

Estudio de Controles de Paso de Pala para Generador eólico de Baja Potencia, UTN1899

De Villafior Alejandro Blas*, Garbuglia Hugo, Persello Andrés, Bufanio Ruben, Garcia Motto Germán

*Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional
devillab@speedy.com.ar, hugogar@ciudad.com.ar, perselloa@hotmail.com,
ruben.bufanio@speedy.com.ar, german_garcia_motto_@yahoo.com.ar*

RESUMEN

El presente trabajo tiene el propósito de incrementar capacidades en el área energética, clave en el desarrollo de una región, con el menor daño medio ambiental y en forma sustentable. Dentro de este marco, se erige la generación por recurso eólico como una de la más importante.

La Argentina cuenta con sitios inmejorables respecto a capacidad de recurso eólico, entre ellos es de destacar la Patagonia, con medias de densidad de potencia del viento por encima de muchas regiones del mundo en donde la energía eólica es de vital importancia.

Las características particulares de las condiciones atmosféricas de estos lugares, como por ejemplo, el alto nivel de turbulencia, hace necesario el estudio de diferentes métodos de trabajo de las turbinas eólicas de baja potencia, con el objetivo de obtener el mejor desempeño respecto a la producción, reducción de costos y aumento de vida útil.

Por ello se propone:

La optimización del rotor de un generador eólico, de potencia por debajo de los 10kW, para propender a un mejor desempeño en la obtención de energía del viento.

Modificar el paso de pala, por encima de velocidad de viento nominal, de manera de incrementar las condiciones de amortiguamiento de cargas aerodinámicas y por ende disminuir la fatiga del dispositivo electroproductor.

Desarrollar, en principio, un rotor por control de potencia por pérdida aerodinámica "Stall" (por su definición en inglés) de paso fijo y luego con controles de paso de pala, para este último a través de sistema netamente mecánico con centrífugos, como por acción de controles electromecánicos por medio de servomecanismos y control electrónico.

Modelar, por medio de programa computacional, un método de control de potencia por paso de palas, haciendo énfasis a la zona de trabajo de la turbina eólica por encima de viento nominal de manera de poder comparar contra ensayos de laboratorio y campo.

Obtener conclusiones entre los prototipos planteados, tanto del punto de vista de desempeño estructural como de extracción de energía.

Realizar análisis técnico-económico, fundamentalmente entre el sistema de control de potencia por "Stall" o pérdida aerodinámica (sin paso de pala) respecto de los de paso variable.

Palabras Claves: Eólica, Paso de Pala, Control

1. INTRODUCCIÓN

Como se indicó en el resumen, se dio comienzo (a finales de año 2012) a la construcción de un prototipo de generador eólico de 700W de potencia (Hugh Piggott), con control de potencia por paso de pala fijo. En simultáneo se trabaja sobre el modelado computacional del control de potencia por paso de pala y estudio de la mejor opción de control centrífugo para el próximo prototipo experimental.

2. ETAPAS DESARROLLO AEROGENERADOR CON PASO DE PALA FIJO

Se construyó de manera completa una turbina eólica de 700w de potencia con generador sincrónico a imanes permanentes de polos no salientes PMSG, [1], [2].

La tarea se dividió en las siguientes etapas.

Construcción de generador sincrónico a imanes permanentes

- a) Determinación de número de vueltas y sección de bobinas de estator
- b) Armado de molde estator
- c) Montaje de bobinas generador y conexión dentro de molde estator
- d) Determinación de tipo y cantidad de imanes de rotor (n° de polos)
- e) Construcción de rotor generador con imanes permanentes

Construcción de rotor aerodinámico

- a) Determinación de material y dimensiones aerodinámicas para la construcción de las palas
- b) Construcción de palas
- c) Ensamblaje de las palas y equilibrio de rotor

Construcción sistema mecánico

- a) Construcción cuerpo aerogenerador
- b) Desarrollo de tren de transmisión mecánico
- c) Construcción cola aerogenerador (furling)

Sistema eléctrico

- a) Cálculo de rectificador y regulador de voltaje
- b) Estimación de dimensionamiento de baterías y dump load.
- c) Armado de configuración eléctrica y etapa de control

Ensamble y prueba aerogenerador

- a) Montaje generador eléctrico y prueba previa con variador de velocidad/motor eléctrico.
- b) Montaje de caja estanca para distribución de energía generada y furling

3. CONSTRUCCIÓN DE GENERADOR SINCRÓNICO A IMANES PERMANENTES PMSG

Se determina el tipo de material para los imanes permanentes y sus dimensiones al igual que la cantidad a emplear en cada disco del rotor (n° de polos) e inducción de trabajo

En el comienzo de esta tarea se parte de la necesidad de contar, para una adecuada conversión a corriente continua, con una frecuencia mínima de corriente suministrada por las bobinas del estator no menor a los 21Hz, [3].

$$f_g = 21\text{Hz}$$

Teniendo en cuenta que se utiliza una máquina sincrónica y que la velocidades de generación estarán a partir de las:

$N=200$ rpm (radio de palas $R= 1.2\text{m}$), se obtiene la cantidad de pares de polos como sigue:

$$P = \frac{60 f_s}{N} = 6 \quad (1)$$

Establecidos los n° de pares de polos se opta por trabajar, dado las bondades magnéticas, con imanes permanentes de aleaciones NdFeB con siguientes características:

Grado = N40, con área $A_{im} = 50\text{mm} \times 30\text{mm}$ y longitud $L_{im} = 10\text{mm}$, propiedades magnéticas inducción remanente e intensidad de campo coercitiva como sigue:

$$B_r = 1.14 \left[\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \right]$$

$$H_{cb} = 850 \left[\frac{\text{KA}}{\text{m}} \right]$$

Se emplean dos discos de acero para montaje de los imanes, utilizándose 12 por cada uno de manera de conformar la cantidad de polos requerida. Estos giraran solidarios al eje de rotación formando un "sándwich" con las bobinas del estator permitiendo un flujo del tipo axial y creando un sistema de conversión (WECS) del tipo "PMSG" de polos no salientes. En las siguientes figuras se muestra el resultado de lo planteado.



a) b) c)
 Figura 1 montaje de imanes sobre disco de acero, a) Ubicación de imanes y preparación del molde, b) llenado del molde, c) Disco con imanes terminado.

Es importante determinar el punto de trabajo de los imanes permanentes para ello partiendo de consideraciones teóricas [4] y de Figura 2 se llega a:

$$B_m = -\mu_0 H_m \left(\frac{A_{eh} L_{im}}{A_{im} L_{eh}} \right) \quad (2)$$

Por otro lado de acuerdo a la histéresis del material del imán se tiene

$$B_m = B_r + \mu_{im} H_m \quad (3)$$

Con:

B_m = Inducción de trabajo

H_m = Intensidad de campo de trabajo

A_{eh} = Área de entrehierro

A_{im} = Área de imán

L_{eh} = Longitud de entrehierro

L_{im} = Longitud de imán

μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío, $4\pi 10^{-7}$ [Hy/m]

μ_{im} = Permeabilidad magnética material del imán

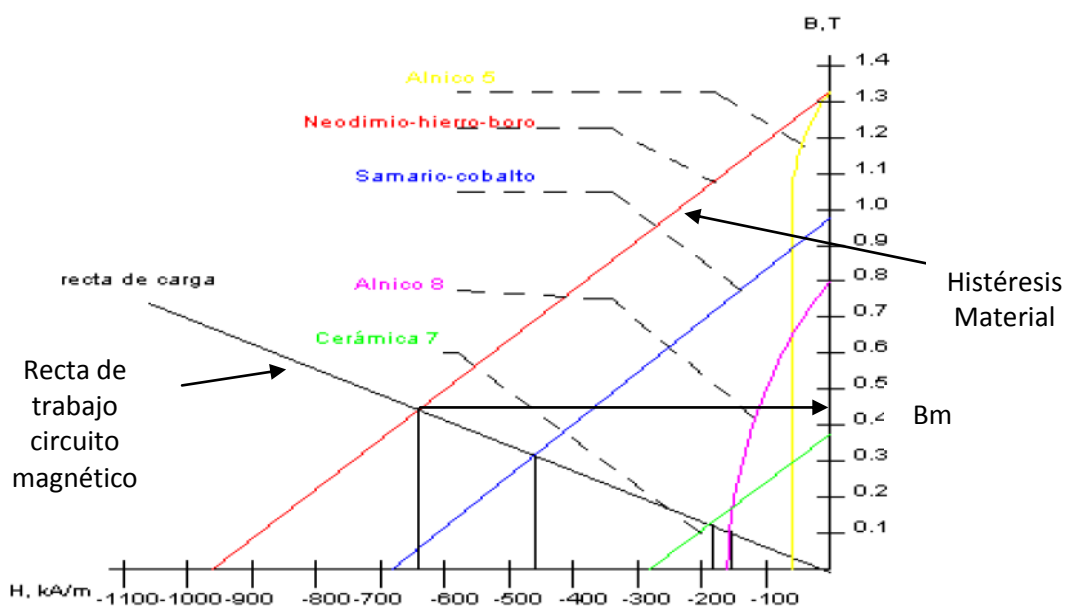


Figura 2 Curva de histéresis de materiales magnéticos, en segundo cuadrante, y su intersección con recta de trabajo magnética según geometría desarrollada en prototipo.

Si se define a:

μ_{tr} Como permeabilidad de trabajo, entonces

$$\mu_{tr} = -\mu_0 \left(\frac{A_{eh} L_{im}}{A_{im} L_{eh}} \right) \quad (4)$$

Nos queda

$$B_m = \frac{B_r}{\left(1 + \frac{\mu_{im}}{\mu_{tr}}\right)} \quad (5)$$

Para nuestro caso:

$$\mu_{im} = 1.3412 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Hy}{m} \right]$$

$$\mu_{tr} = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{Hy}{m} \right]$$

Con lo que se obtiene una inducción de trabajo teórica:

$$B_m = 0.56 \left[\frac{Wb}{m^2} \right]$$

3.1. CONSTRUCCIÓN DE ESTATOR

Teniendo en cuenta la frecuencia mínima de generación de punto anterior (21 Hz), se construyen nueve bobinas (tres por fase) de manera que por la disposición geométrica habrá instantes en que los imanes (sus caras) estén centradas simultáneamente en el hueco de tres bobinas de una fase (las cuales están en serie), repitiéndose esto en las bobinas de las otras a medida gira el rotor. Esta geometría entre bobinas e imanes (9/12) promueve una salida de generación trifásica con distorsión aceptable respecto a una señal senoidal THDv < 20 %.

Teniendo en cuenta las caídas de tensión en los diodos del puente trifásico, se plantea la siguiente expresión aproximada para el cálculo del número de vueltas de cada bobina

$$N_b = \frac{V_{dco} + V_{Dt}}{3 \cdot \sqrt{6} \cdot 4.44 \cdot S_{eh} \cdot B_m \cdot f_g} \quad (6)$$

V_{dco} = Tensión de generación a salida de puente rectificador (24 V)

V_{Dt} = Caída directa en diodos de puente trifásico (1.4 V)

S_{eh} = Sección de hueco de bobina (área de cada imán permanente (0.0015 m²))

f_g = Frecuencia mínima de generación (21 Hz)

B_m = Inducción de trabajo calculada en punto anterior (0.56 Wb/m²)

Esto lleva a un resultado

$$N_b = 45 \text{ (Vueltas por cada bobina de fase)}$$

La sección/diámetro de conductor utilizado para el bobinado se determina en el apartado de condiciones eléctricas de funcionamiento.

En siguiente Figura 3 se muestra una bobina de fase y la interconexión interna, en estrella, de su estator.

4. CONSTRUCCIÓN DE PALAS Y ROTOR

Para la construcción de las palas se siguió la idea de una plantilla que permite control por pérdida aerodinámica o Stall [5]. Ya que la potencia pretendida esta en el orden de los 700W, con un coeficiente de potencia CP del orden de 0.35 y un rendimiento de conversión total, teniendo en cuenta pérdidas mecánicas y eléctricas, del 70%, es que se elige una longitud de pala de 1.2m (Radio del rotor). De manera de obtener dicha potencia de acuerdo a la siguiente expresión, [6] entre los 10 y 11 [m/s] de velocidad del viento medio.

Por el lado del material se opta por utilizar madera de cedro, lo cual da una buena resistencia a vibraciones y fatiga.

En las siguientes figuras se muestra detalle de las palas y ensamblado final de rotor.

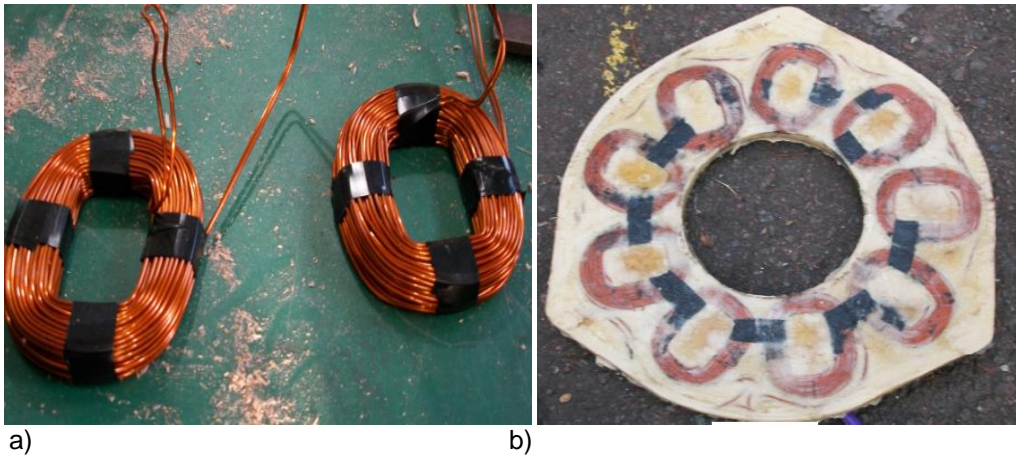


Figura 3 Armado de estator, a) Bobinas de fase, b) Estator completo

$$P_m = CP \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_\infty^3 \quad (7)$$

P_m Potencia mecánica
 CP Coeficiente de potencia
 ρ Densidad del aire (estimada en 1.225 kg/m³)
 R Radio de pala
 V_∞ Velocidad de viento libre

$$P_e = \eta P_m \quad (8)$$

P_e Potencia eléctrica a salida rectificador
 η Rendimiento de conversión (contempla pérdidas mecánica y eléctricas)

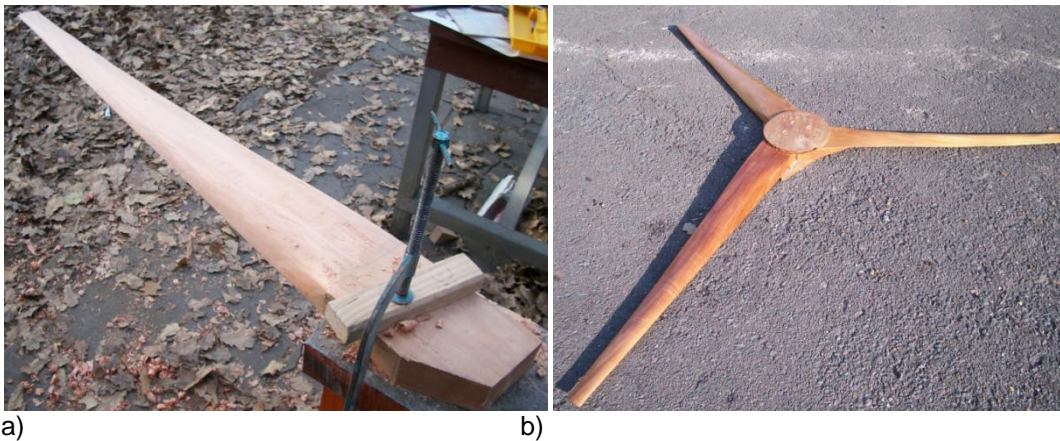


Figura 4, Construcción de rotor, a) Elaboración de palas, b) Ensamblado de Rotor

5. DESARROLLO SISTEMA ELÉCTRICO Y CONTROL

La salida alternada del generador trifásico se rectifica y aplica a una barra de corriente continua de 24V nominales, [7] lo cual indica para la potencia desarrollada una corriente media rectificadora máxima

$$I_{dcm\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{V_{dc}} \cong 30A \quad (9)$$

Con una corriente eficaz de fase del estator del generador

$$I_{fm\acute{a}x} = I_{dcm\acute{a}x} \sqrt{\frac{2}{3}} \cong 24[A] \quad (10)$$

Cada diodo del puente trifásico deberá soportar una corriente eficaz

$$I_{Dm\acute{a}x} = I_{dcm\acute{a}x} \sqrt{\frac{1}{3}} \cong 17[A] \quad (11)$$

En base a cálculos anteriores el diámetro de alambre del bobinado estatórico deberá estar en los 3 mm de diámetro, dada la mayor dificultad para su bobinado en dicho diámetro, se opta por utilizar dos en paralelo de 1.5 mm.

La corriente rectificada se aplica a un sistema eléctrico, el cual se muestra en la siguiente Figura 5 de bloques, está compuesto por banco de baterías, sistema de control de carga, resistencias de quemado de energía (Dump Load) y carga o consumo.

La etapa de control evita el exceso de carga de batería entregando un perfil acorde a baterías del tipo plomo-ácido, en caso de que la producción de energía exceda la demandada más la carga de batería, el control a través de sensores y comparadores, activa el circuito de potencia sobre los resistores de quemado de exceso de energía, encontrando él sistema un equilibrio entre producción y consumo. Esto evita aceleraciones del rotor e inestabilidad del sistema aerodinámico, teniendo en cuenta a demás que a medida aumenta la corriente estatórica en un generador sincrónico PMSG de polos no salientes [8] lo hace el torque antagónico, lo cual lleva control de por medio al sistema a equilibrio. La siguiente ecuación, despreciando fricción, [9] indica lo anterior.

$$\dot{\omega}_R = \frac{1}{J} (T_m - T_e) \quad (12)$$

$\dot{\omega}_R$ = Aceleración angular rotórica
 J = Momento de Inercia del rotor
 Tm = Torque mecánico
 Te = Torque electromagnético

6. MONTAJE GENERADOR PMSG Y PRUEBA CON VARIADOR DE VELOCIDAD/MOTOR ELECTRICO.

Para esta labor se construyó y se muestra en las siguientes figuras, un banco de trabajo conformado por una carga variable que permite recorrer, en función del valor de resistencia elegido, diferentes niveles de potencia de generación. Esta se conecta al generador trifásico a través de la placa reguladora de voltaje/ control en conjunto con un motor acoplado a su eje y como entrada de alimentación a este un variador de velocidad de manera de recorrer diferentes frecuencias, y obtener en correspondencia, las velocidades de giro de generación en el rango de trabajo previsto.

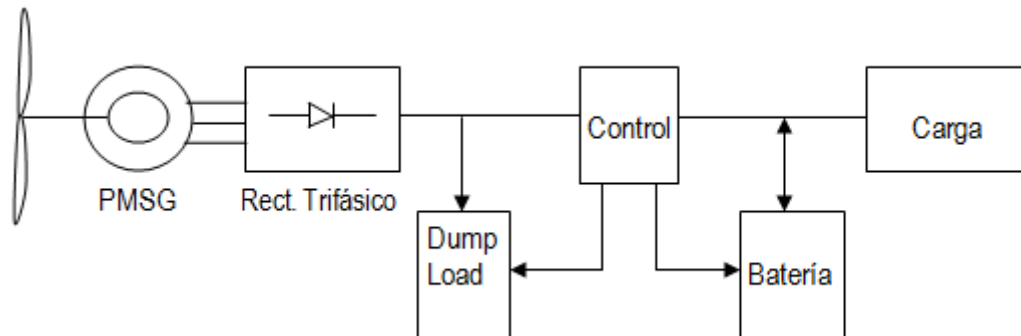


Figura 5 Diagrama de bloques de sistema de conversión de energía eólica empleado

Esta tarea permite observar y evaluar el perfil de tensión obtenido a la salida del generador (forma y frecuencia de su salida), a demás de tensión rectificada de carga óptima de baterías (para este caso de voltaje nominal 24V), y desempeño de acuerdo a diferentes valores de carga resistiva utilizada.

Para la obtención de las medidas se utilizaron osciloscopio conectado a la salida del aerogenerador, un multímetro digital a la salida del rectificador trifásico que alimenta la carga variable y un medidor de calidad de energía (Fluke 435) a la entrada del variador de velocidad.

6.1 MEDIDAS EN VACIO

La primera etapa de las mediciones se realizó en vacío, se recorrió una amplia variación de velocidades de giro de manera de cubrir todo el rango de trabajo, los resultados se muestran en la Tabla1. Se puede observar de estas que tanto el perfil de tensión a la entrada y salida del rectificador trifásico guarda relación con lo previsto en los cálculos teóricos, la tensión de salida rectificada sin filtrar no está más que un 5% por debajo de lo calculado y la forma de señal fase a

fase del generador presenta una distorsión respecto a una senoidal, por encima de los 220rpm (velocidad de generación) menor al 20%.

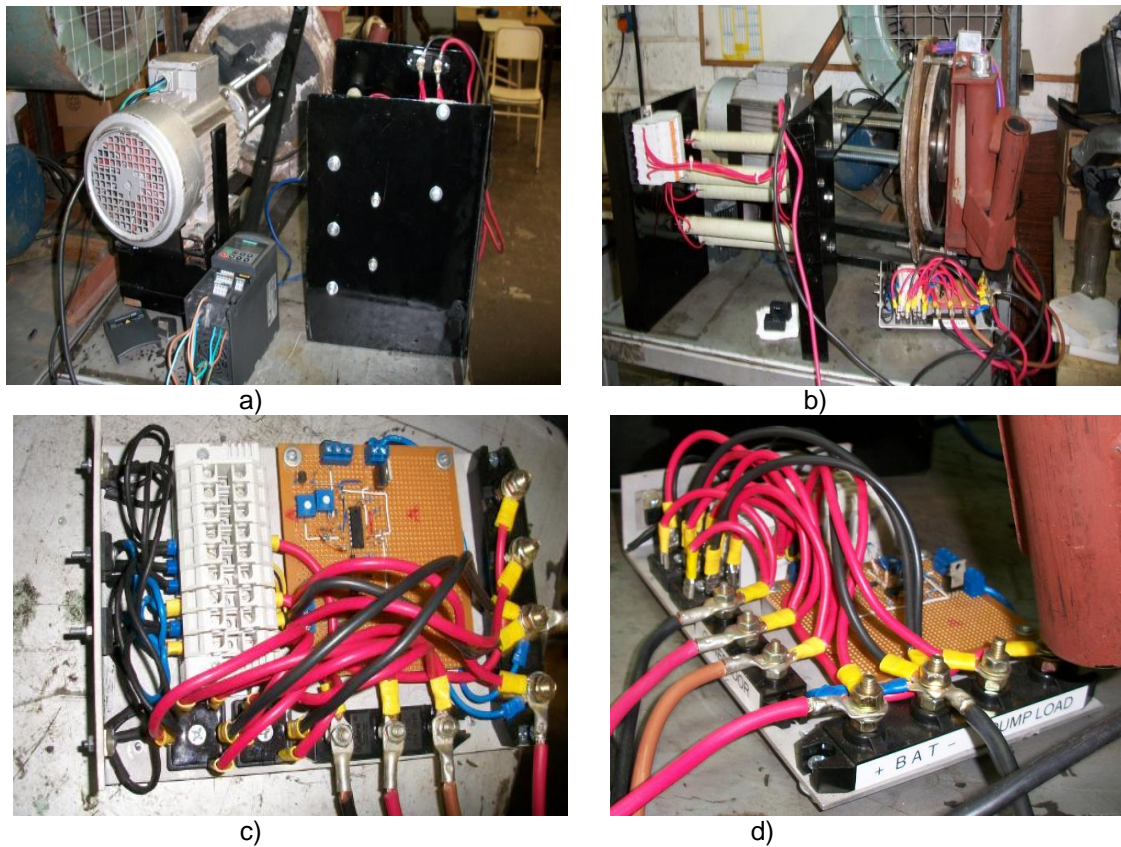
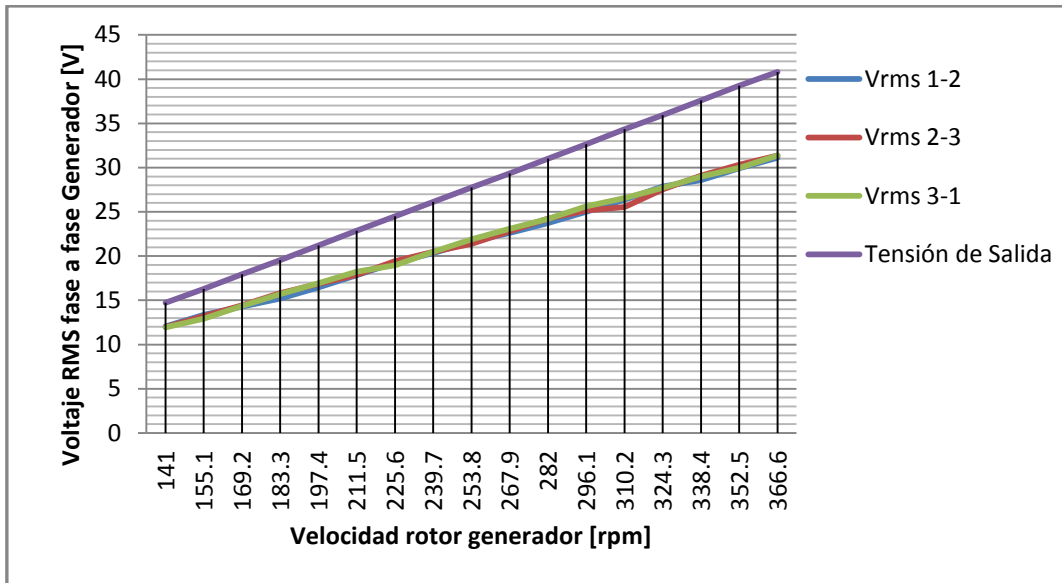


Figura 6, a) y b) Vistas de banco de trabajo prueba de PMSG, c) y d) Vistas de placa de control e interconexión sistema eléctrico (batería, carga y dump load).

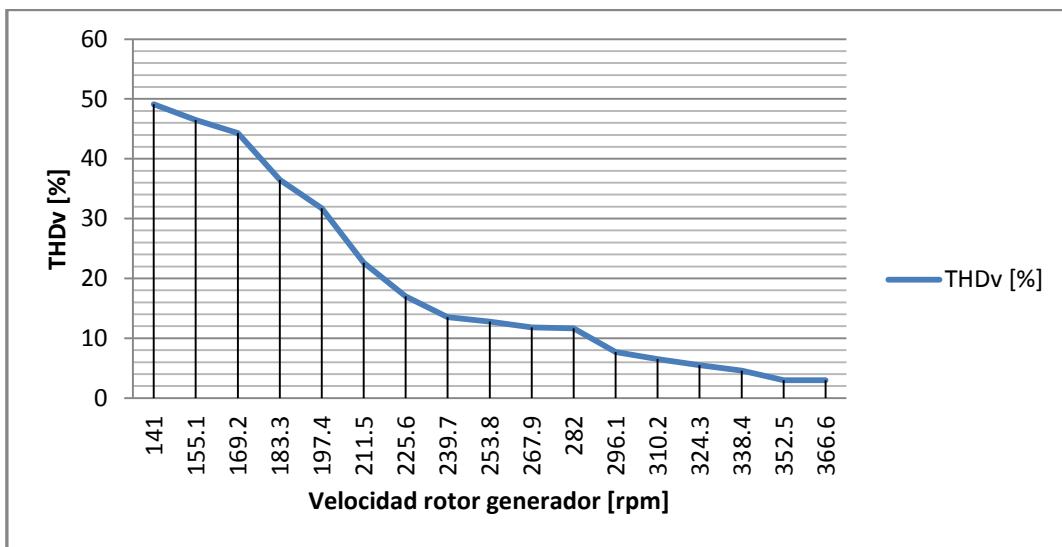
Tabla 1 Medidas eléctricas en vacío.

Velocidad Variador [Hz]	Velocidad rotor [RPM]	Vrms 1-2	Vrms 2-3	Vrms 3-1	THDv [%]	Tensión de Salida [V]	Frecuencia Salida [Hz]
5	141	12.06	11.96	11.95	49.1	14.71	14.1
5.5	155.1	13.36	13.22	12.92	46.5	16.3	15.51
6	169.2	14.3	14.43	14.38	44.3	17.93	16.92
6.5	183.3	15.19	15.83	15.72	36.5	19.55	18.33
7	197.4	16.48	16.86	16.94	31.7	21.22	19.74
7.5	211.5	17.85	17.89	18.22	22.6	22.85	21.15
8	225.6	19.24	19.43	18.96	17	24.5	22.56
8.5	239.7	20.33	20.48	20.48	13.5	26.14	23.97
9	253.8	21.63	21.37	21.88	12.8	27.74	25.38
9.5	267.9	22.62	22.81	23.08	11.8	29.36	26.79
10	282	23.73	24.24	24.21	11.64	31	28.2
10.5	296.1	25.02	25.14	25.63	7.7	32.64	29.61
11	310.2	26.37	25.55	26.57	6.5	34.34	31.02
11.5	324.3	27.86	27.54	27.7	5.5	35.94	32.43
12	338.4	28.58	29.09	28.98	4.6	37.6	33.84
12.5	352.5	29.93	30.32	29.97	3	39.25	35.25
13	366.6	31.13	31.37	31.38	3	40.8	36.66

En las siguientes curvas se puede observar la relación del THDv en función de la velocidad de giro, al igual que las tensiones de fase a fase como de salida. Estas medidas difieren solo entre un 5 y 10% lo de lo estimado previamente de manera teórica, lo cual es satisfactorio teniendo en cuenta que tanto el generador y sistema eléctrico forman parte de un prototipo experimental realizado sin ningún herramental especial de mecanizado y trabajo en serie.



a)



b)

Figura 7, curvas de medidas en vacío, a) Salida fase a fase de generador y tensión rectificadora, b) Distorsión de tensión respecto componente fundamental.

6.2 MEDIDAS CON ACOPLE DIRECTO

En la siguiente Tabla 2 se pueden observar las medidas con cuatro condiciones de carga, vacío (sin resistencia de carga) y tres valores de resistencia. Se concluye que es prácticamente, dada las pérdidas del motor por deslizamiento y límite de trabajo del variador de velocidad (1.5kW), poder evaluar el desempeño del generador a plena carga. El deslizamiento del motor con una carga de 4 Ohms supera el 17%, no llegando la potencia de salida a los 200 W. El motor fuera de su zona de velocidad de trabajo evidencia altas pérdidas que afectan el desarrollo de las medidas y su seguridad de funcionamiento. Las pérdidas de potencia del generador se encuentran en los 93W (en la mayor potencia de trabajo, alrededor de 400W de salida), lo cual indica un rendimiento del PMSG mayor al 80%, acorde a lo previamente calculado, teniendo en cuenta además que se deberían descontar pérdidas en rectificador más control.

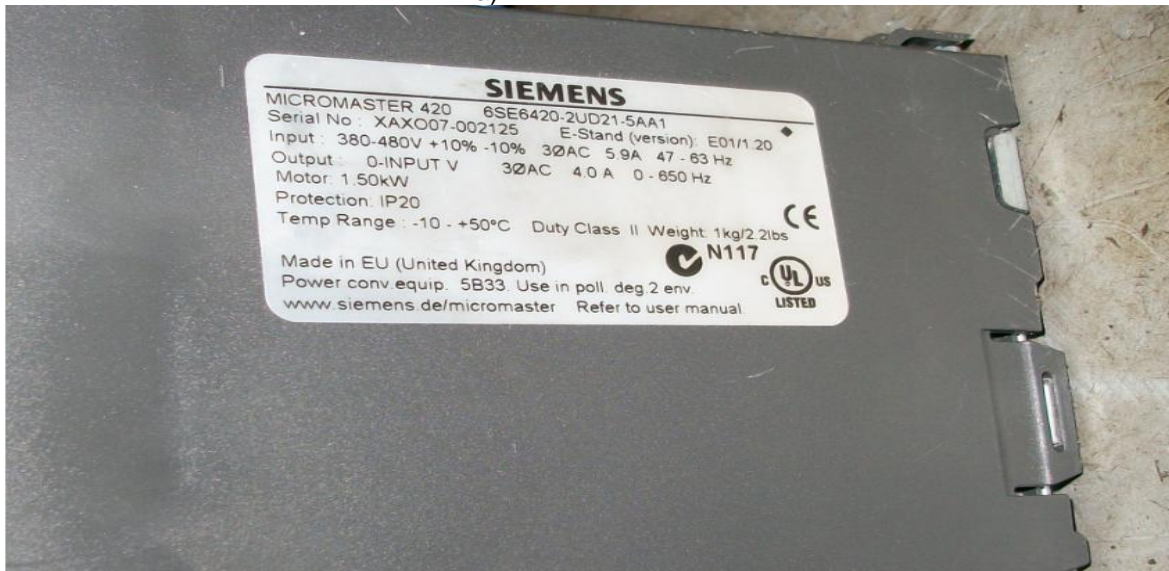
Tabla 2 Medidas desempeño sistema con acoplamiento directo motor generador.

R Carga [Ω]	RPM motor	Fvar. [Hz]	Fg [Hz]	Vo [V]	Io [A]	If Gen. [A]	Per. Gen. [W]	S [%]	P Entr. [W]	P Sal. [W]	Pérd. motor [W]	Pot. Total
Vacio	272	9.2	27.2	28.2				1%	143	0	3	
4	302.3	12.2	30.23	28.2	7.05	5.75	23.2	17%	503	198	86	505
2	328	15.8	32.8	28.3	14.1	11.54	93.4	31%	1200	399	370	1160
1.34	250.5	14.67	25.05	22	16.4	13.4	126	43%	1420	362	610.6	1397

En las siguientes figuras se muestran algunas de las medidas eléctricas tomadas por el medidor de calidad de energía (Fluke 435) a la entrada del variador de velocidad, que evidencian hacer trabajar al motor a una velocidad de giro acorde a la indicada en su chapa de entrada como muestra la Figura 8.



a)



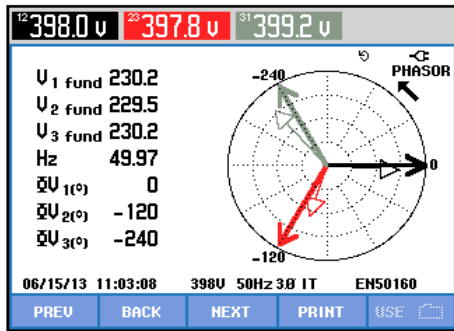
b)

Figura 8, Parámetros de trabajo, a) Motor eléctrico, b) Variador de Velocidad
De Tabla 2 se considera pérdida total a la suma de la del variador de velocidad, motor (eléctricas + mecánicas), electrónica de conversión (rectificador + control) y generador eléctrico.

Primera medida

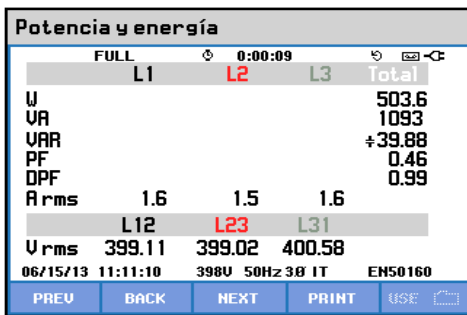
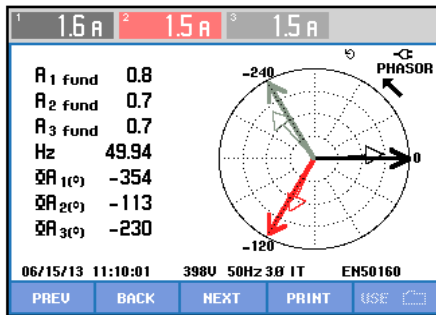
Ro= (Sin carga)

Vo= 28,2v



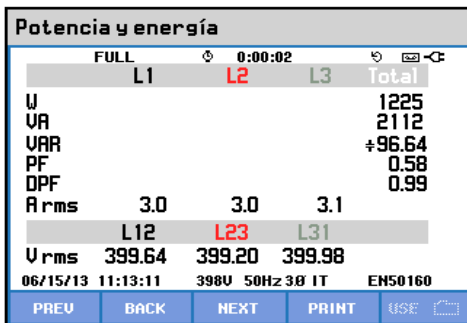
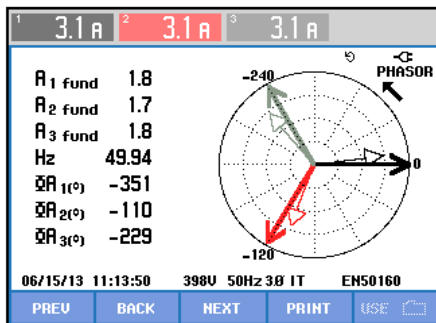
Segunda medida

Ro= 4 Ω (una resistencia de carga)
Vo= 28,2v



Tercera medida

Ro= 2 Ω (dos resistencias de carga)
Vo= 28,3v



Cuarta medida

Ro= 1.34 Ω (tres resistencias de carga)
Vo= 22v

Nota: En esta medida el variador comienza a limitar su salida (por exceso de pérdidas por deslizamiento en el motor de 1.5kW).

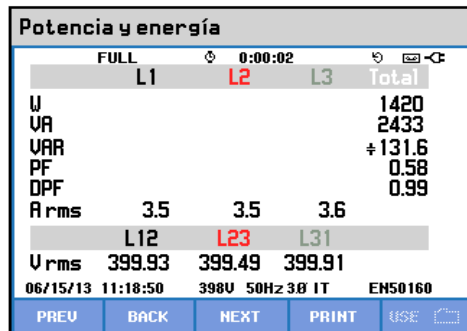
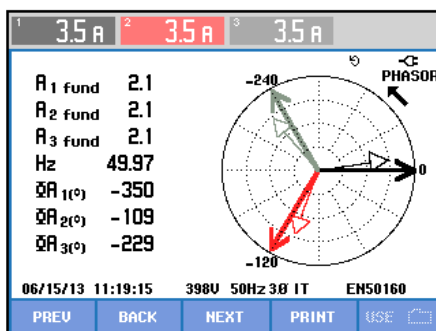


Figura 9 Salidas medidor de calidad de energía.

6.3 MEDIDAS CON POLEA DE REDUCCIÓN

Para solucionar el problema planteado en apartado anterior se implementa, como es mostrado en Figura 10, una reducción 3.51:1. Se repiten todas las medidas las cuales se presentan en la Tabla 3.

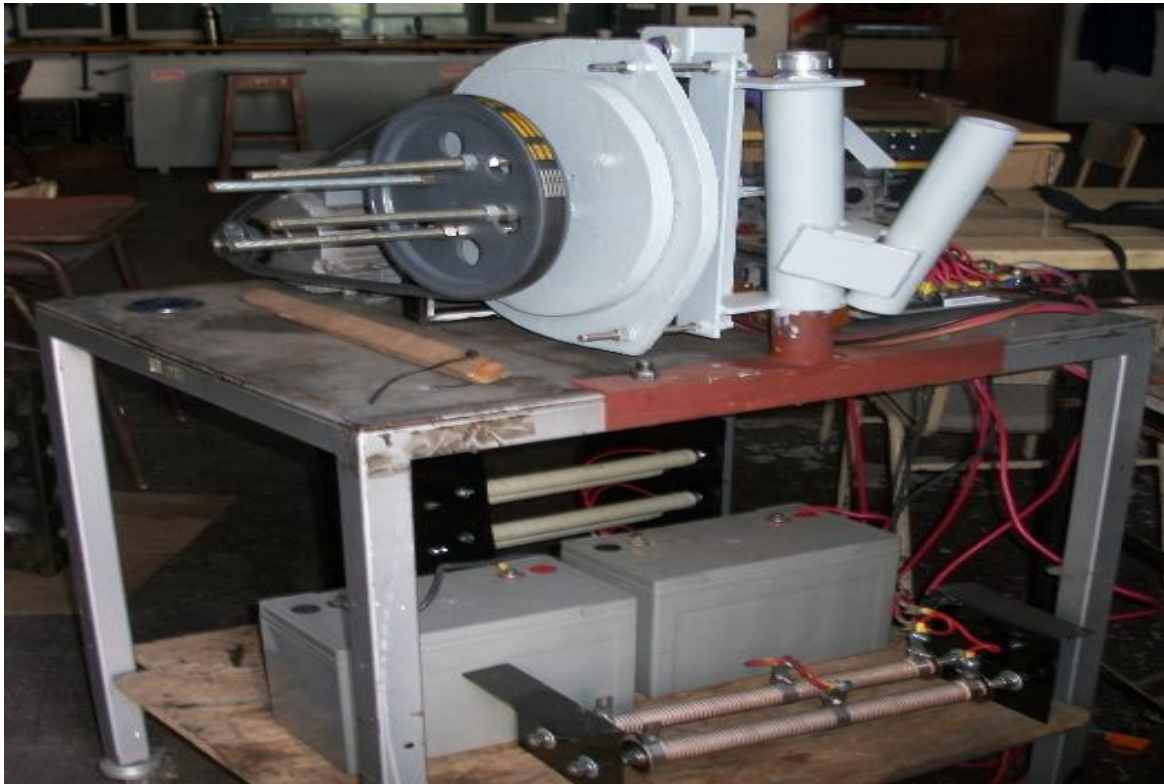
Tabla 3, Medidas eléctricas con reducción 3.5:1.

R Carga [Ω]	rpm Gen.	F.Var. [Hz]	Fgen. [Hz]	Vo [V]	Io [A]	I. Fase Gen. [A]	Per. Gen. [W]	S	Pin [W]	Po [W]	Pér. Mot. [W]	Perd. Conv. [W]	Pot. Tot. [W]	η Gen.
Vacio	270	31.8	27	28.1	0.00	0.00	0.00	0.007	200	0	1.32	0.0	179	
4	300	36.1	30.08	28.1	7.03	5.74	21.3	0.028	483	197	13.38	20.0	418	0.91
2	309	40.4	30.9	28.1	14.05	11.47	85.5	0.105	794	395	83.47	41.0	772	0.84
1.34	345	45.2	34.5	28.1	20.97	17.12	190.5	0.107	1175	590	125	62.0	1151	0.77
1	385	55.3	38.5	28	28.00	22.86	339.6	0.185	1731	784	321	82.0	1743	0.72

En la Figura 11 se presenta el rendimiento del generador PMSG, como las RPM de este en función de las potencias desarrolladas.

7. ANÁLISIS ROTOR PASO FIJO

Para la prueba del rotor se presenta el inconveniente de que el túnel de viento con que se cuenta no admite un barrido de área del rotor construido, motivo por el cual las medidas de desempeño, con posterior levantamiento de curva de potencia y análisis de desempeño en zona de carga parcial y total, se realizarán en campo. Para ello, dado su costo, se está desarrollando un adquirente de datos (Datalogger) de manera de coleccionar variables eléctricas (potencia) en concordancia con la lectura de variables de recurso eólico según norma [10].



a)



b)

Figura 10 Banco de prueba generador PMSG, a) Vista configuración completa, b) Vista detalles reducción.

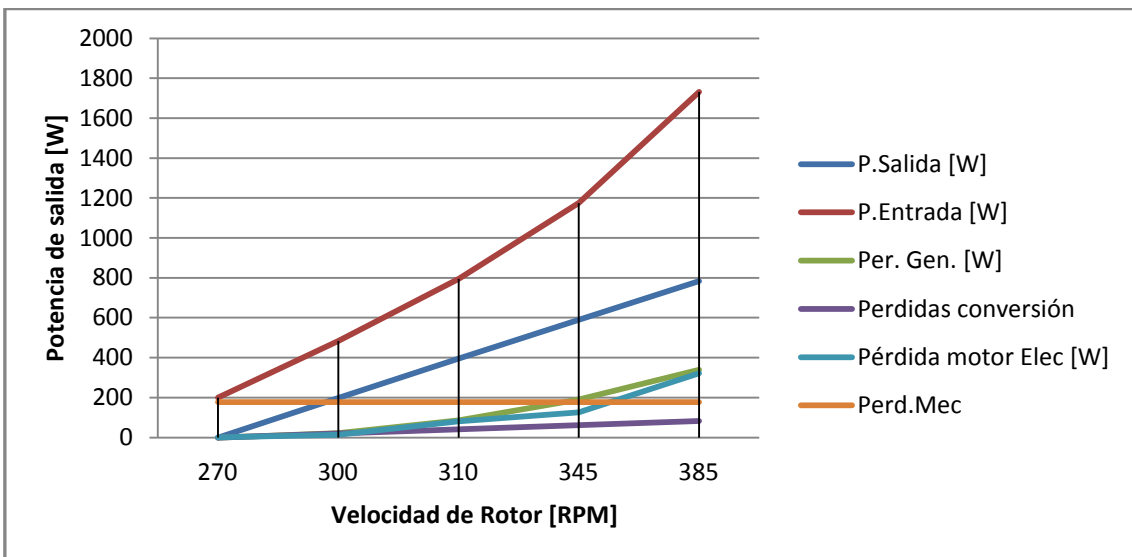
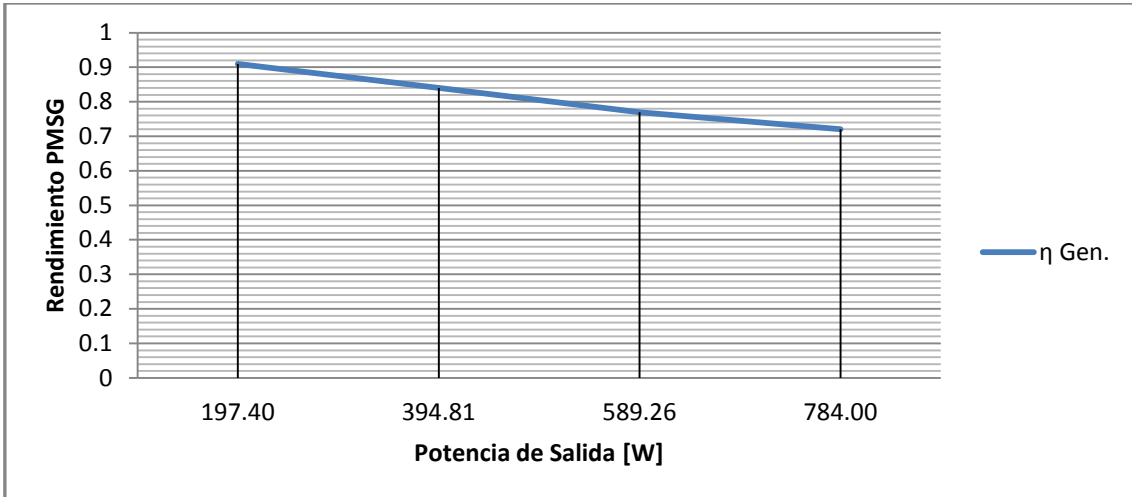


Figura 11, Graficas de desempeño PMSG con reducción.

8. CONCLUSIONES

Los cálculos teóricos del PMSG, aunque aproximados y basados en experiencias anteriores, fueron satisfactorios respecto de los resultados obtenidos en el banco de prueba.

En la primera etapa de evaluación aunque se utiliza un variador de velocidad y motor en potencias de más del doble del aerogenerador (1500W), no es posible llegar a la nominal de este último (700W). Se debe a que el acople directo entre el motor y el generador hace trabajar al primero fuera de su punto óptimo de trabajo (1500rpm), lo cual produce grandes pérdidas por deslizamiento limitando en potencia al variador de velocidad. Para solucionar el problema se adoptó una reducción 3.51:1 y se practicarán nuevamente todas las mediciones pudiendo llegar a potencia superiores a la nominal prevista sobre una carga (784W).

Las medidas obtenidas a través del esquema mostrado en Figura 10 indican un desempeño aceptable del generador PMSG en conjunto con baterías, Dump Load, sistema de control eléctrico y diferentes disposiciones de carga.

El rendimiento del generador, aunque pudiendo ser mayor, entre un 70% y 90% es aceptable en las potencias de generación que se trabajan por debajo del kW.

Para evaluación final es necesario instalar el aerogenerador en campo, censar recurso eólico en torre meteorológica en conjunto con parámetros eléctricos dentro de un sistema de adquisición, obtener la curva de potencia de acuerdo a norma IEC y por último analizar desempeño del rotor con paso de pala fijo en zona de regulación de potencia.

Una vez finalizada la etapa anterior se reemplazará el rotor de paso fijo, para mismo PMSG, por el del control centrífugo repitiéndose nuevamente todas las medidas, de manera de permitir comparaciones de desempeño y obtener conclusiones del control centrífugo respecto del Stall según diferentes índices como mitigación de cargas aerodinámicas y producción de energía.

9. REFERENCIAS

- [1] Wu, B., Yongqiang, L., Zargari, N. & Kouro, S. (2011). Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.
- [2] Krause, P., Wasinczuk, O. & Sudhoff, S. (2002). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems (2da Ed.). New York: John Wiley and Sons, Inc.
- [3] Manwel, J.F., McGowan, J.G. & Rogers, A.L. (2002). Wind Energy Explained. University of Massachusetts, Amherst, USA: John Wiley and Sons, Inc.
- [4] Fitzgerald, A.E., Kingsley, Jr. & Stephen D. (2004). Maquinas Eléctricas. 6ta Edición. México: Mc Graw Hill.
- [5] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. & Bossanyi, E. (2001). Wind Energy Handbook. London: John Wiley and Sons, Ltd.
- [6] Ackermann, T. (2005). Wind Power in Power Systems. London: John Wiley and Sons, Ltd.
- [7] Rashid, M. (2001). Power Electronics Handbook. Canada: Academic Press.
- [8] Munteanu, I., Bratcu, A., Cutululis, N. & Seanga, E. (2008). Optimal Control of Wind Power Systems. London: Springer-Verlag London Limited.
- [9] Pao, L. & Johnson K. (2009). A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms. American Control Conference, St. Louis, USA.
- [10] International Electrotechnical Commission. (2005). IEC 61000-12-1, Wind Turbines, Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines.