

DISEÑO DE UN SISTEMA DE PASO VARIABLE PARA UN GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA

Andrés Martínez del Pezzo, Alejandro Martínez, Alejandro Patanella,
Ana Scarabino⁽¹⁾, Marcos Actis

*Departamento Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata,
Calle 116 entre 47 y 48, (1900) La Plata. E-mail⁽¹⁾: scarabino@ing.unlp.edu.ar*

RESUMEN

En este trabajo se describe el diseño de un sistema de ángulo de paso variable de pala, para ser utilizado en un generador eólico de baja potencia de imán permanente y sin caja multiplicadora, de manera de poder utilizarse como control de potencia mecánica de entrada al generador eléctrico. El sistema de paso variable fue diseñado bajo las hipótesis de simplicidad de funcionamiento y construcción, además de su bajo peso. Para este diseño se eligió un sistema de leva seguidor, el cual puede ser diseñado para ser instalado en un lugar reducido, sin tener un costo excesivo de fabricación y eliminando los juegos o ángulos muertos, ya que no existen engranajes. El sistema mecánico es accionado por un motorreductor de corriente continua y es controlado por un sensor óptico, el cual alimenta un microcontrolador, que a su vez, también recibe información de la carga de las baterías y de la velocidad del viento de la corriente libre. Con esos tres parámetros de entrada se debe diseñar el algoritmo de control. El sistema de cambio de paso permite mantener aproximadamente constantes las RPM y torque aerodinámico del rotor, en caso de velocidades de viento superiores a la velocidad de diseño, haciendo que el generador eléctrico trabaje en su punto óptimo.

Palabras clave: control por paso variable, generador eólico, diseño mecánico.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de un sistema de control en aerogeneradores es tan antigua como el origen de los mismos. El principal objetivo del sistema de control es limitar la generación de potencia y las RPM. en condiciones de vientos intensos. A medida que las turbinas evolucionaron, los requerimientos de control aumentaron y los mecanismos ganaron en complejidad. En grandes turbinas, los objetivos del sistema de control incluyen mayor captación de energía dentro de las condiciones y límites previstos, la reducción de cargas mecánicas y estructurales sobre el sistema y la calidad de la potencia generada, para poder cumplir especificaciones estándar de interconexión [1].

Entre los mecanismos de control aerodinámicos, el sistema de paso variable es tal vez el más extendido [2]. Consiste en cambiar el ángulo de incidencia (paso) de toda la pala, y permite mantener el punto de operación (torque y RPM) constante ante variaciones en la velocidad del viento, sobre todo cuando esta excede el valor nominal V_n .

En el caso de nuestra turbina de 1.5 kW, la estrategia de control será de paso variable-RPM constantes para vientos que excedan la velocidad nominal, ya que al tener acoplamiento directo al generador eléctrico, esto permitirá trabajar en el punto de diseño (Torque-RPM) en todo el rango de velocidades de viento comprendidas entre la nominal y la velocidad de corte. Para velocidades de viento menores a V_n , la operación será del tipo paso variable-RPM variables, para maximizar la captación de energía.

En este trabajo se describe el diseño de un sistema de ángulo de paso variable de pala, para ser utilizado en un generador eólico de baja potencia de imán permanente y sin caja multiplicadora [3] [4], de manera de poder utilizarse como control de potencia mecánica de entrada al generador eléctrico. Este aerogenerador fue diseñado y está siendo construido por docentes y alumnos pertenecientes al Área Departamental Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata. Hasta el momento se han construido el cubo de la hélice, el generador eléctrico de diseño propio [5] y las palas. El sistema de paso variable fue diseñado bajo las hipótesis de simplicidad de funcionamiento y construcción, además de su bajo peso. Si bien este tipo de mecanismos de control no suele ser utilizado en generadores de baja potencia debido a su costo y mayor complejidad, en este caso será implementado por tratarse de un generador eólico pensado como un recurso para docencia e investigación, con los objetivos adicionales de formar recursos humanos y aumentar el conocimiento en esta rama de la ingeniería. El sistema mecánico es accionado por un motoreductor de corriente continua y es controlado por un sensor óptico, el cual alimenta un microcontrolador, que a su vez también recibe información de la carga de las baterías y de la velocidad del viento de la corriente libre. funcionando el equipo completo para los primeros meses del 2008.

2. TEORÍA

Idealmente, la potencia generada en función de la velocidad de viento, responde a una curva de potencia ideal como la ilustrada en la Figura 1.

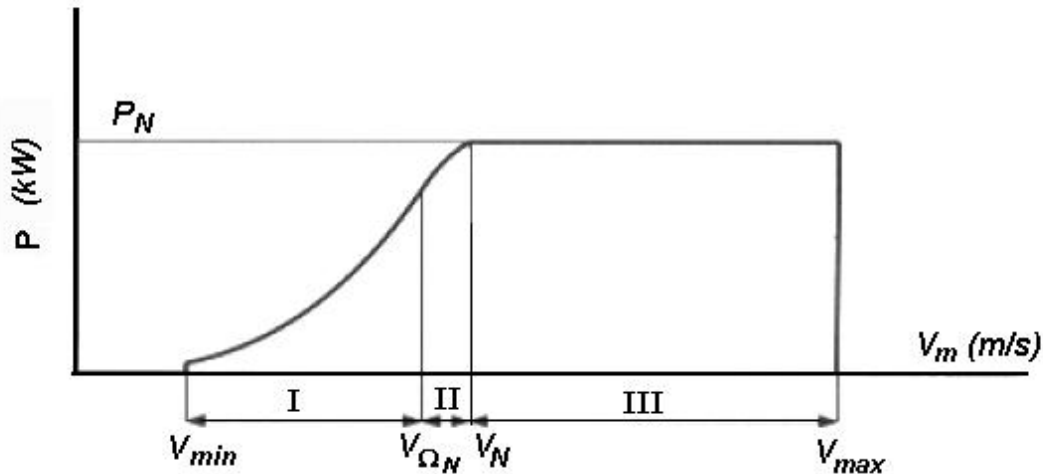


Figura 1: Curva ideal Potencia vs. Velocidad de viento para una turbina eólica

Se aprecia que la potencia suministrada por una turbina, dependiendo de la velocidad del viento, es:

- 0 si $V < V_{min}$ (velocidad de arranque o cut-in speed)
- Región I: aproximadamente proporcional a V^3 si $V_{min} < V < V_N$ (velocidad nominal)
- Región II: transición entre la curva de potencia óptima a bajas velocidades (I) y la región de potencia constante igual a la nominal (III)
- Región III: Potencia constante igual a la potencia nominal, si $V_N < V < V_{max}$ (velocidad de corte o cut-out speed)
- 0 si $V > V_{max}$ (la turbina se detiene para evitar daños en caso de vientos extremos)

El objetivo de nuestro sistema de control será maximizar la potencia en la región de velocidades entre V_{min} y V_N y mantenerla aproximadamente constante en la región entre V_N y V_{max} .

La Figura 2 (de [6]) muestra la cupla aerodinámica vs. RPM para distintas velocidades de viento, la curva de potencia constante = P_N y la correspondiente a los máximos coeficientes de potencia C_p , el que se define como

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^3 A}, \quad (1)$$

donde P es la potencia, V la velocidad del viento, ρ su densidad y A el área barrida por el rotor. La curva vertical muestra la zona de operación ideal a RPM constantes.

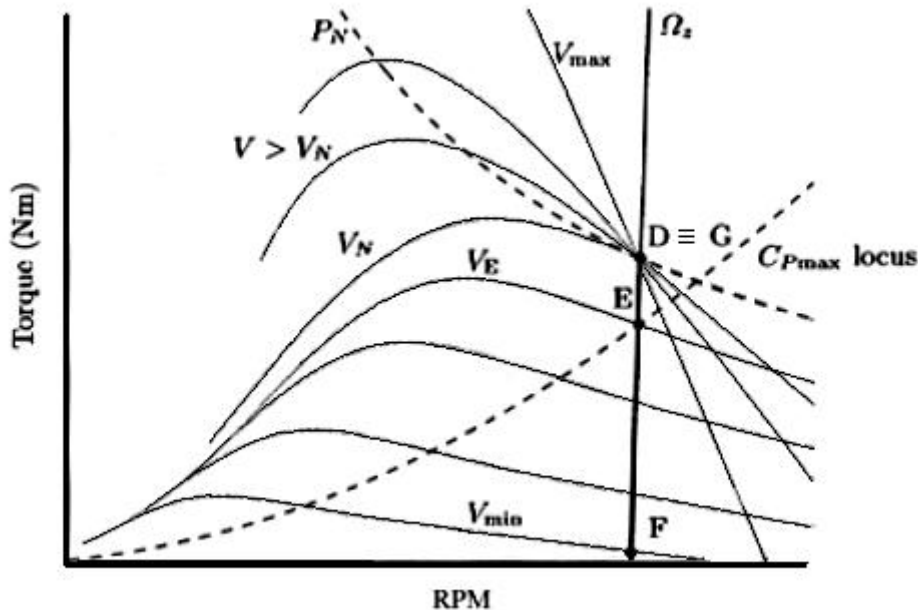


Figura 2: Curva de operación con control por paso variable- RPM constantes

3. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA

Para encarar el diseño de un sistema de paso variable para un generador eólico, una vez definida la filosofía y el alcance del proyecto, es necesario conocer las características de funcionamiento de la hélice y contar con un modelo teórico que permita estimar para la pala entera su intervalo de ángulos de funcionamiento y el de bandera, así como la potencia mecánica capaz de entregar. Todos estos parámetros se deben obtener en función de la velocidad de la corriente libre, que será la fuente de energía. De esta forma, en base a este modelo teórico se puede estimar en función de la velocidad de la corriente libre la curva de potencia, que es nuestro parámetro a regular. La potencia suministrada estará asociada a un ángulo de ataque, α , determinado a su vez por el ángulo de paso de la pala, l , como muestra la Figura 3. Este ángulo de ataque será el que regule la cupla transmitida al generador eléctrico, permitiendo mantener un régimen de potencia constante a velocidades mayores a la nominal. Para el cálculo de las fuerzas y cupla aerodinámica se usó un modelo aerodinámico clásico de teoría de cantidad de movimiento - elemento de pala ([7-8]). La Figura 3 muestra la velocidad

relativa del aire sobre un elemento de pala y las fuerzas aerodinámicas sobre el mismo. A partir de la fuerza en el plano de rotación puede calcularse la cupla o torque resultante, y el producto de este por la velocidad angular de rotación nos dará la potencia mecánica transmitida al generador eléctrico. Al ser de acoplamiento directo, sin ningún mecanismo multiplicador de RPM, la potencia mecánica no sufre pérdidas en la transmisión.

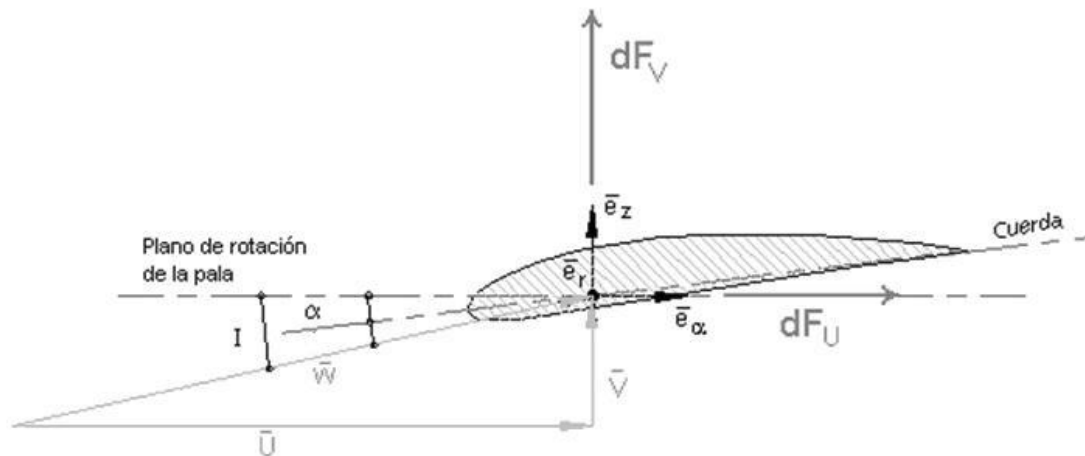


Figura 3: Velocidad relativa del viento sobre un elemento de pala, \bar{w} , ángulo de paso, α , y fuerzas aerodinámicas.

En cuanto al sistema de cambio de paso, como para cualquier diseño en ingeniería primero se debe definir que tipo de mecanismo se va a utilizar, por ejemplo con engranajes, tornillo sin fin, leva seguidor, etc. Para este diseño se eligió un sistema de leva seguidor, el cual puede ser diseñado para ser instalado en un lugar reducido, sin tener un costo excesivo de fabricación y eliminando los juegos o ángulos muertos, ya que no existen engranajes.

Luego de definir el tipo de mecanismo, éste debe ser dimensionado, no solo para soportar las cargas actuantes, sino también para cumplir con los requerimientos cinemáticos del sistema. De ésta forma se dimensiona la leva y se estiman los ángulos de apoyo con el plato para los regímenes de funcionamiento y bandera, o sea aquella posición para la cual la hélice no entrega cupla.

En la figura 4 se muestra un esquema del sistema que realiza el cambio de ángulo de la pala visto desde la raíz. En esta figura se puede observar que se utilizó una leva circular, de modo de simplificar la fabricación. El plato que aparece en la figura es esquemático, el real se puede ver en la figura 6. En la figura 4 también se muestran los ángulos entre la cuerda de la raíz y el plano de rotación, α , así como el ángulo de trimado del sistema, α_0 .

Luego de dimensionar y posicionar la leva es necesario calcular la carga que el seguidor debe soportar y transmitir, para de esta forma dimensionar el motoreductor a utilizar, y de ser necesario estudiar la posibilidad de instalar un sistema multiplicador de fuerzas para tal fin. De esta forma queda definida la cadena cinemática entre el motoreductor y el sistema de levas que comanda la rotación de cada pala, por lo cual ya es posible definir los parámetros cinemáticos de funcionamiento del motoreductor, el cual cumple el papel de actuador. En base a estos parámetros de funcionamiento y a las condiciones de trabajo óptimos de la hélice para cada condición de viento se puede diseñar el algoritmo de control del mecanismo, el cual puede estar comandado por un microprocesador programable, que a su vez utiliza la velocidad de la corriente libre y la lectura de la posición de las palas como parámetros de entrada.

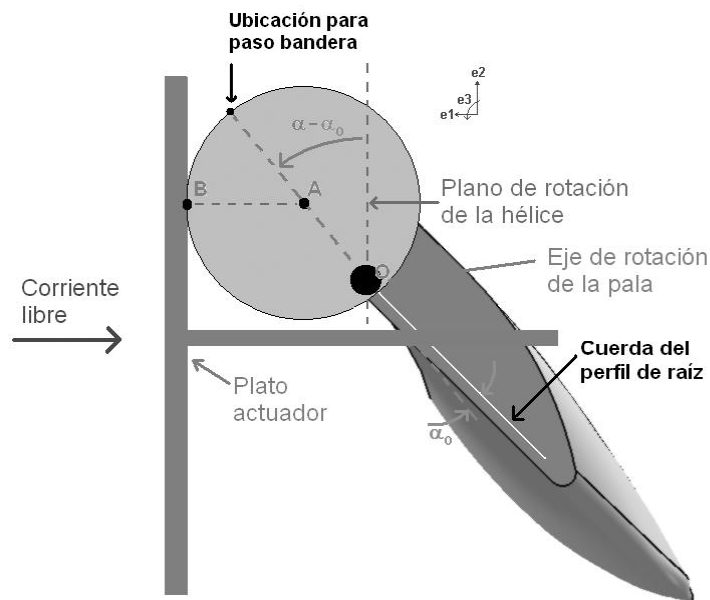


Figura 4: esquema del sistema que realiza el cambio de ángulo de la pala visto desde la raíz

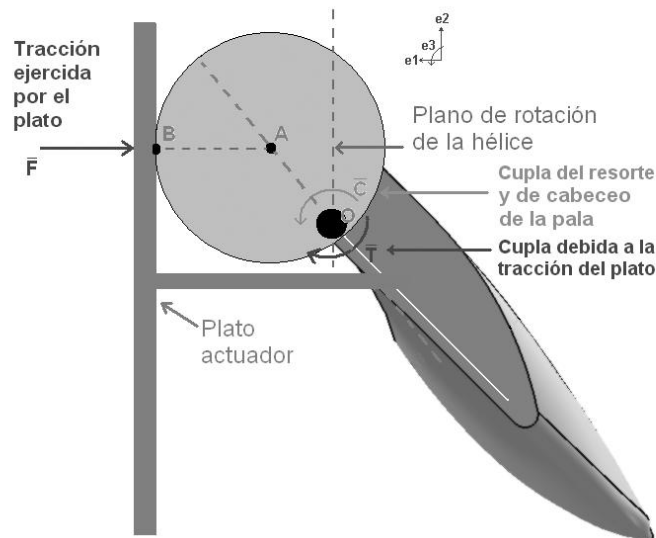


Figura 5: esquema de los esfuerzos ejercidos sobre el mecanismo de cambio de paso de pala.

En la figura 5 se muestra el mecanismo esquemático de cambio de paso de la pala, pero en éste caso, indicando fuerzas y cuplas actuantes, en base a las cuales se dimensionarán cada una de las partes que componen el conjunto. En la Figura 6 se muestra el diseño final de la leva así como su posición relativa a la pala, de forma de que la varilla que mueve el seguidor solo trabaje a tracción. De esta forma se logra reducir los pesos del sistema, al disminuir la sección de los componentes. En esta figura también se puede observar que la leva dejó de ser un círculo completo para transformarse en una porción de dicho círculo, con el objetivo que el sistema pueda funcionar en un espacio reducido. Por último, se muestra el rango de ángulos de contacto entre la leva y el seguidor, el cual esta asociado al régimen de funcionamiento, así como la posición correspondiente a bandera.

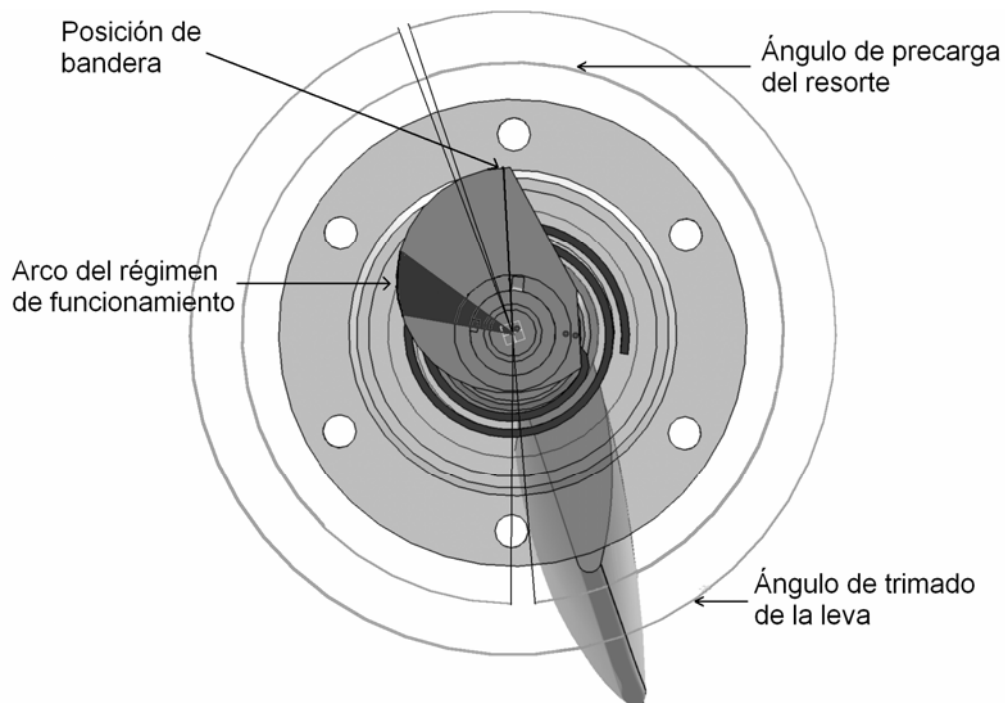


Figura 6: diseño final de la leva y posición relativa a la pala

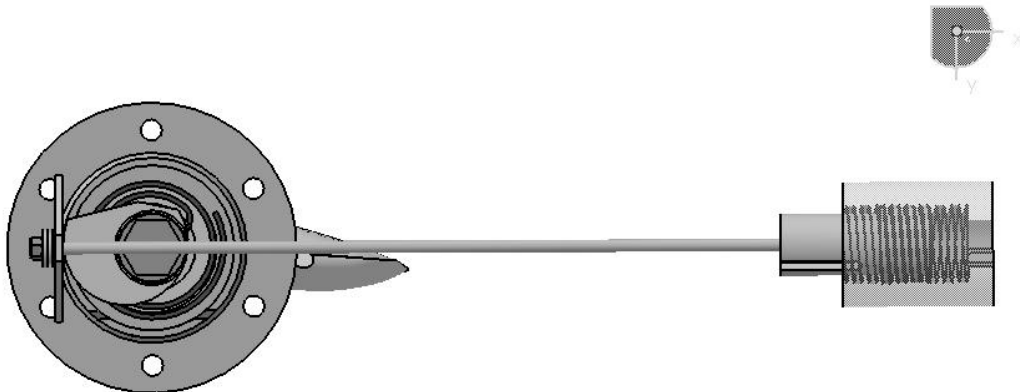


Figura 7: sistema completo de cambio de paso

En la figura 7 se muestra el sistema completo de cambio de paso, donde aparece la leva y el seguidor, junto con la varilla y el sistema multiplicador de la fuerza necesario para utilizar un motoreductor comercial.

4. RESULTADOS

En base al modelo teórico aerodinámico utilizado, se obtuvo para un rotor de 3,4 m. de diámetro la curva de potencia mecánica vs. velocidad del viento que se muestra en la Figura 8. En esta figura se puede observar que la potencia mecánica entregada por la hélice aumenta con la velocidad de la corriente libre al cubo (curva continua), hasta que comienza a funcionar el sistema de regulación, el cual mantiene aproximadamente constantes las RPM y la cupla aerodinámica, y por lo tanto la potencia, a medida que aumenta la velocidad de la corriente libre (curva punteada). De esta forma se trabaja en las condiciones óptimas del generador eléctrico. La curva que se obtiene para un sistema sin regulación de paso sigue creciendo en función del cubo de la velocidad de la corriente libre, y si no se regula por algún otro método (entrada en pérdida o control de potencia), puede quemar el generador eléctrico o producir daños estructurales.

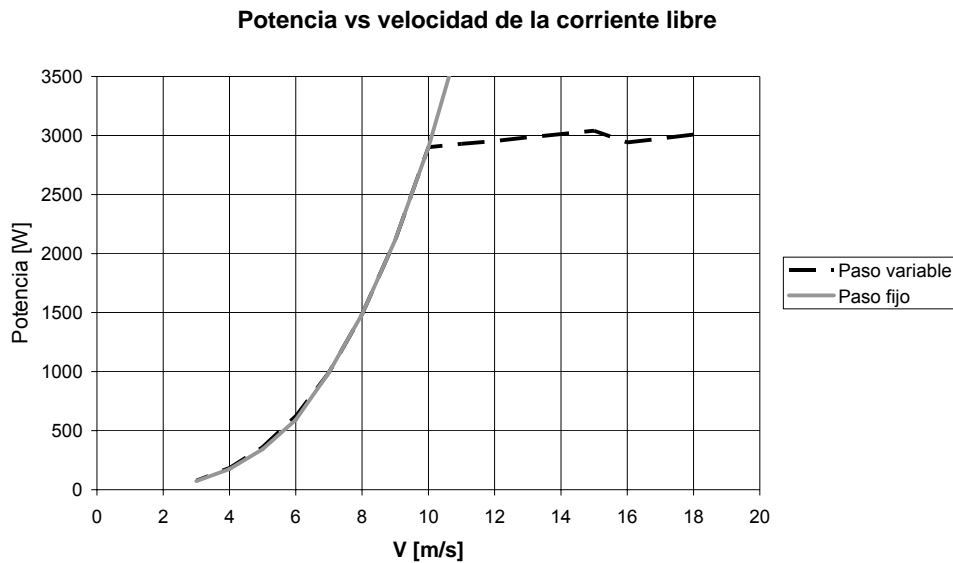


Figura 8: Potencia transmitida por el rotor vs. velocidad del viento, con paso fijo (línea continua) y paso variable (línea punteada).

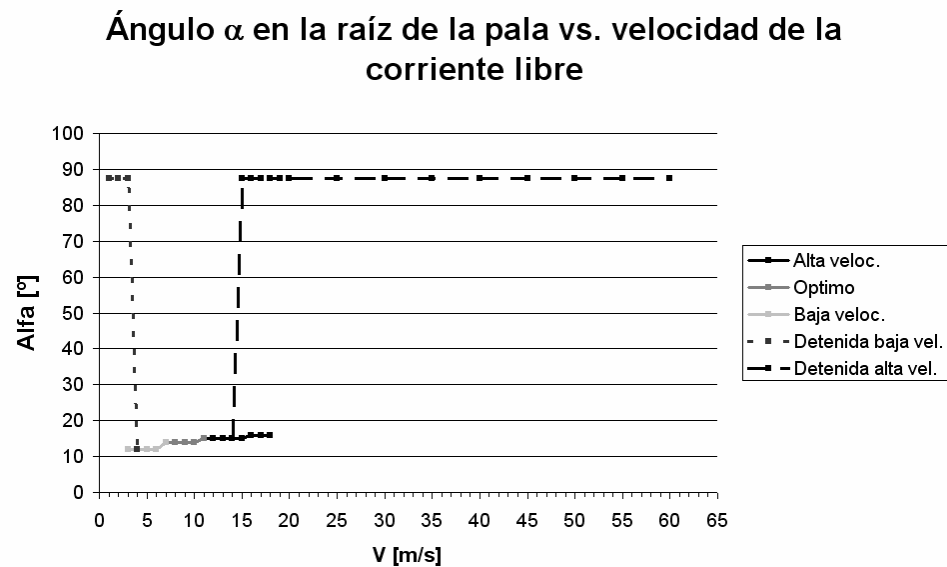


Figura 9: Ángulo de ataque en la raíz de la pala vs. velocidad del viento

La Figura 9 muestra la variación del ángulo en la raíz de la pala que permite obtener la curva de potencia de la Figura 8. La cadena cinemática permite obtener variaciones de 1 grado en el ángulo de incidencia de la pala. Según el criterio de control que se utilice, el sistema puede mandar las palas a bandera en cualquier condición de viento, lo que se muestra en la figura como condición “detenida a baja velocidad”

5. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo el diseño y construcción de un sistema de cambio de paso para las palas de una turbina eólica, en función de las características aerodinámicas del rotor y la relación cupla-RPM del generador eléctrico. Se consideraron los esfuerzos aerodinámicos y mecánicos actuantes sobre el mecanismo de cambio de paso para garantizar su eficiencia y resistencia estructural. El diseño propuesto permite, con un adecuado circuito de control, mantener la potencia aproximadamente constante para velocidades de viento entre 10 y 18 m/s y mandar la hélice a bandera para vientos superiores, minimizando las cargas sobre el sistema y aumentando así su vida útil. También permite incrementar, aunque muy levemente, la captación de potencia para bajas velocidades. El cambio de incidencia de un grado permitido por el motor paso a paso que comanda el mecanismo demuestra ser suficiente para regular la potencia en el rango de velocidades de viento consideradas. La continuación de este trabajo consiste en la implementación del algoritmo y circuito de control y la evaluación experimental del sistema montado en el conjunto del prototipo de generador eólico.

6. REFERENCIAS

- [1] Leithead W., de la Salle S. and Reardon D. (1991): Role and objectives of control for wind turbines. IEEE Proceedings-C 138(2), pp. 135-148.
- [2] Muljadi E., Butterfield C.P., Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation. February 2000. NREL/CP-500-27143
- [3] Chertok, A. and Hablanian, D. (2005), Development of a Direct Drive Permanent Magnet Generator for Small Wind Turbines, Technical Report for the U.S. Department of Energy, TIAX Reference D0223.
- [4] Rizk J. and Nagrial M. (2000), Design of Permanent-Magnet Generators for Wind Turbines, Proceedings of the Third International Power Electronics and Motion Control Conference. IPEMC 2000, Vol. 1, pp. 208-212
- [5] Martínez del Pezzo A., Sacchi J., Patanella A., Garaventa G., Scarabino A., Actis M, (2007) Development of a 1.5 kW Multipole Generator for Wind Turbines. 6th World Wind Energy Conference and Exhibition. Mar del Plata, Argentina, 2007
- [6] Bianchi, D. De Battista, H. Mantz, R. "Wind Turbine Control Systems", Springer Ed. (2006)
- [7] Bastianon, R. "Energía del viento y diseño de turbinas eólicas", Tiempo de Cultura Ediciones. (1994)
- [8] Le Gourieres, D. "Energía eólica. Teoría, concepción y cálculo práctico de instalaciones". Ed. Masson (1983).

Agradecimientos:

La construcción del generador eólico fue financiada por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, CIC. El generador eléctrico fue construido con asistencia del Laboratorio de Alta Tensión ITREE-LAT, Facultad de Ingeniería de la UNLP.