



TLATEMOANI
Revista Académica de Investigación
Editada por Eumed.net
No. 13 – Agosto 2013
España
ISSN: 19899300
revista.tlatemoani@uaslp.mx

Fecha de recepción: 28 de mayo de 2013
Fecha de aceptación: 15 de julio de 2013

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

M.C. Raúl Castillo Meraz
raulcastillom1@hotmail.com
M.C. Roberto Carlos Martínez Montejano
rc.montejano@gmail.com
I.E. Finees Delgado Aranda
fdelgadoaranda@gmail.com
Dr. Isaac Campos Cantón
icampos@fciencias.uaslp.mx
Facultad de Ciencias
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Resumen

El uso de energías fotovoltaica y eólica ha crecido de manera importante en las últimas décadas dados los beneficios directos económicos y ambientales que traen consigo. Una parte importante en estos sistemas de energías renovables son los inversores multinivel. Un inversor multinivel es todo aquel dispositivo que cambia el voltaje de corriente directa (CD) a alterna (CA) de forma escalonada. El puente H es una opción atractiva por sus diversas ventajas, respecto a las otras topologías. En el presente trabajo se muestra un prototipo de inversor CD/CA de baja potencia en puente H que funciona simultáneamente con energía fotovoltaica y eólica. El objetivo de este proyecto es presentar un modelo de inversor híbrido que pueda tener aplicaciones didácticas y que pueda ser implementado en un laboratorio a bajo costo.

Palabras clave — Conmutación, Energía fotovoltaica, Energía eólica, Inversor multinivel, Modulación de Ancho de Pulso, Sistema Híbrido.

Abstract

The use of solar-photovoltaic and wind energy has been growing significantly on the last decades because of their environmental and economic benefits. The multilevel inverters are a very important part of these systems of renewable energy. A multilevel inverter is a device that converts Direct Current (DC) to Alternating Current (AC) in staircase output waveform. The H-bridge multilevel inverter is an interesting option for its several advantages versus other topologies. In this work we show a DC/CA inverter prototype of low power in H-bridge form that works with solar-photovoltaic and wind energy simultaneously. The objective of this project is showing a low-cost hybrid inverter in a laboratory of power electronics for didactic applications.

Keywords — Commutation, Hybrid System, Multilevel Inverter, Pulse Width Modulation, Photovoltaic energy, Wind energy.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda energética de la población mundial ha crecido de manera considerable a través del último siglo. Tan sólo en 2005 hubo una demanda energética de 15 TWh (TeraWattthora; 1 TW = 1, 000, 000, 000,000 W) de los cuales el 86.5% provenía de combustibles fósiles (Patel, 2006).

En este contexto es importante mencionar que el petróleo, gas y carbón siguen siendo los combustibles más recurridos por su bajo costo. Sin embargo, el impacto ambiental de estas fuentes de energía, sumado con el crecimiento de la población en el planeta y su demanda energética, ha traído consigo nocivos efectos al medio ambiente. Por ello, el mercado de las energías renovables ha crecido de manera considerable en las últimas décadas promoviendo una forma de generar energía sin dañar al medio ambiente.

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En la figura 1 se puede apreciar una proyección en la generación de energía desde 2005 hasta el 2035. Es interesante observar como las energías renovables se podrían posicionar como la segunda fuente de energía para la población mundial en 2035 por encima del gas y de la energía nuclear y sólo por debajo del carbón cuyas reservas mundiales aún son vastas y podrían agotarse hasta 2065 (EIA, 2012).

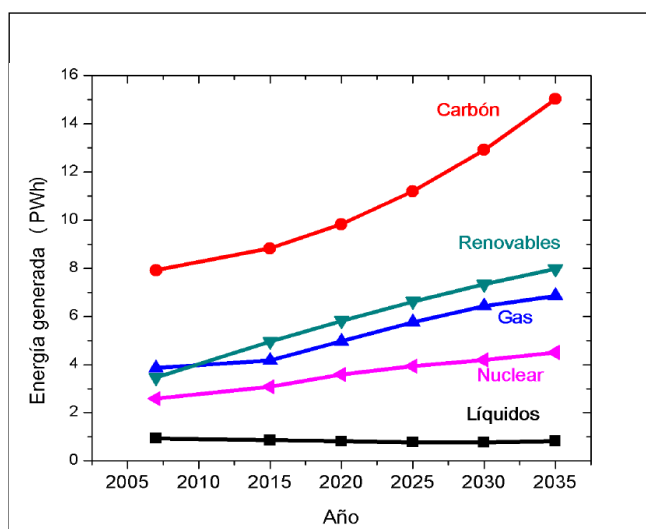


Figura 1. Proyección energética 2005-2035 (EIA, 2012)

El potencial de la energía solar y eólica que recibe la tierra es enorme. La cantidad de esta energía recibida es tan vasta que equivale aproximadamente al doble de toda la energía producida por otras fuentes de energía no renovable como el petróleo, carbón, uranio y gas natural. Además, México tiene una posición geográfica privilegiada en cuanto a la captación de este tipo de energías. En 2011, el territorio mexicano recibió una radiación solar promedio de 5,000 Wh/m² al día en comparativa con los países de Norteamérica y del norte de Europa cuya radiación solar promedio apenas superó los 2500 Wh/m² al día (UNAM, 2012).

Entre las energías renovables más populares y utilizadas en el mundo se encuentran la energía solar fotovoltaica (FV) y la energía eólica. La primera convierte la radiación solar en electricidad en forma de corriente directa (CD).

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La segunda utiliza el movimiento de las aspas de una turbina a través del viento, generando corriente directa a la salida. Todo ello basado en el principio fundamental de la física: “La energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma”.

El uso de cada tipo de energía renovable se muestra en la figura 2.

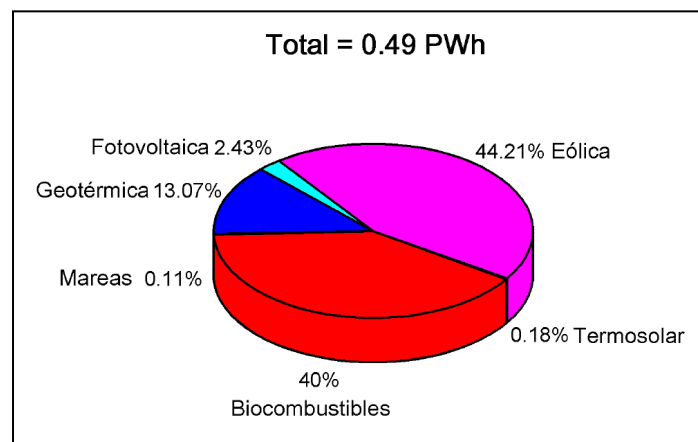


Figura 2. Generación mundial de electricidad a través de fuentes de energía renovables en 2008 (EIA, 2012)

Una parte importante en estos sistemas de energías renovables son los inversores multinivel. Un inversor multinivel es todo aquel dispositivo que cambia el voltaje de corriente directa a alterna (CA) de forma escalonada. En la Facultad de Ciencias de la UASLP se ha desarrollado un prototipo de inversor CD/CA de baja potencia en puente H que funciona simultáneamente con energía solar fotovoltaica y eólica para con ello poder alimentar aparatos de uso cotidiano tanto de corriente directa como de corriente alterna.

2. MARCO TEÓRICO

A continuación se explican los aspectos teóricos del funcionamiento de este tipo de sistemas y cada una de las partes que lo integran.

2.1 Sistemas híbridos de energías renovables

Estos sistemas se denominan “híbridos” porque pueden generar energía eléctrica a partir de dos o más fuentes de energía renovable simultáneamente; por ejemplo, fotovoltaica-eólica, fotovoltaica-celdas de combustible, eólica-térmica entre otras.

Los sistemas híbridos se componen de varias partes fundamentales (figura 2):

- Al menos 2 tipos distintos de energía renovable
- Fase de control de carga
- Banco de baterías
- Inversor Corriente Directa-Corriente Alterna (CD/CA)

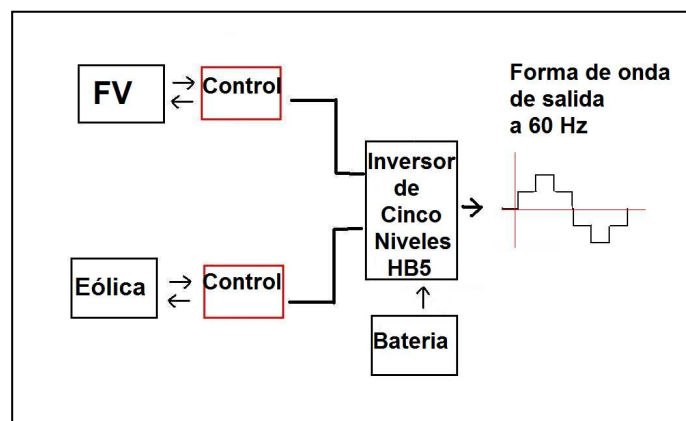


Figura 3. Partes de un sistema híbrido aislado

En este trabajo, se está considerando un sistema híbrido de tipo aislado del cual se explicarán los aspectos teóricos de cada una de sus partes.

2.2 Energía Solar Fotovoltaica (FV)

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La energía solar Fotovoltaica (FV) funciona bajo el principio físico del efecto fotoeléctrico el cual, al hacer incidir luz visible en un material semiconductor, se genera una absorción de fotones y desplazamiento de electrones en dicho material. Esto da lugar a la generación de un potencial eléctrico en los extremos de dicho material (Djamila, 2012).

Cada panel solar está construido a partir de pequeñas celdas (obleas de silicio) que generan un potencial eléctrico individual aproximado de entre 0.6 y 0.7 Volts. Esto puede apreciarse en la figura 4. Al colocar las celdas solares en arreglos serie y paralelo, se pueden obtener mayores voltajes y corrientes.

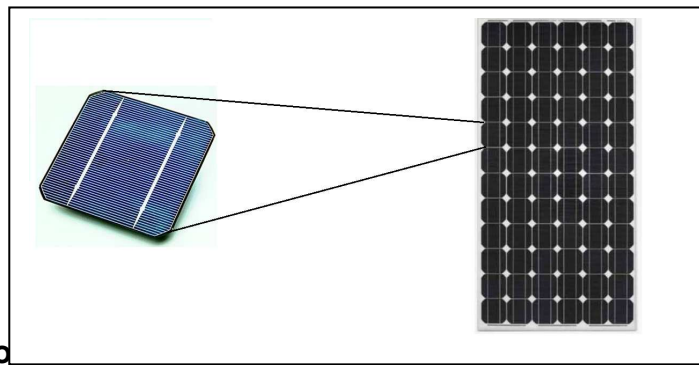


Figura 4. Conexión de celdas solares

El voltaje y la corriente producidos por un panel solar son directamente proporcionales al área de captación y a la irradiancia incidente. Para mostrar esta relación, típicamente se suele representar una celda solar mediante el circuito mostrado en la figura 5.

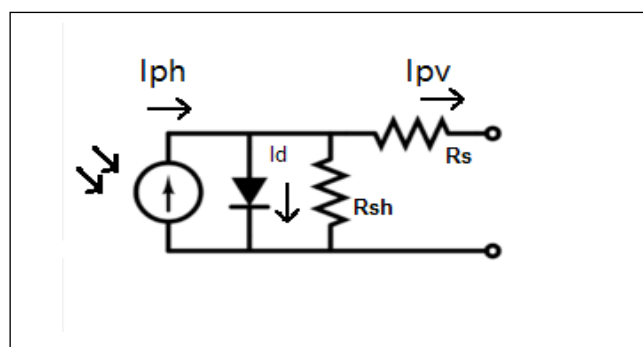


Figura 5. Circuito electrónico representativo de una celda solar

Al resolver el circuito mediante leyes de Kirchkoff se obtiene la siguiente relación (Djamila, 2012):

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Donde:

$$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{I_{rr}}{1000} \right) [1 + K(T_{cell} - T_{ref})] \quad (2)$$

- I_{sc} = Corriente en corto circuito de la celda (A)
- I_{rr} = Irradiancia (W/m^2)
- A, q, T, k = parámetros del diodo Shockley
- T_{cell} = Temperatura de la celda ($^{\circ}C$)
- T_{ref} = Temperatura ambiente ($25^{\circ}C$)
- K = coeficiente térmico dado por el fabricante.
- R_{sh}, R_{se} = pérdidas óhmicas del material

Para resolver las ecuaciones 1 y 2 generalmente se recurre a algún software numérico como MATLAB. Con ayuda de dicho software se pueden generar las curvas características de una celda solar como la que se muestra en la figura 6. Aquí se puede apreciar que la corriente eléctrica generada en cada celda solar es directamente proporcional a la irradiancia incidente (Djamila, 2012).

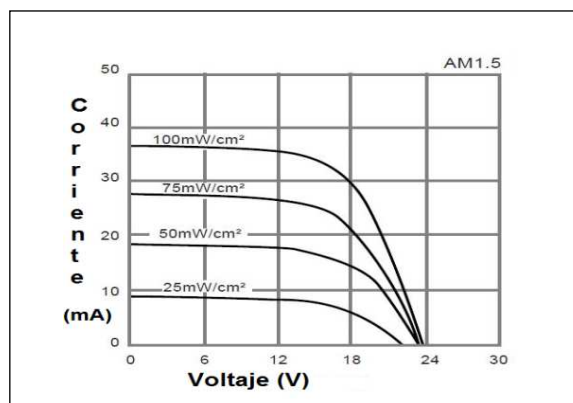


Figura 6. Curvas típicas de un panel solar en función de la irradiancia incidente

Asimismo, el voltaje en una celda FV varía con la temperatura de la misma. Este efecto se puede apreciar en la figura 7.

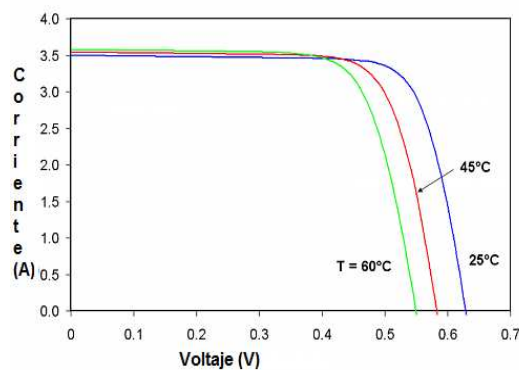


Figura 7. Curvas típicas de una celda solar en función de la temperatura de la celda.

De las gráficas anteriores se puede deducir que las variaciones de la corriente eléctrica respecto a la irradiancia son mayores que las variaciones del voltaje de la celda respecto a su temperatura. También se puede apreciar que existe un punto de máxima eficiencia (MPP) donde la temperatura y la irradiancia son tales que la celda solar entrega un máximo de corriente eléctrica y un máximo de voltaje. Este punto se puede calcular mediante la siguiente expresión (Djamila, 2012):

$$\frac{\partial P}{\partial v} = 0 \quad (3)$$

Existen varios parámetros importantes que los fabricantes proporcionan respecto a los paneles solares. Estos son los siguientes:

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- *Potencia máxima (P_m)*. Es la potencia eléctrica máxima que entrega el panel al encontrarse en su punto de máxima eficiencia.
- *Corriente de su máxima eficiencia (I_m) y Voltaje de máxima eficiencia (V_m)*. Son aquellos parámetros que entrega el panel solar al encontrarse en su punto de máxima eficiencia.
- *Corriente en corto circuito (I_{sc})*. Es aquella corriente que entrega el panel al poner sus terminales en corto circuito. Equivale a hacer $V=0$ en la expresión 1.
- *Voltaje en circuito abierto (V_{oc})*. Es el voltaje medido entre las terminales abiertas del panel. Esto equivale a sustituir $I=0$ en la expresión 1.
- *Coeficientes de temperaturas para voltaje y corriente*.
- *Tipo de material*: Silicio mono o policristalino.

2.3 Energía eólica

La energía eólica funciona bajo el principio físico de la ecuación de flujo de Bernoulli que trata de la conservación de la masa de un fluido (aire) a través de dos secciones transversales de área A_1 y A_2 respectivamente (Ackermann, 2005). Esto se ilustra en la figura 8.

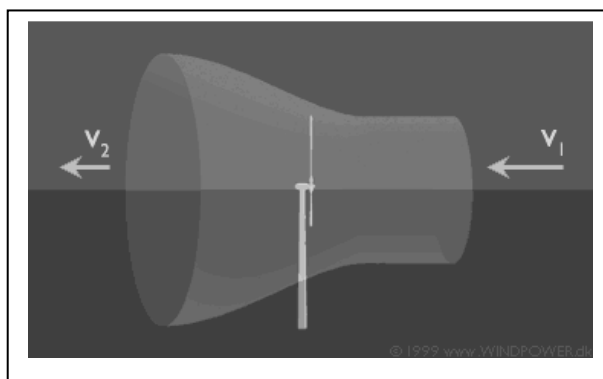


Figura 8. Flujo de aire a través de las aspas de un aerogenerador

Es posible demostrar que la potencia disponible en un flujo de aire que viaja a velocidad “ v ” viene dada por la siguiente expresión:

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad 0 \leq C_p \leq 0.59 \quad (4)$$

Dónde:

- P_0 = Potencia disponible en el viento (Watts)
- ρ = Densidad del aire (kg/m^3)
- A = Área de barrido de las aspas (m^2)
- C_p = Coeficiente de eficiencia

Como se puede observar en la ecuación 4, la potencia que se puede extraer del viento es directamente proporcional a:

- La densidad del aire
- El área de barrido
- La velocidad del viento al cubo.

Es por ello que se pueden conseguir mayores potencias con menos aerogeneradores que si se usaran celdas FV para tal fin. En contraparte a esto, la velocidad del viento es más impredecible que la radiación solar. Es decir, se sabe que la mayoría de los días en un año hay sol en determinadas regiones y en promedio unas 4 o 5 horas de irradiancia constante al día. Sin embargo, la velocidad del viento puede variar instantáneamente o incluso cambiar de dirección.

Típicamente, un generador eólico comercial luce como el mostrado en la figura 9.

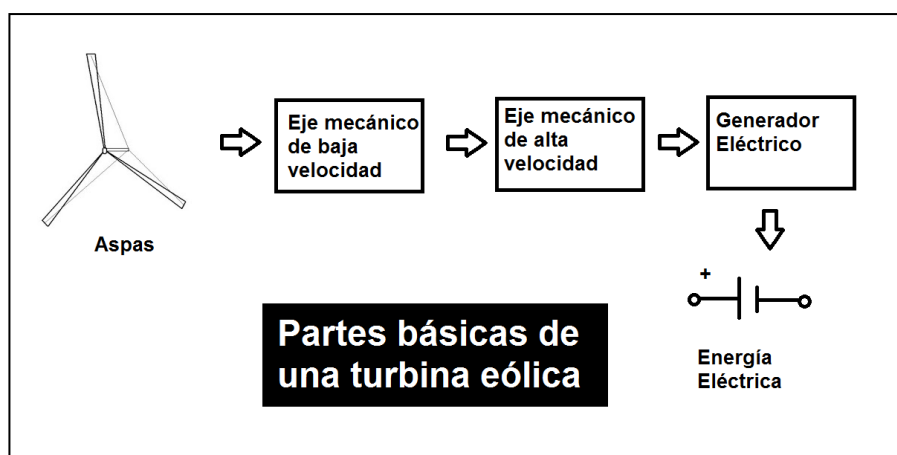


Figura 9. Elementos básicos de un aerogenerador

El principio básico de funcionamiento es como sigue:

1. El viento hace girar las aspas produciendo una determinada velocidad angular en el rotor de las mismas.
2. Dicho rotor gira a baja velocidad y lleva consigo una determinada potencia mecánica que es directamente proporcional a la velocidad de giro de las aspas.
3. Dicha velocidad angular se multiplica mediante una serie de engranes.
4. Las velocidades angulares resultantes son del orden de 1500 a 3000 RPM (revoluciones por minuto).
5. Esta potencia mecánica es transformada en potencia eléctrica mediante un generador eléctrico que puede ser síncrono o asíncrono.
6. Como sistema de emergencia se dispone de un freno mecánico que detiene la velocidad de rotación de los ejes de baja y alta velocidad en caso de ser necesario.

Este es el principio básico de funcionamiento de un aerogenerador. Sin embargo, es importante notar que los aerogeneradores comerciales disponen algunos de otros elementos:

- Sensores de posición, velocidad de giro, temperatura etcétera.
- Veleta
- Anemómetro
- Un procesador digital de señales que sirva para monitorear y controlar todos los procesos.

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los generadores eólicos poseen dos tipos de eficiencias (Ackermann, 2005):

- La eficiencia mecánica que es la que nos indica cuanta energía de la que se dispone del viento es capaz de transmitir al eje de baja velocidad. Esta eficiencia típicamente cae en el intervalo de entre 20% y 50% dependiendo del tipo de aerogenerador que se trate (figura 10).
- La eficiencia eléctrica. Depende de la capacidad del generador eléctrico para transformar la energía mecánica a eléctrica. Para generadores síncronos las eficiencias son menores al 70% y para generadores asíncronos está entre 80% y 90%.

Una medida útil de la eficiencia mecánica de un aerogenerador es la “razón velocidad a punta” (Tip-Speed Ratio) y se denota con la letra griega λ .

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (5)$$

Donde:

- λ = Razón velocidad-punta (adimensional)
- ω = Velocidad angular del eje de baja velocidad (rad/seg)
- R = Radio del área de barrido (m)
- V = Velocidad del viento (m/s)

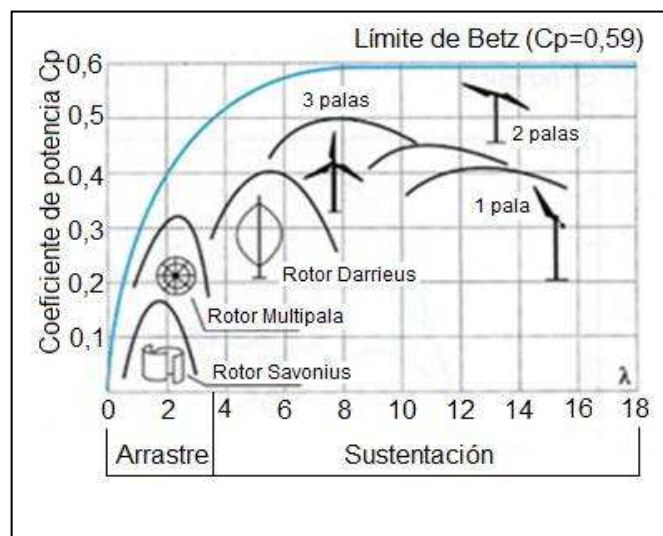


Figura 10. Gráfica de la eficiencia de varios tipos de aerogeneradores

Es importante notar que, dado que se trata de un sistema mecánico-eléctrico, puede haber pérdidas de energía por fricción mecánica en los engranes y puede haber pérdidas de energía eléctrica en los devanados del estator y rotor del generador eléctrico.

2.4 Inversores multinivel

En años recientes los convertidores multinivel se han hecho populares en aplicaciones de mediana y alta potencia (Martínez, 2012). Las ventajas que estos convertidores ofrecen son bien conocidas desde los 80's; una de ellas es la mínima cantidad de componentes para obtener la misma cantidad de niveles; otra es su configuración modular que hacen posible la optimización del circuito. Estos inversores soportan altos voltajes, distorsión armónica reducida y bajas emisiones electromagnéticas. Algunas de las topologías comerciales disponibles son por ejemplo, el NPC (Neutral Point Clamped), CHB (Cascade H-Bridge) y FC (Flying Capacitor). La topología CHB ofrece alta seguridad debido a su modularidad. Dicha topología se basa por conexiones en serie de inversores monofásicos de puente completo, también llamados "celdas". Cada celda tiene similaridad en términos de la topología del circuito, control y esquema de modulación. La idea detrás de este sistema es que se puede sintetizar el voltaje de corriente alterna de salida a través de muchos niveles de voltaje, con ello se producen formas de onda tipo escalera lo cual produce que el potencial de salida contenga baja distorsión armónica (Castillo, 2012). Por otra parte, se tiene la capacidad de incrementar la magnitud del voltaje de salida si se conectan más dispositivos semiconductores configurados en cascada como puentes H, también se reduce la frecuencia de conmutación en los semiconductores que permite utilizar dispositivos de baja velocidad en conmutación y provocar menor pérdida de potencia de forma general en el convertidor.

Sin embargo, para poder explotar correctamente estas ventajas en una

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

aplicación dada, se debe establecer un algoritmo de modulación y una estrategia de control. El algoritmo de modulación producirá la secuencia de conmutación adecuada que generará la forma de onda escalonada asemejando una senoidal (figura 12).

En este trabajo se considera un inversor compuesto por dos puentes H en cascada para obtener cinco niveles en el potencial de salida como el inversor que se muestra en la figura 11.

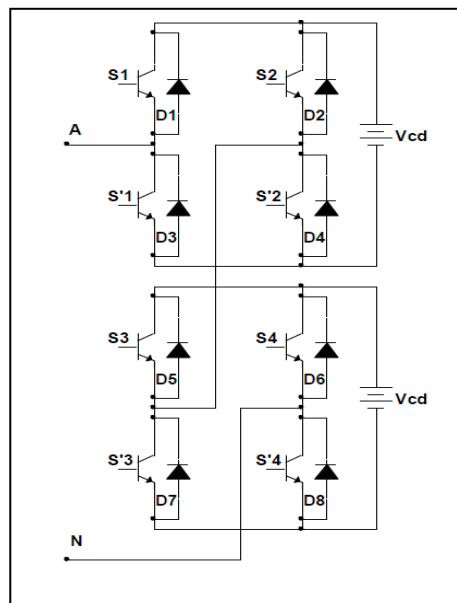


Figura 11. Inversor monofásico HB-5 en modo aislado

Dicho modelo debe generar una forma de onda que asemeje una señal senoidal. En la figura 12 se muestra un ejemplo de la forma de onda de salida típica en este tipo de inversores.

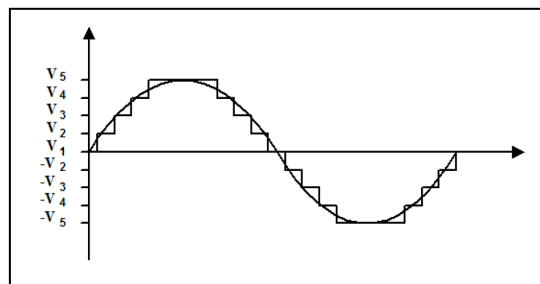


Figura 12. Forma de onda típica de un inversor multinivel.

Para poder lograr los niveles escalonados a la salida se necesita una adecuada técnica de modulación para los Transistores de Potencia los cuales han sido modelados como interruptores ideales.

Dentro de la literatura se pueden encontrar numerosas técnicas de modulación como la modulación SPWM (Modulación Sinusoidal de Ancho de Pulso) o la Modulación Vectorial. Dentro de este trabajo y para efectos prácticos y de simplicidad se utilizó la Modulación Sinusoidal de Ancho de Pulso por disposición de fase (Bakar, 2003) la cual se muestra en la figura 13.

En el modelo mostrado en la figura 11 puede verse que existen numerosas combinaciones de encendido-apagado de los interruptores para generar los 5 niveles de salida que se muestran en la figura 12. Sin embargo, es suficiente con tomar una secuencia de esas combinaciones para generar los cinco niveles de salida.

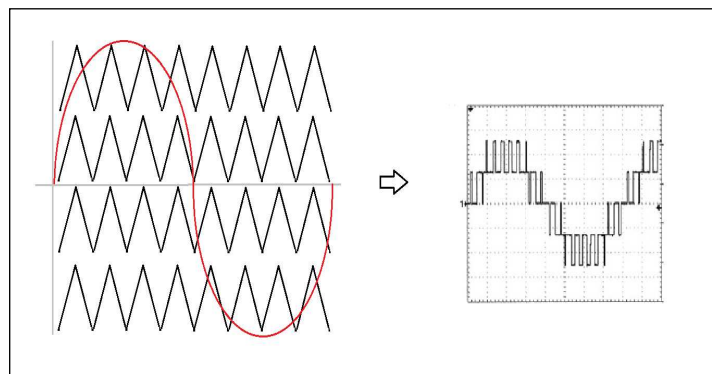


Figura 13. Modulación Sinusoidal de Ancho de Pulso por Disposición de Fase.

3. RESULTADOS EN SIMULACIÓN POR SOFTWARE

Existen numerosos programas para la simulación de circuitos electrónicos. Entre ellos destaca el software MULTISIM 11 fabricado por la empresa National Instruments. Este software fue el que se eligió para la simulación del sistema híbrido dada su simplicidad de uso y la versatilidad de componentes

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

virtuales (resistencias, capacitores, etc.) que posee. A continuación se muestran el diagrama esquemático.

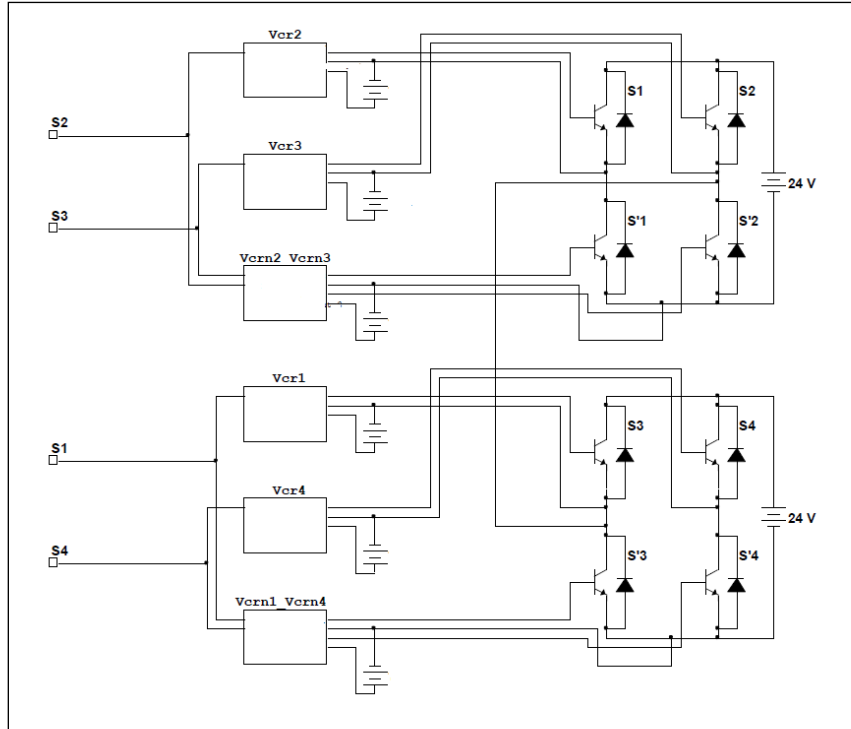
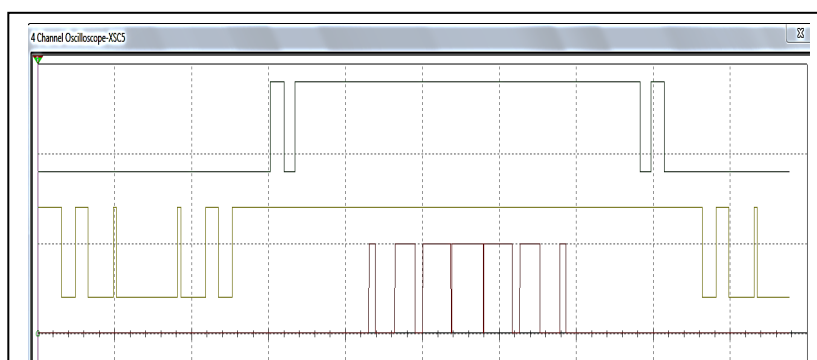


Figura 14. Diagrama esquemático en multisim 11

Enseguida se muestran las formas de onda de salida de la modulación SPWM.



SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Figura 15. Resultados de la modulación SPWM y disparos generados.

Por último, se observa la forma de onda a la salida del inversor de cinco niveles que precisamente coincide con lo estudiado en la literatura.

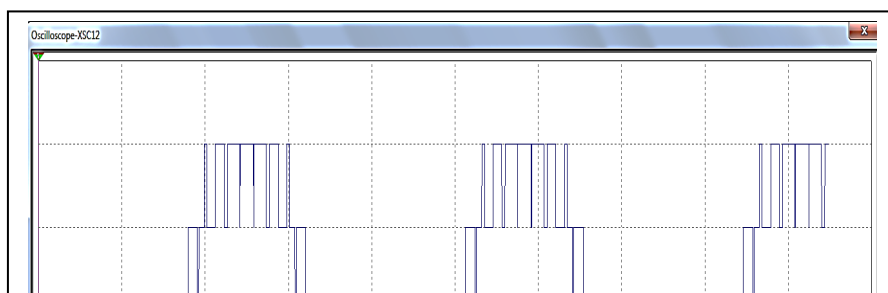


Figura 16. Resultados en simulación de la forma de onda de salida del inversor.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Después de concluir con éxito la etapa de simulación, se procedió a implementar físicamente el circuito para visualizar los resultados reales de este prototipo. Los detalles de la puesta en marcha del sistema se presentan a continuación.

4.1 Panel Fotovoltaico de 10 Watts marca EPCOM

El panel utilizado tiene las características indicadas en la tabla 1. En la figura 17 se muestra una imagen del panel solar.

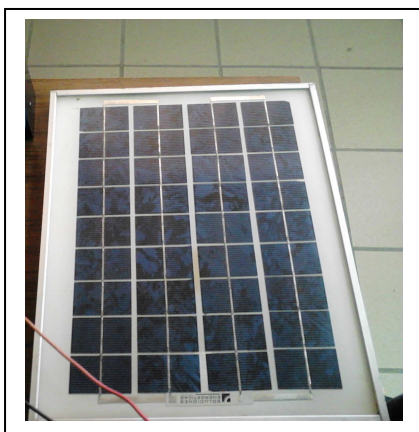


Tabla 1. Datos técnicos del panel solar utilizado

Pmax	10 Watts
Voc	21 Volts
Isc	0.65 Amperes
Vmpp	17.3 Volts
Impp	0.58 Amperes
Tipo	Silicio PoliC

Figura 17. Panel solar EPCOM

4.2 Sistema emulador eólico

Para la parte de generación eólica se implementó un sistema emulador que imita el comportamiento de una turbina eólica de baja potencia y radio pequeño ($r < 0.5$ m). Se tomó como referencia una turbina eólica comercial marca SUNSOL-TEC (figura 18). Los datos técnicos se muestran en la tabla 2.



Tabla 2. Datos técnicos de la turbina eólica SUNSOL-TEC

Potencia nominal	300 Watts a 12.5 m/s
Voltaje nominal	12 Volts DC
Corriente nominal	25-2 Amperes
Potencia máxima	350 Watts
Velocidad máxima	15 m/s
Velocidad mínima	2 m/s
Número de aspas	6
Diámetro de las aspas	1.1 m
Velocidad angular nominal	900 rpm
Tipo de generador eléctrico	Asíncrono, de 2 fases, imanes permanentes

Figura 18. Turbina eólica SUNSOL-TEC de 300 W.

Para emular el comportamiento de esta turbina, se diseñó el sistema mostrado en la figura 19.

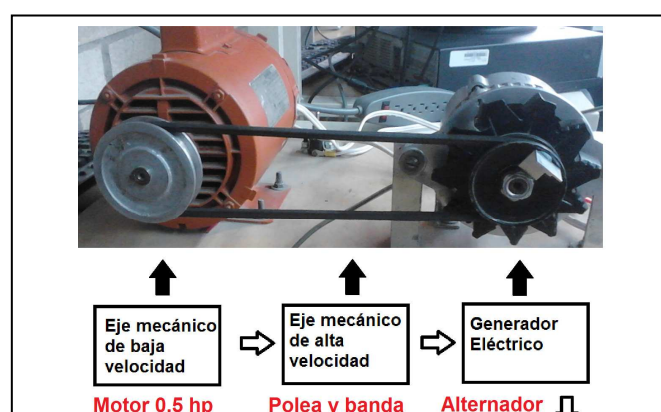


Figura 19. Sistema emulador para turbinas de baja potencia

Las partes que conforman este sistema emulador se muestran en la tabla 3 donde se hace un comparativo con las partes básicas de un aerogenerador comercial.

Tabla 3. Comparativo entre las componentes del emulador y una turbina real

<i>Componente del emulador</i>	<i>Características</i>	<i>Parte de la turbina que emula</i>
Transformador Variable (VARIAC)	0-127 Vrms, 0-5 A. Sirve para variar la velocidad angular del motor	Emula cambios en la velocidad del eje de bajas revoluciones.
Motor eléctrico	SIEMENS, 0.5 caballos de potencia	Rotor y eje de baja velocidad
Sistema de poleas y banda	Multiplicador de revoluciones 1 a 1.25	Engranajes multiplicadores de velocidad
Alternador de auto (generador síncrono)	HITACHI, 12 VDC, 50 A máximo	Eje de alta velocidad y generador eléctrico
Baterías o capacitores	12 Volts	Filtrado de señal y almacenamiento de energía.

Para mostrar el funcionamiento del emulador eólico se utilizó un contador de revoluciones (tacómetro), se hicieron los cálculos adecuados en función de los datos técnicos de la turbina SUNSOL-TEC y se calculó a qué velocidad del viento correspondían dichas revoluciones por minuto.

Por ejemplo, para emular una velocidad del viento de 5 m/s (18 km/hr) se requería que el motor girara a 700 rpm aproximadamente. Para ello, se ajustó el Variac para que el motor girara a esa velocidad angular midiendo el voltaje y corriente a la salida. El diagrama esquemático del sistema montado se muestra

en la figura 20.

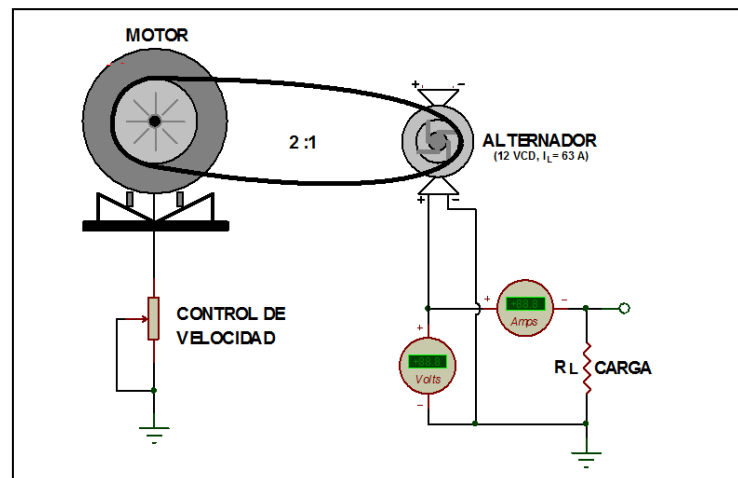


Figura 20. Diagrama esquemático del emulador eólico

4.3 Construcción del inversor HB5

Cuando se acondicionaron las fuentes de energía renovable adecuadamente, se procedió al diseño y construcción del inversor HB5 de baja potencia el cual se muestra en la figura 21.

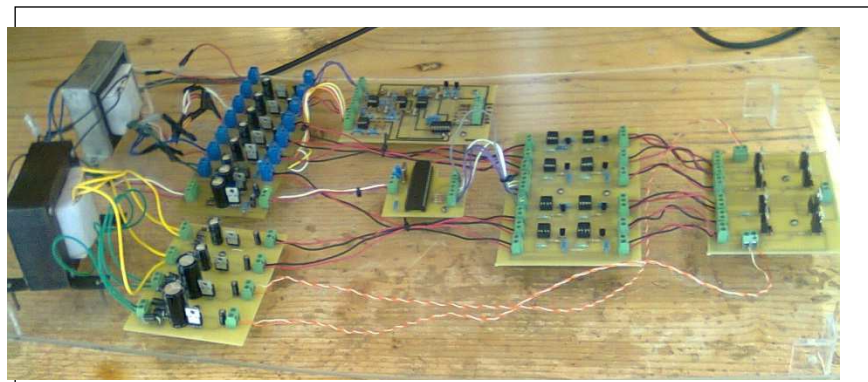


Figura 21. Inversor de cinco niveles

Finalmente, se acoplaron las distintas partes del sistema y se colocó un transformador elevador de voltaje con el objetivo de encender algún dispositivo de corriente alterna. El sistema híbrido completo se muestra en la siguiente figura.

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

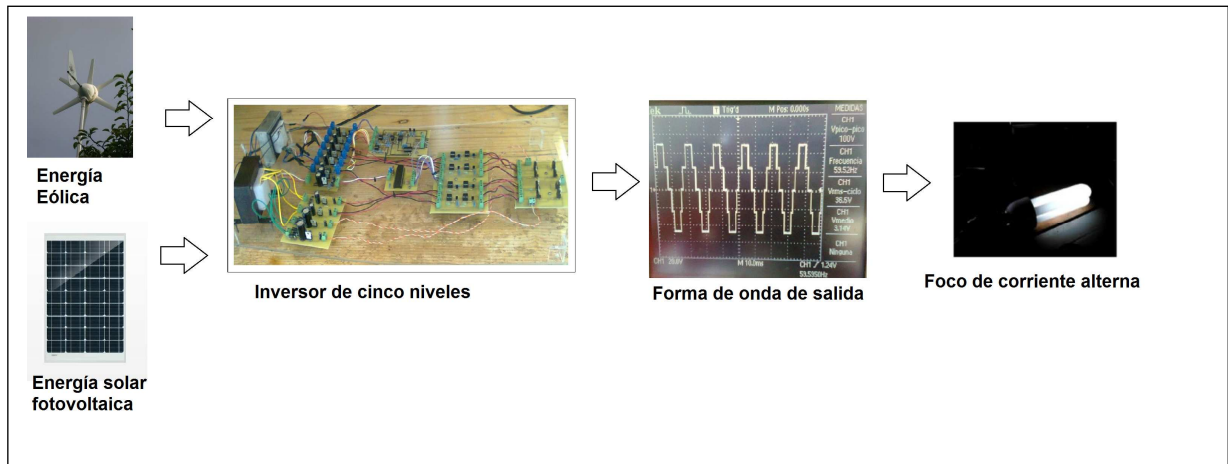


Figura 22. Sistema híbrido de generación de energía construido en la Facultad de Ciencias UASLP.

5. Conclusiones

Se logró diseñar, simular y construir un prototipo de sistema híbrido para la generación de energía eléctrica a través de energías renovables. Es un sistema de bajo costo que puede implementarse fácilmente en laboratorios académicos para aplicaciones didácticas en asignaturas de electrónica de potencia y energías renovables.

A pesar de que nuestro prototipo es para aplicaciones de baja potencia eléctrica (menores a 150 W), puede ser escalable. Es decir, se puede utilizar el mismo principio de funcionamiento en conjunto con turbinas eólicas de alta potencia y paneles solares de mayor capacidad. Así mismo, se podría construir un inversor CD/CA capaz de manejar potencias del orden de kilowatts (de 1000 Watts en adelante). Todo este conjunto podría satisfacer la demanda de energía eléctrica de una familia promedio de 3 o 4 personas aprovechando la magnífica posición geográfica que tiene San Luís Potosí respecto a irradiación solar.

Es importante mencionar que este tipo de sistemas híbridos puede seguir generando energía eléctrica en las siguientes condiciones:

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- Ausencia de luz solar (noche) con un viento promedio de 15 km/hr.
- Ausencia de viento y suficiente radiación solar (día despejado o poco nublado)
- Ausencia de viento y de luz solar a través de un banco de baterías que actúa como respaldo de energía.

Así mismo, cabe hacer mención que estos sistemas pueden ser interconectados a la red eléctrica CFE y generar un ahorro económico en el recibo de electricidad.

Por último, con el uso de este tipo de sistemas se genera una cultura de cuidado al planeta utilizando las energías renovables que son amigables con el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

Ackermann, Thomas, 2005, "Wind power in power systems", ed. John Wiley, USA.

Departamento de Administración de la Energía de los Estados Unidos de América. Energy Information Administration, <http://www.eia.gov/>

Castillo, R., 2012, "Diseño y programación de una ley de control basada en un modelo matemático para el convertidor multinivel HB5", IICO, San Luís Potosí, México.

Instituto de Geofísica de la UNAM, <http://www.geofisica.unam.mx/>

Martínez, R.C., 2012, "Controlador basado en el modelo matemático para el convertidor multinivel HB5 usado como filtro activo", IICO, San Luís Potosí, México.

Messenger, Roger A., "Photovoltaic systems engineering", CRC press, 2010.

M. S. Bakar, N. A. Azli, 2003, "Simulation of a Regular Sampled Pulse-width Modulation (PWM) Technique for a Multilevel Inverter". National Power and Energy Conference (PECon), pp. 144-147, USA.

Patel, Mukund R., 2006, "Wind and solar power systems: design, analysis, and operation", CRC press, USA.

SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA

Peng F., Wei Q., Dong C., 2010, "Recent advances in multilevel converter/invertir topologies and applications", Power Electronics Conference (IEPEC), USA.

Rekioua, Djamila, 2012, "Optimization of photovoltaics power systems: modelization, simulation and control", Springer, USA