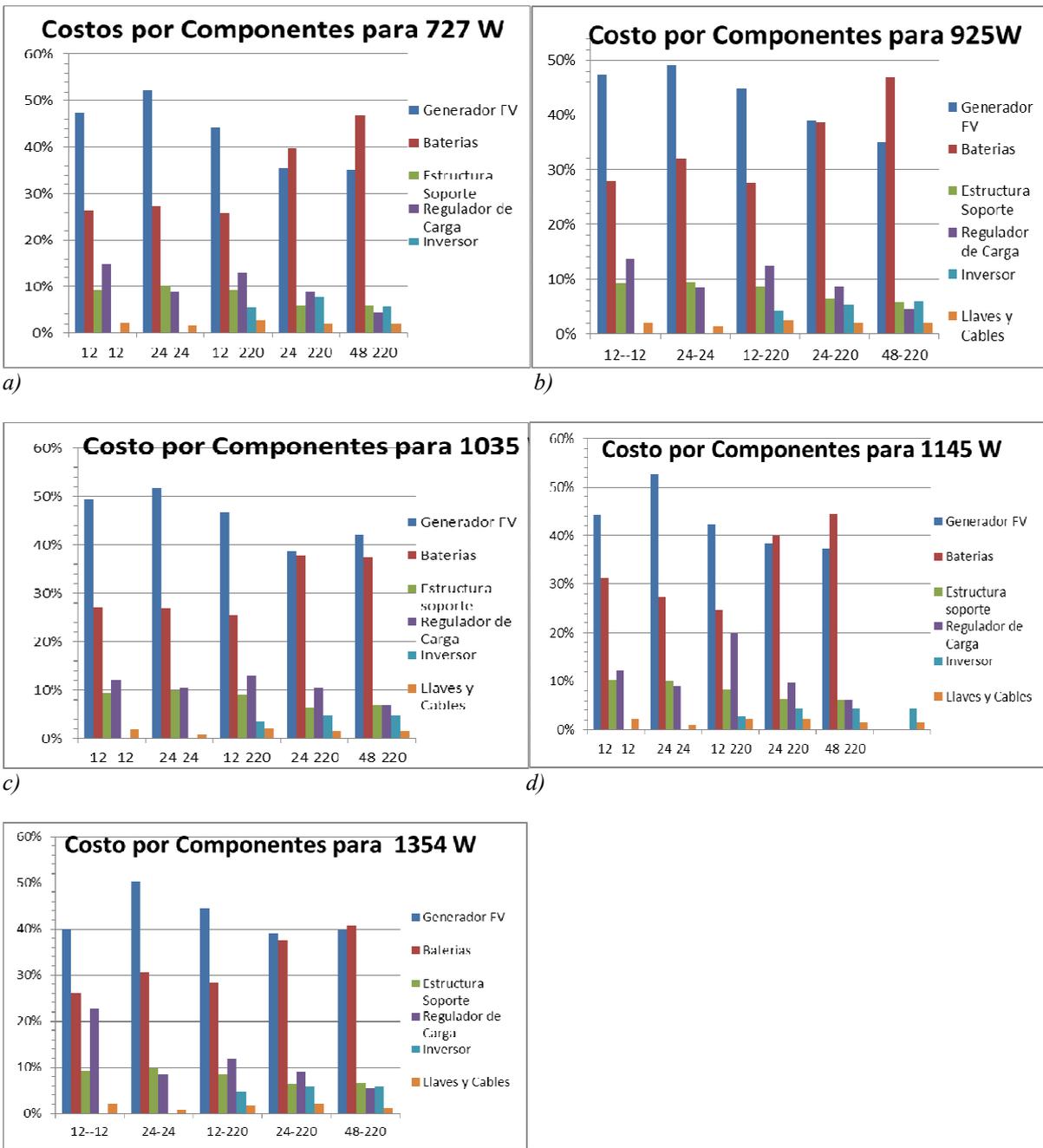


Figura 8: Costos relativo de componentes a potencia de carga a) 727 W ; b) 925 W; c)1035W; d)1145 W y e) 1354 W

En estos gráficos de barras, Figuras 8 a),b),c),d) y e), se puede observar que la forma de variación del costo relativo del componente “baterías” tiene una tendencia a incrementar su valor en la medida que se incrementa la tensión de trabajo del sistema.

También se observa que todos los demás componentes tienen una variación similar entre sí y opuesta a la del componente “baterías” que, en general, responde a una disminución de sus valores en la medida que se incrementa la tensión del generador tanto para los sistemas con alimentación en corriente continua como en alterna, aunque con distintos pesos y diferentes rangos de variación, pero siempre manteniendo la forma, produciéndose un incremento significativo al cambiar de tensión de alimentación de la carga de continua a alterna.

También en estas figuras es destacable que resulta siempre y para todos los niveles de potencia examinados, que la configuración 24-220 V presenta los costos relativos de generador fotovoltaico y baterías similares entre sí, siendo también la de menor costo relativo por vatio como se puede comprobar en la Figura 7, aun cuando tiene un solapamiento con la gráfica correspondiente a la configuración 48-220 V en un rango muy pequeño de potencias. Este representa el único cruce entre gráficas para destacar.

En esta última figura mencionada, también se puede observar que las curvas responden a una forma general similar con un marcado mínimo en cada una de ellas que se ubica entre los 900 y 1000 W para todas las configuraciones analizadas, obteniéndose el valor mínimo de 70,06 \$/W para 925 W de consumo con una configuración 48 V de generador y 220 V de tensión de alimentación a las cargas, indicando en este caso que se obtiene un rendimiento óptimo para esa potencia desde el punto de vista económico.

Finalmente en la misma gráfica, Figura 7, para todas las configuraciones y el rango de potencias considerado se puede observar la forma de variación similar en todas ellas y el hecho de que prácticamente no hay entrecruzamientos (a excepción del destacado más arriba) por lo que la determinación de la potencia óptima económica por configuración circuital está establecido por la de menores costos relativos, adoptando en este caso la de 24 V de generador y 220 V de alimentación a la carga, siendo su valor mínimo 70,75 \$/W para 925 W. En consecuencia para este rango de potencias de consumo no es posible caracterizar un índice relativo \$/W óptimo, en relación a la tensión de trabajo del sistema.

CONCLUSIONES

De análisis efectuado en este estudio preliminar se puede concluir que los resultados obtenidos no se pueden considerar definitivos y que es necesario analizar los mismos mediante otros programas de dimensionamiento y además para otros rangos de potencia de consumo e incluyendo otras variables con mayor peso e influencia, trabajo que deberá ejecutarse en el futuro. Por otro lado se infiere que los indicadores de costo relativo a la inversión total de SFVA de “Llaves y Cables y “Estructura de soporte” no son significativos al objeto de este estudio preliminar. “Generador FV” y “Baterías” son los indicados para ser utilizados en proyectos de diseño de sistemas fotovoltaicos en la determinación de la configuración más conveniente a utilizar en el rango de potencias considerado.

En lo relativo a determinación de la tensión más adecuada de trabajo según la potencia a utilizar no es definitivo el resultado obtenido ya que en el rango de 750 a 1350 W los índices tiene variaciones similares y como se muestra en la Figura 7 no se produce entrecruzamiento significativos de los gráficos lo que no permite establecer un criterio de selección en función de la potencia y configuración circuital.

REFERENCIAS

- Alonso Abella, M. (2004). Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos. CIEMAT. Madrid, España.
- Alonso Abella, M. (2010). Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos Aislados. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Departamento de Energías Renovables. Madrid, España.
- ANPASOL Energía Solar (2014). Página Web: <http://www.anpasol-energiasolar.com/Tematica/Fotovoltaica.aspx>.
- Bortolini, M., Gamberi, M. y Grazziani, A. (2014). Technical and economic design of photovoltaic and battery energy storage system. ELSEVIER. Energy Conversion and Management. pp 81-92.
- Fundación Bariloche, Secretaria de Energía de la Rep. Argentina y REEEP (2009). Energías Renovables. Diagnóstico, Barreras y Propuestas. IRAP. Argentina.
- Maleki, A. y Askarzadeh, A. (2014). Optimal sizing of a PV/wind/diesel with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran. ELSEVIER. Sustainable Energy Technologies and Assessments. pp 147-153
- Prat Viñas, L. (2011). Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos. XVIII CONEIMERA. Puno. Perú.
- Surface Meteorology and Solar Energy. NASA. RETScreen. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen>.
- Raboso López, A. M. (2013). Diseño de un Sistema FV para Alimentar una Planta Desalinizadora Autónoma. Universidad Internacional de Andalucía.
- Waliki. (2009). Dimas PV-3.0. <http://renewableengineering.blogspot.com.ar/p/nuevo-software-fotovoltaico.html>

ABSTRACT: This paper aims to find characterizing indexes that operate as tools to determine the more convenient working voltage for an isolated photovoltaic system. The study was carried out from both an economical and technical standpoint, searching for a reference related to costs and efficiency in terms of the installed energy capacity. The analysis of the systems designed using the same software and under the same weather conditions, is described with a charge varying from 700-1400 W and design configurations in terms of the input voltage of loads (12V-24V-220VAC). In direct current power supplying 48 V was not used since there are not loads available in the market. Some useful indexes and other indexes which were not adequate for the pretended characterization were found. The Configuration Cost index shows that the 24V-220V is the cheapest within the range of powers analyzed. It is necessary to deepen this analysis with further studies, including other variables with more weight and influence.

Keywords: photovoltaic, voltage of the system, indexes, isolated systems