

Turbina de Viento: Caracterización de Operación

Francisco M. González-Longatt

Resumen—En este artículo, inicialmente presenta el principio de operación general para las turbinas a viento empleadas como fuente de generación de electricidad. Las características más relevantes de las turbinas de viento de velocidad variable y velocidad fija son mostradas, mostrando todos los mecanismos posibles de conversión y para las configuraciones más empleadas en la actualidad se efectúa su comparación y mostrando sus ventajas y desventajas. Además, los fundamentos aerodinámicos de conversión son mostrados junto con los métodos de control de potencia. Finalmente una tabla con parámetros característicos de turbinas de viento disponibles comercialmente son presentados.

Índice de Términos— Generación eólica, turbinas de viento, control.

I. INTRODUCCIÓN

Como resultado del incremento en el interés ambientalista, el impacto de la generación de electricidad convencional esta siendo minimizado y esfuerzos son hechos para generar electricidad por medios menos agresivos al ambiente —fuentes renovables [1]. La principal ventaja de la generación de electricidad desde fuentes renovables son la ausencia de emisiones dañinas y la infinita disponibilidad de la fuente primaria que es convertida en electricidad [2]. Una vía para la generación de electricidad desde fuentes renovables es el uso de las turbinas de viento que convierten la energía contenida en los vientos a electricidad. Hasta este momento, la cantidad de potencia eólica integrada a los grandes sistemas de potencia solo cubre una pequeña parte de la carga total del sistema de potencia [3]. El resto de la carga del sistema, mayoritaria, es cubierta por plantas convencionales: térmicas, nucleares e hidroeléctricas. En este artículo se presenta inicialmente una descripción muy general del sistema de generación de turbina a viento, su clasificación considerando el régimen de velocidad de operación: velocidad fija y velocidad variable, y una comparación. La Sección II, presenta los fundamentos

aerodinámicos de la turbina de viento ideal y real, además de las ecuaciones de la potencia convertida desde el viento, la Sección III, presenta algunas consideraciones sobre el control de las turbinas de viento, y en la Sección IV se muestran algunas características relevantes de algunos modelos disponibles comercialmente de turbinas de viento.

II. SISTEMA DE GENERACIÓN CON TURBINA DE VIENTO

El principio de trabajo de una turbina a viento enfatiza en dos procesos de conversión, los cuales son llevados a cabo por sus principales componentes: el rotor, el cual extrae la energía cinética del viento y la convierte en torque mecánico en el eje. Y el sistema de generación, el cual convierte este torque en electricidad [4]. Este principio general de trabajo es mostrado en la Fig. 1.

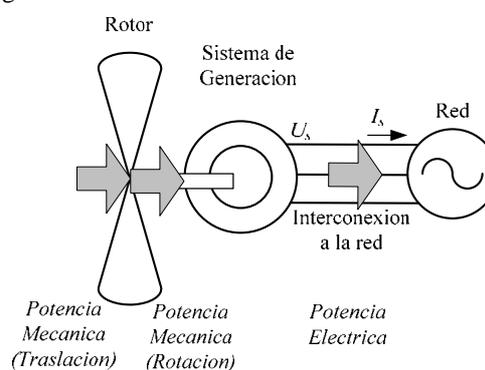


Fig. 1. Principio de trabajo general de un sistema de generación por turbina de viento

Aunque esto suene simple, una turbina de viento es un sistema complejo en el cual el conocimiento de varias áreas de ingeniería aerodinámica, mecánica, civil, eléctrica y control están juntas. Además el viento es un recurso altamente variable que no puede ser almacenado y como tal debe ser explotado.

A. Clasificación

Tomando en consideración la velocidad rotacional, las turbinas de viento pueden ser divididas en dos tipos: unidades de velocidad rotacional fija y de velocidad rotacional variable [5]. En las maquinas de velocidad fija, el generador es directamente acoplado a la red principal de suministro. La frecuencia de la red determina la velocidad rotacional del generador y entonces la del rotor. La baja velocidad de rotación del rotor de la turbina es trasladada a la velocidad

Manuscrito terminado el 30 de Enero de 2005.

F.G.L está con la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, Carretera Nacional Maracay-Mariara, Decanato de Maracay, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Mérida, Estado Aragua, Venezuela, Tlf. +58-243-5546954, Fax: +58-243-5546921, E-mail: fglongatt@ieee.org.

Candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Caracas, Distrito Capital, Venezuela, Tlf. +58-414-4572832, E-mail: flongatt@elecisc.ing.ucv.ve.

rotacional del generador por una caja convertidora de velocidad con una relación de transmisión dada. La velocidad del generador depende el número de pares de polos y de la frecuencia eléctrica de la red [3].

En las máquinas de velocidad variable, el generador es conectado a la red a través de un convertidor electrónico de potencia, o el devanado de excitación del generador son alimentados por una frecuencia externa desde un inversor. La velocidad de rotación del generador y entonces la del rotor esta desacoplado de la frecuencia de la red, el rotor puede operar con velocidad variable ajustada para la situación actual de velocidad de viento [3].

La mayoría de los sistemas existentes pueden ser clasificados en la siguiente forma [3]:

1. Turbinas de viento con velocidad rotacional fija directamente acoplados a la red.
 - a. Turbinas de viento con generador asincrónico.
 - b. Turbinas de viento con generador sincrónico.
2. Turbinas de viento con velocidad rotacional parcial o totalmente variable.
 - a. Generador sincrónico o asincrónico con convertidor en el circuito principal de potencia.
 - b. Generador asincrónico con control de deslizamiento.
 - c. Generador asincrónico con convertidores en cascada sobre u subsincronico

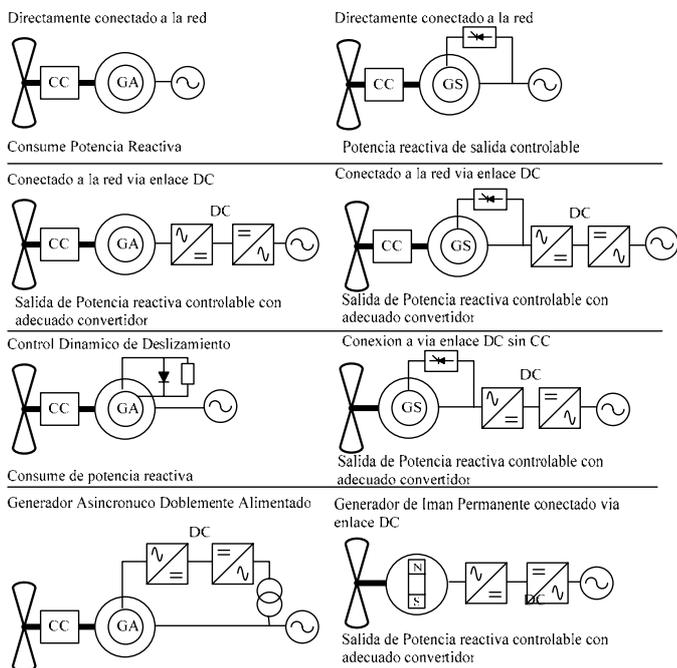


Fig. 2. Diferentes tipos de sistemas de generación de turbinas de viento [3]

Actualmente, tres principales tipos de turbinas de viento están en el mercado. La principal diferencia entre los tres conceptos esta en el sistema de generación y la vía en la cual la eficiencia aerodinámica del rotor es limitada durante vientos de alta velocidad. Casi todas las turbinas de viento instaladas en el presente usual uno de los siguientes sistemas [4], mostrados en la Fig. 3.

- Generador de inducción con rotor de jaula de ardilla.
- Generador de inducción doblemente alimentado (rotor bobinado).
- Generador sincrónico directamente impulsado.

El primer sistema de generación es el mas antiguo de todos. Este consiste de un generador de inducción con rotor de jaula de ardilla convencional directamente acoplado a la red. El deslizamiento, y de ahí que la velocidad del rotor del generador de jaula de ardilla varié con el valor de potencia generado. Esas variaciones en la velocidad del rotor, sin embargo son muy pequeñas, aproximadamente 1 a 2%. De tal modo que este tipo de turbina es normalmente referida como una turbina de *velocidad constante* o de *velocidad fija*. Se debe mencionar que el generador de inducción de rotor del tipo jaula de ardilla puede frecuentemente trabajar a dos diferentes (pero constantes) velocidades por el cambio en el numero de polos del devanado estatorico.

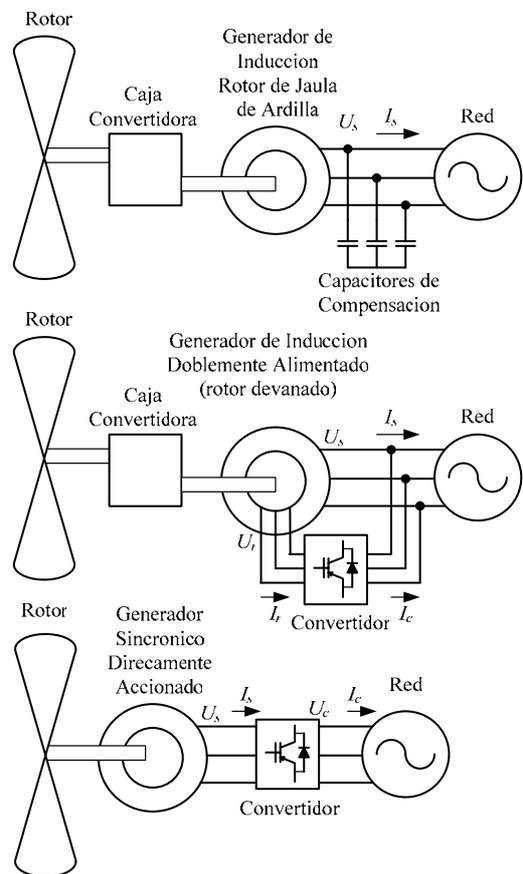


Fig. 3. Sistemas de generación empleados en turbinas de viento

Un generador de inducción siempre consume potencia reactiva. En la mayoría de los casos, esto es indeseable, particularmente en el caso de de grandes turbinas de viento en redes débiles. De tal modo, el consumo de potencia reactiva del generador de inducción con rotor de jaula de ardilla es casi siempre parcial o completamente compensado por capacitares a fin de lograr un factor de potencia cercano a uno [4]. En los otros dos sistemas de generación presentados en la Fig. 3 son sistemas de velocidad variable. Estos son usados en turbinas

de viento de velocidad variable. Para permitir la operación a velocidad variable, la velocidad mecánica del rotor y la frecuencia eléctrica de la red deben ser desacoplados [5]. Para este fin, la electrónica de potencia es empleada. En generadores de inducción doblemente alimentados, un convertidor de voltaje back-back alimenta el devanado trifásico del rotor. De este modo, la frecuencia mecánica y eléctrica en el rotor están desacopladas y la frecuencia del estator y el rotor pueden coincidir, independientemente de la velocidad mecánica del rotor. En el generador sincrónico directamente acoplado, el generador es completamente desacoplado de la red por un convertidor electrónico de potencia [4]. El lado de la red de este convertidor es un convertidor alimentado por fuente de voltaje, por ejemplo un puente de IGBT. Del lado del generador puede ya sea un convertidor alimentado por fuente de o un puente rectificador. El generador es excitado ya sea usando un devanado de excitación o imanes permanentes [5].

Adicionalmente a estos tres sistemas de generación, hay otras variantes. Uno que debe ser mencionado aquí es el sistema de velocidad semi-variable. En una turbina de velocidad semi-variable, un generador de inducción en el cual la resistencia del rotor pueda ser variado por medio de electrónica de potencia es usado. Por el cambio de la resistencia del rotor, es posible modificar la característica de velocidad/toque del generador y la velocidad transitoria del rotor puede ser llevada a un incremento de 10% de la velocidad nominal [5]. En este sistema de generación, un capacidad limitada de velocidad variable es lograda con un relativamente bajo costo. Otras variaciones son un generador de inducción con rotor de jaula de ardilla o un generador sincrónico de alta velocidad que es conectado al eje de la turbina a través de una caja mecánica convertidora y la red por medio de un convertidor electrónico de potencia a plena capacidad del generador. Los generadores sincrónicos directamente acoplados a la red, los cuales son usando en la mayoría de las plantas de generación convencionales, no son aplicados en las turbinas de viento [5].

Aunque las turbinas de viento con los generadores sincrónicos conectados directamente a la red han sido construidas en el pasado, este tipo de generador no ha sido aplicado más. Su característica dinámica desfavorable cuando son usados en combinación con una fuente primaria fluctuante causa altas carga estructural. Además, las turbinas de viento son presuntamente conectadas y desconectadas de la red y un generador sincrónico debe ser sincronizado antes de ser conectado a la red. Esto es complicado cuando se emplea una fuente primaria que es no controlable.

B. Comparación

Cada uno de los tres principales sistemas de generación posee sus ventajas y desventajas. La ventaja de un sistema de velocidad constante es que es relativamente simple. De tal modo, que los precios de lista para las turbinas de viento de velocidad constante tienden a ser mas bajos que los de

velocidad variable. Sin embargo, las turbinas de viento para velocidad constante deben ser mecánicamente mas robustos que las turbinas de viento de velocidad variable. Debido a que la velocidad del rotor no puede ser variada, las fluctuaciones en la velocidad del viento son trasladados directamente en fluctuaciones del torque actuante en el eje, causando cargas estructurales mayores que con la operación a velocidad variable [4]. Esto parcialmente cancela la reducción de costos logrado por el uso de generadores relativamente más económicos. Además, el ruido puede ser un problema, debido a que los niveles de ruido están fuertemente relacionados con la velocidad de giro de la pala, y de ahí a la velocidad rotacional del rotor, la cual por supuesto no puede ser cambiada en las turbinas de velocidad constante. Este problema es, sin embargo, aliviado usando generadores cuyo numero de pares de polos pueden ser cambiados, permitiendo a la turbina girar a una mas baja velocidad rotacional cuando la velocidad del viento es menor. La principal ventaja de la operación a velocidad variable es que mas energía puede ser generada para un régimen de velocidad de viento específico. Aunque la eficiencia eléctrica decrece, debido a las pérdidas en la electrónica de potencia, que son esenciales para la operación a velocidad variable, hay también una ganancia en la eficiencia aerodinámica debido a la operación a velocidad variable.

La ganancia en la eficiencia aerodinámica excede la pérdida en la eficiencia eléctrica, alcanzándose una eficiencia total más alta [6], [7]. También hay menos estrés mecánico, debido a que el rotor actúa como un volante (almacenando energía temporalmente), reduciendo las variaciones del torque en el eje. Los problemas de ruido también son reducidos también, debido a que la turbina gira a baja velocidad cuando hay poco viento. La principal desventaja de los sistemas de generación de velocidad variable es que ellos son más costosos. Sin embargo, pueden también proveer un mayor ahorro en otros subsistemas de la turbina tales como fundaciones livianas en aplicaciones fuera de habia (*offshore*), limitando el incremento en el costo total [4]. Además, el precio de los componentes de electrónica de potencia está descendiendo rápidamente. Cuando se compara los dos diseños de velocidad variable, se puede concluir que la ventaja del concepto basado en el generador de inducción doblemente alimentado son que generadores mas o menos estándares y uno mas pequeño y por ello convertidores de potencia mas económicos pueden ser usados [9]. Una desventaja del concepto del generador de inducción doblemente alimentado cuando se compara con el directamente accionado por turbinas de viento variable es que ellos siguen necesitando un mantenimiento más intensivo y cajas convertidores potencialmente no confiables [4].

Las desventajas del diseño directamente accionado son la gran, pesada y complejo generador de anillo deslizantes y el más grande convertidor de potencia, además de que toda la potencia generada tiene que pasar a través del convertidor, comparado con el alrededor de 1/3 de la potencia en el caso

basado en el generador de inducción doblemente alimentado con turbina de viento. Las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de fuente de generación son mostradas en la Tabla 1.

TABLA I
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN CON TURBINAS DE VIENTO

	Velocidad constante	Doblemente alimentado	Directamente acoplado
	Simple y Robusto	Menos esfuerzo mecánico	Lemos esfuerzo mecánico
	Eléctricamente eficiente	Menos ruidoso	Menos ruidoso
Fortalezas	Generador estándar	Generador estándar	Sin caja convertidora
		Menor capacidad del convertidor	
	Aerodinámica menos eficiente	Eléctricamente menos eficiente	Eléctricamente menos eficiente
	Caja convertidora incluida	Caja convertidora incluida	Convertidor de mayor capacidad requerido
Debilidades	Estrés mecánico	Costoso	Costoso
	Ruidoso		Generadores mas pesados y grandes Generador complejo

III. FUNDAMENTOS AERODINÁMICOS

A. Potencia de Salida de una Turbina Ideal

La energía cinética en una pieza de masa de aire m , fluyendo a una velocidad u es dada por [2]:

$$U = \frac{1}{2}mu^2 = \frac{1}{2}(\rho Ax)u^2 \quad (1)$$

donde A es la sección transversal en m^2 , ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , y x es el espesor de la pieza en m . La potencia del viento P_w , es la derivada en el tiempo de la energía cinética.

$$P_v = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2}(\rho A)u^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2}(\rho A)u^3 \quad (2)$$

B. Fuerzas Aerodinámicas sobre una Pala

El flujo de aire estacionario sobre un perfil produce dos fuerzas: un asenso perpendicular al flujo de aire, y una fuerza arrastre en la dirección del flujo de aire como se muestra en la Fig. 4. La existencia de la fuerza de ascenso depende del flujo laminar sobre el perfil, lo cual significa que el aire fluye suavemente sobre los dos lados del perfil. Si existe flujo turbulento más que laminar, habrá poca o ninguna fuerza de ascenso. El aire que fluye por encima del perfil posee una velocidad mayor debido a la mayor distancia de viaje, y este incremento en velocidad causa un suave decremento en la presión. La diferencia de presión entre ambos lados del perfil, es lo que produce la fuerza de asenso que es perpendicular a la dirección de; flujo de aire. El ángulo de incidencia θ o ángulo de ataque es el ángulo que forma la cuerda del perfil con la velocidad aparente del viento.

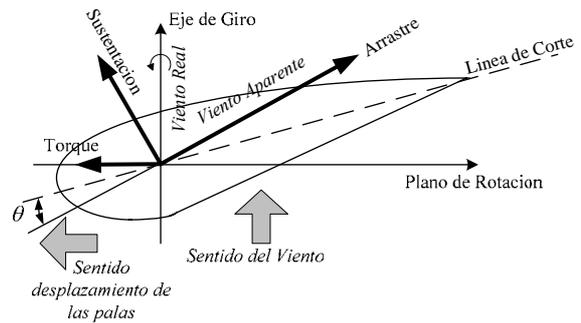


Fig. 4. Fuerzas que aparecen en una pala de la turbina de viento

C. Potencia de Salida de una Turbina Real

La fracción de potencia extraída desde el viento por una turbina de viento práctica es usualmente dada por el símbolo C_p , que es conocido como coeficiente de desempeño [2], [4], [5], [8], [9].

$$P_w = C_p(\lambda, \theta) \frac{1}{2} \rho A_r u^3 = C_p P_v \quad (3)$$

El coeficiente de eficiencia no es constante, sino que varía con la velocidad del viento v_w , la velocidad rotacional v_r , de la turbina, y los parámetros de la pala como el ángulo de ataque λ , y ángulo de la pala. Cuando la velocidad rotacional es cambiada, $R\omega_m$ cambia y cauda que el ángulo de ataque cambie. Esto predice el cambio en C_p . Es conveniente para propósitos de diseño tener una simple curva para C_p , desde la cual el efecto en el cambio de la velocidad rotacional y la velocidad del viento puedan ser determinados. Esto significa que el cambio en la velocidad rotacional debe de algún modo ser combinando en una sola variable para la cual una sola curva puede ser debitada. Experimentos muestran que la variable única es el TSR, la velocidad periférica específica (Tip Speed Ratio) que es el cociente de la velocidad periférica de la pala y la velocidad del viento [2], [4], [5].

$$\lambda = TSR = \frac{R\omega_p}{v_w} \quad (3)$$

Siendo R el máximo radio de la turbina giratoria en m , y ω_p la velocidad angular de la turbina en Rad./seg y v_w , es la velocidad del viento no perturbado en m/seg .

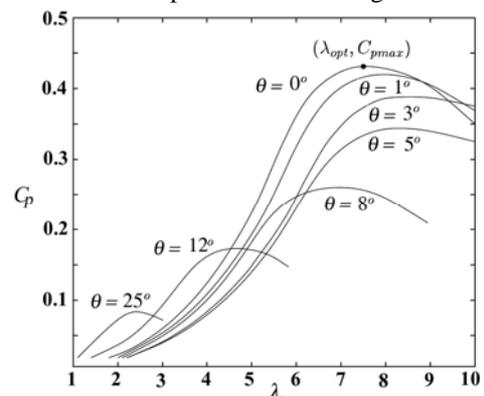


Fig. 5. Relación C_p , λ , θ , típica

La Fig. 5 corresponde a una turbina típica de eje horizontal. Se evidencia que para un viento dado, la potencia máxima se obtiene en el punto $(\lambda_{opt}, C_{pmax})$. El valor máximo teórico del coeficiente de potencia es conocido como el *límite de Betz*, y es 0.593.

IV. CONTROL DE LAS TURBINAS DE VIENTO

Los principales objetivos de los sistemas de control de las turbinas a viento son:

- Reducción de cargas mecánicas en la turbina y en el sistema de transmisión.
- Aprovechamiento máximo de la energía cinética del viento.
- Reducción de las oscilaciones de potencia Eléctrica y voltaje en el punto de conexión común.

Cuando la velocidad del viento se incrementa por encima de la velocidad nominal, la potencia generada no puede ser incrementada mas, debido a que esto llevaría a la sobrecarga del generador y/o, si esta presente, el convertidor. De tal modo, que la eficiencia aerodinámica C_p , debe ser reducida, a fin de limitar la potencia extraída desde el viento a la potencia nominal del sistema de generación. Esto corresponde a un ajuste de C_p , el cual puede ser obtenido de dos modos [5].

El primera vía, es diseñar las palas del rotor de modo tal que su eficiencia inherentemente disminuya con incrementos de la velocidad por encima de la nominal. Este enfoque es denominado limitación de potencia por pérdida aerodinámica o control por pérdida (*stall control*). En este caso, los sistemas de control no activos son aplicados para reducir el ángulo de paso. La segunda posibilidad para reducir la eficiencia aerodinámica del rotor es rotar las palas fuera del viento por medio del uso de mecanismos hidráulicos o motores eléctricos. Este enfoque es denominado control del ángulo de paso (*pitch control*). En contraste con el control de pérdida, el control de ángulo de paso, requiere sistemas de control activos para girar las palas. Una combinación de los dos enfoques es el control activo de pérdida (*active stall control*), el cual algunas veces es empleado en grandes turbinas de viento con velocidad fija. Con este enfoque, las palas son giradas en la dirección opuestas como con el control de ángulo de paso. Esto causa el denominado efecto de pérdida profunda. El ángulo de rotación es menor que en el caso del control de ángulo de paso y las palas son girados en un numero discreto de paso, en vez que en el caso del control de paso, donde el ángulo de la pala es variado en forma continua [4].

En los sistemas de turbinas viento de velocidad fija, existen dos métodos principales de control [8]:

- Control de entrada en pérdida aerodinámica.
- Control por variación de paso de la pala.

En las turbinas de viento con velocidad variable se pueden seguir dos esquemas principales de control [9]:

- *Control de Torque*. A partir de la velocidad del viento, se obtiene el torque correspondiente en la curva característica de torque-velocidad. Este torque se toma directamente

como referencia para el sistema de control.

- *Control de velocidad*. A partir de la velocidad del viento medida por un anemómetro, se obtiene la velocidad de referencia. La velocidad es controlada por un lazo externo al control de toque.

La Fig. 6, presenta las curvas resultantes de potencia versus velocidad del viento características para estas estrategias de control.

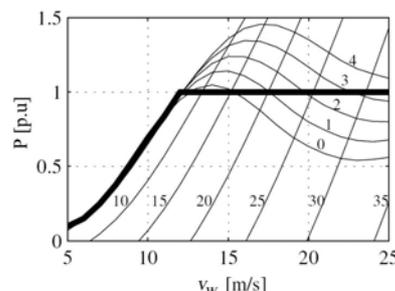


Fig. 6. Control aerodinámico de potencia, la línea delgada representa un sistema de velocidad fija con diferentes ángulos de paso pero fijo, la línea gruesa representa un sistema regulado por ángulo de paso.

TABLA 2
COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE CONTROL DE POTENCIA

Tipo de Control	Ventajas	Desventajas
Entrada en pérdida	Simplicidad Palas fijas	Peor aprovechamiento a vientos altos
Angulo de pala	Mejor aprovechamiento a vientos altos	Mas caro. Averías del mecanismo

V. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS

En la Tabla 3, se muestran las características típicas de algunos generadores comercialmente disponibles en el mercado.

TABLA 3
COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE CONTROL DE POTENCIA

Tipo	Potencia	Concepto	Regulación	Revoluciones (rpm), diámetro rotor
Enercon E-33	330kW	Generador sincrónico directamente accionado, sin caja convertidora	Control de ángulo de paso	18-45 rpm, 33.4m
Enercon E-48	800kW	Generador sincrónico directamente accionado, sin caja convertidora	Control de ángulo de paso	16-32 rpm, 48m
Enercon E-70	2000 kW	Generador sincrónico directamente accionado, sin caja convertidora	Control de ángulo de paso	22-80 rpm, 71 m
Enercon E-112		Ring Generator directamente accionado, sin caja convertidora	Control de ángulo de paso	8-13 rpm, 114m
General Electric GE 2.3	2300 kW	Generador asincronico con caja convertidora y convertidor de potencia con IGBT	Control de ángulo de paso	5-14.9 rpm, 94m
General Electric GE 2.5	2500 kW	Generador asincronico con caja convertidora y convertidor de potencia con IGBT	Control de ángulo de paso	5-16.5rpm, 88m
General Electric GE 2.7	2700 kW	Generador asincronico con caja convertidora y convertidor de potencia con IGBT	Control de ángulo de paso	6-18rpm, 84m
General Electric GE- 3.6s	3600 kW	Generador asincronico doblemente alimentado, caja convertidora, convertidor de frecuencia PWM de IGBT	Control de ángulo de paso	8.5-15.3 rpm
Repower MD 77	1500 kW	Generador asincronico doblemente alimentado, caja convertidora, convertidor de frecuencia PWM de IGBT	Control de ángulo de paso y de velocidad del rotor	9.7-17.3 rpm, 77m
Repower MM70	2000 kW	Generador asincronico doblemente alimentado, caja convertidora, convertidor de frecuencia PWM de IGBT	Control de ángulo de paso y de velocidad del rotor	10-20 rpm,
Repower M5	5000 kW	Generador asincronico doblemente alimentado (6polos), caja convertidora, convertidor de	Control de ángulo de paso y de velocidad	6.9-12.1rpm, 126m

Genesys 600	1500 kW	frecuencia PWM de IGBT Generador sincrónico de imán permanentes, con convertidor de frecuencia y sin caja convertidor de velocidad	del rotor Control de ángulo de paso	22-32rpm
Wind World W-4500/750	750 kW	Generador asincrónico con convertidor de frecuencia	Control de pérdidas	16-30rpm
Vestas-63	1500 kW	Generador asincrónico con regulación dinámica de deslizamiento	Control de ángulo de paso	21-23rpm.
Nordex N-90	2300 kW	Generador asincrónico doblemente alimentado (6polos), caja convertidora, convertidor de frecuencia de IGBT		9,6-16,9rpm, 90m

VI. CONCLUSIONES

Este artículo fue orientado a la divulgación general del principio de operación de las turbinas de viento empleados para la generación de electricidad. Se muestra la clasificación típica de los sistemas de conversión de energía del viento: velocidad fija y velocidad variable, además de evidencian las características mas relevantes de cada uno de estos. Además, este artículo muestra todas las posibles configuraciones para generadores (sincrónico, asincrónico, generador de imán permanente) y convertidores (dc/dc, dc/ac). Para las configuraciones más empleadas en la actualidad se efectúa su comparación y mostrando sus ventajas y desventajas: generador de inducción con rotor de jaula de ardilla, generador de inducción doblemente alimentado (rotor bobinado), generador sincrónico directamente impulsado. Algunas nociones elementales referentes a los fundamentos aerodinámicos de conversión son mostrados junto con los métodos de control de potencia son mostrados y finalmente una tabla con parámetros característicos de turbinas de viento disponibles comercialmente son presentados.

REFERENCIAS

- [1] Danish Wind Industry Association [Online]. Available: www.windpower.org
- [2] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, and W. L. Kling, "General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations". IEEE Trans. Power on Systems, Vol. 18, No. 1, February, 2003.
- [3] N. Hatzigiorgiou, M. Donnelly, S. Papanthassiou, J.A. Pecos Lopes *et al.* "Modeling of New Forms of Generation and Storage". CIGRE Technical Brochure TF 38.01.10, November 2002.
- [4] J. G. Slootweg. "Wind Power. Modeling and Impact on Power System Dynamics". PhD Thesis. University of Delft. December, 2003.
- [5] T. Petru. "Modeling of Wind Turbines on Power System Studies". PhD Thesis, Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Göteborg, Sweden, December, 2003.
- [6] D.S. Zinger, E. Muljadi, "Annualized wind energy improvement using variable speeds", IEEE Transactions on Industry Applications, v.33, n.6, pp.1444-1447, November/December 1997.
- [7] R. Hoffmann, P. Mutschler, "The influence of control strategies on the energy capture of wind turbines", Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Rome, 8-12 October 2000, v.2, pp.886-893.
- [8] R. Barnowski, G. Bettenwort, B. Hampo, E. Ortjohann, B. Voges, and J. Voss. "Simulation of the dynamic interaction between wind energy and the electric power grid". European Union Wind Energy Conference, May 1996.
- [9] R. Peña, J. C. Clare, and G. M. Asher. "A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation". IEE Proceedings on Electronics Power Applications, 145(5), Sept, 1996.