

Control con dos sensores para energías eólica y solar

Alfredo G. M. Gámez
Javier Cabrera
Eduardo Castañeda

Francisco E. López
Mario Morera
Oscar Cruz

Recibido: Abril del 2008
Aprobado: Mayo del 2008

Resumen / Abstract

En el artículo se realiza un análisis de dos sensores que se aplican en energías renovables (eólica y solar), obteniéndose una ley de control óptima. Para las fuentes energéticas elegidas se proponen técnicas de alta frecuencia de conmutación y eficiencia. Para la validación de los resultados se emplean técnicas de simulación digital

Palabras clave: Energías alternativas, sensores de voltaje y corriente, control con técnica PWM

In this article we make an analysis of two sensors applied in renewable energies (wind and solar), obtaining an ideal law of control. For the chosen energetic sources there appear technologies of high frequency of commutation and of high efficiency. Technologies of digital simulation validate the results.

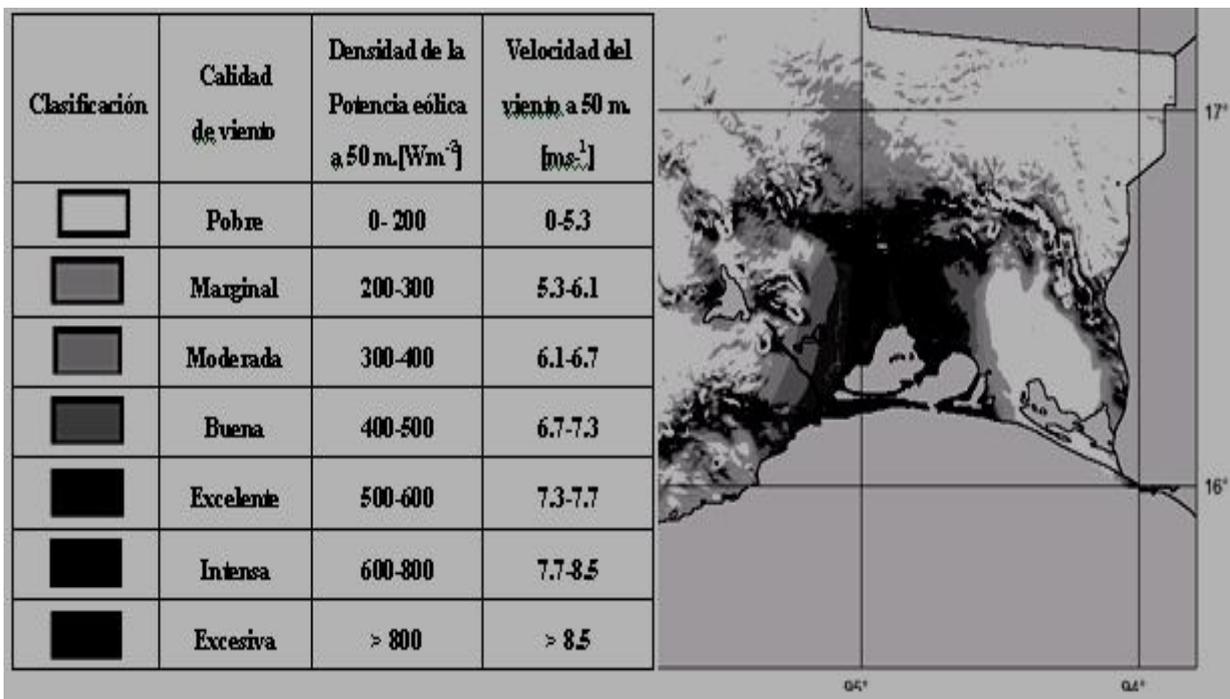
Key words: Alternative energies, voltage and current sensors, control with PWM technology

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las comunidades científicas e industriales se enfrentan a la difícil tarea de armonizar el desarrollo económico y la protección del medio ambiente, con el objetivo de asegurar el bienestar y mejorar la calidad de vida de las generaciones futuras. El mercado de fuentes alternas de energía de alta eficiencia, construidas con nuevos materiales y dispositivos electrónicos no es ajeno a estos cambios y por ello responde, ahora más que nunca, no solo a la necesidad de resolver aspectos primordiales de automatización sino que, apoyándose en nuevas tecnologías, contempla el ahorro energético como respuesta a la utilización más racional y eficiente de los recursos naturales.¹

POTENCIAL EÓLICO EN MÉXICO

En México, el 92% de la energía primaria proviene de combustibles fósiles, sin embargo, no se aprovecha ni la diezmilésima parte del potencial económicamente utilizable de la energía eólica (30 000 MW) ya que solo existen instalados 3 MW. Hay varias regiones dentro del territorio mexicano con gran potencial eólico, el mayor se encuentra en el Istmo de Tehuantepec, en el Estado de Oaxaca (figura 1), con velocidades de viento promedio anual de poco más de 9 m/s registradas a 30 m de altura sobre la superficie, lo que la hace una de las mejores regiones a nivel mundial para la producción de electricidad con una capacidad estimada de 2 000 MW.²



Potencial eólico en México.

1

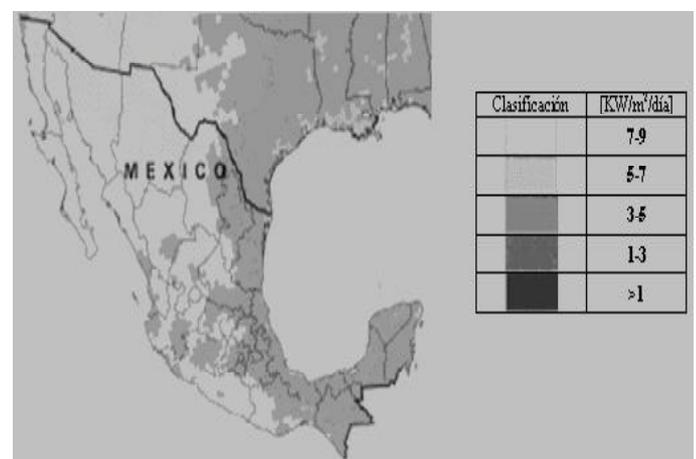
La Comisión Federal de Electricidad (CFE) construyó en 1994 una planta eólica llamada La Venta I en la zona de la Ventosa, en Oaxaca, con siete turbinas eólicas de manufactura danesa tipo Vesta V-27, cada una con capacidad de 225 kW. Entre julio de 1994 y diciembre de 1997, la planta eléctrica produjo más de 18,5 GW/h de energía eléctrica, evitando con ello la combustión de 29 000 barriles de petróleo en la planta termoeléctrica que hubieran producido más de 14 000 toneladas de gases contaminantes. La CFE también ha desarrollado un sistema de aerogeneración de 600 kW en Guerrero, Baja California del Sur y otros tres de ellos están en proyecto para alimentar las comunidades de Puerto Alcatraz, Isla Cedros y San Juanico en el mismo estado.³ En el estado de Zacatecas se concluyó la primera etapa del proyecto eólico del Cerro la Virgen reportado en el informe del Instituto de Investigaciones Eléctricas.⁴

POTENCIAL SOLAR EN MÉXICO

Toda la energía renovable excepto la energía mareomotriz y la energía geotérmica, así como la energía proveniente de los combustibles fósiles tienen su origen, eventualmente, en la energía proveniente del sol. Se estima que el planeta recibe $1,74 \cdot 10^{17} W$ de potencia de radiación solar. La cantidad de radiación solar recibida en la superficie de la atmósfera de la tierra es de $1366 Wm^2$. La radiación solar en el territorio mexicano aprovechable⁵ tiene un promedio de $5 kWm^2$. Este gran potencial solar puede estimarse

de la siguiente manera, si se considera que se pueden instalar 2 000 MW de concentradores solares en $30 km^2$, y el desierto de Altar tiene un área de 50 000 entonces el potencial de la energía solar de ese desierto es de 3 333 000 MW. En la figura 2 se muestra la radiación solar en México.

La forma de generar energía directamente desde el sol sin la presencia de un proceso de combustión constituye un procedimiento limpio y exento de contaminación por lo que es conveniente al medio ambiente.



Radiación solar en México.

2

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DIGITAL

El modelo utilizado se presenta en el diagrama de bloques de la figura 3. Los bloques implicados en el control automático se detallan en este trabajo de investigación; las señales indicadas son las requeridas para lograr el control deseado

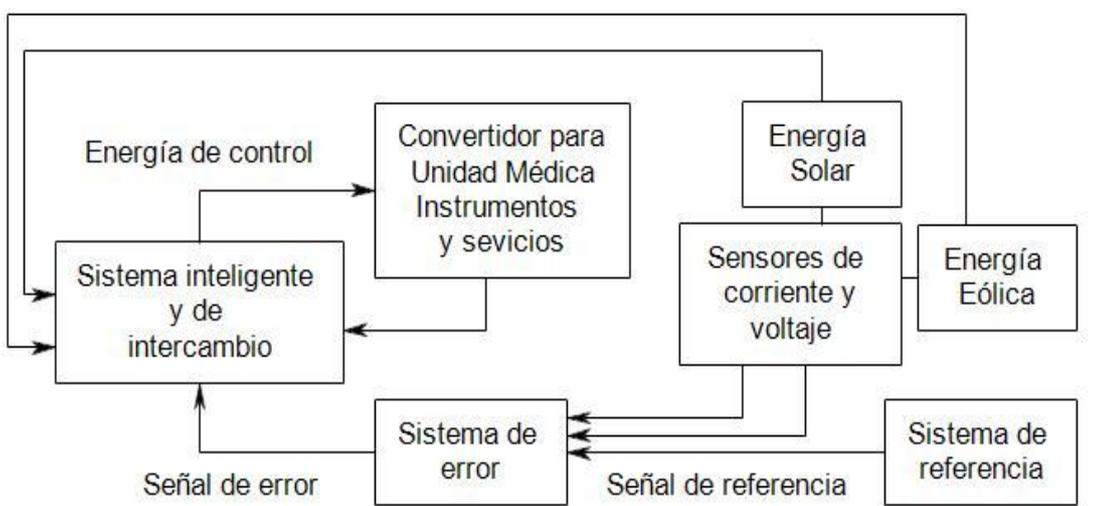
Dentro del sistema a controlar se definen dos señales que serán un voltaje y una corriente, cada una de ellas determinará una señal de error al compararla con los valores deseados. En el sistema de referencia se obtiene a la salida, un error proporcional a la superficie de intercambio que definirá la ley de control.

En la figura 4 se muestra el circuito electrónico con la combinación de los dos sensores para producir la señal

de error y un arreglo que permite obtener la señal de referencia.⁶

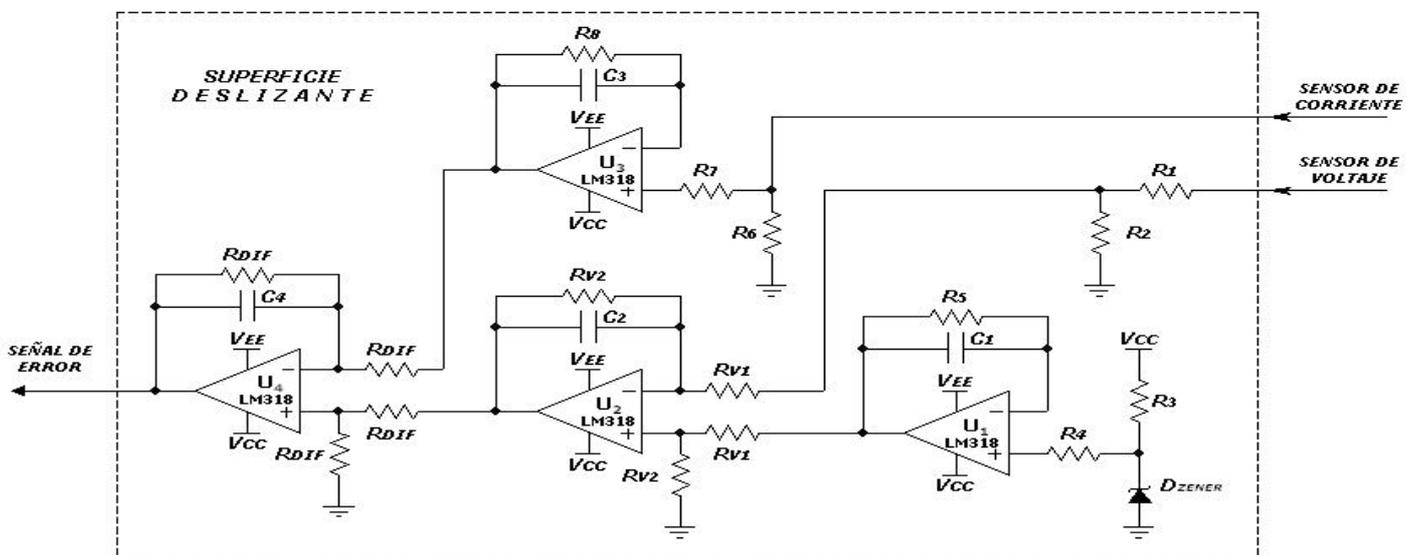
El sistema de intercambio se muestra en la figura 5, del cual se canaliza la energía de control.

Como se aprecia en la figura 5, se requiere de un detector de cruce por cero como disparador, para convertir la pequeña señal de error en un pulso manejable, a partir de aquí es necesario que la señal que se quiera procesar esté aislada para lo cual se introduce un optoacoplador manejado por una compuerta lógica. Para el control del Mosefet de alta velocidad de canal *N* se emplea el circuito de control que se muestra en la figura 5, mediante el cual se regula la potencia que requiere el circuito de carga.



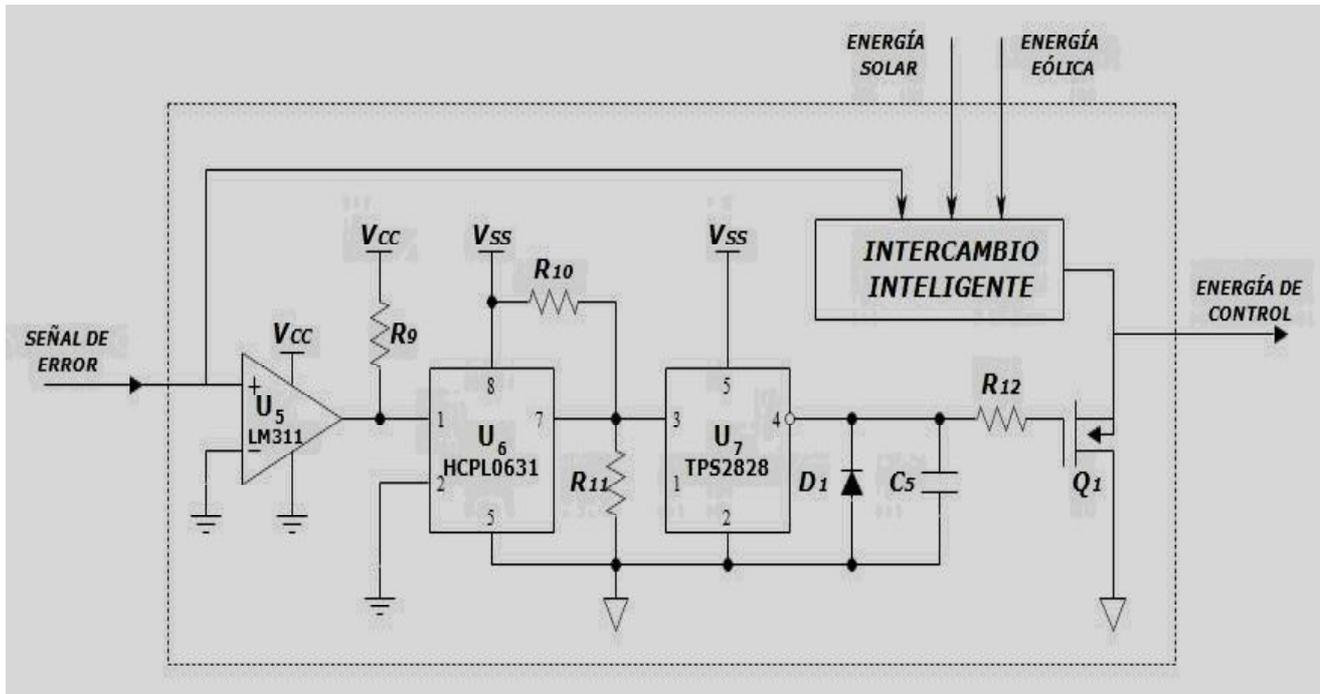
Señales y sistemas del sistema de control.

3



Sistema de error para el diseño del control.

4



Sistema de intercambio.

En el trabajo se propone un controlador por modos deslizantes, para lo cual, sobre la base de dos sensores se proporcionan las superficies de intercambio y así desarrollar la ley de control siguiente: ⁷

$$u = - U_o \text{sign}(\text{superficie de intercambio}) \quad \dots(1)$$

Si la superficie de intercambio proporciona el cambio de signo, es decir, si el signo de la superficie es positivo, entonces se le proporciona energía al sistema dinámico y en caso contrario no.

PROCEDIMIENTO DEL DISEÑO

El controlador de modos deslizantes (MD) que se muestra en la figura 4, está constituido básicamente por dos circuitos en configuración de seguidor de voltaje (U_1 para el voltaje de referencia y U_3 para la señal de corriente), y dos circuitos en configuración de amplificador diferencial (U_2 para relacionar el voltaje de referencia contra la señal de voltaje y U_4 para relacionar la señal de corriente con la salida del voltaje de U_2).

La detección de la retroalimentación de voltaje es proporcionada por el circuito de división de tensión formado por R_1 y R_2 . De manera conveniente un sensor de corriente genera la señal que representa la cantidad de corriente disponible en el sistema de generación alternativa.⁸

ETAPAS DEL DISEÑO

El diseño se inicia suponiendo que los parámetros del sistema dinámico son conocidos y están dados en la tabla 1.

Tabla 1 Especificaciones del sistema dinámico		
Descripción	Parámetro	Valor
		nominal
Voltaje de entrada	V_i	24 V
Frecuencia de intercambio deseada	f_{id}	> 10 kHz
Resistencia de carga nominal	R_{Lnom}	60 Ω
Voltaje de salida deseado	V_{od}	12 V

Para el diseño se recomiendan los siguientes pasos:

Paso 1

La medición de la corriente es representada con un voltaje correspondiente a la relación un ampere/unvolt dada por las especificaciones del sensor de corriente utilizado (CS1100), ver especificaciones en la referencia 9, y la resistencia R_6 ; la cual se escoge $R_6=100 \Omega$. Este voltaje es condicionado por U_3 .

Paso 2

Del conjunto del voltaje de referencia $V_{ref} = 3,3V$, V_{od} y β , son calculados con el uso de la siguiente relación:

$$\beta = \frac{V_{ref}}{V_{od}} = \frac{3,3}{12} = 0,275 \quad \dots(2)$$

Donde R_1 y R_2 están relacionados con:

$$R_2 = \frac{\beta}{1-\beta} R_1 \quad \dots(3)$$

Se escoge a $R_1 = 870 \Omega$, lo cual conlleva que $R_2 = 330 \Omega$.

Paso 3

La ganancia que requiere el amplificador de la señal

$(V_{ref} - \beta v_o)$ es $\frac{1}{\beta r_i}$ veces. De este conjunto $r_L = R_{L(nom)}$, R_{v1} y R_{v2} están relacionadas por:

$$R_{v1} = (\beta R_{L(nom)} R_{v2}) \quad \dots(4)$$

Se escoge a $R_{v2} = 20k\Omega$, lo cual produce $R_{v1} = 33k\Omega$. De manera adicional, las resistencias R_{DIF} para el circuito del amplificador diferencial U_4 , se escogen a $10k\Omega$.

Paso 4

Para suprimir las frecuencias altas (frecuencias de ruido)¹⁰ se instalan los capacitores $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 5\mu F$ y para las resistencias R_4 , R_5 , R_7 , y R_8 , se escoge el valor de $10k\Omega$, de igual forma se escoge $R_3 = 1,2k\Omega$ con un diodo Zener de $3,3V$. La configuración del circuito se muestra en la figura 4.

Paso 5

El sistema de intercambio que se muestra en la figura 5, está formado por un circuito disparador y dos circuitos para el acoplamiento de la señal de control con el actuador, de manera práctica será un Mosfet de canal N (Q_1 , IRF540N). En el circuito disparador (U_5) (señal de error), se conecta directo a la salida del circuito (U_4) en su terminal no inversora y la entrada inversora es referenciada a tierra, para generar los pulsos en el momento de detectar un cruce por cero (figura 6). La salida del disparador es polarizada con R_9 escogida a $2,2k\Omega$.

Paso 6

El circuito optoacoplador (U_6) entrega pulsos digitales, por lo que se utiliza el circuito integrado con matricula HCPL-0631.

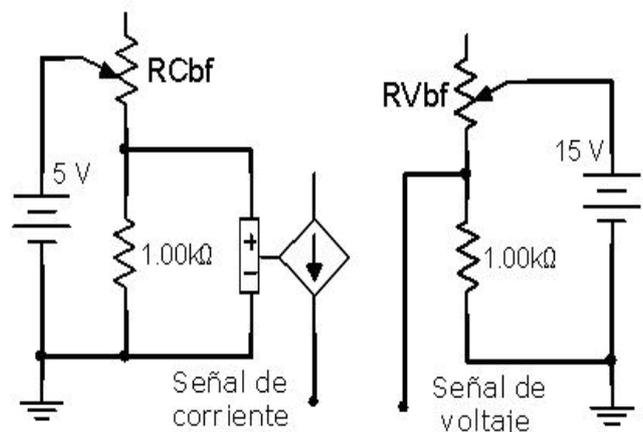
Paso 7

Para asegurar la conmutación del Mosfet se conecta un manejador para él (U_7) que sea activado con la señal generada por el optoacoplador. El manejador seleccionado es el de matricula TPS2828 y la interconexión de estos dos circuitos (U_6 y U_7) se hace mediante un divisor de tensión formado por $R_{10} =$ un kilohm y $R_{11} = 10k\Omega$.

Finalmente, el Mosfet se conecta con una R_{12} que puede seleccionarse desde un valor de 10Ω hasta un kilohm.

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

En los resultados se muestran las simulaciones electrónicas incorporando en un solo circuito la superficie deslizante y el sistema de intercambio presentado en las figuras 4 y 5. En la figura 6 se muestran los circuitos que representan las variaciones de voltaje y corriente detectadas por los sensores correspondientes.

**Arreglos para simular los cambios en la detección de la corriente y el voltaje.**

6

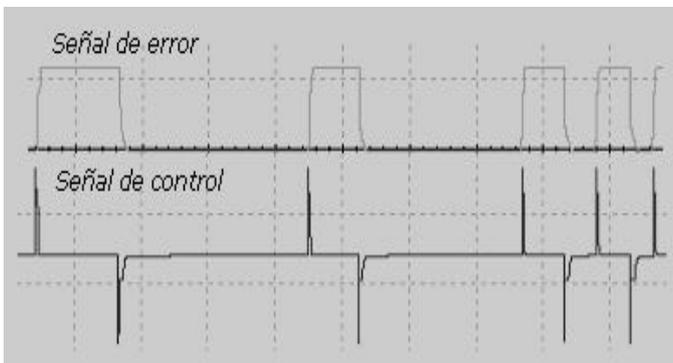
La sintonización en el intervalo de operación del sistema, se realiza estableciendo el voltaje (V_{od}) para después variar la corriente y así provocar una señal de error la cual comprueba la conmutación en el Mosfet a través del sistema de intercambio. De manera similar se provoca una variación en el voltaje (V_{od}) sin variación de corriente, produciéndose con ello una señal de error que de igual manera conmuta al Mosfet a través del sistema de intercambio.

En la figura 7 se muestran las señales de error y control generadas, donde al presentarse cambios en la señal de error se produce la señal de control correspondiente para el control del Mosfet.

Para obtener los resultados del funcionamiento del circuito a diferentes frecuencias se decide establecer el voltaje (V_{od}) y adecuar el arreglo que provoquen los cambios de corriente que se muestran en la figura 8.

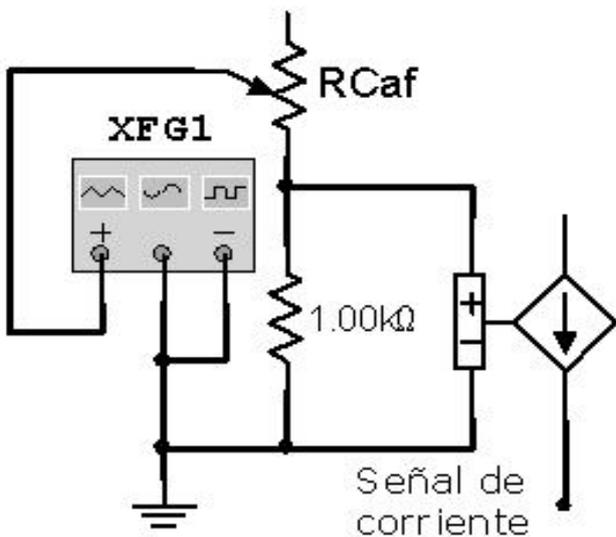
La prueba con diferentes frecuencias se realiza a partir de una señal de entrada de 100 Hz, de 500 Hz, 1kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz y a 20 kHz. El sistema responde con una señal de control diferente para cada una de las frecuencias lo cual se muestra en la figura 9.

Para las primeras frecuencias la señal de control está invertida con respecto a los estados de subida y bajada proporcionados por los cambios de corriente (señal de entrada). Esta respuesta es adecuada para el funcionamiento del sistema. De igual manera para todas las frecuencias mencionadas, como se observa en la figura 9. Para frecuencias mayores 20 kHz ocurre un transitorio de 468 microsegundo, el cual provoca que en modo permanente no opere el Mosfet.



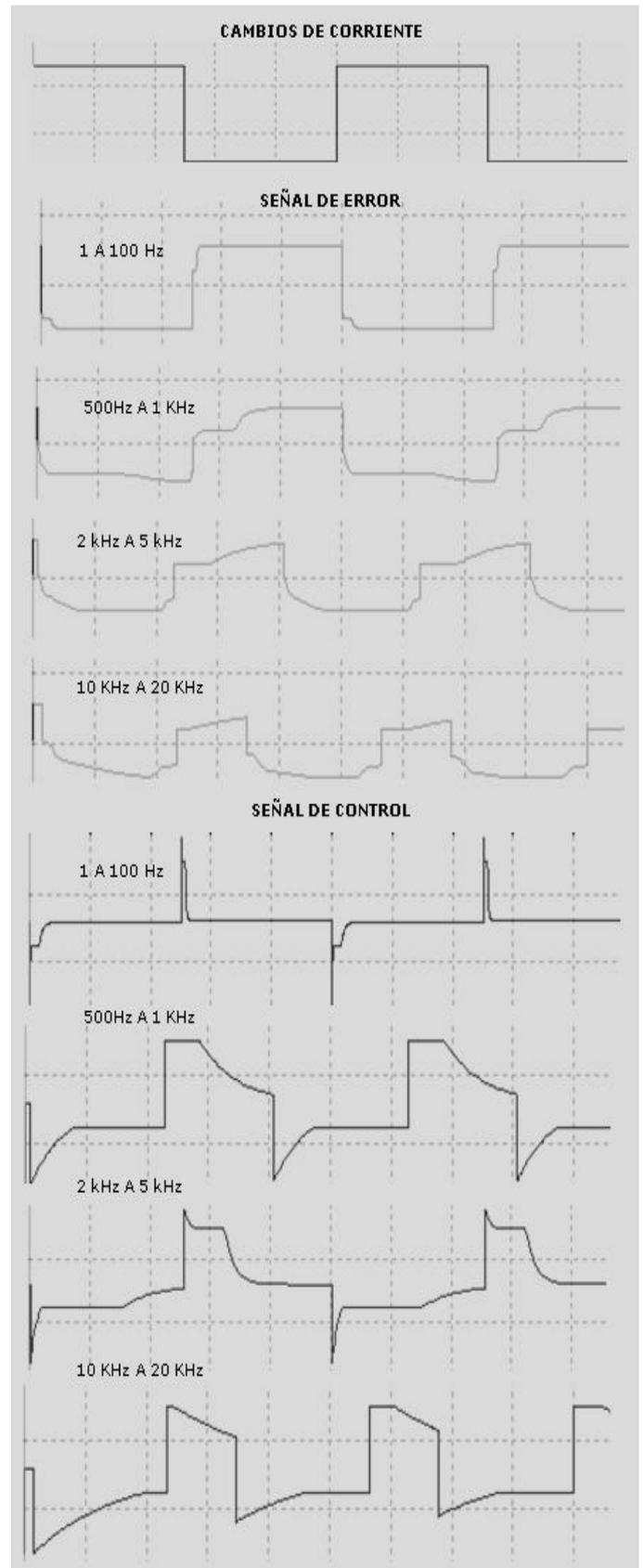
Señal de error vs. señal de control.

7



Arreglo para simular los cambios en la señal de la corriente a diferentes frecuencias.

8



Señales de error y control.

9

CONCLUSIONES

1. El control por modos deslizantes utilizado en este sistema híbrido garantiza un suministro de energía constante a una unidad médica en zonas marginadas.
2. El funcionamiento del sistema por control de modos deslizantes en diferentes frecuencias es satisfactorio y queda concluida la etapa de simulación electrónica para dejar un circuito en condiciones de operación física.
3. Se logra un sistema con sensores de voltaje y corriente que sea capaz de intercambiar señales a un actuador conveniente para las energías alternativas.

REFERENCIAS

1. Comisión Nacional de Ahorro de Energía, CONAE. (<http://www.conae.gob.mx>).
2. **de Buen R., O.:** *Desarrollo de las energías renovables en México: La perspectiva de la CONAE*, diciembre de 2001.
3. Comisión Federal de Electricidad, CFE. (<http://www.cfe.gob.mx>).
4. **Caldera, E.:** "Informe sobre la terminación de la 1ra. etapa del proyecto de la central eólica del Cerro de la Virgen", Instituto de Investigaciones Eléctricas, División de Fuentes de Energía, Departamento de Fuentes no Convencionales de Energía, Cuernavaca, Morelos, junio, 2002.
5. Solar Variation wind <http://www.en.wikipedia.org>.
6. **Acero, H.:** *Electrónica Industrial, componentes circuitos y sistemas de potencia*, Editorial ETSI, Madrid, España, 1994.
7. **Utkin, V. I.:** "Variable Structure Systems with Sliding Mode" , *IEEE Trans. On Automatic Control*, Vol. AC-22, pp. 212-222, 1977.
8. **Rashid, M. H.:** *Electrónica de potencia, circuitos dispositivos y aplicaciones*, Prentice Hall, México, 2004.
9. <http://www.datasheetcatalog.com>.
10. **Coughlin, Robert F. y Frederick F. Driscoll:** *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*, Prentice Hall, 1999.

AUTORES

Alfredo G. M. Gámez López

Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, Profesor Titular A, Laboratorio de Electrónica, Universidad Veracruzana, México.

e-mail:alfredogustavo2004@yahoo.com.mx

Javier Cabrera Vázquez

Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Electrónica, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.

e-mail:javier.cabrera@cupei.udg.mx

Eduardo Castañeda Paredes

Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, Departamento de Electrónica, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.

e-mail:eduardo.castaneda@cupei.udg.mx

Francisco Eneldo López Monteagudo

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba

e-mail: eneldol@fie.uclv.edu.cu

Mario Morera Hernández

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de la Habana, Cuba

e-mail: marmor@electrica.cujae.edu.cu

Oscar Cruz Fonticiella

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba

e-mail:fonti_cu@yahoo.com