

SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR Y RED ELÉCTRICA

HYBRID POWER SYSTEM USING SOLAR ENERGY AND POWER LINE SUPPLY

Mg. Jorge Díaz Rodríguez
Universidad de Pamplona, Colombia
jdiazcu@gmail.com

Ing. Luis Pabón Fernández
Universidad de Pamplona, Colombia
davidpabon@hotmail.es

Ph.D. Aldo Pardo García
Universidad de Pamplona, Colombia
apardo13@hotmail.com

(Artículo de **Investigación científica y tecnológica**. Recibido el 03/10/2011. Aprobado el 19/12/2011)

Resumen. En este trabajo se realiza el diseño y cálculo de los dispositivos de un sistema híbrido de energía, integrado por un generador fotovoltaico (arreglo de paneles solares), una fuente de energía convencional (red eléctrica), un banco de baterías para el almacenamiento de la energía proveniente del arreglo fotovoltaico y los respectivos dispositivos de control de las etapas y la interacción de las mismas. El sistema híbrido se constituye en una solución económica para un suministro confiable de electricidad. En el trabajo se enfatiza el diseño del inversor de potencia, se aportan datos necesarios para la selección o construcción de las partes eléctricas involucradas en la implementación de un convertidor multinivel de 81 escalones. Con el uso de este inversor se garantiza un mejoramiento ostensible de la calidad de la energía eléctrica suministrada por el sistema híbrido.

Palabras clave: Sistema híbrido; Energía fotovoltaica; Inversor; Inversores multinivel; Convertidor *Buck*.

Abstract. This paper presents the design and the devices calculation of a hybrid power system integrated by a photovoltaic (PV) source (solar array), a conventional power source (mains), a battery array to store energy from the PV generator and the stage control devices and its interaction. The hybrid system is an economical solution for a reliable power supply. The paper emphasizes in the design of the power inverter, providing all data required for the selection and construction (all electrical parts involved) of a 81 steps multilevel inverter. With the use of this inverter the energy quality provide by the hybrid system is guarantee.

Keywords: Hybrid system, photovoltaic energy, power inverter, multilevel inverter, buck converter.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de energía híbridos utilizan fuentes de energía primaria como la energía solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, mareomotriz y biomasa, entre otras. Un sistema que utiliza alguna combinación de estas fuentes tiene la ventaja de presentar un mayor equilibrio y estabilidad, disfruta de una mejor calidad de la energía y proporciona salidas estables a partir de sus fuentes primarias y se reduciendo la dependencia de la salida de los cambios externos como las variaciones climáticas y la escasez de combustibles. Se optimiza la utilización de las fuentes de energías alternativas disponibles.

Hacer una revisión del estado del arte sobre sistemas híbridos implica revisar trabajos en la región como [1], [2], [3], [4] en los que se realizan el diseño y cálculo, inclusive con software especializado. En dichos trabajos se enfatiza en determinar las capacidades de los dispositivos; sin embargo, usan el inversor de potencia convencional, que genera una distorsión armónica (THD) considerable. En [5] se mencionan topologías de sistemas híbridos pero no se establece una selección óptima de la fuente de energía primaria. En [6] y [7] se optimiza la selección de la fuente primaria de energía mediante el modelado de los componentes de un sistema híbrido, pero no existe una optimización en la selección de los dispositivos que integran al sistema híbrido. Tampoco se tiene en cuenta la calidad de la energía suministrada. En [8] se hace una revisión del estado del arte de los sistemas híbridos de energía que utilizan como energía primaria la energía solar, eólica, convencional (red) y diesel. Se hace énfasis en los desarrollos futuros con el potencial económico de cada sistema. En este trabajo se pone de manifiesto la capacidad de avance en los sistemas híbridos que usan energía solar. Finalmente, en [9], se describe una metodología para diseñar y evaluar los sistemas híbridos de energía renovable y se visiona la proyección para su futuro.

2. SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA

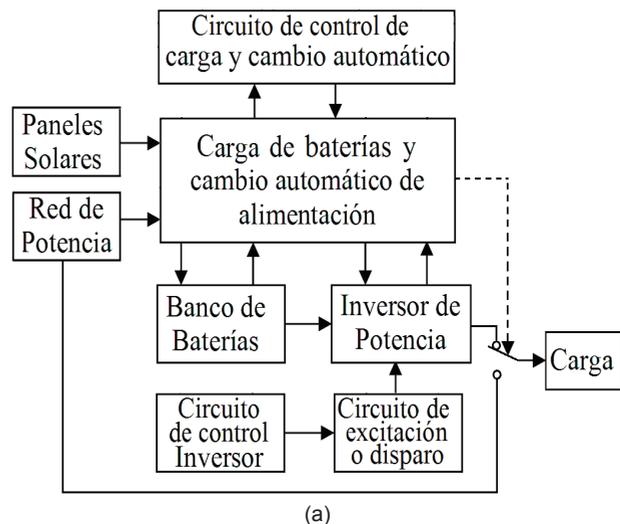
Cualquier sistema de energía híbrido, por lo general, implica la conversión de la energía porque la energía primaria generada es de CD, o, por defecto, convertida a CD, para permitir el uso de las baterías que se utilizan para almacenar energía eléctrica. Luego, para su uso final, se hace necesario convertir la CD en CA, puesto que la mayoría de los electrodomés-

ticos usan esta corriente de 120 V o 220 V y una frecuencia de 50 Hz o 60 Hz. Para esta aplicación se debe usar un dispositivo inversor de potencia que garantice la conversión adecuada. Los inversores de potencia tipo puente son los más utilizados por sus características particulares tanto en servicio monofásico como en trifásico. Las nuevas topologías han permitido la aplicación de los inversores multinivel, con el objetivo principal de aumentar los niveles de voltaje a la salida y obtener ondas de voltaje y corriente de CA casi ideales en función de la cantidad de niveles. Además, se eliminan los armónicos de menor orden que son los que mayor distorsión aportan.

El sistema híbrido diseñado estaría integrado de forma general por las siguientes etapas [10]:

1. Arreglo de paneles solares.
2. Banco de baterías.
3. Circuito de control de carga y cambio automático.
4. Carga de baterías y cambio automático de alimentación.
5. Circuito de control del inversor.
6. Circuito de excitación o de disparo.
7. Inversor de potencia.

Estas etapas están relacionadas, de acuerdo con el diagrama en bloque de la Fig. 1(a) y el esquema funcional del sistema resultante se muestra en la siguiente Fig. 1(b).



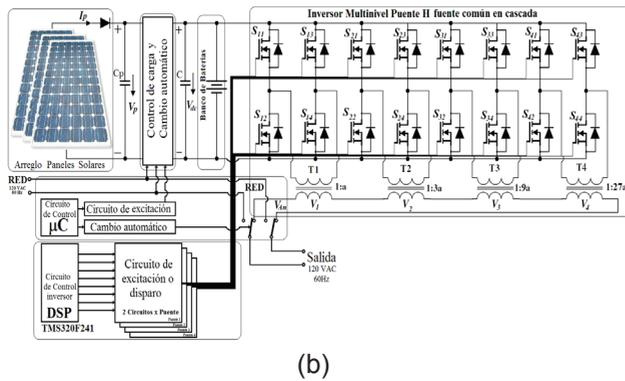


Fig. 1. Sistema híbrido de energía. (a) Diagrama de bloques, (b) Esquema funcional

2.1 Arreglo de paneles solares

Los paneles solares, mediante el efecto fotovoltaico, convierten los fotones en corriente eléctrica, la luz solar causa excitación en los electrones del panel solar y crean un campo electromagnético interno que produce una corriente. Esta electricidad de corriente continua se puede utilizar para producir energía eléctrica limpia puesto que no involucra el uso de minerales fósiles y reduce la contaminación ambiental y el efecto invernadero.

3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE PANELES SOLARES

Un procedimiento sencillo para dimensionar los paneles solares es [11]:

A. Consumo diario

Puede resultar un cálculo simple, basta buscar la placa de identificación de potencia en los aparatos electrodomésticos para determinar su consumo de potencia en vatios. Si no aparece el dato, se mide con la multiplicación de la corriente y el voltaje para obtener la potencia (se considera el factor de potencia unitario). Luego, se multiplica por el número de horas que se espera que operen en un día normal para determinar el consumo máximo en vatios-hora. Los televisores, computadores, equipos de sonido, relojes y otros aparatos, a veces, utilizan energía incluso cuando están apagados. Por esta razón, y para tener un margen adicional de potencia, se multiplican los vatios-hora por un factor del 1.5, con esto se tiene en cuenta la pérdida de potencia por concepto de caída de voltaje en el cableado de conexión y los ciclos de carga y descarga de la batería.

Otra aproximación, más directa y efectiva, para calcular la energía para el hogar, está representada en las facturas mensuales para obtener un resultado preciso del consumo mensual de energía.

B. Disponibilidad de la luz solar

Este dato es suministrado por Ideam en el Atlas de radiación solar de Colombia, con el que se determina la disponibilidad de la luz solar en la región donde se instalará el sistema. Para Colombia, obtenemos de 4.5-6 horas de sol por día, es suficiente si consideramos el peor mes, el de diciembre, que es de 4.5. En la tabla 1 se relaciona el potencial de la energía solar por regiones para Colombia, basado en el Atlas de radiación colombiano del Ideam y del UPME. Se muestran los datos insolación y radiación solar por regiones [12].

El diseño de esta etapa se fundamenta en el peor dato de radiación establecido para la región andina, según un modelo hecho en el Matlab por los autores, con datos geográficos de *Google Earth* con el que se obtiene la radiación mínima $Rad_{min} = 463.97 \text{ W/m}^2$.

El método utilizado es el equivalente solar que consiste en definir la energía total de un día y hallar el tiempo equivalente si se estableciera una radiación promedio $Rad_{prom} = 1000 \text{ W/m}^2$, con el fin de medir la potencia que se ha de instalar, con la potencia nominal por panel que entrega el fabricante. Las horas de sol diaria (Tsd) aproximada para Colombia son $Tsd=10$ horas.

TABLA 1: Potencial de la energía solar en Colombia por regiones

Región	Insolación (Kwh/m2/año)	Radiación (W/m2)
Guajira	2000 - 2100	684.93 - 719.18
Costa Atlántica	1730 - 2000	592.46 - 684.93
Orinoquia	1550 - 1900	530.82 - 650.68
Andina	1550 - 1750	530.82 - 599.15
Costa Pacífica	1445 - 1550	494.86 - 530.82

La insolación (I) es la cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a un lugar de la Tierra en un día concreto (insolación diaria) o en un año (insolación anual), para nuestro caso:

$$I = Rad_{min} \cdot T_{sd} = 463.97 \text{ W/m}^2 \cdot 10 \text{ hr} = 4639.7 \text{ Whr/m}^2 \quad (1)$$

El equivalente día solar (D_s) será:

$$D_s = I / Rad_{prom} = 4693.7 \text{ Whr/m}^2 / 1000 \text{ W/m}^2 = 4.639 \text{ hr} \quad (2)$$

Por tanto, la potencia para instalar (P_{instalar}) está determinada por la razón de la energía nominal (E_n) entre el equivalente del día solar (D_s). La energía nominal se calcula como la relación de la potencia nominal P_n (se considera el factor de potencia unitario) por el tiempo de autonomía de la batería ($t_{\text{autonomía}}$).

$$E_n = P_n \cdot t_{\text{autonomía}} = 2000 \text{ W} \cdot 8 \text{ hr} = 16000 \text{ Whr} \quad (3)$$

$$P_{\text{instalar}} = E_n / D_s = 16000 \text{ Whr} / 4.639 \text{ hr} = 3449 \text{ W} \quad (4)$$

El panel seleccionado sería el KD210GH-2 de la compañía coreana Kyocera, con una potencia nominal de $W_n = 210 \text{ W/m}^2$ a 1000 W/m^2 , con un voltaje nominal de $V_n = 26.6 \text{ V}$ y una corriente nominal $I_n = 7.9 \text{ A}$.

C. Potencia del arreglo de paneles solares.

La potencia necesaria para instalar es de 2000W (a factor de potencia unitario) y cada panel aporta independiente una potencia de 210W, por tanto, el número total de paneles necesarios es:

$$N_{\text{paneles}} = P_{\text{instalar}} / W_n = 3449 \text{ W} / 210 \text{ W} = 16.42 \approx 18 \text{ paneles.} \quad (5)$$

Se escoge un número entero par superior al obtenido (16.42 paneles) porque, para conseguir el voltaje de la batería, se requiere de la conexión en serie de 2 paneles.

Si se asume que el sistema operará en condición máxima de carga todo el tiempo, y que el objetivo es que utilice lo menos posible la energía convencional de la red, el número de paneles se aproxima a los citados anteriormente (18 paneles).

El voltaje nominal de la batería seleccionada será de 48V, por consiguiente, se requieren dos paneles conectados en serie para alcanzar este nivel. Esto hace que los paneles se agrupen en disposiciones de dos, con seis módulos en paralelo. Así, se forma un generador fotovoltaico de 2×9 con los 18 paneles KD210GH-2, y quedarían dispuestos como se muestra en la Fig. 2.

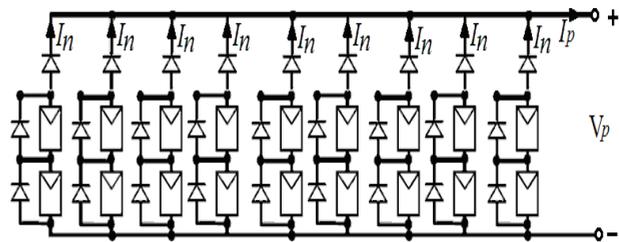


Fig. 2. Arreglo de paneles solares.

El voltaje nominal será de 48V, aunque el arreglo entregará un voltaje a máxima potencia de:

$$V_{\text{carga max}} = 2V_p = 2 \cdot 26.6 \text{ V} = 53.2 \text{ V} \quad (6)$$

El voltaje máximo de circuito abierto (vacío) es:

$$V_{\text{CA}} = 2V = 2 \cdot 33.2 \text{ V} = 66.4 \text{ V} \quad (7)$$

La corriente máxima que entregará el arreglo de paneles será de:

$$I_{\text{pmax}} = 9I_{\text{cc}} = 9 \cdot 8.58 \text{ A} = 77.22 \text{ A} \quad (8)$$

La corriente de operación a potencia nominal tendrá un valor de:

$$I_p = 9I_n = 9 \cdot 7.9 = 71.1 \text{ A} \quad (9)$$

Según el fabricante, la pérdida de eficiencia entre una incidencia de radiación de 1000 W/m^2 y 200 W/m^2 es de aproximadamente 6%. Lo que se ve balanceado por el sobredimensionamiento de los paneles solares.

Si se tienen en cuenta los parámetros calculados en el dimensionamiento de la batería, el voltaje a plena carga cumple con el máximo establecido por el fabricante de la batería, quien recomienda cargar cada celda con un valor pico máximo de 2.25V, lo que da un voltaje total de 54V. Este voltaje está por encima de los 53.2V nominales del arreglo de los paneles. De igual forma, la máxima corriente que entrega la disposición de paneles no sobrepasa la calculada para el cargador de la batería. Por esta razón, no es necesario implementar un circuito que controle el flujo de corriente porque la optimización del punto de operación de la batería la realizará el control de carga.

D. Determinar la capacidad de la batería

Una posible estimación de la capacidad de la batería es que se acerque a cinco veces el consumo diario del hogar. Se recomienda que el sistema sea capaz de proporcionar energía de forma continua durante

cinco días sin recarga, en el caso de que la aplicación sea totalmente dependiente del sistema de paneles solares. Multiplicar el consumo diario en amperes por 5, y luego dividir el resultado por el voltaje de la batería (12, 24 ó 48 voltios). El resultado es la capacidad recomendada en amperios-hora (A.h) de la batería.

2.2 Banco de baterías

Considerando que la carga que debe soportar el sistema es de 2000 VA, la batería fue dimensionada para proveer $P_n=2000W$, durante una autonomía de $T_{autonomía} = 8$ horas con el fin de garantizar la energía necesaria para alimentar la carga total en un corto tiempo. Se tienen pérdidas en el sistema tales como: regulación en conductores, disipación en dispositivos de control y de potencia, pérdidas en transformadores y otras, es decir, la potencia, más un 5% de seguridad, será la siguiente:

$$P_{batería} = 1.05 \cdot P_n = 1.05 \cdot 2000 = 2100 \text{ W} \quad (10)$$

La autonomía del sistema es de 8 horas, por consiguiente la energía para almacenar será:

$$E_{almacenada} = P_{batería} \cdot T_{autonomía} = 2100 \cdot 8 = 16800 \text{ W} \cdot h \quad (11)$$

La tensión nominal de la batería es 48V, lo que demanda una capacidad nominal de:

$$I_{Ah} = E_{almacenada} / V_n = 16800 \text{ W} \cdot h / 48 \text{ V} = 350 \text{ A} \cdot h \quad (12)$$

Como la conexión de baterías en paralelo no es recomendable, debido a diferencias de voltajes entre las mismas, la conexión de celdas en serie es la más utilizada, aunque exige la adquisición de celdas de la misma capacidad. Para este diseño se podrían seleccionar 24 celdas 5 OPzS 350, de voltaje nominal 2 V y de capacidad 350 A.h a una C10, con un voltaje final por celda de 1.8 V. La selección de esta batería entrega un margen de 10 horas de autonomía a máxima carga y con un máximo de ciclos de vida útil, ya que la operación del sistema exige una tasa de descarga menor a la dada por el fabricante y el voltaje final de descarga está por encima de 1.75V (valor típico de descarga total para una batería de Pb-ácido).

2.3 Circuito de control de carga y cambio automático de alimentación

El circuito de control de carga y cambio automático es un convertidor CD-CD o fuente de alimentación

conmutada, convierte un nivel de voltaje de CD de manera eficiente a otro nivel de voltaje de CD, a través de una etapa intermedia de almacenamiento de energía (inductor), de tal manera que la corriente de carga circule de forma continua y lo más cercano a un valor constante. Las aplicaciones de este convertidor se encuentran en fuentes de poder de baja potencia, alrededor de unos pocos kilovatios, como es nuestra aplicación, en particular como cargador de batería y regulador del voltaje en la carga.

Los convertidores conmutados se clasifican en convertidor reductor o tipo *Buck*, convertidor elevador o tipo *Boost* y convertidor reductor - elevador (*Buck-Boost*) o tipo *Flyback*. El funcionamiento de estos convertidores CD-CD está dado por el almacenamiento temporal de energía en el campo magnético de la inductancia y su posterior entrega. El ajuste del período de tiempo determina la cantidad de energía entregada a la carga [13].

En nuestra aplicación se escogió un conversor tipo *Buck*. Éste transforma el voltaje no regulado en la entrada en un voltaje de salida regulado, siempre inferior al de entrada (reductor).

El voltaje del arreglo de los paneles solares, que se constituye en la entrada del conversor, es de $V_i = 53.2 \text{ V}$, mientras que el voltaje deseado a la salida (voltaje nominal de la batería) es de $V_o = 48 \text{ V}$. El circuito de control utiliza una frecuencia de trabajo fija y genera una modulación por anchura de pulso (PWM) al comparar un nivel de referencia de CD con una señal diente de sierra, como se muestra en la Fig. 3.

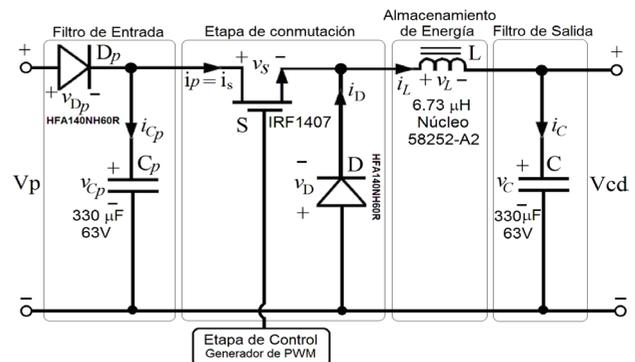


Fig. 3. Convertidor DC-DC tipo reductor (Buck)

La modulación PWM estará generada por un microcontrolador que se basa en los algoritmos programados con este fin, con ciclos de trabajo variables (10, 50, 70 y 100%) de acuerdo con el estado de la carga de la batería. Usualmente, en esta etapa se

programa el algoritmo de determinación del punto de máxima transferencia de potencia (MPPT) a partir de los datos de sensado de voltaje y de corriente.

La polaridad del voltaje en la salida se mantiene igual a la del voltaje en la entrada, característica de este convertidor y que contribuye a minimizar el ruido generado, en lo que influye el filtro LC resultante por la combinación del inductor y el condensador en la salida (filtro pasa bajos). Sin embargo, el voltaje en la entrada recibe los pulsos del transistor de potencia lo que hace que el convertidor produzca un ruido elevado en la entrada. Para disminuir este ruido se pone un condensador que actúa como filtro pasa bajos.

2.4 Carga de baterías y cambio automático de alimentación

Debido a que el sistema que se pretende diseñar es de carácter híbrido, éste debe contar con un circuito capaz de seleccionar la fuente de mayor conveniencia, para este caso en particular, debe cambiar a alimentación convencional sólo cuando el sistema fotovoltaico no posea las condiciones necesarias para operar. Además, debe proveer una carga eficaz y disponer de un circuito que garantice las condiciones óptimas del flujo de energía de los paneles hacia la batería. Se integraron los dos circuitos con el fin de reducir costos y asegurar que las acciones sean realizadas desde un único punto, con el propósito de garantizar la coordinación. El diseño del control está basado en el manejo de tres dispositivos interruptores potencia que conectan los puntos clave del sistema. En la siguiente tabla se presenta la descripción de los interruptores.

TABLA 2:
Dispositivos interruptores de potencia

Interruptor	Conexión	Función	Tipo
S1	Inversor - Carga	Conectar o desconectar la fuente de energía renovable.	Relé
S2	Red CA - Carga	Conectar o desconectar la fuente de energía convencional.	Relé
S3	Paneles - Batería	Desconectar paneles cuando la batería esté en sobrecarga y permitir PWM de alta frecuencia.	Mosfet

Los interruptores S1 y S2 son relés ya que funcionan simplemente con acciones de apagado encendido (on-off), para el interruptor S3 se escogió un mosfet debido a la optimización del flujo de energía: cuando

la batería alcanza un nivel alto de carga (75%), se debe implementar en S3 una modulación por ancho de pulso (PWM) de CD.

Con el fin de evitar gasificación en el electrolito [14] la modulación PWM debe disminuir el ciclo de trabajo a medida que el voltaje de la batería aumente. El circuito diseñado se muestra en la Fig. 4.

El diseño está basado en el uso del microcontrolador de gama media PIC16F876 que, mediante su módulo interno de conversión análogo digital (ADC) de 10 bits, transforma una señal de voltaje proveniente de un sensor de tensión conectado a la batería en una señal lógica que se compara con las referencias establecidas para realizar las respectivas acciones y visualice en un *display* de cristal líquido (LCD) el voltaje actual de carga de la batería y los estados en los que se encuentra el sistema.

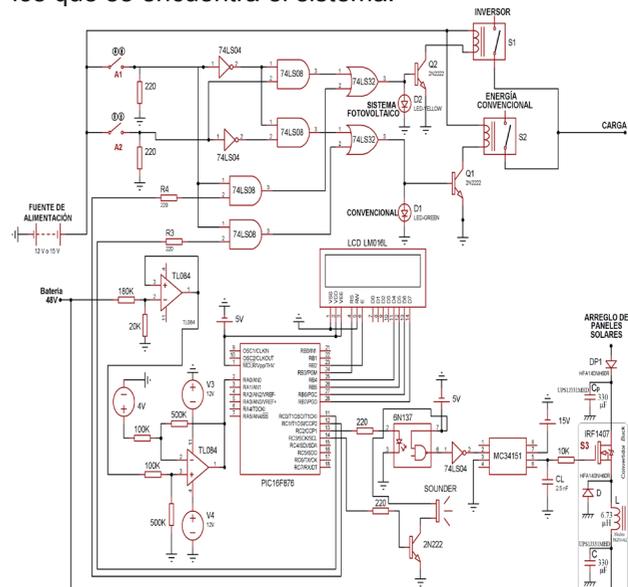


Fig. 4. Circuito control de carga y cambio de alimentación.

Referencias de voltaje

En la tabla 3 se resumen los estados de los interruptores y los rangos de voltajes. En la Fig. 5 se presenta el diagrama de flujo que atiende a las necesidades del microcontrolador frente a este diseño [14].

TABLA 3:

Intervalos de operación

Intervalo	S1	S2	S3 ciclo PWM	Alarma
$V \leq 43.2$	0	1	100%	0
$43.2 < V \leq 45$	Descargándose	1	0	100%
	Cargándose	0	1	100%
$45 < V \leq 47$	1	0	100%	0
$47 < V \leq 47.5$	1	0	70%	0
$47.5 < V \leq 48$	1	0	50%	0
$48 < V \leq 48.5V$	1	0	10%	0
$48.5 < V \leq 49$	1	0	5%	0
$49 < V \leq 50$	1	0	0%	0
$V > 50$	1	0	0%	1

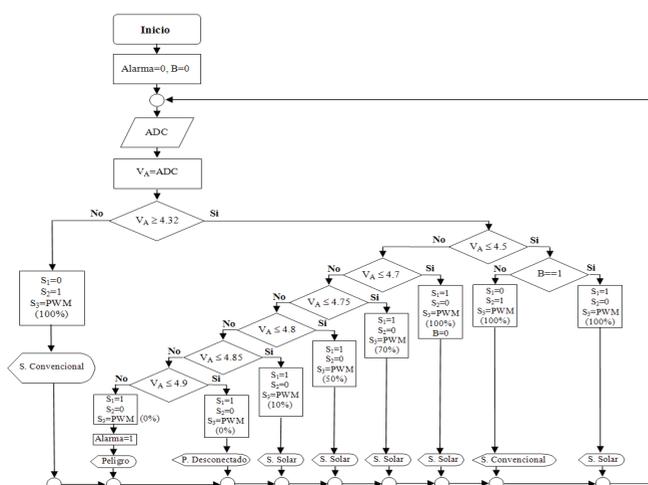
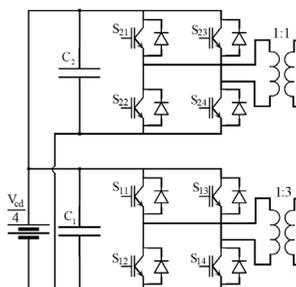


Fig. 5. Diagrama de flujo de la programación

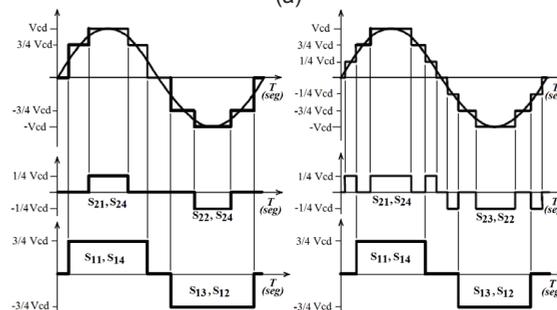
2.5 Inversor multinivel en cascada tipo puente h fuente común asimétrico

El inversor multinivel es una topología reciente de convertidor electrónico de potencia que sintetiza un voltaje deseado a partir de varios niveles de voltajes de CD. Si se utiliza un número suficiente de fuentes de CD o transformadores a la salida, se puede obtener una forma de onda de voltaje casi sinusoidal [15].

El inversor multinivel en cascada tipo puente H fuente común simétrico es similar al del inversor multinivel en cascada tipo puente H multifuente, pero colocando transformadores cuyos devanados primarios están conectados a la salida del inversor y los devanados secundarios están conectados en serie entre sí, como se muestra en la Fig. 6 (a) [16], [17] y [18].



(a)



(b)

Fig. 6: (a) Inversor puente H fuente común asimétrico en cascada de dos etapas (b) operando con cinco niveles (c) operando con siete niveles.

Se puede construir un inversor multinivel en cascada tipo puente H fuente común con la proporción adecuada de voltaje la cual es ajustada con la relación de transformación. Como puede observarse, a diferencia del inversor multifuente, ambos puentes están alimentados desde una misma fuente CD y además los transformadores utilizados poseen diferentes relaciones de transformación. Este inversor de potencia es equivalente al inversor multinivel puente H en cascada con fuente común simétrico; por lo tanto es capaz de generar cinco niveles de voltajes (dos positivos, dos negativos y el cero), como se muestra en la Fig. 6 (b).

TABLA 4:

Transformadores en topología multinivel fuente común.

Característica	Número de niveles				
	3	9	27	81	3k
Número de transformadores	1	2	3	4	k
Relación de transformación	1:a	1:3a	1:9a	1:27a	1:3k-1a

La ventaja de esta configuración frente a la que no utiliza transformadores es que con una sola fuente CD se pueden alimentar todos los puentes del inversor. Esta ventaja es más evidente si se aumenta el número de etapas del inversor. Por ejemplo, en un inversor de potencia multifuente de 4 etapas necesita 4 fuentes independientes de CD mientras que uno

de fuente común de las mismas características sólo utiliza una fuente CD. No obstante hay que mencionar que esta topología no es de uso práctico para aplicaciones de frecuencia variable.

2.6 Circuito de excitación

Para activar o desactivar un *mosfet* es necesario diseñar un circuito que propicie las condiciones necesarias para que se garantice la transición de estados y se consiga en un tiempo corto. Los tiempos de conmutación deben ser pequeños en el orden de los microsegundos [13].

El circuito excitador se obtiene cuando se conectan etapas de acoplamiento óptico, se usa el circuito integrado 6N137 y se adicionan 2 diodos *Zener* 1N4744A de 15 V (D_1 , D_2) que garantizan voltaje constante y regulado en los *mosfet*, como se muestra en la Fig. 7 [19].

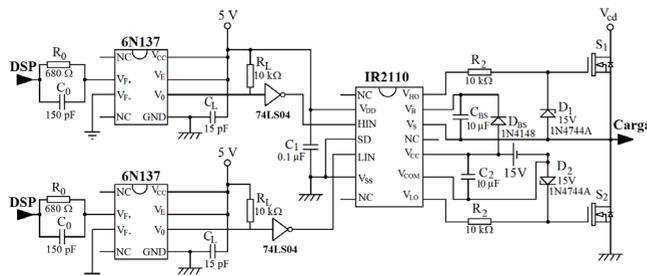


Fig. 7. Circuito excitador para una rama del inversor.

Las señales de control de los dos *mosfet* de una misma rama, deben contar con un tiempo muerto, con el fin de que, en ninguno de los casos, ambos *mosfet* conduzcan en el mismo intervalo de tiempo, ya que esto generaría un cortocircuito. Para la asignación de este tiempo muerto se dispone de un arreglo RC con la siguiente característica:

$$\tau = R_0 \cdot C_0 = 680 \Omega \cdot 150 \text{ pF} = 102 \text{ nSeg} \quad (13)$$

Este circuito asigna un tiempo muerto inferior a los microsegundos para garantizar que no exista la posibilidad de cortocircuito en rama alguna. Para reducir inductancias parásitas y tener un óptimo funcionamiento del *driver* el fabricante provee las siguientes consideraciones para las capacitancias. Estas consideraciones se encuentran en las recomendaciones del fabricante, la compañía *International Rectifier* (*IR*).

Teniendo en cuenta la hoja de característica del *driver* y del *mosfet* de mayor potencia:

$$C \geq 0.629 \mu\text{F}. \quad (14)$$

La recomendación para el condensador C_1 es que este condensador debe ser como mínimo 10 veces mayor al calculado para C , por tanto, los dos condensadores C y el condensador C_1 serán de $10 \mu\text{F}$.

En la entrada del *driver* se debe ubicar un condensador entre los pines V_{DD} y V_{SS} del *driver*, estos pines son la alimentación del nivel lógico y la tierra con el fin de eliminar rizado en la fuente de alimentación, el condensador de conexión típico para el puente H es de $4.77 \mu\text{F}$. El condensador empleado para la realización de este diseño es de $C_{BS} = 10 \text{ mF}/50\text{V}$.

La hoja de características del circuito optoacoplador 6N137 de *Hewlett Packard* (*HP*) en sus curvas de características sugiere que para conseguir un tiempo de demora de $T_{d \text{ optocoupla}} = 30 \text{ nS}$ los valores de los componentes son: $CI = 15 \text{ pF}$ y $RL = 350 \Omega$. Esta disposición asegura un tiempo de respuesta de:

$$T_{resp \max} = T_{d \text{ optocoupla}} + T_{d \text{ NOT}} + T_{d \text{ driver}} = 30 \text{ nS} + 15 \text{ nS} + 150 \text{ nS} = 195 \text{ nS} \quad (15)$$

4. CONCLUSIONES

La calidad de la energía de los sistemas fotovoltaicos depende de la onda de tensión de la señal de voltaje de salida del inversor, es decir, si se disminuye el contenido armónico de esta señal se logrará mejorar sustancialmente la calidad de la energía entregada por estos sistemas. En este trabajo la estrategia empleada para optimizar la calidad de energía de los sistemas fotovoltaicos, es utilizar un inversor multinivel que tenga un contenido armónico muy bajo, para lo que se seleccionó el caso de un convertidor multinivel de 81 escalones.

La batería es el bloque del sistema híbrido de energía que presenta menor tiempo de vida útil y se convierte en un componente crítico. Cuando se diseña un sistema que utilice baterías estacionarias, no se debe escatimar en otorgar todas las garantías para que opere con un flujo de carga óptimo y que su descarga no supere los niveles ni los tiempos recomendados por el fabricante. De allí la aparente complejidad del circuito diseñado para la carga de la batería. El uso de microcontroladores en el sistema de control de carga, ofrece variantes como la modulación PWM de ciclo de trabajo variable, que permite optimizar el flujo de energía que proviene de los paneles solares y facilita una mejor visualización de los estados en los que el sistema está operando.

La utilización de un sistema híbrido como el diseñado es importante si se aplica en el desplazamiento de cargas constantes tales como equipos de refrigeración, ventiladores y aparatos que deben operar en lugares donde la radiación solar es alta. Así, se disminuiría la carga alimentada por la red convencional y se aporta en la solución de la problemática medio ambiental.

REFERENCIAS

- [1] N. Sogari. "Diseño de un sistema híbrido solar-eólico para proveer de energía a una comunidad". Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Dpto. de Física - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura - UNNE, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, 2003.
- [2] P. Tagle S. y J. Duque R. "Diseño preliminar de un sistema híbrido de suministro de energía doméstica para una comunidad aislada en base al modelado en el software HOMER". Facultad en Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2003.
- [3] J. González Espinosa, J. I. Véliz Alonso y Rincón Toledo. "Diseño de un sistema híbrido con base en energías renovables para garantizar 5 kW a un consumidor". Facultad de Ingeniería Química-Mecánica, Universidad de Matanzas, Cuba, 2009.
- [4] E. Gutiérrez, D. Aguirre, J. Carpio y J. L. Jaramillo. "Sistemas mixtos fotovoltaicos - energía eléctrica convencional para iluminación: bloque de storage de energía, regulador de carga e inversor". Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, 2010.
- [5] J. Rocabert Delgado, S. Busquets Monge y J. Bordonau Farrerons. "Sistema Autónomo de Generación de Energía Renovable". Memorias de las XVII Jornadas de Conferencias de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Cataluña, Terrassa, España, 2011.
- [6] M. Muselli, G. Notton and A. Louche. "Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management". *Solar Energy*, Volume 65, Issue 3, 1 February 1999, pp. 143-157.
- [7] R. Dufo López. "Dimensionamiento y control óptimos de sistemas híbridos aplicando algoritmos evolutivos". *Tesis doctoral*, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2007.
- [8] P. Nema, R. K. Nema and S. Rangnekara. "A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issue 8, October 2009, pp. 2096-2103.
- [9] M. K. Deshmukh and S. S. Deshmukh. "Modeling of hybrid renewable energy systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 12, Issue 1, January 2008, pp. 235-249.
- [10] H. L. Gasquet. "Sistemas fotovoltaicos mixtos e híbridos". Asociación Solar de El Paso EPSEA, Texas, 2008.
- [11] H. L. Gasquet. "Manual sobre los sistemas fotovoltaicos". Asociación Solar de El Paso EPSEA, Texas, 2007.
- [12] H. Rodríguez Murcia. "Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas". *Revista de Ingeniería*, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, No. 28, July/Dec., 2008.
- [13] N. Mohan, M. Undeland y W. Robbins. "Electrónica de potencia convertidores, aplicaciones y diseño". 3^{ra} Edición, México D.F., 2009.
- [14] H. Wayne Beaty. "Handbook of electric power calculations". 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, USA, 2001.
- [15] A. Pardo y J. L. Díaz. "Aplicaciones de los convertidores de frecuencia. Estrategias PWM". Universidad de Pamplona, Editorial JAVA E.U., Colombia, 2004.
- [16] J. Rodríguez, J.-S. Lai. and F. Z. Peng. "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 4, August 2002.
- [17] A. A. Breton Schuwirth. "Diseño y construcción de un inversor trifásico multinivel de cuatro etapas para compensación armónica y de reactivos". Pontificia Universidad Católica de Chile, Trabajo de grado, Santiago de Chile, 2003.
- [18] C. M. Elgueta Díaz. "Aplicación de un inversor multinivel como variador de frecuencia de un motor de inducción trifásico". Pontificia Universidad Católica de Chile, Tesis de Maestría, Santiago de Chile, Julio 2005.
- [19] J. L. Díaz y L. D. Pabón. "Diseño y análisis de un inversor de potencia multinivel para la aplicación en un sistema híbrido de energía". Trabajo de Categoría Profesor Asociado. Universidad de Pamplona, Colombia, 2011.