

SEGUIMIENTO DEL PUNTO MÁXIMO DE POTENCIA (MPPT) EN UNA PEQUEÑA TURBINA EÓLICA (SWT) EN APLICACIONES RESIDENCIALES AISLADAS A LA RED ELÉCTRICA

David R. López Flores, José A. Pineda Gómez, Roberto Herrera S., Marcelino S. Alvarado.

Universidad Tecnológica de Chihuahua.

Dpto. de Mecatrónica y Energías Renovables.

Ave. Montes Americanos No. 9501 Sector 35

C.P. 31216 Chihuahua, Chih., México, Tel.: +52 (614) 4-32-20-00 ext. 105

dlopez@utch.edu.mx, apineda@utch.edu.mx, rherrera@utch.edu.mx, msanchez@utch.edu.mx

José A. Duarte Moller

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Maestría en Energías Renovables

Ave. Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial, C.P. 31109, Chihuahua Chih., México

Tel.: +52 (614) 439 1100

alberto.duarte@cimav.edu.mx

RESUMEN.

Se presenta el diseño, análisis, simulación e implementación de un control de Seguimiento del Punto Máximo de Potencia (MPPT) en una Pequeña Turbina Eólica (SWT) de ángulo de ataque α fijo. El MPPT extrae la máxima energía cinética debida al viento V y es convertida a potencia mecánica P_m mediante eje del rotor eólico de velocidad angular W , seguido en potencia eléctrica P_e por un Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSM) y un Rectificador Trifásico CA-CD, el voltaje generado V_r , es regulado por un Convertidor Reductor CD-CD para mantener la carga óptima a un estabilizador (baterías); mediante un controlador Proporcional Integral (PI) y relaciones entre V , P_m , V_r y W , se optimiza a V_r^* para extraer la máxima energía del viento a cualquier velocidad y demanda de carga. Un Convertidor Elevador CD-CD con control PI y el Inversor CD-CA proporcionan voltaje en CA de baja distorsión armónica para aplicaciones residenciales. Se agregan resultados por simulación y experimentales.

PALABRAS CLAVES: *Controlador PI, Optimización, Turbina Eólica, Convertidor Reductor CD-CD, Convertidor Elevador CD-CD, Inversor CD-CA, Generador Síncrono de Imanes Permanentes y Rectificador Trifásico CA-CD.*

1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica disponible en el mundo es de entre 1,744.23 TW a 3,488.46 TW [1], superando al menos 28859 veces la capacidad nacional instalada en el 2009 [2], lo cual representa una brecha importante para el aprovechamiento de la energía eólica. Para la conversión de energía eólica

a energía eléctrica se utilizan rotores eólicos que captan la energía cinética del viento y la transforman en energía mecánica, que varía según la velocidad del viento. La energía mecánica resultante es convertida a energía eléctrica de CA mediante un generador PMSM de alta eficiencia para velocidades variables del viento [3]. El límite de Betz establece que la máxima eficiencia (C_p) que un rotor eólico puede alcanzar es del 59%, estableciendo la velocidad relativa de punta (TSR, Tip Speed Ratio) en un punto óptimo [4]. En este punto se centran algunos investigadores, como es el caso de la presentada por Md. Arifujjaman [5], donde establece relaciones óptimas entre la velocidad del viento, la velocidad angular del rotor eólico y el ciclo de trabajo d de un Convertidor Elevador CD-CD (interconectado a un Inversor CD-CA) para acercarse al límite de Betz, mediante el control de W del rotor eólico, regulado por un controlador PI que compara las revoluciones óptimas W^* contra las revoluciones actuales W y de esta forma frenar el eje del rotor mediante actuadores; al llegar a las velocidades óptimas se mantiene el máximo C_p y se ajusta d para mantener estable la salida del Inversor en CA. Algunos trabajos se enfocan a controlar el Puente Rectificador Trifásico CA-CD [3] conectado a la salida del generador PMSM para regular la velocidad angular del rotor eólico, o mediante el Control de un Convertidor DC-DC que regula la carga óptima a un sistema estabilizador (baterías) [6] [7]. El sistema propuesto en esta investigación es el que se muestra en la figura 1, el control MPPT se realiza estableciendo relaciones óptimas entre V y V_r^* , para mantener la relación TSR y C_p en valores óptimos, de 6 a 8 y 0.4 a 0.5 respectivamente para pequeñas turbinas eólicas [8].

Un Convertidor Elevador *CD-CD* se conecta al banco de baterías de 24V para elevar el voltaje a 170 V, que entran al Inversor *CD-CA*, generando

un voltaje de 120 V_{rms} con baja distorsión armónica.

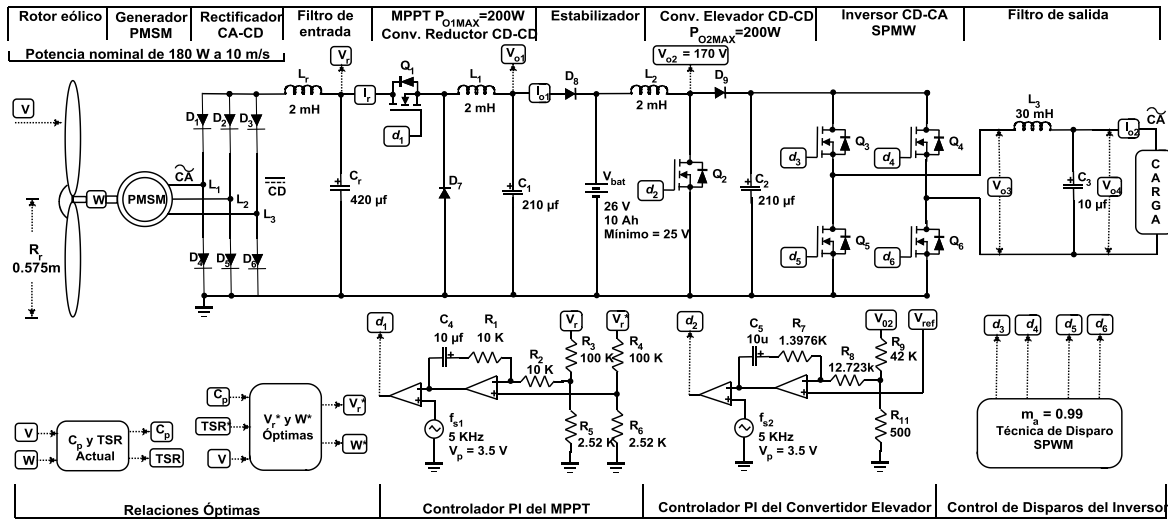


Figura 1. Sistema propuesto con control MPPT en una turbina eólica.

2. DESARROLLO

En esta sección se analiza la estrategia de control del *MPPT*, el análisis y diseño del Convertidor Elevador *CD-CD* que acondiciona de un bus de voltaje de 24V a 170V en *CD* para el Inversor de *CD-CA*, el cual entrega 120V en *CA* con baja distorsión armónica (*THD*).

2.1. Estrategia del MPPT.

La figura 2 muestra la curva de máxima potencia eléctrica P_e de una turbina *SWT* para diferentes velocidades de viento.

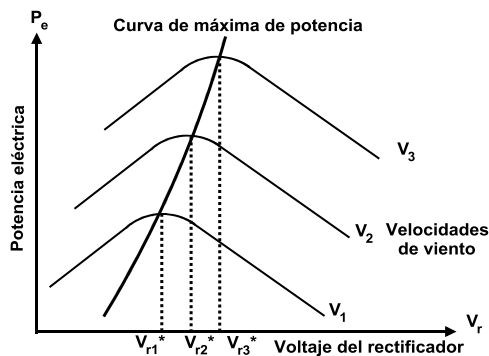


Figura 2. Curva de máxima potencia eléctrica.

Se puede observar que existe una línea que une los puntos óptimos de potencia eléctrica como resultado del producto $V_r^* \times I_r^*$, indicando que para cada velocidad de viento V existe un valor óptimo

de V_r^* , implicando un máximo C_p . El controlador *MPPT* busca seguir los puntos óptimos de la curva, mediante relaciones óptimas entre V y V_r^* .

2.2. Relaciones óptimas.

Debido al límite de *Betz* [9], la potencia mecánica P_m de una turbina está dada por:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A_r C_p(TSR, a) V^3 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde ρ es la densidad del aire, A_r el área del rotor eólico. La velocidad de punta *TSR* está determinada por la ecuación 2 [9].

$$TSR = \lambda = \frac{R_r W}{V} \quad \text{Ec. 2}$$

R_r , es el radio del rotor de la turbina eólica. Considerando que el ángulo de ataque es fijo, C_p queda en función de *TSR* y se puede estimar según la ecuación 3 [5].

$$C_p = C_1 \lambda^4 - C_2 \lambda^3 + C_3 \lambda^2 - C_4 \lambda + C_5 \quad \text{Ec. 3}$$

y $C_1 = 0.00044, C_2 = 0.012, C_3 = 0.097, C_4 = 0.2$
 $C_5 = 0.11$

La figura 3, muestra la relación entre C_p y *TSR*, es notable que para una V y W dada, se tiene el máximo C_p , sin embargo, para alcanzar este punto, es necesario de un controlador.

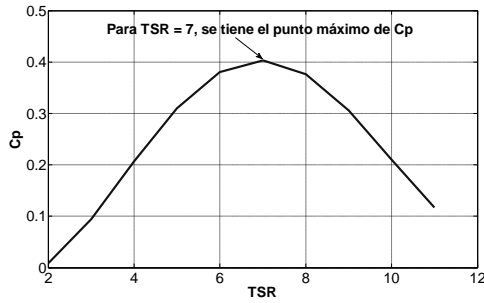


Figura 3. Coeficiente de potencia en función de TSR.

P_m se convierte en potencia eléctrica a través del PMSM, donde el voltaje entre líneas es:

$$V_{gll} = \frac{1}{\sqrt{2}} K_v W \sin(Wt) \quad \text{Ec. 4}$$

K_v , es la constante de fuerza contra electromotriz y se puede encontrar por:

$$K_v = \frac{\sqrt{2} \times V_{gll}}{W} \cong 0.69 \quad \text{Ec. 5}$$

Y t la frecuencia del generador en función del número de polos ($N_p = 12$) del generador y W .

$$t = \left(W N_p / 2 \right)^{-1} \quad \text{Ec. 6}$$

El V_{gll} es convertido en CD por el rectificador CA- CD , y se determina por:

$$V_r = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{gll} - 2V_D \quad \text{Ec. 7}$$

La velocidad óptima W^* para una turbina eólica SWT está dada por la ecuación 8 [5]:

$$W^* = 3 \sqrt[3]{\frac{P_m}{K_{opt}}} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho A_r C_p(TSR, \alpha) \left(\frac{R_r}{\lambda} \right)^3 \quad \text{Ec. 9}$$

Fijando $TSR = 7$ (valor óptimo) para cualquier V e introduciendo la ecuación 8 en ecuación 4 se establece la relación óptima de V_{gll}^* para una velocidad de viento dada.

$$V_{gll}^* = \frac{1}{\sqrt{2}} K_v 3 \sqrt[3]{\frac{P_m}{K_{opt}}} \sin \left(3 \sqrt[3]{\frac{P_m}{K_{opt}}} t \right) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho A_r C_p(TSR=7) \left(\frac{R_r}{7} \right)^3 \quad \text{Ec. 11}$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A_r C_p(TSR=7) V^3 \quad \text{Ec. 12}$$

Finalmente, sustituyendo la ecuación 10 en ecuación 7 obtenemos una relación óptima entre el voltaje del rectificador y la velocidad del viento a través del V_{gll}^* .

$$V_r^* = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{gll}^* - 2V_D \quad \text{Ec. 13}$$

W se determina por Ec. 2 y C_p por Ec. 3, valores indispensables para determinar P_m y K_{opt} con Ec. 9, implicando que sólo es necesario sensar la velocidad del viento V para determinar el voltaje óptimo V_r^* .

2.3. Controlador PI del MPPT.

Si el voltaje del rectificador V_r no se controlara, crecería al mismo tiempo que la velocidad del viento incrementara, ocasionando una disminución de C_p , esto lo podemos apreciar en la figura 4.

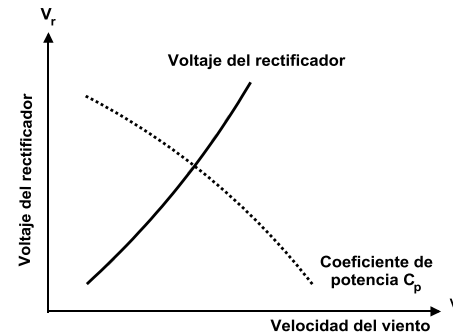


Figura 4. Coeficiente de potencia en función de TSR.

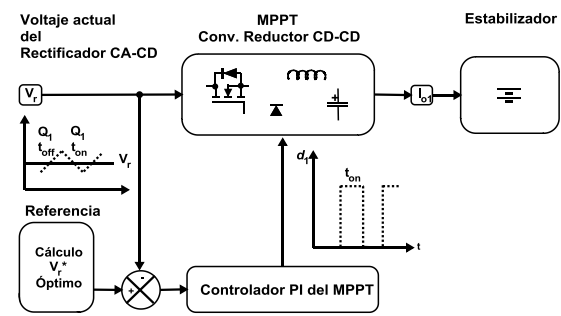


Figura 5. Controlador PI del MPPT.

Para mantener el voltaje V_r controlado en un punto óptimo según la ecuación 13, se interconecta la salida del Rectificador CA- CD a un Convertidor Reductor CD - CD con filtro de entrada $L_r C_r$, que reduce el rizo de voltaje y corriente provocados por la conmutación del interruptor Q_1 .

El Convertidor Reductor *CD-CD* es controlado mediante un regulador *PI* (ver figura 5), donde V_r es comparado con V_r^* , de tal forma que si el voltaje del rectificador V_r supera al voltaje de referencia V_r^* , el controlador *PI* genera un incremento en el tiempo que dura encendido Q_I (aumento del ciclo de trabajo d_I) hasta que el voltaje V_r se iguala con V_r^* , esto debido al aumento de corriente demandada por el convertidor, el cual ocasiona la disminución de V_r . En caso contrario el controlador *PI* disminuye el tiempo de encendido de Q_I (disminución de d_I) hasta que V_r alcance a V_r^* , como resultado de este proceso se mantiene el máximo C_p .

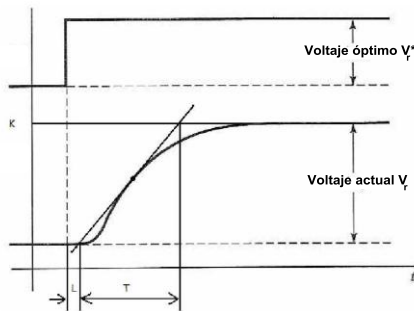


Figura 6. Respuesta en lazo abierto del MPPT.

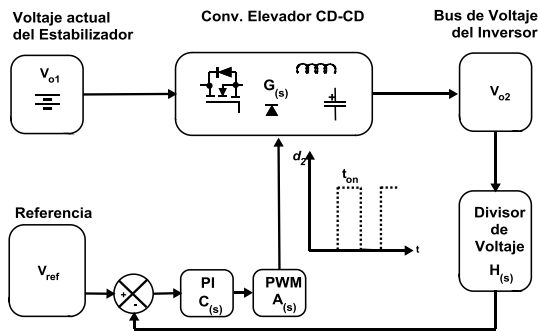


Figura 7. Convertidor Elevador *CD-CD* en modo voltaje.

La respuesta del sistema *MPPT* en lazo abierto presenta tiempos de retardo L no mayores a 40 ms y tiempos de levantamiento T no mayores de 50 ms (ver figura 6), desde este escenario, aplicando las reglas de sintonización de *Ziegler-Nichols* [10] se aproximan las constantes del controlador *PI*, resultando un tiempo integral de $T_i = 0.1$ s y una constante proporcional $K_p = 1$.

2.4. Inversor de *CD-CA* y Convertidor Elevador *CD-CD*.

Un Convertidor Elevador *CD-CD* controlado en modo voltaje mediante un regulador *PI* (ver figura 7) es necesario para acondicionar y estabilizar el voltaje del banco de baterías hacia el bus de voltaje

de entrada ($V_{o2} = 170V$) del Inversor *CD-CA*. Considerando que el convertidor trabaja en modo continuo de conducción la relación entre la salida de voltaje V_{o2} y el ciclo de trabajo d_2 (función de transferencia, $G(s)$) está dada por la siguiente ecuación [11]:

$$\frac{V_{o2}}{d_2} = \frac{V_i}{(1-D)^2} \frac{\left(1 + \frac{s}{W_{Z1}}\right) \left(1 - \frac{s}{W_{Z2}}\right)}{1 + \frac{s}{W_o Q} + \frac{s^2}{W_o^2}} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

$$W_{Z2} = \left((1-d_2)^2 (R - R_L) \right) / L_2 \quad \text{Ec. 15}$$

$$W_{Z1} = 1 / (ESR * C_2) \quad \text{Ec. 16}$$

$$W_o = \sqrt{ \left(R_L + (1-d_2)^2 R \right) / R } / \left(\sqrt{L_2 C_2} \right) \quad \text{Ec. 17}$$

$$Q = W_o / \left((R_L / L) + (1 / (C_2 (R + ESR))) \right) \quad \text{Ec. 18}$$

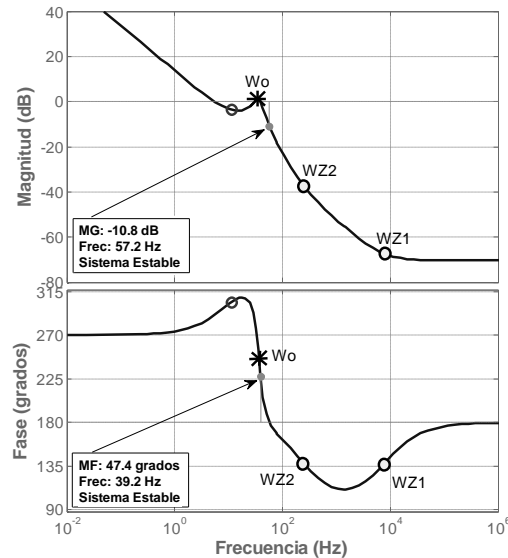


Figura 8. Graficas de bode de ganancia y fase del Convertidor Elevador *CD-CD* en lazo cerrado.

Y R_L la resistencia del inductor L_2 , ESR la resistencia interna del capacitor C_2 , con valores de 0.12 Ω y 0.1 Ω respectivamente. Del diseño en estado estable y tomando como parámetros según la figura 1, la elección de C_2 es de 210 μf con un ESR de 0.1 Ω y L_2 de 2 mH con $R_L = 0.12 \Omega$. Para el cálculo del controlador *PI* se toman en cuenta los criterios de estabilidad de *Nyquist* (margen de ganancia MG de al menos -6 dB al cruce de la fase por los 180° y un margen de fase MF de entre 30° y 60° al cruce de la ganancia por 0 dB) en el

dominio de la frecuencia [11], además, que el nuevo cruce de la ganancia por 0 dB se sitúa en 1/6 de la frecuencia resonante $W_o \approx 236 \text{ Hz}$ con el propósito de minimizar la pérdida de fase provocada por el cero de fase mínima (Ec. 15). Resultando en $T_i = C_5 R_7 = 0.0139 \text{ s}$ y $K_p = R_7/R_8 = 0.1098$. Utilizando *MATLAB* las graficas de bode en ganancia y fase con el controlador *PI* se pueden apreciar en la figura 8, en la cual se observa que cumple con los criterios de estabilidad descritos. En la figura 9 se aprecia la respuesta ante el escalón del Convertidor Elevador *DC-DC*

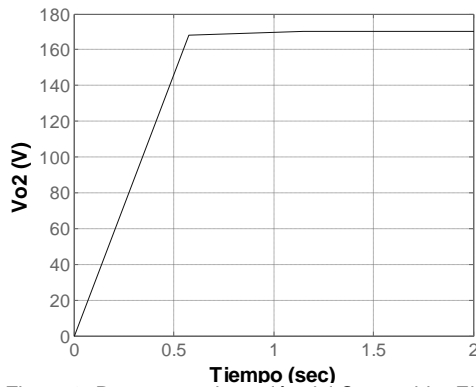


Figura 9. Respuesta al escalón del Convertidor Elevador *CD-CD* en lazo cerrado.

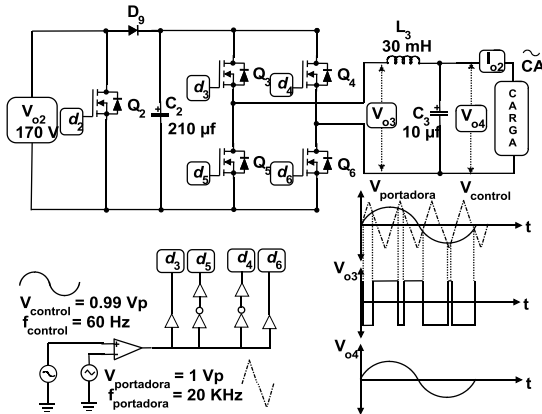


Figura 10. Inversor *CD-CA* controlado mediante la técnica *SPWM*.

La técnica de disparos de modulación de ancho de pulso sinusoidal (*SPWM*) es aplicada para activar el Inversor *CD-CA* [12], la cual se muestra en la figura 10.

Para disminuir el factor *THD* y aumentar la calidad de formas de onda de salida del inversor, se extrae la frecuencia fundamental mediante un filtro *LC* diseñado para una frecuencia de corte $f_c = 290 \text{ Hz}$ la cual es adecuada ya que es menor a la frecuencia

de la señal portadora $f_{portadora} = 5 \text{ kHz}$, resultando $L_3 = 30 \text{ mH}$ y $C_3 = 10 \mu\text{f}$.

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTALES

Para la implementación de la turbina eólica y el Convertidor Reductor *CD-CD* se utilizan los módulos de *Lab-Volt*. En el caso del Convertidor Elevador e Inversor *CD-CA* se utilizó un inversor con potencia de 2KW, entrada de 24V y salida senoidal a 120V con baja distorsión armónica. El circuito de control del *MPPT* se desarrolló con el integrado *SG3524*, el contiene la arquitectura para la implementación del *PI*. En la figura 11 se muestran los resultados de V_r^* , V_r , I_r y C_p de simulación considerando una carga conectada al inversor de 60W y $V = 7 \text{ m/s}$, en los cuales el coeficiente de potencia se mantiene en un valor mayor a 0.4 y el valor óptimo del voltaje del rectificador es alcanzado, según lo determinado en la sección I.

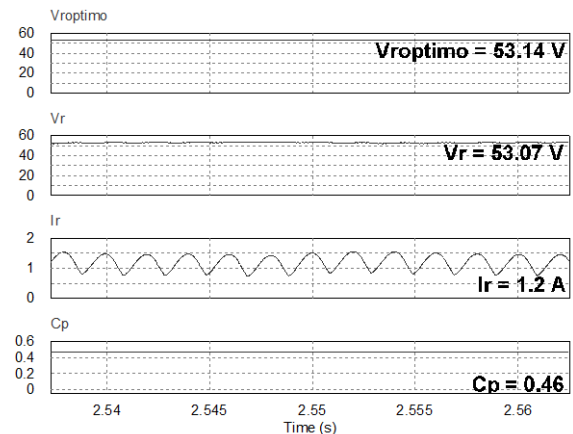


Figura 11. Resultados de simulación de V_r^* , V_r , I_r y C_p para $V = 7 \text{ m/s}$.

En la figura 12 se muestran los resultados de experimentales para una velocidad de viento de 7 m/s de V_r e I_r , en cuales se observa un voltaje de 52.5 V y una corriente de 1.27 A, muy similares a los resultados de simulación, por lo tanto C_p se mantiene en un punto optimo.

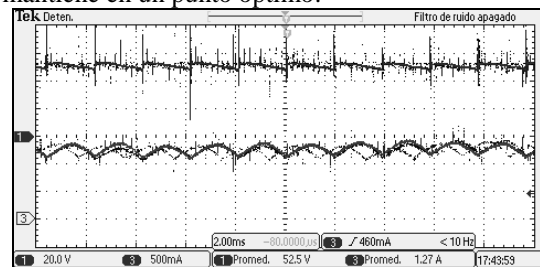


Figura 12. Resultados experimentales de V_r (Ch1: 20 V/DIV, 2 ms/DIV) e I_r (Ch3: 500 mA/DIV, 2 ms/DIV).

Para una carga de $60W$, en la figura 13 y 14 se muestran los resultados de simulación y experimentales, respectivamente, del voltaje y corriente de salida del inversor con filtro LC y $m_a = 0.99$, en los cuales se puede apreciar una buena calidad en su forma onda y valores de magnitud aproximadamente iguales.

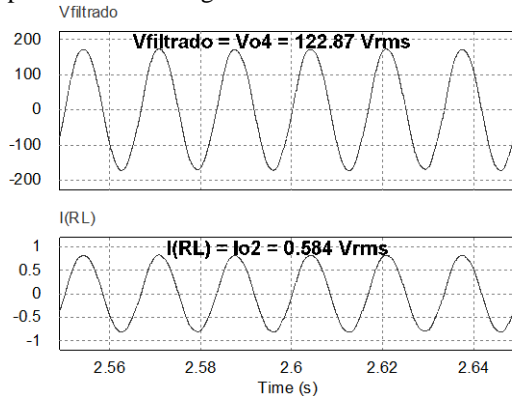


Figura 13. Resultados de simulación del voltaje y corriente de salida del inversor para una potencia de $60W$.

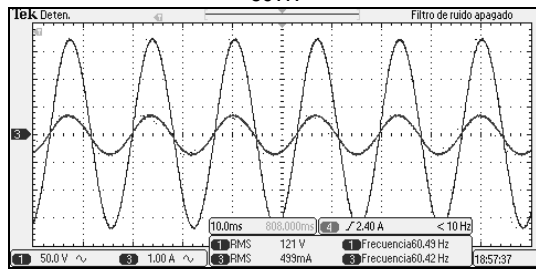


Figura 14. Resultados experimentales del voltaje (Ch1: 50 V/DIV, 10 ms/DIV) y corriente (Ch3: 1 A/DIV, 10 ms/DIV) de salida del inversor.

4. CONCLUSIONES

Se presentó en esta investigación aplicada el diseño simulación e implementación de un MPPT en una pequeña turbina eólica, además, del diseño y simulación de un Convertidor Elevador $CD-CD$ e Inversor $CD-CA$ con alta calidad en sus formas de onda de salida. Los resultados de simulación y experimentales fueron según los esperados, validando de esta forma la teoría y metodología de control del sistema $MPPT$ de la turbina eólica. La relación entre V_r y V , según la ecuación 13, sustento el valor de referencia a seguir para el controlador PI del $MPPT$ y de esta forma obtener el máximo coeficiente de potencia del rotor eólico para velocidades de viento y carga variables. El controlador PI del Convertidor Elevador $CD-CD$ se diseñó para compensar antes de la pérdida de fase debido al cero de fase mínima que presenta el sistema, sin embargo, limito el ancho de banda a $39.2Hz$.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Danish Wind Industry Association, "De Donde Viene la Energía Eólica". Disponible en: <http://guidedtour.windpower.org/es/tour/wres/index.htm>.
- [2] Secretaria de Energía, "Prospectiva del Sector Eléctrico 2010-2025". Disponible en: http://www.energia.gob.mx/res/1825/SECTOR_EL_ECTRICO.pdf
- [3] M. Hilmy, M. El-Nemr, M. Youssef, "A Less Sensor Control Method for Standalone Small Wind Energy Using Permanent Magnet Synchronous Generator", IEEE APEC'11, Conference Publications, pp. 1968 – 1974. Abril 2011.
- [4] J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers, "Wind Energy Explained", John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [5] Md. Arifujjaman, "Modeling, Simulation and Control of Grid Connected Permanent Magnet Generator (PMG)-based Small Wind Energy Conversion System" IEEE EPEC'10, Conference Publications, pp. 1-6. Agosto 2010.
- [6] H. Xu, J. Hui, D. WU, W. Yan, "Implementation of MPPT for PMSG-Based Small-Scale Wind Turbine", IEEE ICIEA'09, Conference Publications, pp. 1291-1295, Mayo 2009.
- [7] D. Oliveira, G. Sousa, A. Rangel, D. Queiroz, L. Santos, L. Fontenele, P. Bezerra, "Low Cost and High Efficiency Static Converter For Small Wind Systems", IEEE COBEP'09, Conference Publications, pp. 972 – 977, Octubre 2009.
- [8] M. Abdel-Salam, a. Ahmed, M. Abdel-Sater, "Maximum Power Point Tracking for Variable Speed Grid Connected Small Wind Turbine", IEEE ENERGYCON'10, Conference Publications, pp. 600-605, Diciembre 2010.
- [9] G. Putrus, M. Narayana, M. Jovanovic, P. Sing, "Maximum Power Point Tracking For Variable-Speed Fixed-Pitch Small Wind Turbines".
- [10] K. Ogata, "Ingeniería de Control Moderna", Tercera Edición, Publicada por Prentice-Hall Hispanoamericana, 1998.
- [11] D. López, A. Lizárraga, J. Durán, "Diseño y Consideraciones de un Lazo de Compensación para el Convertidor Tipo Boost (Elevador) Cd-Cd Controlado en Modo de Voltaje", ELECTRO'04, Conferencia, Octubre 2004.
- [12] N. Mohan, "Electrónica de Potencia, Convertidores, Aplicaciones y Diseño", Tercera Edición, Publicada por Mc. Graw Hill, 2009.