



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO

“SIMULACIÓN Y CONTROL DE UNA TURBINA EÓLICA PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA”

**Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería de Control
y Automatización**

AUTOR

Ing. Jesica Patricia Cárdenas Rios.

ASESOR

Antonio Manuel Morán Cárdenas, Ph.D.

LIMA-PERÚ

2015

Dedicatoria:

Esta tesis está dedicada a toda mi familia y amigos, en especial a la memoria de mi querido papá Renán, a la mami Rosa ejemplo de vida, a mi amor Alvaro por apoyarme siempre y a la hermosa sonrisa de Dayrita.

Agradecimientos:

Quiero expresar mi agradecimiento a todos los profesores de la maestría de Ingeniería de Control y Automatización por brindar sus conocimientos con altruismo y motivar en los alumnos la búsqueda de la mejora constante, en especial a mi asesor de tesis Dr. Antonio Morán Cárdenas, y a los profesores Dr. Javier Sotomayor Moriano, Mgt. Carlos Gustavo Pérez Zuñiga, Dr. Raúl Rivas Pérez por sus valiosos consejos y observaciones en el desarrollo de este proyecto de tesis.

RESUMEN

Los sistemas de generación de energía eléctrica eólicos se presentan como una alternativa para solucionar en parte los problemas de contaminación ambiental, esta tesis se desarrolla con la intención de diseñar un control difuso eficiente de una turbina eólica.

Para cumplir con este objetivo, primero se definen las características de los componentes de un aerogenerador y se indica el potencial energético eólico de nuestro país, luego se desarrolla el modelo matemático no lineal de un aerogenerador de características específicas: turbina de eje horizontal de tres palas, generador eléctrico tipo jaula de ardilla (potencia nominal 0.66 MW), actuador del ángulo de paso β (ángulo de rotación de la pala de la turbina de viento, alrededor de su eje longitudinal) y se realizan las simulaciones del sistema modelado en el programa Simulink de MATLAB.

Se realizó una revisión de la teoría del control difuso, antes de diseñar un controlador difuso basado en el modelo no lineal obtenido previamente. En el diseño del controlador de la potencia de un aerogenerador mediante la variación del ángulo de paso β , se presentan las funciones de pertenencia y la base de reglas difusas del controlador. Para hacer el controlador difuso más eficiente, se diseña una ganancia a la salida del controlador que minimice la integral del error cuadrático.

Se desarrollaron simulaciones en Simulink del controlador difuso y el controlador convencional PID de la potencia generada por el aerogenerador y se mostró que el sistema con el controlador difuso, presenta una menor amplitud de las oscilaciones durante el transitorio y un menor valor de la integral del error cuadrático.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. ESTADO DEL ARTE DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA	
1.1 Introducción	5
1.2 Aproximación del comportamiento físico del viento	5
1.3 Componentes del aerogenerador	10
1.3.1 Turbina de viento	11
1.3.2 Regulación de las palas del rotor de una turbina de viento para control de potencia	17
1.3.3 Generador de Potencia eléctrica	19
CAPITULO 2. MODELADO MATEMÁTICO DE UN AEROGENERADOR	
2.1 Introducción	21
2.2 Modelado de la turbina mecánica de eje horizontal de 3 palas	21
2.3 Modelado de generador jaula de ardilla	27
2.3.1 Definición	27
2.3.2 Transformación de Park	28
2.3.3 Ecuaciones que modelan el generador jaula de ardilla	30
2.3.4 Simulación del modelo del generador Jaula de ardilla	37
2.4 Modelo del actuador de la variación del ángulo de paso (pitch angle)	41
2.5 Conclusiones	43
CAPITULO 3. CONTROLADOR DIFUSO DE UN SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA.47	
3.1 Introducción	44
3.2 Teoría del Control difuso	44

3.2.1	Funciones de pertenencia	44
3.2.2	Base de reglas de la lógica difusa	48
3.2.3	Mecanismos de inferencia en un sistema modelado a través de las reglas lógicas difusas	48
3.2.4	Estrategias de defusificación	50
3.2.5	Control Difuso	53
3.3	Control difuso de la potencia de un aerogenerador	53
3.3.1	Funciones de pertenencia de las variables del Controlador	54
3.3.2	Base de Reglas difusas	57
3.3.3	Defusificación	60
3.4	Conclusiones	61
CAPITULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL CONTROL DIFUSO DE LA POTENCIA DE UN AEROGENERADOR		
4.1	Control difuso de la potencia de un aerogenerador, mediante la variación del ángulo de paso β	62
4.1.1	Control de la potencia mecánica de la turbina por variación del ángulo de paso β	62
4.1.2	Comparación control difuso y control PID de la potencia mecánica de la turbina por variación del ángulo de paso β	73
4.2	Control de la potencia eléctrica del generador por variación del ángulo de paso β	77
4.3	Conclusiones	81
CONCLUSIONES GENERALES		82
RECOMENDACIONES		82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83
ANEXOS		

INTRODUCCIÓN

Los problemas de contaminación ambiental y los cambios climáticos, generados por el uso de combustibles fósiles, hacen necesario la búsqueda de otras fuentes de energías limpias y renovables como la energía solar, la energía hidráulica, la energía eólica. La tecnología eólica es la de mayor crecimiento en el mundo (Cheng, 2006), debido a los avances tecnológicos en el diseño de las turbinas de viento, la electrónica de potencia y el control de los accionamientos mecánicos de los aerogeneradores, que vuelven a estos sistemas más eficientes y competitivos. Los países con mayor capacidad de potencia eólica instalada son China, Estados Unidos y Alemania, China superó los 70,000 MW de potencia generada a finales del 2012. En América Latina Brasil es el país con mayor desarrollo de la industria eólica supera los 2500 MW (Global Wind Statistics, 2012). Nuestro país no es ajeno a este crecimiento y cuenta con 2 parques eólicos, el parque eólico Marcona y parque eólico tres hermanas (90 MW) ubicados en el departamento de Ica.

Considerando la importancia del desarrollo de la tecnología eólica en el mundo, y su reciente puesta en marcha en nuestro país, se considero desarrollar esta tesis de investigación, para la simulación y control de una turbina eólica. Los sistemas de generación de energía eólica pueden clasificarse en sistemas aislados, los cuales suministran energía a pequeñas comunidades, necesitan de un elemento almacenador de energía como una batería, además de abastecer la demanda del consumidor y en sistemas conectados a redes de potencia, en estos sistemas la potencia de salida, no necesita estar controlada por la demanda del consumidor, la frecuencia de la red se determina por la central de potencia convencional, que es considerada un bus infinito (Osley, 2011). La agrupación de turbinas eólicas en parques eólicos permite obtener una potencia eólica total comparable a la de la central convencional. En este trabajo de tesis se considerará la simulación y control de una turbina eólica, conectada a una central de potencia convencional de 60Hz.

La estructura básica de un aerogenerador o turbina eólica está conformada por el rotor de la turbina que adquiere parte de la energía cinética del viento y la transforma en energía mecánica rotatoria, un sistema de engranajes que incrementa la velocidad de rotación del rotor para adaptarla a la velocidad del generador eléctrico, y un generador eléctrico que

transforma la energía mecánica en energía eléctrica. La simulación del aerogenerador en MATLAB, requiere los modelos de sus componentes, el modelo de una turbina de viento de un aerogenerador es no lineal, debido a que el torque y la potencia generados por la turbina, dependen del coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \beta)$ que presenta una relación no lineal en sus parámetros: ángulo de paso (β) y la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala del rotor y la velocidad del viento V (λ) (Slootweg J.G, 2001). El generador considerado en el modelo del sistema de esta tesis, es un generador de inducción Jaula de ardilla, debido a las ventajas sobre un generador síncrono, menor tamaño, menor costo y menor requerimiento de mantenimiento (Yu Zuo, 2010).

Para el control de la potencia del aerogenerador, debe considerarse que la turbina puede generar potencia a partir de una velocidad mínima del viento, genera potencia nominal cuando la velocidad del viento se iguala o supera la velocidad nominal pero es menor a una velocidad máxima del viento, cuando se supera la velocidad máxima, los aerogeneradores detienen su funcionamiento (no generan potencia), para evitar dañar las torres, los álabes de la turbina y el sistema eléctrico. Cuando la velocidad del viento es mayor a la velocidad nominal, la potencia eólica generada debe ser controlada para que no exceda a la potencia nominal y no dañe al sistema. Los métodos más comunes para el control de la potencia son, el control del ángulo de paso de las hélices de la turbina (pitch control), utilizado para grandes turbinas (Muljadi,20), el control a ángulo fijo (stall control), el control de orientación (yaw control) utilizado para turbinas pequeñas (Etienne Audierne,2010). El método de control de potencia desarrollado en esta tesis, es el control de ángulo de paso para una turbina grande de 1.5 MW. Debido a que el modelo de la turbina de viento de un aerogenerador es no lineal, el control convencional PID del ángulo de paso β y otros controles avanzados, que requieren una linealización del modelo, pierden exactitud debido a la aproximación lineal realizada. El control difuso se presenta como una alternativa de control eficiente pues permite el control de sistemas no lineales, basado en reglas difusas, que se generan a partir del comportamiento del sistema y no requiere la linealización del modelo, por ello fue considerado como el controlador a desarrollar en esta tesis.

La búsqueda del controlador más eficiente del ángulo de paso β , para sistemas eólicos, requiere del desarrollo del modelo de estos sistemas y de la simulación de su

funcionamiento, el modelo total debe considerar el modelo de la turbina, del generador y del actuador del sistema. En los artículos especializados (Yu Zou et al, 2010) (A. Ishchenko et al, 2007), (Movahednasab et al, 2008) se desarrollan las ecuaciones del generador Jaula de ardilla, pero se realizan simplificaciones, o se linealiza el sistema. En artículos especializados solo se referencia el actuador del sistema, no se indican los parámetros específicos y no se simula el controlador teniendo en cuenta su influencia en el sistema. Por ello en esta tesis se consideró la importancia de desarrollar el modelo completo del sistema, para el diseño del controlador, por ello se desarrolló el modelo del generador basándose en las ecuaciones teóricas que modelan su funcionamiento, sin realizar linealizaciones, ni aproximaciones, además se incluyo el modelo del actuador en las simulaciones del sistema.

Aunque ya existen artículos especializados que han desarrollado el controlador difuso del ángulo de paso β para el control de la potencia eléctrica de un generador, en esta tesis se considera que es importante desarrollar el controlador difuso del ángulo de paso β , considerando el modelo completo del sistema, y comprobar que el controlador difuso es más eficiente que el controlador PID.

En esta tesis se desarrolló el controlador difuso, para el control de la potencia mecánica entregada por la turbina, se simula el sistema controlado y se compara la respuesta del sistema, con la respuesta obtenida con el controlador PID. Se simula también el control difuso de la potencia eléctrica del aerogenerador.

Los objetivos específicos de la tesis son los siguientes:

1. Estudio de los componentes del Sistema de Conversión de Energía Eólica.
2. Modelo matemático. y simulación de los componentes de un Sistema de Conversión de Energía Eólica.
3. Diseño del control avanzado del ángulo de rotación de la pala de la turbina de viento alrededor de su eje longitudinal (ángulo de paso β)
4. Simulación de la potencia controlada de salida del sistema de conversión de energía eólica utilizando el software de MATLAB y SIMULINK.

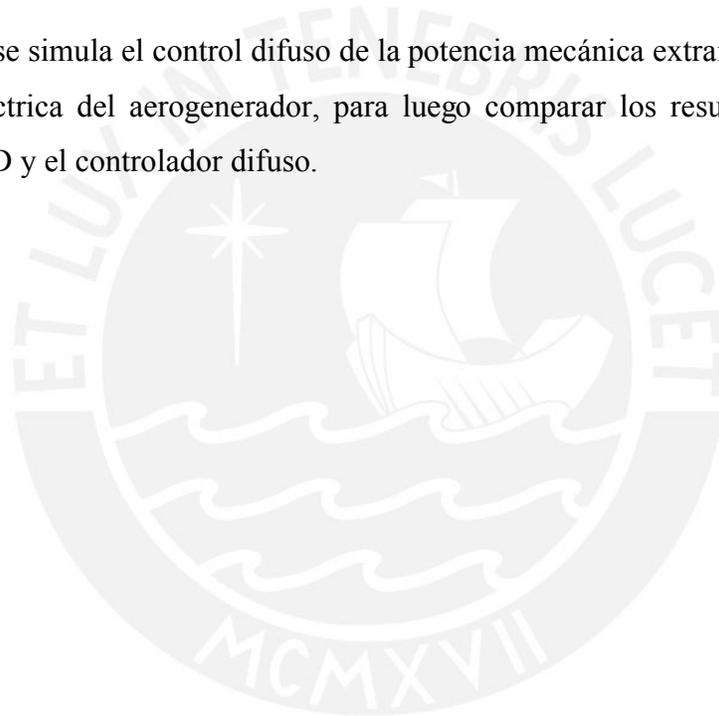
La tesis se desarrolla en 4 capítulos:

En el capítulo 1, se indica las características de un sistema de conversión de energía eólica, haciendo énfasis en el potencial energético de nuestro país.

En el capítulo 2 se desarrolla el modelo completo del aerogenerador, modelo de una turbina de eje horizontal de tres palas, de un generador jaula de ardilla de potencia nominal 0.66 MW, y del actuador del ángulo de paso β (ángulo de rotación de la pala de la turbina de viento, alrededor de su eje longitudinal).

En el capítulo 3 se desarrolla la teoría básica del control difuso y el diseño del controlador difuso para el control de la potencia mecánica de un aerogenerador.

En el capítulo 4 se simula el control difuso de la potencia mecánica extraíble de la turbina y la potencia eléctrica del aerogenerador, para luego comparar los resultados del control convencional PID y el controlador difuso.



CAPITULO 1. ESTADO DEL ARTE DE LOS COMPONENTES DE UNSISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

1.1 Introducción

A nivel mundial se ha incrementado el interés en las fuentes de energías renovables, pues son una alternativa de generación de energía que no contamina el medio ambiente. Los sistemas de conversión de la energía renovable del viento en energía eléctrica, son una alternativa cada vez más utilizada, debido al incremento de su eficiencia, gracias a los avances tecnológicos en el diseño de las turbinas, la electrónica de potencia y el control de los accionamientos mecánicos. Considerando la importancia de los sistemas eólicos actualmente se desarrollo esta tesis de investigación de la simulación y control de una turbina eólica A grandes rasgos los sistemas de conversión de energía eólica, tienen como componentes fundamentales, la energía del viento, el sistema mecánico que transforma parte de la energía cinética del viento en energía mecánica (turbina), y el sistema eléctrico que transforma parte de la energía mecánica en energía eléctrica (generador eléctrico). En este capítulo se describen de forma general estos componentes y la regulación de las turbinas para el control de la potencia.

Las ecuaciones de este capítulo fueron tomadas de la referencia (D.Bianchi et al, 2007)

1.2 Aproximación del comportamiento físico del viento

Se definen los vientos geostróficos como el movimiento de las masas de aire en la atmósfera, originados principalmente por la variación de temperaturas, entre el aire caliente y ligero de la región ecuatorial y el aire frío y pesado de los polos, el aire caliente sube hacia las capas más altas de la atmósfera y se mueve hacia los polos ,siendo remplazado en las capas inferiores por un aire frío proveniente de las regiones polares ,esta circulación de aire es afectada también por las fuerzas de Coriolis que cambian la dirección de los flujos superiores del aire hacia el este y los flujos inferiores hacia el oeste. Los vientos de las capas inferiores o superficiales de la atmosfera varían su velocidad y dirección debido a las fuerzas de fricción y a los obstáculos. Se definen los vientos locales como los flujos de aire causados por la presencia de mares y grandes lagos.Los vientos cerca de la superficie de la tierra resultan de la combinación de los vientos locales y

geostróficos, por tanto dependen de varios factores como la localización geográfica, el clima, la altura, los obstáculos y la rugosidad del terreno.

Una caracterización de los vientos se da a través de la distribución de la energía cinética en el dominio de la frecuencia, denominada el espectro de Vander Hoven, las bajas frecuencias corresponden a los vientos geostróficos y las altas frecuencias, representan las turbulencias asociadas a los vientos locales, S_v representa la densidad espectral de potencia, un diagrama típico del espectro de Vander Hoven se muestra en la figura 1.1.

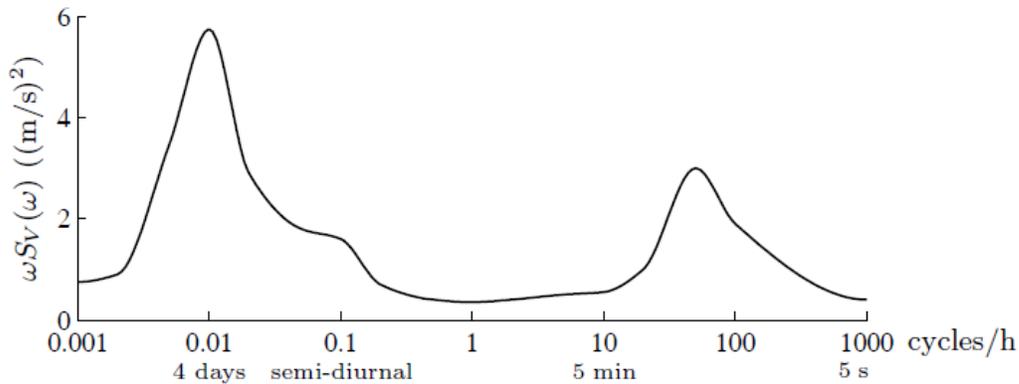


Fig.1.1 Espectro de Vander Hoven (Wind Turbine Control Systems 2007)

Del gráfico se observa que la energía se concentra alrededor de dos frecuencias por lo que la velocidad del viento se puede considerar como la suma de dos componentes.

$$V = V_m + v \tag{1.1}$$

v representa la turbulencia atmosférica y V_m representa la velocidad principal del viento, V_m se obtiene como el promedio de las velocidades instantáneas en un intervalo de tiempo t_p , como se muestra en la ecuación 2.1, t_p generalmente está comprendido entre los 10min y 20 min.

$$V_m = \frac{1}{t_p} \int_{t_0 - t_p/2}^{t_0 + t_p/2} V(t) dt \tag{1.2}$$

La distribución de la probabilidad de la velocidad principal del viento, se obtiene mediante las mediciones del viento durante varios años, éstas mediciones pueden aproximarse a la

distribución de probabilidad de la velocidad del viento Weibull, mostrada en la figura 1.2 y ecuación 1.3, los coeficientes K (parámetro de forma) y C (parámetro de escala), se ajustan mediante cálculos estadísticos a los datos experimentales de cada sitio en particular.

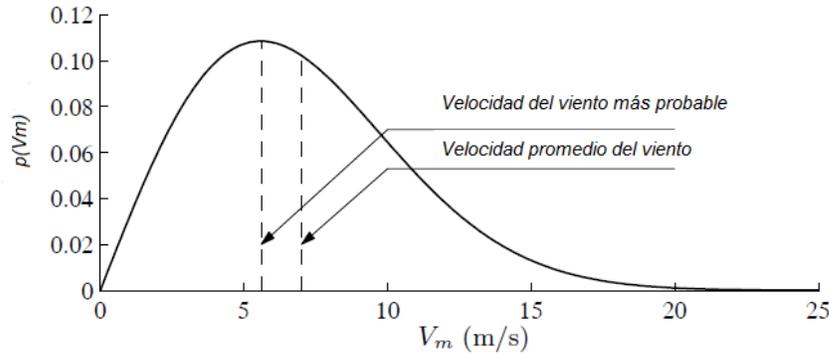


Fig.1.2 Gráfico general de la distribución de Weibull (Adaptado de Wind Turbine Control Systems 2007)

$$P(V_m) = \frac{K}{C} \left(\frac{V_m}{C}\right)^{k-1} e^{-(V_m/C)^k} \quad (1.3)$$

El gráfico de la distribución de probabilidad de la componente principal del viento, nos muestra el rango más probable de las velocidades del viento, se observa que la velocidad del viento más probable supera a la velocidad promedio. La componente principal del viento, también varía con la altura y el tipo de superficie, es posible modelar este efecto mediante la ley logarítmica de Prandtl, ecuación 1.4.

$$\frac{V_m(z)}{V_m(z_{ref})} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)} \quad (1.4)$$

z : altura sobre el nivel de la tierra

z_{ref} : altura de referencia

z_0 : magnitud de la rugosidad.

En nuestro país se cuenta con mapas eólicos que muestran las velocidades promedio del viento en un intervalo de tiempo específico y para una altura establecida, en diferentes regiones. En la figura 1.3 se muestra el mapa eólico de las velocidades promedio del viento en un año, a una altura de 100m tomadas en el año 2008. De este gráfico se puede observar

el potencial eólico de nuestro país, especialmente en la región de la costa, en el departamento de Ica, donde la velocidad promedio del viento puede superar los 10m/s.

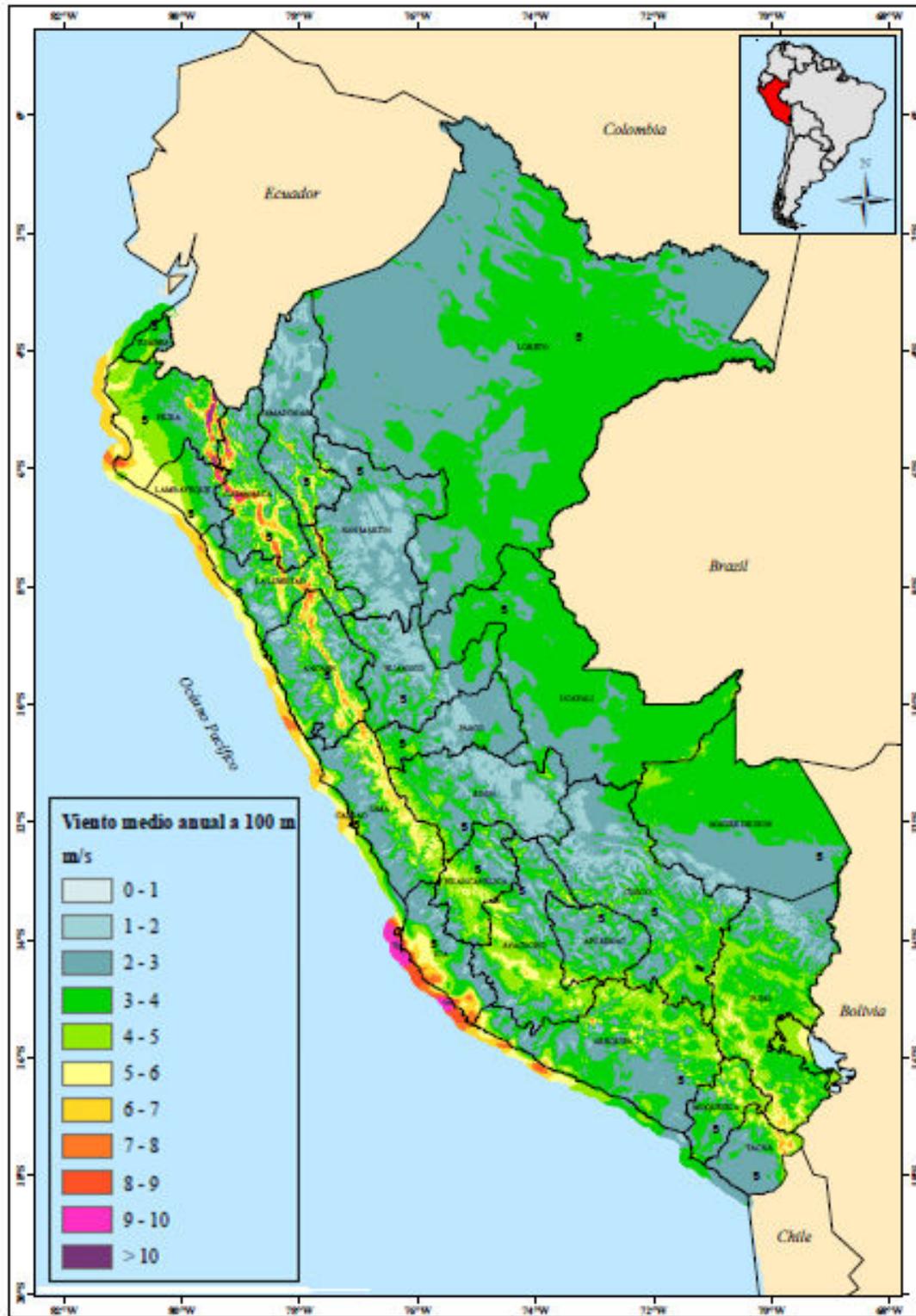


Fig.1.3 Mapa eólico del Perú (Ministerio de Energía y Minas 2008)

Una característica fundamental del viento es la energía cinética y la energía producible por el viento en un intervalo de tiempo. La energía cinética almacenada en un flujo por unidad de volumen E_c , se muestra en la ecuación 1.5, en la cual ρ representa la densidad del fluido.

$$E_c = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1.5)$$

La potencia del viento P_v , que atraviesa un área A con una velocidad se muestra en la ecuación 1.6.

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1.6)$$

La energía promedio que produce el viento durante un intervalo de tiempo T_p (generalmente un año) se muestra en la ecuación 1.7

$$\text{Energía Promedio} = \frac{1}{2} \rho A \int_0^{t_p} V^3 dt \quad (1.7)$$

En el año 2000, el SENAMHI, a través de su Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales, elaboró un cuadro referencial (tabla 1.1), que muestra una aproximación de la energía promedio del viento durante un año para diferentes regiones y altitudes del país.

Tabla 1.1 Potencial energético del viento en el Perú (SENAMHI 2000)

Lugar	Región	Altitud (msnm)	Velocidad media (m/s)	Energía producible (Kwh/año)
Tumbes	Tumbes	25	2.6	252
Talara	Piura	50	8.5	4993
Piura	Piura	46	4.0	642
Chiclayo	Lambayeque	27	5.1	1281
Trujillo	La Libertad	33	5.0	1243
Chimbote	Ancash	11	5.5	1157
Aeropuerto	Lima	13	3.4	507
Laguna Grande	Ica	10	6.5	2465

Marcona	Ica	31	6.4	2329
Pta. Atico	Arequipa	20	6.7	2701
Pta, de Coles	Moquegua	50	5.0	1223

1.3 Componentes del aerogenerador

Los componentes principales de un sistema de conversión de la energía del viento (figura 1.4), son el rotor de la turbina de viento, el sistema de transmisión y el generador de potencia. Las palas del rotor realizan la conversión aerodinámica, el buje acopla las palas del rotor al sistema de transmisión, la regulación de las palas se ubica dentro del buje. El sistema de transmisión tiene como función, transmitir la potencia mecánica capturada por el rotor hacia el generador eléctrico, tiene como elementos los ejes, los engranajes y los frenos. Los engranajes incrementan la velocidad del rotor a valores que puedan ser manejados por el generador generalmente de [20 50] rpm a [1000 1500] rpm. El generador eléctrico convierte la potencia mecánica en potencia eléctrica, sus terminales se conectan a una red eléctrica. La red se modelará como un bus infinito. La torre soporta las fuerzas de la interacción del viento con las palas.

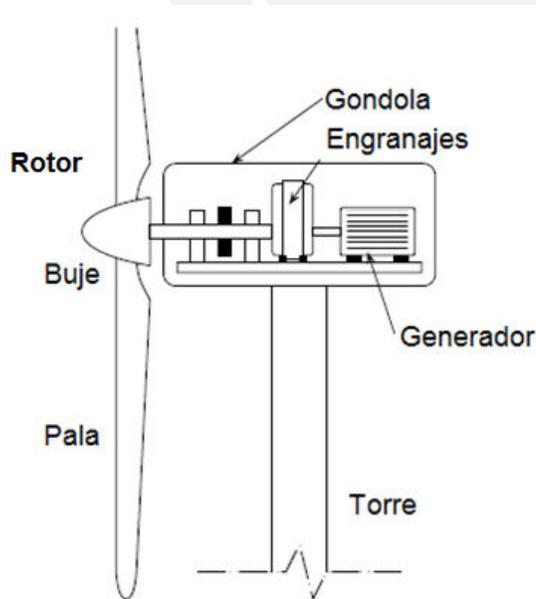


Fig.1.4 Elementos de un sistema de conversión de la energía del viento (Adaptado de Wind Turbine Control Systems 2007)

1.3.1 Turbina de viento

Las turbinas de viento son dispositivos mecánicos específicamente diseñados para convertir parte de la energía cinética del viento en energía mecánica.

Clasificación de las turbinas de viento

Según la posición de los ejes del rotor, las turbinas se clasifican en turbinas de eje vertical y turbinas de eje horizontal.

Turbinas de viento de eje vertical:

El eje del rotor se encuentra en posición vertical, el generador y los dispositivos de transmisión son localizados al nivel de la tierra, tiene la capacidad de capturar el viento de cualquier dirección, la principal desventaja es que la energía capturada es reducida, pues los vientos con los que interactúa el rotor también tienen una velocidad reducida, otra dificultad es que los rotores necesitan de una gran extensión de tierra, en la figura 1.5 se muestra una turbina de viento de eje vertical.



Fig. 1.5 Turbina de viento de eje vertical (fuente web de renewableUK)

Turbinas de viento de eje horizontal

El eje del rotor se encuentra en posición horizontal, en la cima de una torre en esa ubicación, el viento tiene mayor energía y es menos turbulento, sobre la torre se ubica una

góndola, en cuyo interior se ubica el generador y los elementos mecánicos y eléctricos necesarios, la electrónica de potencia es organizada a nivel de la tierra. Las turbinas eólicas de eje horizontal más comerciales son de dos y tres palas, en la figura 1.6 se muestran turbinas de tres palas.



Fig.1.6 Turbinas de viento de eje horizontal (fuente web de renewableUK)

Aerodinámica de las palas del rotor de una turbina de viento

La aerodinámica de la turbina describe las fuerzas de la interacción del flujo de aire y las palas o álabes del rotor de la turbina. Se considera una sección de transversal de la pala de área A , que extrae energía del viento, a la que se denomina disco actuador, como se muestra en la figura 1.7.

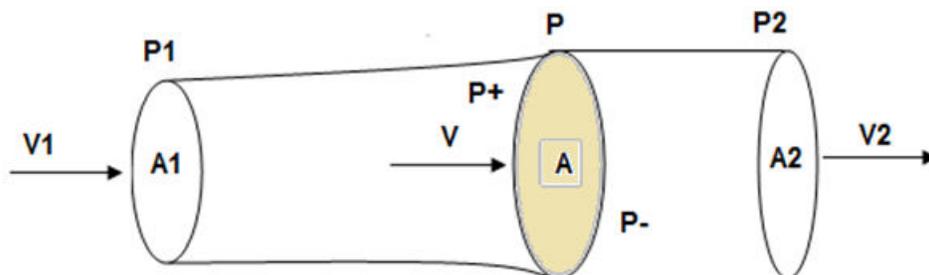


Fig.1.7 Disco actuador

Las presiones P_1 y P_2 son la presión atmosférica, V_1 es la velocidad inicial del viento V es la velocidad del viento debida al disco actuador, V_2 es la velocidad final del viento, ρ es la densidad del aire. Se genera una fuerza F , por la caída de presión, aplicando la ecuación de Bernoulli de conservación de energía se obtienen las siguientes expresiones:

$$F = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2)A \quad (1.8)$$

$$V = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (1.9)$$

Si se define el factor a dimensional a , como se muestra en la ecuación 1.10

$$a = \frac{(V - V_1)}{V_1} \quad (1.10)$$

Se obtienen las relaciones de la velocidad del aire de salida V y en el disco en función del parámetro a

$$V = (1 - a)V_1 \quad (1.11)$$

$$V_2 = (1 - 2a)V_1 \quad (1.12)$$

Se puede obtener las expresiones de la fuerza F y de la potencia del viento P extraída por el disco como se muestra en las ecuaciones 1.13 y 1.14

$$F = 2a(1 - a)V_1^2\rho A \quad (1.13)$$

$$P = 2a(1 - a)^2V_1^3\rho A \quad (1.14)$$

Se define el coeficiente de potencia C_p como la relación entre la potencia extraída por el disco actuador y la potencia del viento sin considerar perturbación.

$$C_p = \frac{2a(1 - a)^2V_1^3\rho A}{0.5AV_1^3\rho} \quad (1.15)$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (1.16)$$

El máximo valor de C_p es el valor de 0.593 y se obtiene con $a=1/3$, este valor se conoce como el límite de Betz, se puede concluir que la eficiencia de la extracción de potencia no puede superar el valor de 59.3%. Se muestra una grafica de C_p en función del parámetro a , en la figura 1.8.

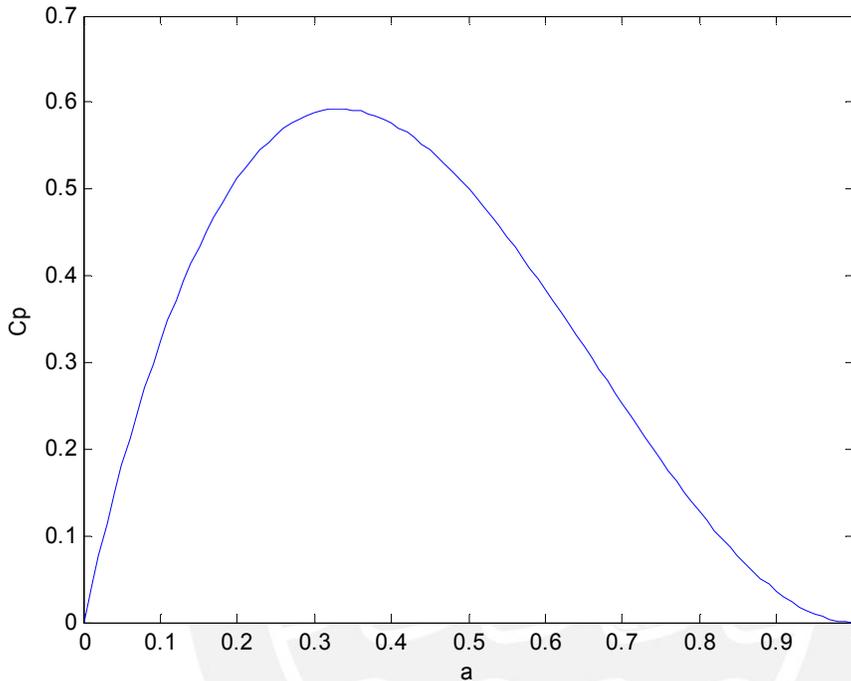


Fig.1.8 Grafica del coeficiente de potencia C_p en función de a

En la figura 1.9 se muestra una sección transversal de la pala con sus principales características: cuerda, referencia y borde de incidencia o ataque del viento.

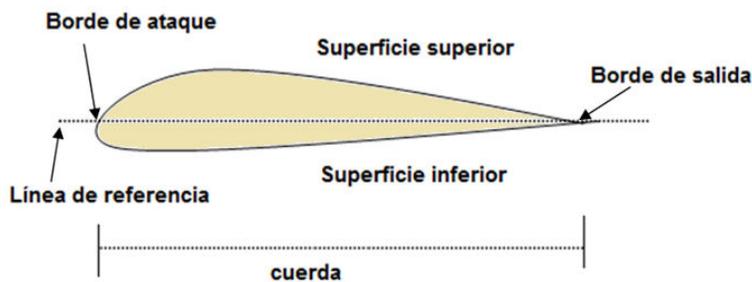


Fig. 1.9 Sección de una pala del rotor

El álabe se mueve en el flujo de aire a una velocidad relativa V_{rel} , ésta velocidad puede ser vista como la suma de dos velocidades, la velocidad tangencial ωr (r distancia de la sección al centro del rotor), y la velocidad del viento V , a' se define como el factor de inducción del flujo tangencial, la figura 1.10 muestra las componentes de la velocidad relativa y los ángulos de incidencia sobre la sección del álabe.

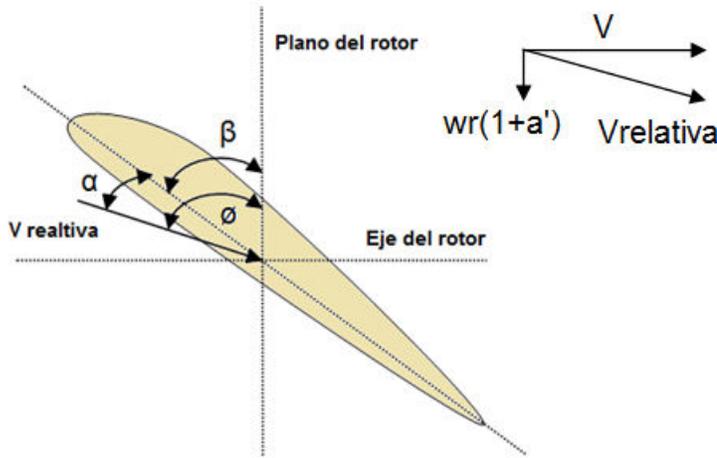


Fig.1.10 Ángulos de incidencia de la velocidad relativa

Se define ϕ como el ángulo entre la velocidad relativa y el plano del rotor, β se denomina ángulo de paso, se define como el ángulo entre el plano del rotor y la cuerda. Si se toma en cuenta la acción de la suma de secciones de área de los álbes se obtienen las ecuaciones 1.17 y 1.18, debe tomarse en cuenta que a y a' no son valores uniformes.

$$V_{rel} = V \sqrt{(1 - a)^2 + \left(\frac{r\omega}{V} (1 + a')\right)^2} \quad (1.17)$$

$$\tan(\phi) = \frac{V}{\omega r} \frac{1 - a}{1 + a'} \quad (1.18)$$

La fuerza perpendicular a la dirección del movimiento de aire local (velocidad relativa), se denominada fuerza de sustentación F_L , y la fuerza en la misma dirección que la velocidad relativa se denomina fuerza de arrastre F_D , éstas fuerzas pueden expresarse en función de sus componentes axial F_R y tangencial F_T , la figura 1.11 muestra las fuerzas sobre la

sección transversal de la pala. La fuerza de sustentación desarrolla un torque útil, mientras que la fuerza de arrastre desarrolla un torque de oposición.

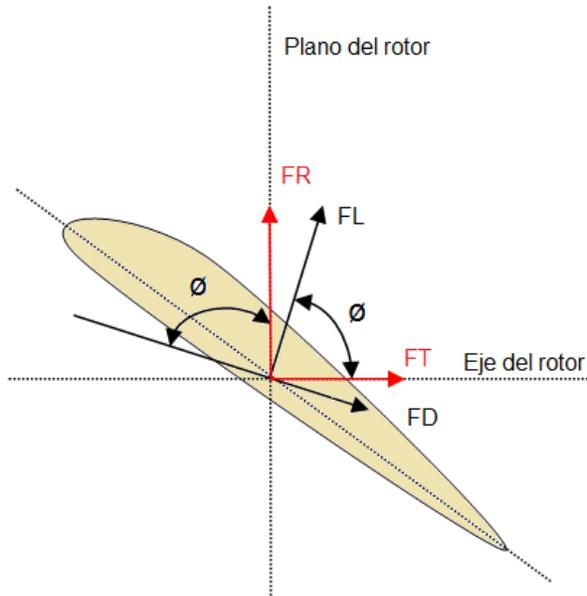


Fig.1.11 Diagrama de fuerzas en sección de un álabe

La fuerza tangencial F_T , el torque T y la potencia P se expresan en términos de los coeficientes de fuerza C_T , torque C_Q y potencia C_p respectivamente, según se indica en las ecuaciones (1.19),(1.20) y (1.21)

$$F_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T(\lambda, \beta) V^2 \quad (1.19)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_Q(\lambda, \beta) V^2 \quad (1.20)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (1.21)$$

λ es la relación entre la velocidad angular en el extremo del álabe y la velocidad del viento V .

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (1.22)$$

1.3.2 Regulación de las palas o álabes del rotor de una turbina de viento para control de potencia

Se diseñan sistemas de regulación de las palas del rotor de turbinas grandes, que regulen la potencia mecánica extraíble del viento, para evitar daños en generador de la turbina de viento por sobrecalentamiento, o daños en el rotor de la turbina cuando la fuerza centrífuga se incrementa para excesivas velocidades del viento. Para turbinas grandes los tipos de regulación que actualmente se utilizan son los siguientes:

Regulación por pérdida aerodinámica (stall control):

En la regulación por pérdida aerodinámica, las palas o álabes del rotor están unidas al buje formando un ángulo fijo, cuando la velocidad del viento se incrementa, el diseño aerodinámico del perfil de las palas crea turbulencia en la parte de la pala que no da al viento, lo que reduce la fuerza de sustentación, el torque, y la generación de potencia. En este tipo de sistema se presenta una caída de potencia a velocidades altas del viento, debido a las mayores pérdidas de sustentación. En esta regulación es de suma importancia el diseño del rotor, pues se debe considerar el comportamiento de las cargas para mejorar las características de la curva de potencia,

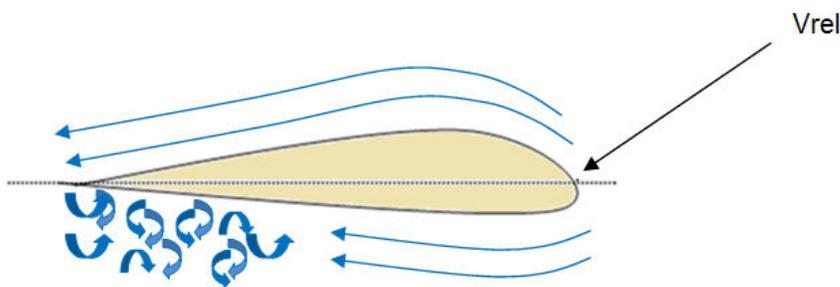


Fig. 1.12 Efecto del incremento de la velocidad en las palas del rotor

Regulación por variación de ángulo de paso (pitch control):

Cuando la potencia generada excede a un valor permitido, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio de ángulo de paso, y aumenta ligeramente el ángulo de paso β para reducir la velocidad del rotor, y cuando la potencia disminuye, el mecanismo hace girar las palas nuevamente para reducir el ángulo β . Este actuador puede ser modelado como un

sistema de primer orden con saturación en la amplitud del ángulo de paso β y en su derivada $d\beta/dt$, como se observa en la figura 1.13. β_d representa al ángulo de paso deseado.

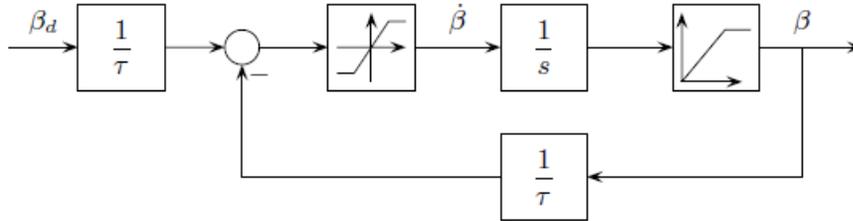


Fig. 1.13 Actuator de variación de ángulo de paso. (Wind Turbine Control Systems 2007)

En la figura 1.14 y 1.15, se observan mecanismos de control de ángulo de paso, el mecanismo del actuator generalmente utiliza sistemas hidráulicos o mecánicos eléctricos, el sistema de la figura 1.14 utiliza el mecanismo conocido como máquina de Jacobs, éste sistema utiliza el peso de las palas para variar el ángulo de paso, la figura 1.15 muestra un sistema mecánico eléctrico de Siemens.



Fig 1.14 Sistema mecánico de Control de ángulo de paso (Wind Power Basics 2010)

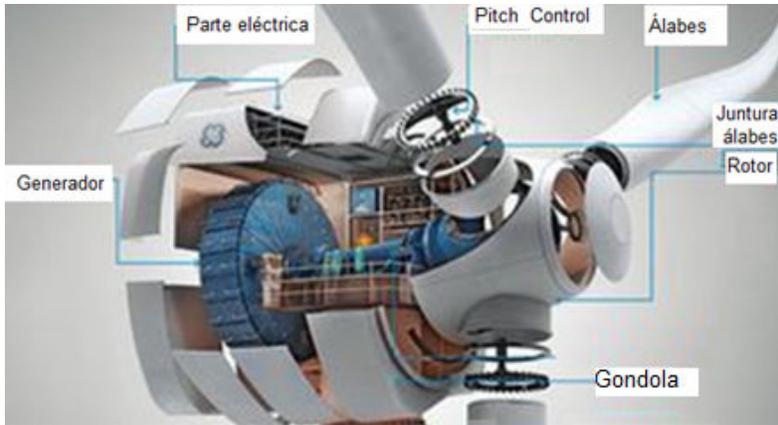


Fig. 1.15 Sistema mecánico de Control de ángulo de paso (Adaptado de fuente web Siemens Direct Drive Turbines)

1.3.3 Generador de Potencia eléctrica

Los generadores más utilizados en las turbinas de viento conectadas a una red eléctrica, son los generadores de inducción. Los generadores síncronos se utilizan generalmente en los sistemas autónomos. Basados en la topología eléctrica los generadores de inducción pueden clasificarse en tres categorías:

Generador de inducción Jaula de ardilla directamente conectado a la red.

El voltaje y la frecuencia en los terminales del estator del generador son impuestos por la red eléctrica.

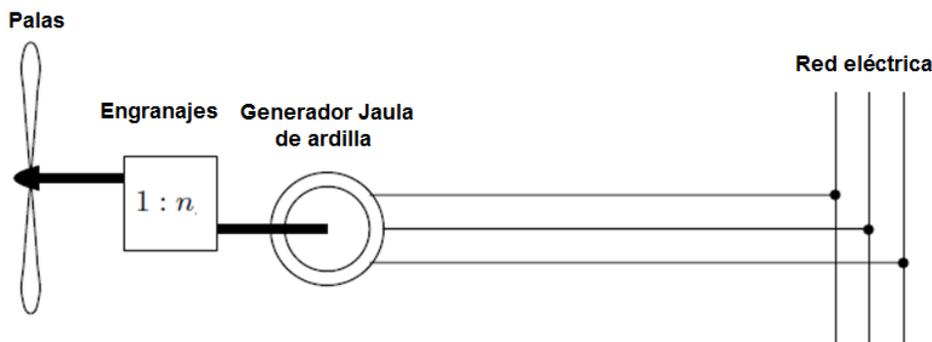


Fig.1.16 Generador de inducción Jaula de ardilla directamente conectado a la red (Adaptado de Wind Turbine Control Systems 2007)

Generador de inducción Jaula de ardilla, estator controlado.

En esta configuración se utiliza conversores de frecuencia como interface entre el estator del generador jaula de ardilla y la red, para mejorar la calidad de la señal de potencia. Es posible controlar los conversores para consumir o producir potencia reactiva, proporcionando la potencia aparente necesaria que no exceda el rango de conversión.

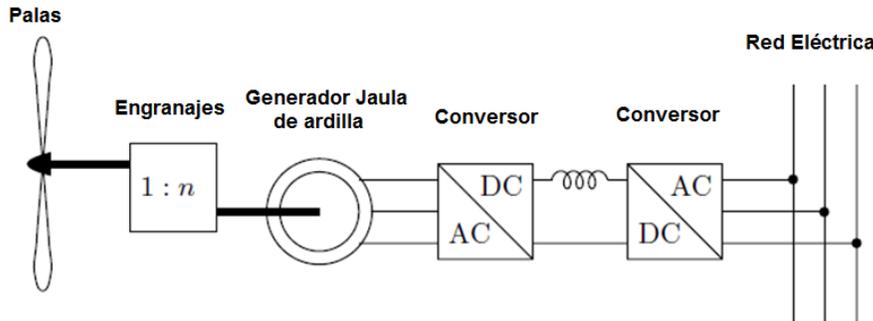


Fig.1.17 Generador de inducción Jaula de ardilla, estator controlado (Adaptado de Wind Turbine Control Systems 2007)

Generador de inducción doblemente alimentado, rotor controlado.

Se utiliza un circuito de excitación de frecuencia variable del rotor, generalmente convertidor de frecuencia PWM. Los conectores del estator son directamente conectados al estator. El dispositivo de electrónica de potencia tiene un manejo de una fracción de la potencia capturada.

Este esquema permite un control independiente de la potencia activa y reactiva.

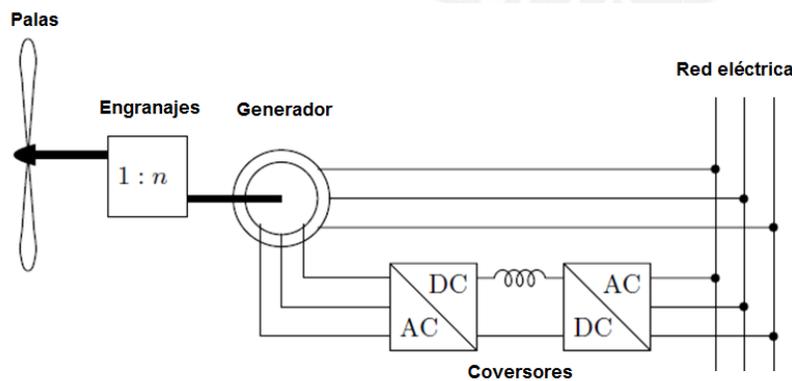


Fig.1.18 Generador de inducción doblemente alimentado, rotor controlado (Adaptado de Wind Turbine Control Systems 2007)

CAPITULO 2. MODELADO MATEMÁTICO DE UN AEROGENERADOR

2.1 Introducción

Los sistemas de conversión de energía eólica transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica, en la actualidad su puesta en marcha en parques eólicos, se muestra como una alternativa viable de generación de energía limpia. El desarrollo de esta tesis tiene como objetivo principal el diseño y simulación del control difuso de la potencia de un aerogenerador, variando el ángulo de paso β de la turbina, previamente se va desarrollar el modelo no lineal completo del aerogenerador, se eligió una turbina de eje horizontal de 3 palas, pues son las más comúnmente utilizadas, un sistema de engranajes, el modelo del actuador de las palas de la turbina y un generador de inducción, debido a las ventajas sobre un generador síncrono, menor tamaño, menor costo y menor requerimiento de mantenimiento (Yu Zuo, 2010), se eligió el generador jaula de ardilla, pues es un generador comúnmente utilizado en los sistemas eólicos, la topología eléctrica de generador es directamente conectado a la red, pues es la más utilizada en parque eólicos que utilizan grandes turbinas.

2.2 Modelado de la turbina mecánica de eje horizontal de 3 palas

Como se mostro en el capítulo 1, la potencia de una turbina puede expresarse en función del coeficiente de potencia C_p (ecuación 2.1), por ello una turbina de eje horizontal puede ser modelada por la curva que relaciona el coeficiente de potencia C_p y los parámetros λ y β , se define λ como la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala del rotor y la velocidad del viento V , (ecuación 2.2) y β es el ángulo de paso de la pala, ángulo comprendido entre el plano del rotor y la cuerda (figura 2.1).

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{R w}{v} \quad (2.2)$$

R : Radio de la pala de la turbina (m)

w : Velocidad angular del rotor (rad/s)

v : Velocidad del viento(m/s)

ρ : Densidad del aire

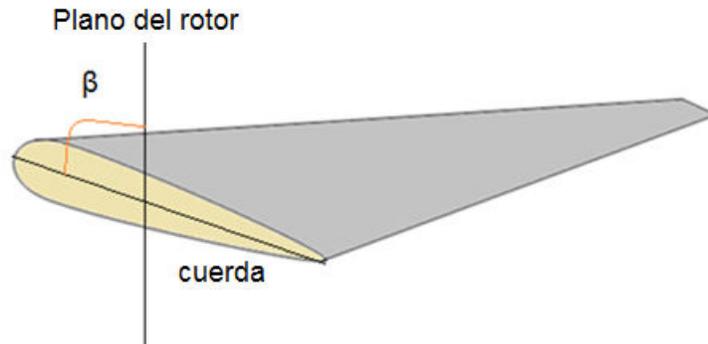


Fig. 2.1 Ángulo β

Las ecuaciones 2.3 y 2.4 relacionan el coeficiente de potencia C_p y las variables λ y β , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 , C_7 , representan las constantes propias de cada turbina por aproximación numérica (Slootweg J.G, et al, 2001).

$$C_p = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + C_6\beta} - \frac{C_7}{\beta^3 + 1} \quad (2.4)$$

Es posible despejar λ_i

$$\lambda_i = \frac{(\beta^3 + 1)(\lambda + C_6\beta)}{(\beta^3 + 1) - C_7(\lambda + C_6\beta)} \quad (2.5)$$

Considerando los siguientes parámetros del modelo de una turbina de eje horizontal de 3 palas de 1.5 MW, (Yu Zou, et al, 2010).

$$C_1=0.4654$$

$$C_2=116$$

$$C_3=0.4$$

$$C_4=5$$

$$C_5=20.24$$

$$C_6=0.08$$

$$C_7=0.035$$

Radio del rotor $R=34$ m

Potencia $P=1.5$ MW

Momento de inercia $J_T=16 \cdot 10^5$ kgm²

Es posible obtener la superficie de C_p en función de λ_i y β , la cual se muestra en la figura 2.2. La figura 2.3, relaciona C_p versus λ para variaciones del ángulo β de 0° a 90° .

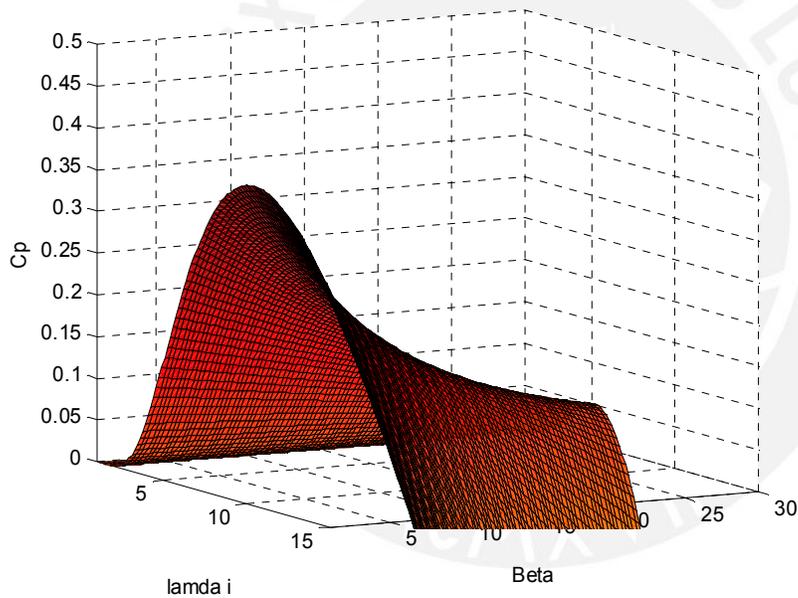


Figura 2.2 Gráfico C_p vs λ_i , β

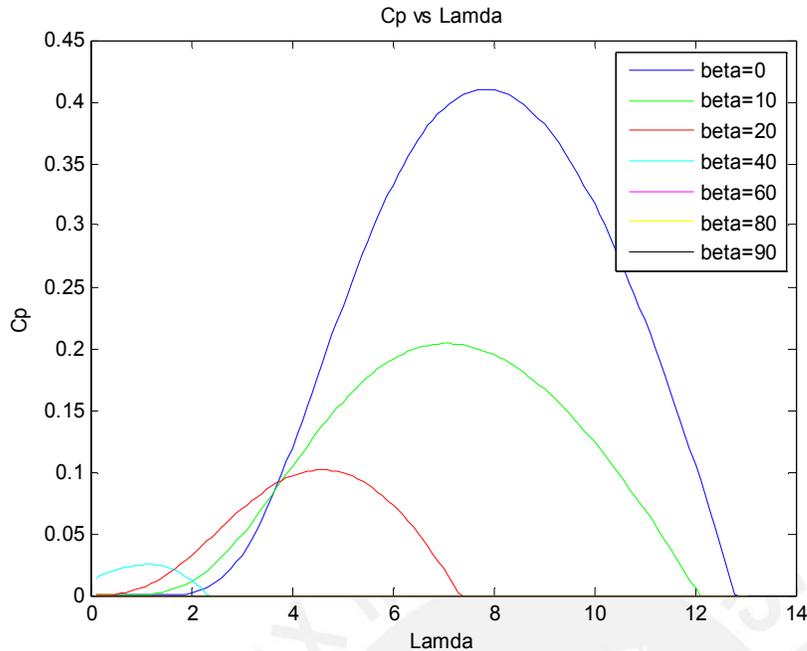


Figura 2.3 Gráfico C_p vs λ para variaciones de β

Considerando una turbina de radio de pala $R=34$, la densidad del aire $\rho=0.647 \text{ kg/m}^3$ y utilizando la ecuación 2.1, se puede hallar la potencia mecánica extraíble por la turbina P_m para diferentes valores del coeficiente de potencia C_p y diferentes velocidades del viento V . Para obtener una gráfica de la máxima potencia P_m se considera $\beta=0$, la variación de C_p , estaría solo en función de λ , como λ está en función de la velocidad angular del rotor y la velocidad del viento, se puede obtener una gráfica que relacione la potencia P_m en función de la velocidad angular del rotor w , para diferentes velocidades del viento V , éste gráfico se muestra en la figura 2.4.

Se observa que la potencia mecánica extraíble de la turbina P_m se incrementa conforme aumenta la velocidad del viento. La potencia P_m se incrementa conforme aumenta la velocidad angular del rotor hasta un cierto valor pero luego disminuye, pues existe un valor específico w de máxima eficiencia de la turbina.

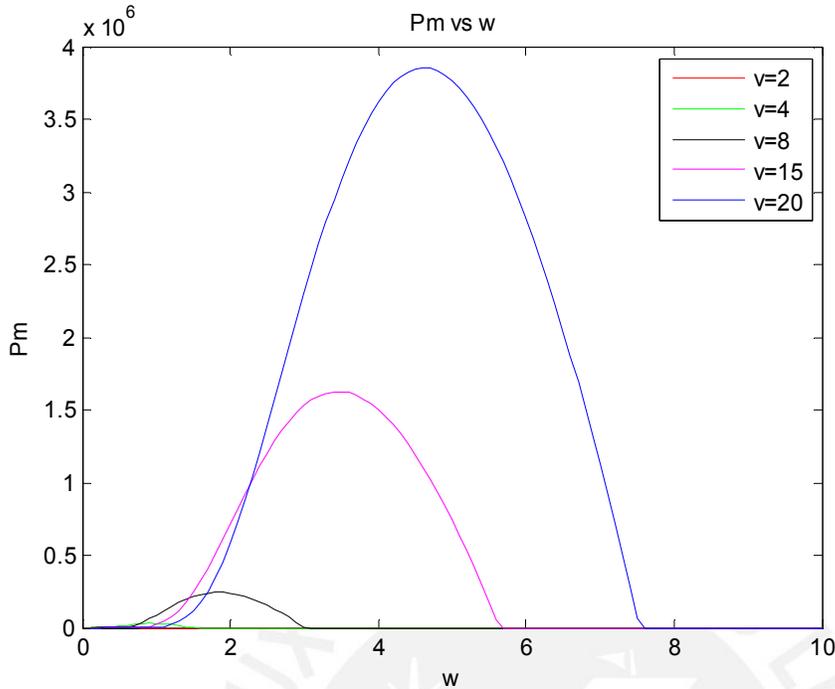


Fig. 2.4 Potencia mecánica de turbina versus velocidad angular del rotor

El torque mecánico T_m desarrollado por la turbina se obtiene de la ecuación (2.6).

$$T_m = \frac{P_m}{w} \quad (2.6)$$

w: Velocidad angular del rotor (rad/s)

P_m : Potencia mecánica de la turbina (W)

T_m : Torque mecánico de la turbina (Nm)

Se puede obtener una gráfica que relacione el torque mecánico T_m en función de la velocidad angular del rotor w , para diferentes velocidades del viento V , éste gráfico se muestra en la figura 2.5.

Se observa que el torque mecánico extraíble de la turbina T_m se incrementa conforme aumenta la velocidad del viento. El torque mecánico se incrementa conforme aumenta la velocidad angular del rotor hasta un cierto valor, pero luego disminuye, pues existe un valor específico λ de máxima eficiencia.

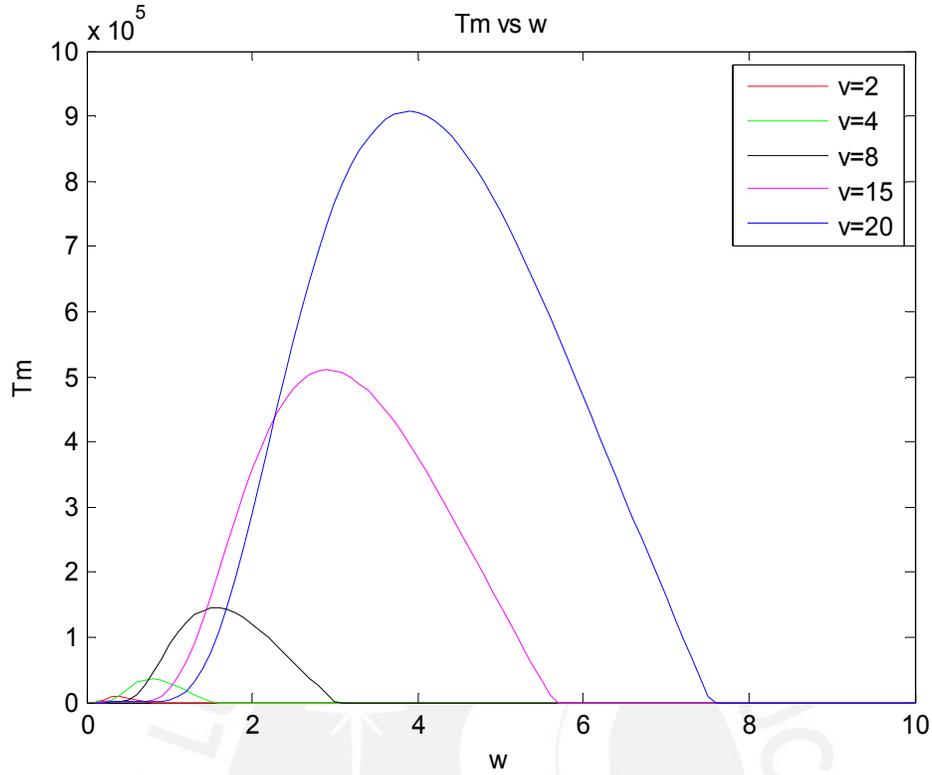


Fig. 2.5 Torque mecánico de turbina versus velocidad angular del rotor

Para el desarrollo de las simulaciones se realizó el modelo de la turbina en simulink de MATLAB, como se muestra en la figura 2.6. El diagrama completo en simulink se muestra en el anexo 2.



Fig. 2.6 Modelo de Turbina desarrollado en Simulink

2.3 Modelado de generador jaula de ardilla

2.3.1 Definición

El generador de jaula de ardilla, es un generador de inducción o asíncrono, está formado 3 devanados en el estator as, bs, cs, separados entre sí por 120°, el rotor está compuesto de 3 devanados ar, br, cr, el rotor consiste de una serie de barras de cobre, las cuales son cortocircuitadas en cada extremo mediante el uso de unos anillos. Puede considerarse que el rotor adopta la misma distribución y número de par de polos N, que el estator. El ángulo θ es el ángulo relativo entre los ejes del rotor y el estator como puede observarse en la figura 2.7.

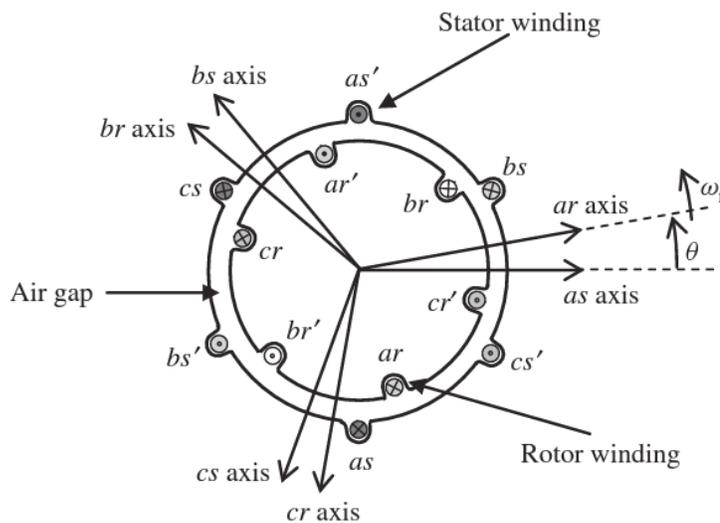


Fig.2.7 Diagrama esquemático de la máquina de inducción (Wind Energy Generation Systems: Modelling and Control 2009)

Las ecuaciones (2.7) y (2.8) son obtenidas de la referencia (Torres Salamao L. A, et al ,2012).

Se define w_s como la velocidad eléctrica del estator o velocidad de sincronismo, w_r como la velocidad eléctrica del rotor, w_m es la velocidad mecánica de rotación y w es la velocidad eléctrica de rotación $w=Nw_m$, se cumple la siguiente relación de la ecuación 2.7.

$$w_s - w_m N = w_r \quad (2.7)$$

Se define el deslizamiento s , como la relación entre la velocidad eléctrica del rotor y la velocidad eléctrica del estator, $w_r = sw_s$ expresada en la ecuación 2.8.

$$s = \frac{(w_s - w_m N)}{w_s} \quad (2.8)$$

Para que la máquina de inducción trabaje en la región de generador, la velocidad eléctrica de rotación debe ser mayor que la velocidad de sincronismo (s negativo). La figura 2.8 muestra la relación entre el torque eléctrico y el deslizamiento, se observa que para valores negativos del deslizamiento, el torque es negativo y la máquina trabaja en la región de generador.

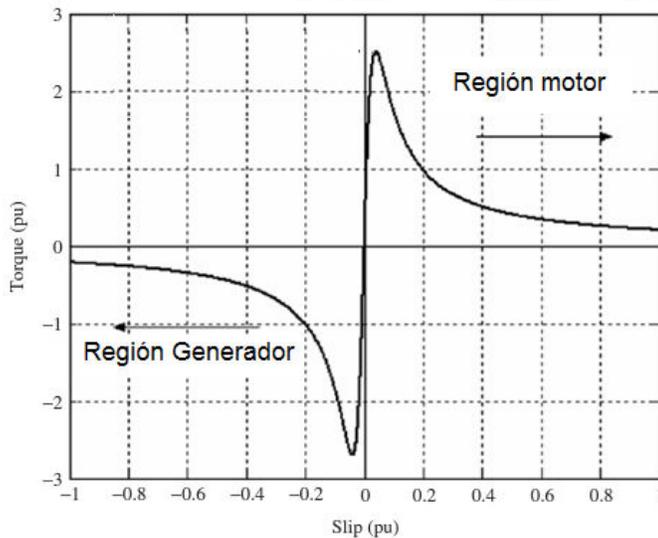


Fig.2.8 Relación entre torque eléctrico y deslizamiento s (Adaptado de Wind Energy Generation Systems: Modelling and Control 2009)

2.3.2 Transformación de Park

Para facilitar el análisis del sistema se realiza una transformación de Park de tres fases: a, b, c a dos fases d, q, el eje d está alineado con la posición del campo del rotor y forma 90° con el eje q, como se observa en la figura 2.9.

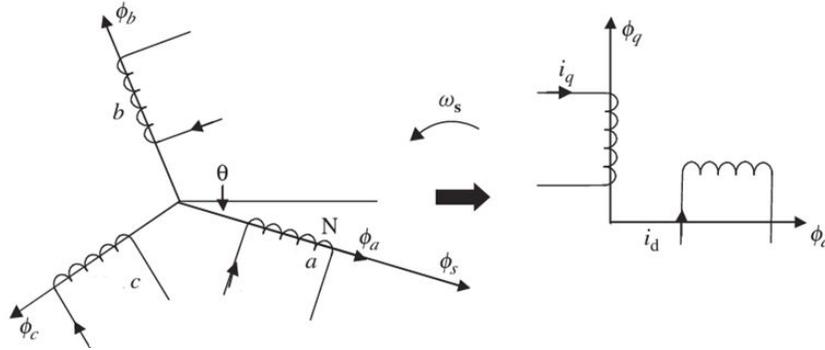


Fig.2.9 Transformación tres a dos fases (Adaptado de Wind Energy Generation Systems: Modelling and Control 2009)

Las ecuaciones de la transformación de Park obtenidas de la referencia [8], son las siguientes

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Matriz de transformación T:

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Matriz de transformación inversa:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Se consideran tres señales de voltaje desfasadas 120°, con voltajes línea neutro v_a , v_b , v_c , simuladas en simulink como se muestra en la figura 2.10.

$$V_{max} = V_{rms} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$v_a = V_{max} \cos (wt)$$

$$v_b = V_{max} \cos (wt - 120^\circ)$$

$$v_c = V_{max} \cos (wt + 120^\circ)$$

Para el desarrollo de las simulaciones se realizo el modelo de los voltajes del estator y de la transformación de park, figuras 2.10 y 2.11.

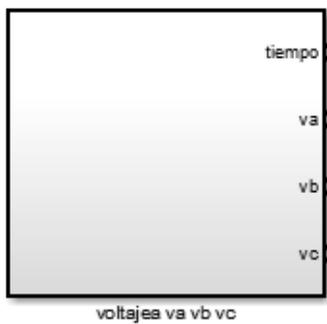


Fig. 2.10 Modelo en simulink de voltajes en el estator v_a , v_b , v_c



Fig. 2.11 Modelo en simulink de la transformación de park

Los diagramas completos en simulink se muestran en el anexo 2.

2.3.3 Ecuaciones que modelan el generador jaula de ardilla

Las ecuaciones de (2.12) a (2.21) que modelan el generador de jaula de ardilla en el marco de rotación dq, que fueron obtenidas de las referencias (Yu Zou, et al, 2010) y (Trilla L, et al, 2010) son las siguientes:

Las ecuaciones de (2.12) a (2.15) muestran la relación de los campos electromagnéticos del estator y el rotor en función de las corrientes del estator y rotor en el marco de rotación dq.

$$\psi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd} \quad (2.12)$$

$$\psi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{rq} \quad (2.13)$$

$$\psi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + L_m \cdot i_{sd} \quad (2.14)$$

$$\psi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + L_m \cdot i_{sq} \quad (2.15)$$

Ψ_{sd} : Campo electromagnético en el estator d

Ψ_{sq} : Campo electromagnético en el estator q

Ψ_{rd} : Campo electromagnético en el rotor d

Ψ_{rq} : Campo electromagnético en el rotor q

i_{sd} : Corriente en el estator d

i_{sq} : Corriente en el estator q

i_{rd} : Corriente en el rotor d

i_{rq} : Corriente en el rotor q

L_{rr} : Inductancia en el rotor

L_r : Inductancia total en el rotor

L_{ss} : Inductancia en el estator

L_s : Inductancia total en el estator

L_m : Inductancia mutua

Las ecuaciones de (2.16) a (2.17) relacionan las inductancias:

$$L_r = L_{rr} + L_m \quad (2.16)$$

$$L_s = L_{ss} + L_m \quad (2.17)$$

Las ecuaciones de (2.18) a (2.21) modelan el sistema eléctrico del estator y rotor en el marco de rotación dq, los volajes en el rotor u_{rd} , u_{rq} son nulos por tratarse de un Generador Jaula de ardilla.

$$\frac{d\psi_{sd}}{dt} = u_{sd} - R_s \cdot i_{sd} + \omega_s \cdot \psi_{sq} \quad (2.18)$$

$$\frac{d\psi_{sq}}{dt} = u_{sq} - R_s \cdot i_{sq} - w_s \cdot \psi_{sd} \quad (2.19)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = (w_s - w) \cdot \psi_{rq} - R_r \cdot i_{rd} \quad (2.20)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = -(w_s - w) \cdot \psi_{rd} - R_r \cdot i_{rq} \quad (2.21)$$

u_{sd} : Voltaje en el estator $d(V)$

u_{sq} : Voltaje en el estator $q(V)$

R_s : Resistencia en el estator (Ω)

R_r : Resistencia en el rotor (Ω)

w_s : Velocidad de rotación del sistema cordenado dq con respecto al estator (rad/s)

w : Velocidad eléctrica de rotación (rad/s)

$$w = w_{mg} N$$

De las ecuaciones (2.12) a (2.15) es posible obtener las corrientes del estator y rotor en función de los campos del estator y rotor (2.22) a (2.25)

$$i_{sd} = \frac{L_r \psi_{sd} - L_m \psi_{rd}}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.22)$$

$$i_{sq} = \frac{L_r \psi_{sq} - L_m \psi_{rq}}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.23)$$

$$i_{rd} = \frac{L_s \psi_{rd} - L_m \psi_{sd}}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.24)$$

$$i_{rq} = \frac{L_s \psi_{rq} - L_m \psi_{sq}}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.25)$$

Remplazando las corrientes del estator y rotor de (2.22) a (2.25) en las ecuaciones que modelan el sistema (2.18) a (2.21), se obtienen las ecuaciones (2.26) a (2.29) que modelan el sistema y que están en función de los campos electromagnéticos del rotor y estator.

$$\frac{d\psi_{sd}}{dt} = u_{sd} - \frac{R_s L_r \psi_{sd}}{(L_s L_r - L_m^2)} + w_s \cdot \psi_{sq} + \frac{R_s L_m \psi_{rd}}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.26)$$

$$\frac{d\psi_{sq}}{dt} = u_{sq} - w_s \cdot \psi_{sd} - \frac{R_s L_r \psi_{sq}}{(L_s L_r - L_m^2)} + \frac{R_s L_m \psi_{rq}}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.27)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = \frac{R_r L_m \psi_{sd}}{(L_s L_r - L_m^2)} - \frac{R_r L_s \psi_{rd}}{(L_s L_r - L_m^2)} + (w_s - w) \cdot \psi_{rq} \quad (2.28)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = \frac{R_r L_m \psi_{sq}}{(L_s L_r - L_m^2)} - (w_s - w) \cdot \psi_{rd} - \frac{R_r L_s \psi_{rq}}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.29)$$

De las ecuaciones (2.26) a (2.29) se obtiene la representación espacio estado del generador jaula de ardilla (2.30)

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_{sd}}{dt} \\ \frac{d\psi_{sq}}{dt} \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_r}{(L_s L_r - L_m^2)} & w_s & \frac{R_s L_m}{(L_s L_r - L_m^2)} & 0 \\ -w_s & -\frac{R_s L_r}{(L_s L_r - L_m^2)} & 0 & \frac{R_s L_m}{(L_s L_r - L_m^2)} \\ \frac{R_r L_m}{(L_s L_r - L_m^2)} & 0 & -\frac{R_r L_s}{(L_s L_r - L_m^2)} & (w_s - w) \\ 0 & \frac{R_r L_m}{(L_s L_r - L_m^2)} & -(w_s - w) & -\frac{R_r L_s}{(L_s L_r - L_m^2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Definiendo como constantes a, b, c, d se obtiene la representación espacio estado (2.35).

$$a = \frac{R_s L_r}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.31)$$

$$b = \frac{R_s L_m}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.32)$$

$$c = \frac{R_r L_m}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.33)$$

$$d = \frac{R_r L_s}{(L_s L_r - L_m^2)} \quad (2.34)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_{sd}}{dt} \\ \frac{d\psi_{sq}}{dt} \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & w_s & b & 0 \\ -w_s & -a & 0 & b \\ c & 0 & -d & (w_s - w) \\ 0 & c & -(w_s - w) & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Se halla el torque eléctrico T_e , la potencia eléctrica P_g , la velocidad mecánica del rotor w_{mg} , como se indica en las ecuaciones (2.36), (2.37) y (2.38) respectivamente, referencias (Yu Zou, et al, 2010) y (Trilla L, et al,2010).

$$T_e = 1.5 N (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) \quad (2.36)$$

N : Número de par polos

T_e : Torque eléctrico (Nm)

$$P_g = -(u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \quad (2.37)$$

P_g : Potencia generada (W)

La ecuación (2.38) modela el sistema el sistema mecánico, sin considerar coeficientes de fricción.

$$\frac{dw_{mg}}{dt} = \frac{(T_e + T_m)}{J} \quad (2.38)$$

J : Momento de Inercia total referido al eje del generador (Kgm^2)

T_m : Torque mecánico de turbina (Nm)

T_e : Torque electromagnético (Nm)

Se desarrolla el modelo del generador Jaula de ardilla en simulink, figura 2.12, se considera como entradas los voltajes en el estator u_{sq} , u_{sd} y el torque mecánico generado en la turbina gracias al viento T_m , la salida es la velocidad angular del rotor del generador y la potencia generada.

El diagrama completo en simulink se muestra en el anexo 2.

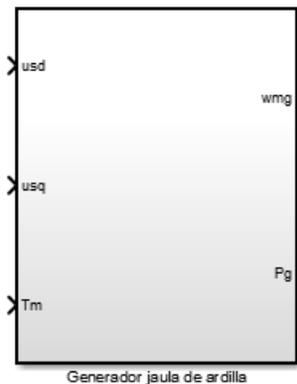


Fig. 2.12 Modelo del generador Jaula de ardilla en Simulink

En la figura 2.13 se muestran los bloques específicos del modelo del generador Jaula de ardilla. El bloque de Flujos (bloque 1) se basa en el modelo de la matriz de estado 2.35, se considera como un valor constante la velocidad eléctrica del estator w_s . La velocidad eléctrica $w = w_{mg} N$, se halla de la ecuación (2.38). Las entradas son la velocidad mecánica y los voltajes en el estator u_{sq} , u_{sd} , las salidas son los flujos electromagnéticos del rotor y el estator. En el bloque corrientes (bloque 2) se utiliza las ecuaciones de (2.22) a (2.25) para hallar las corrientes en el estator y rotor a partir de los flujos obtenidos del bloque 1. En el bloque Torque eléctrico (bloque 3) se halla el torque eléctrico utilizando la ecuación (2.36). En el bloque velocidad angular del rotor (bloque 4), se halla la velocidad mecánica del rotor de la ecuación (2.38). En el bloque Potencia, se halla la potencia generada (2.37). Los diagramas completos de cada bloque en simulink se muestran en el anexo 2.

Se utiliza una configuración en la cual el generador de inducción jaula de ardilla es conectado directamente a la red (capítulo 1), el voltaje y la frecuencia en los terminales del generador son impuestos por la red. La configuración se muestra en la figura 2.14

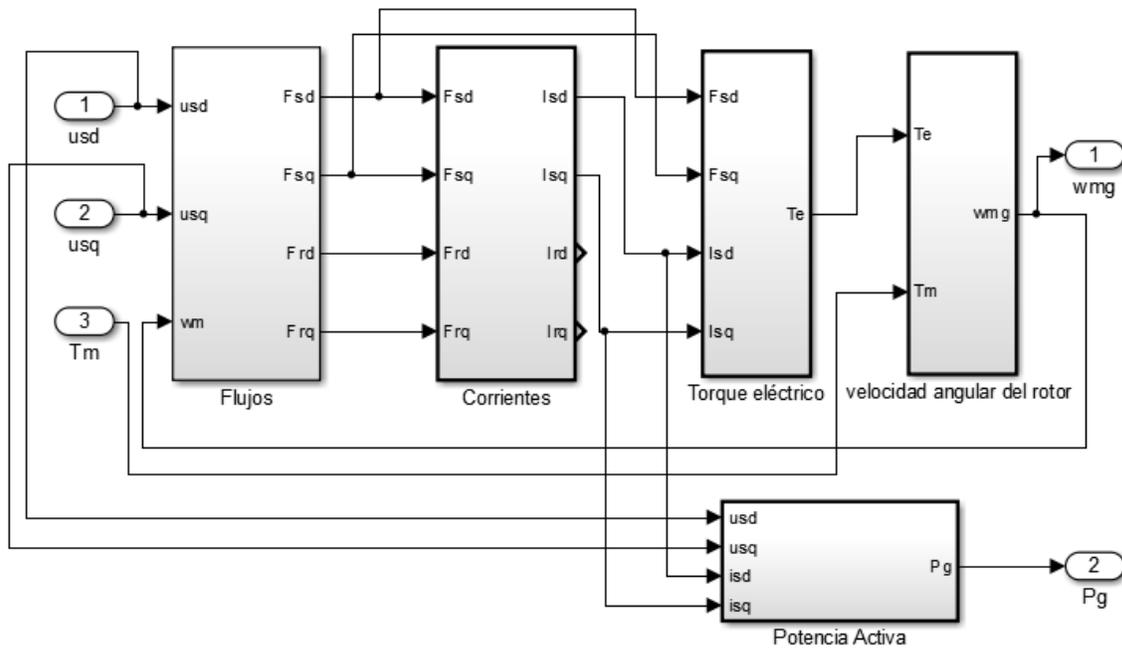


Fig. 2.13 Modelo detallado del generador jaula de ardilla desarrollado en Simulink

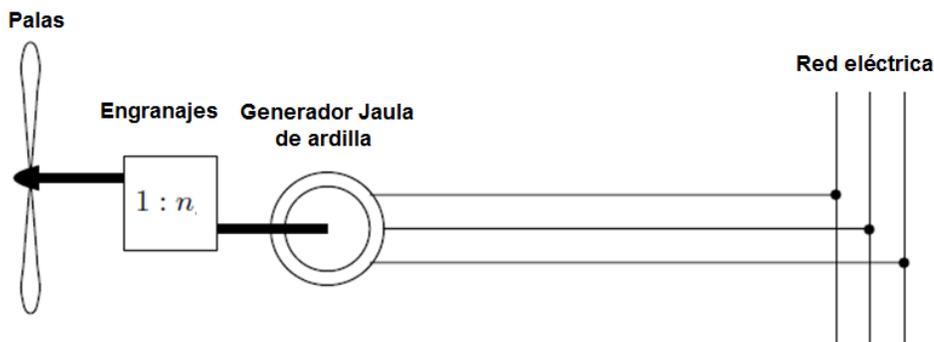


Fig. 2.14 Generador de inducción jaula de ardilla directamente conectado a la red. (Adaptación de Wind Turbine Control Systems 2007)

2.3.4 Simulación del modelo del generador Jaula de ardilla

Para el modelo del generador Jaula de ardilla de potencia nominal P_n igual a 0.66MW, se van a considerar los parámetros siguientes, obtenidos de la referencia (Macêdo A.V.A, 2012)

$N=4$	número de par de polos
$f_s=60\text{Hz}$	frecuencia de la línea
$\omega_s = 2*\pi*60 \text{ rad/s}$	frecuencia angular de la línea
$R_s=0.0067\Omega;$	Resistencia en el estator
$L_{ss}=0.03/\omega_s \text{ H};$	Inductancia en el estator
$R_r=0.0058 \Omega;$	Resistencia en el rotor
$L_{rr}=0.0506/\omega_s \text{ H};$	Inductancia en el rotor
$L_m=2.3161/\omega_s \text{ H};$	Inductancia mutua
$P_n=0.66 \text{ MW}$	
Voltaje eficaz fase a fase = 690 V	
Engranajes $n=30$	
$J_G=1 \text{ Kgm}^2$	

Momento de inercia referido al eje del generador

$$J=J_G+ J_T/n^2$$

$$J=1+ 16.10^5 /30^2=1777.7\text{Kgm}^2$$

En la figura 2.15 se muestra el diagrama en simulink del generador jaula de ardilla.

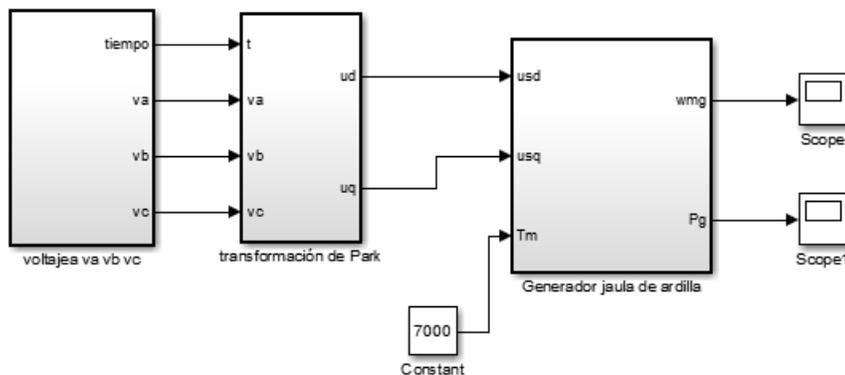


Fig. 2.15 Simulación del Generador jaula de ardilla

La simulación de la velocidad mecánica y la potencia eléctrica para un Torque mecánico igual a cero, $T_m=0$, se muestra en las figuras 2.16 y 2.17.

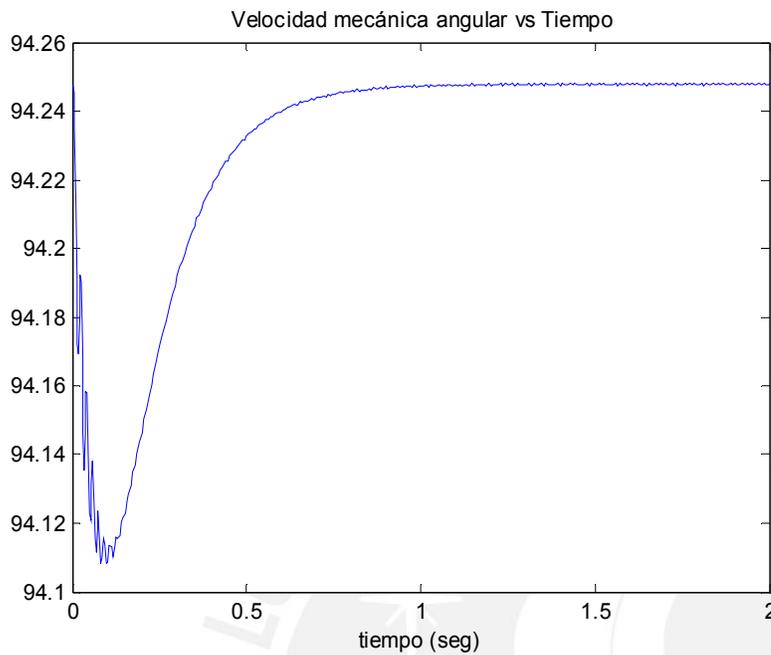


Fig. 2.16 Velocidad angular del eje del generador

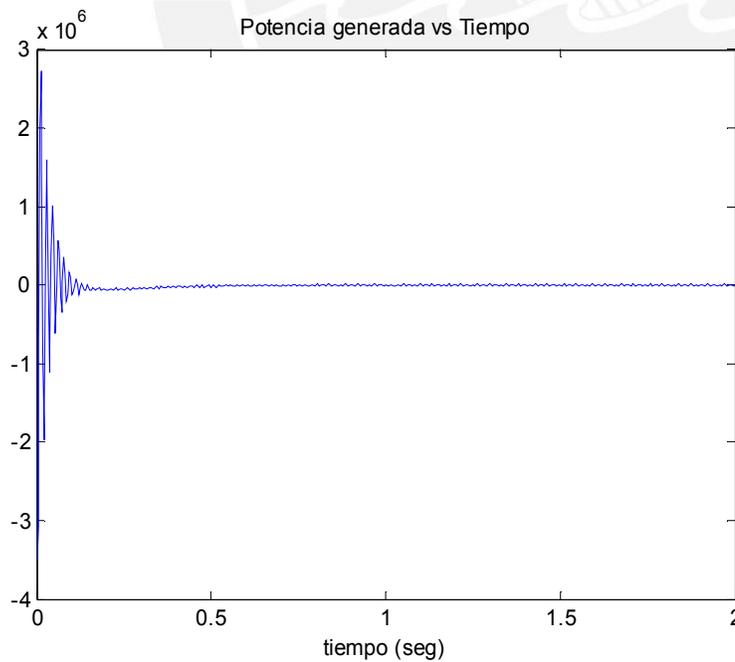


Fig. 2.17 Potencia Eléctrica Generada

Las simulaciones para un torque mecánico de la turbina $T_m=1000$ Nm se observa en las figuras 2.17 y 2.18

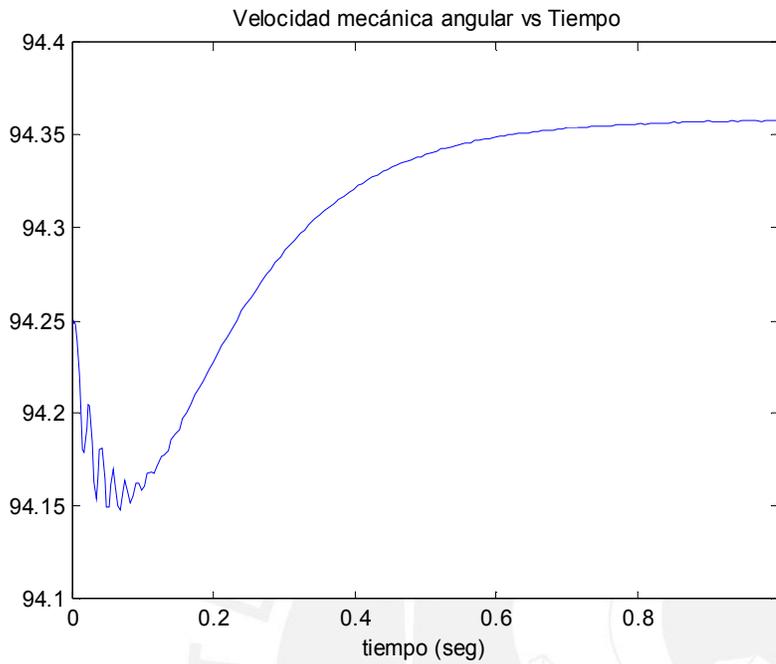


Fig. 2.17 Velocidad angular del eje del generador

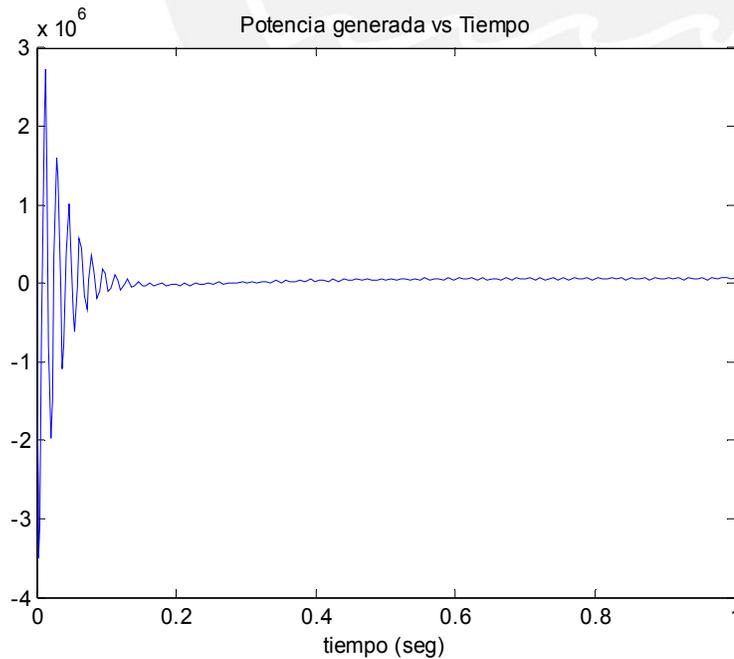


Fig. 2.18 Potencia Eléctrica Generada

Las simulaciones para un torque mecánico de la turbina $T_m=7000$ Nm se observa en las figuras 2.19 y 2.20

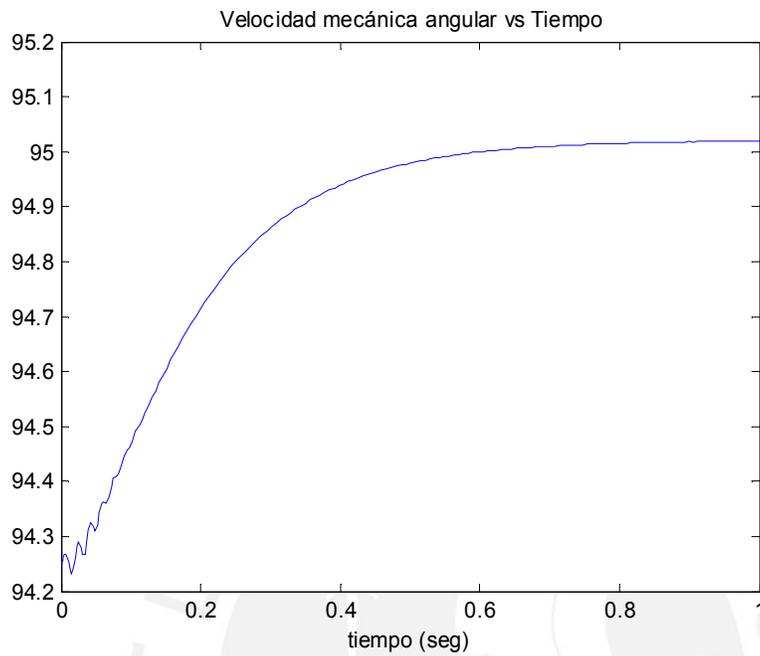


Fig. 2.19 Velocidad angular del eje del generador

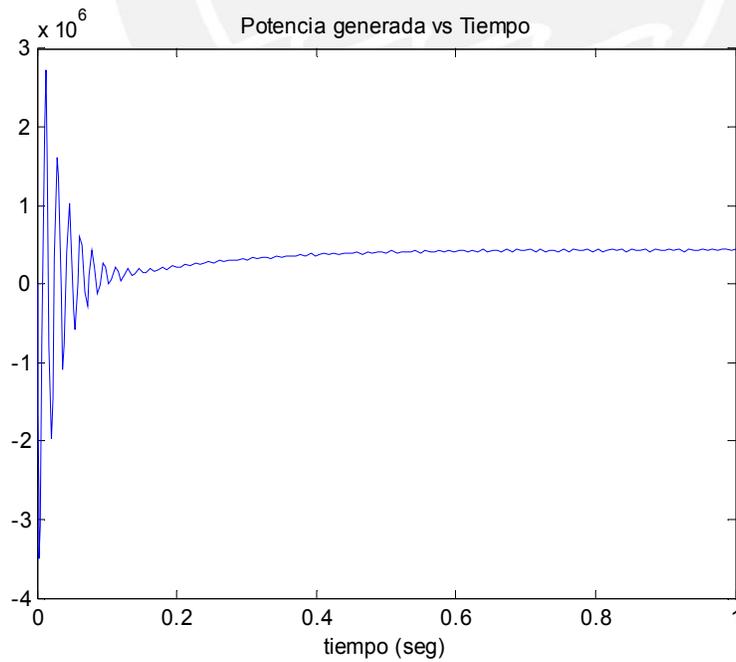


Fig. 2.20 Potencia Eléctrica Generada

Puede observarse que la velocidad angular del rotor permanece casi constante, para torque mecánico $T_m=0$ Nm la velocidad angular del eje del rotor es $w_m=94.25$ rad/s, para un torque $T_m=1000$ Nm, la velocidad angular del eje del rotor es ligeramente superior $w_m=94.36$ rad/s, para un torque mecánico de $T_m=7000$ Nm la velocidad angular se incrementa a un valor de $w_m=95.01$.

Como era de esperarse la potencia generada es $P_g=0$ para un torque mecánico $T_m=0$ Nm, si se incrementa el torque a un valor $T_m=1000$ Nm, la potencia generada en promedio es $P_g=5 \times 10^4$ W, para un torque mecánico de $T_m=7000$ Nm, la potencia generada en promedio es $P_g=4.3 \times 10^5$ W.

2.4 Modelo del actuador de la variación del ángulo de paso (pitch angle)

Para limitar la potencia de turbinas de tamaños medianos y grandes, se utiliza el control de la variación del ángulo de paso, que permite la rotación de las palas o álabes del rotor al rededor de sus ejes longitudinales, mediante la utilización de dispositivos mecánicos e hidráulicos. En el desarrollo de esta tesis se considera el modelo del actuador de la referencia (Macêdo A.V.A, 2012), que se observa en la figura 2.21.

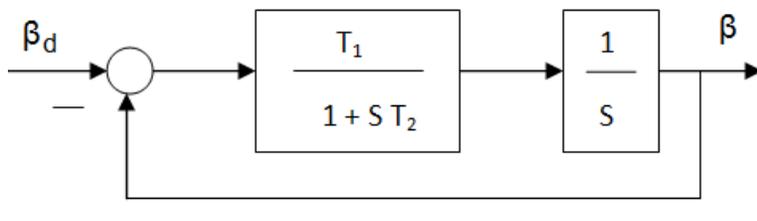


Fig. 2.21 Actuador variación ángulo de paso (Adaptación Wind turbine pitch angle control using Fuzzy Logic 2012)

En la figura 2.22 se muestra el diagrama en simulink del actuador de variación de ángulo de paso.

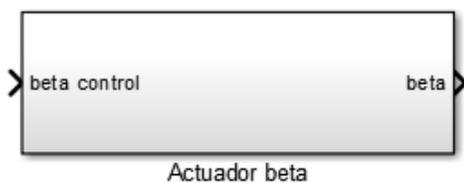


Fig. 2.22 Actuador variación ángulo de paso

El diagrama completo en simulink se muestran en el anexo 2.

En la figura 2.23 se observa el gráfico del ángulo β , para un valor de referencia de β de 15° .

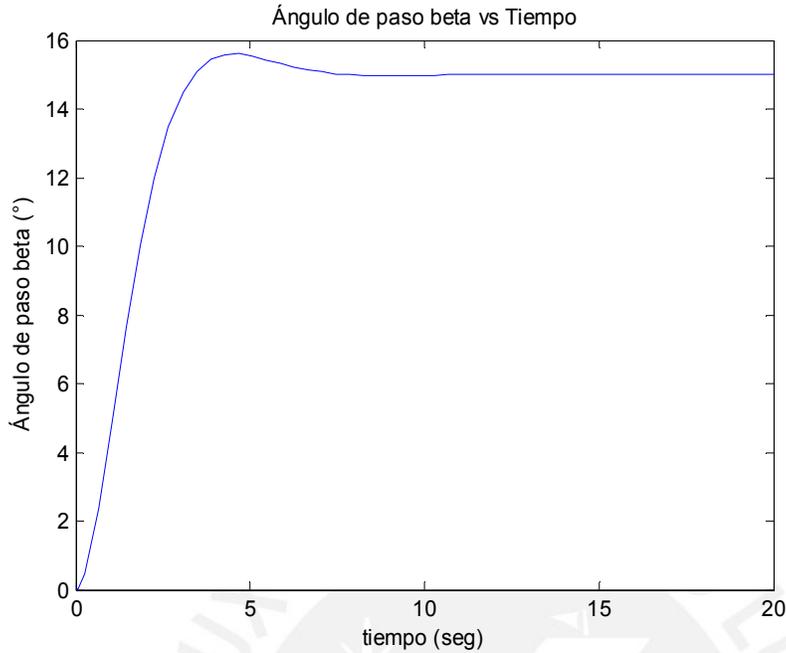


Fig. 2.23 Ángulo de paso β

En la figura 2.24 se observa el gráfico de la variación en el tiempo del ángulo de paso β , para un valor de referencia de β de 15° .

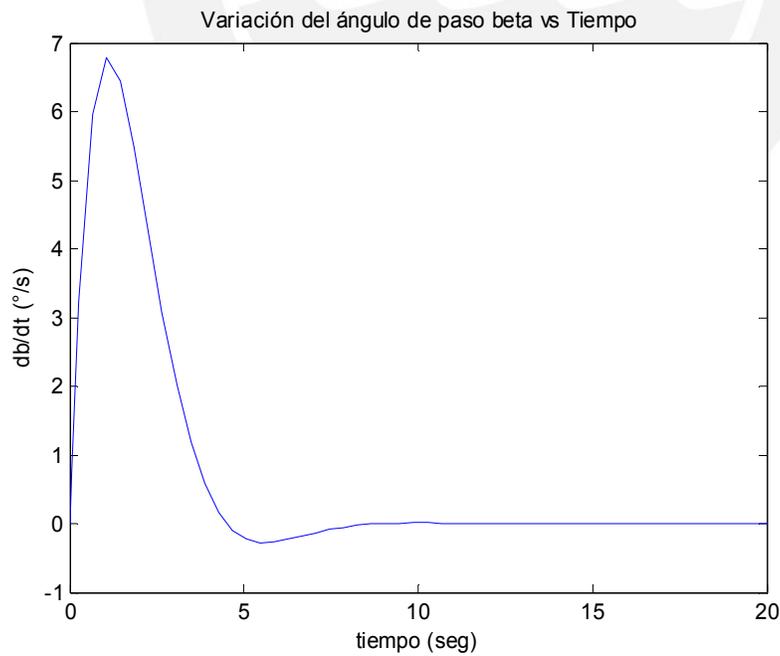


Fig. 2.24 Variación en el tiempo del ángulo de paso β ($d\beta/dt$)

2.5 CONCLUSIONES:

Conclusiones relacionadas con el modelo de la turbina:

Del gráfico de la figura 2.2 (superficie de C_p en función de λ y β), se puede concluir que a menor ángulo de paso β , el coeficiente C_p se incrementa, el máximo valor de C_p se obtiene para un valor ideal de $\beta=0$.

Del gráfico de la figura 2.3, que relaciona C_p versus λ para variaciones del ángulo β de 0° a 90° , se concluye que el máximo coeficiente de potencia $C_p=0.41$, se obtiene para $\beta=0^\circ$ y $\lambda=8$. El máximo valor de C_p cumple con el límite de Betz pues es menor de 0.593.

De la figura 2.4, que relaciona la P_m en función de la velocidad angular del rotor w , para diferentes velocidades del viento V , se concluye que la potencia mecánica extraíble de la turbina P_m guarda una relación no lineal con la velocidad angular del rotor, existe un valor específico de la velocidad del rotor, para una máxima eficiencia de la turbina.

Conclusiones relacionadas con el generador jaula de ardilla:

La velocidad angular del rotor no se incrementa en más del 0.8%, de $w_m=94.25$ rad/s a $w_m=95.01$ rad/s, para variaciones del torque mecánico de $T_m=0$ Nm a $T_m=7000$ Nm, por lo que se concluye que el generador de inducción puede considerarse de velocidad casi constante.

La potencia del generador, presenta altos sobre impulsos de arranque, pero se estabiliza de manera rápida, tiempo de establecimiento menor de 0.5 s, en esta simulación no se consideran dispositivos de electrónica para la reducción de éstos picos.

Conclusiones relacionadas con el actuador de la variación del ángulo de paso:

Para los valores $T_1=0.7$, $T_2=0.7$, se cumple que si el ángulo de paso β está comprendido en el rango $[-2^\circ \ 25^\circ]$, la variación en el tiempo de β ($d\beta/dt$), está limitado en el rango $[-1^\circ/s \ 11^\circ/s]$.

CAPITULO 3. CONTROLADOR DIFUSO DE UN SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

3.1 Introducción

En este capítulo se desarrollará en forma resumida la teoría de conjuntos difusos y del control difuso, explicando las funciones de pertenencia, la base de reglas de la lógica difusa, los mecanismos de inferencia y la defusificación, tomando como base las referencias (Nikola K. Kasabov ,1998) , (Guanrong Chen, et al, 2000), (Chennakesava R. Alavala, 2000), para luego realizar el control difuso de la potencia de un aerogenerador modelado en el capítulo 2 ,mediante la regulación del ángulo de paso β . Se consideró desarrollar el control difuso, porque permite controlar sistemas no lineales, y el modelo completo del aerogenerador incluye las no linealidades del modelo de la turbina y del generador jaula de ardilla, en este capítulo realiza una comparación entre el control difuso y el control PID.

3.2 Teoría del Control difuso

La noción de lógica difusa fue introducida por primera vez por LotfiZadeh en 1965, en lógica difusa, un elemento puede pertenecer parcialmente a un conjunto, el grado de pertenencia es definido a través de una función característica generalizada, llamada función de pertenencia, los valores de la función de pertenencia son números reales en el intervalo de 0 a 1 ,0 indica que el objeto no es miembro del conjunto y 1 significa que pertenece completamente al conjunto, cada valor de la función es denominado grado de pertenencia.

La nomenclatura para un conjunto difuso es $\mu_A(u):U \rightarrow [0 1]$,donde U es el universo y A es un conjunto difuso de U.

3.2.1 Funciones de pertenencia

La conceptualización en términos difusos, consiste en representar un sistema en términos difusos, una variable lingüística pueden ser representada por una función de pertenencia. Un ejemplo fácil de entender sería la variable edad, el rango de valores del conjunto edades

es de $[0, 120]$ y la función pertenencia está en el rango $[0, 1]$, aunque los rangos de la variable edad y de la función de pertenencia no varíen, si

puede variar la forma de la gráfica de la función de pertenencia, como se muestra en las figura 3.1 y 3.2.

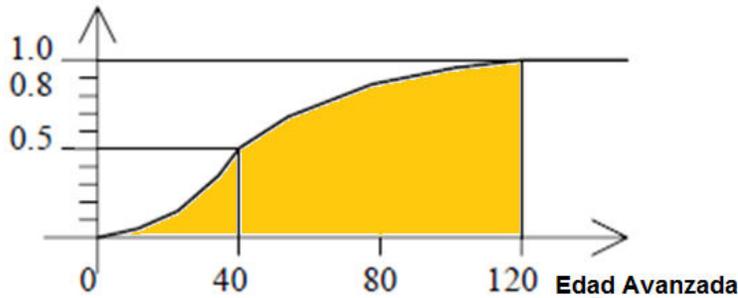


Fig. 3.1 Función de pertenencia 1. (Adaptado Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems 2000)

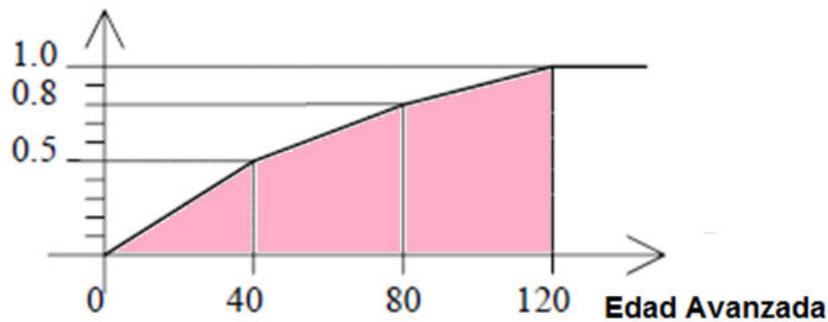


Fig. 3.2 Función de pertenencia 2. (Adaptado Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems 2000)

Algunas funciones de pertenencia comúnmente utilizadas son la Función de pertenencia Triangular, la función de transferencia trapezoidal, y la función de pertenencia Campana de Gauss.

A Función de pertenencia Triangular

Se denota como $\mu_A(x)=\text{triángulo}(x, a, b, c)$ y la función matemática se muestra en la ecuación 3.1

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (3.1)$$

Un ejemplo de función triangular se muestra en la figura 3.3.

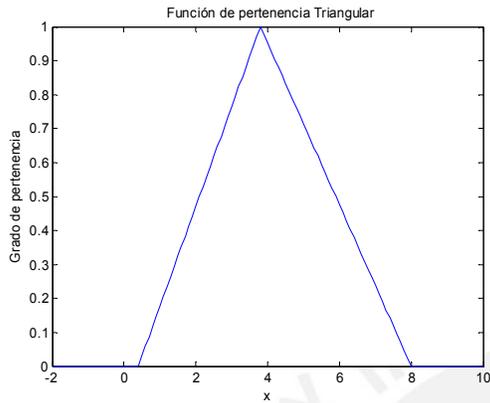


Fig. 3.3 Función de pertenencia Triangular

B Función de pertenencia Trapezoidal

Se denota como $\mu_A(x)=\text{trapezio}(x, a, b, c, d)$ y la función matemática se muestra en la ecuación 3.2

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{c-x}{c-b} & c \leq x \leq d \end{cases} \quad (3.2)$$

Un ejemplo de función trapezoidal $a=0.4, b=2, c=4.8, d=8$, se muestra en la figura 3.4.

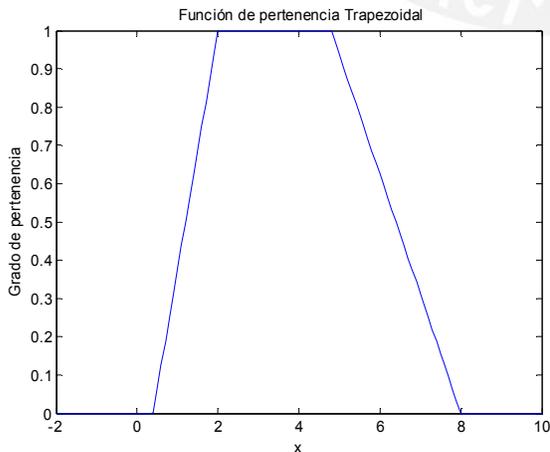


Fig. 3.4 Función de pertenencia Trapezoidal

C Función de pertenencia Campana de Gauss

Se denota como $\mu_A(x)$ =campana de gauss(x, c, σ) y la función matemática se muestra en la ecuación 3.3

$$\mu_A(x) = \left\{ \exp\left(\frac{(x - c)^2}{2\sigma^2}\right) \right. \quad (3.3)$$

Un ejemplo de función Campana de Gauss se muestra en la figura 3.5

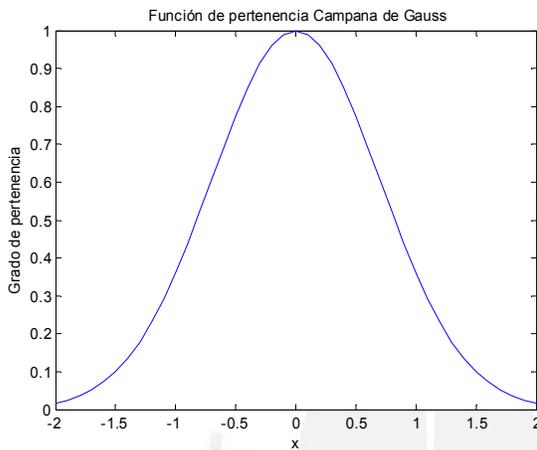


Fig. 3.5 Función de pertenencia Campana de Gauss

La lógica difusa se caracteriza porque es posible que un elemento tenga dos valores diferentes de pertenencia, por ejemplo si se consideran dos funciones de pertenencia trapezoidales denominadas positivo grande y negativo pequeño, observadas en la figura 3.6, el número 0.1, tiene como valor de pertenencia 0.095 para la función de pertenencia positivo grande y el valor de pertenencia 0.08 para la función negativo pequeño.

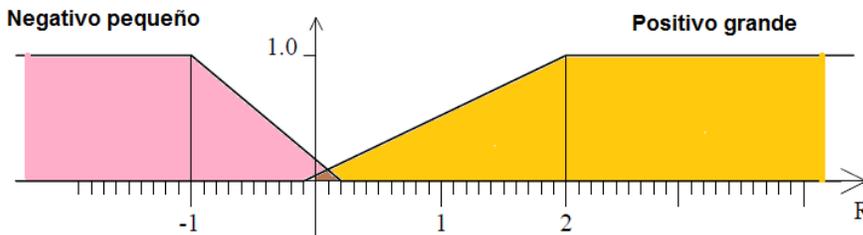


Fig. 3.6 Función de pertenencia (Adaptado Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems 2000)

Un conjunto difuso es denominado normal, si la función de pertenencia tiene el grado 1, al menos para un valor del universo U.

3.2.2 Base de reglas de la lógica difusa

Se definen las operaciones lógicas básicas en las ecuaciones:

$$\text{AND} : \mu_A(a \wedge b) = \mu_A(a) \wedge \mu_A(b) = \min\{\mu_A(a), \mu_A(b)\}$$

$$\text{OR} : \mu_A(a \vee b) = \mu_A(a) \vee \mu_A(b) = \max\{\mu_A(a), \mu_A(b)\}$$

$$\text{NOT} : \mu_A(\bar{a}) = \mu_{\bar{A}}(a) = 1 - \mu_A(a)$$

IMPLICACIÓN: Se define la implicación $a \Rightarrow b$: **IF** $a \in A$ es verdad con valor de verdad $\mu_A(a)$ **THEN** $b \in B$ es verdad con valor de verdad $\mu_B(b)$, que se expresa de la siguiente manera:

$$\text{IF } \mu_A(a) \text{ THEN } \mu_B(b)$$

Se generaliza esta regla para varios subconjuntos:

IF $a_1 \in A_1$ es verdad con valor de verdad $\mu_{A_1}(a_1)$ **AND** $a_2 \in A_2$ es verdad con valor de verdad $\mu_{A_2}(a_2)$ and.....**AND** $a_n \in A_n$ es verdad con valor de verdad $\mu_{A_n}(a_n)$ **THEN** $b \in B$ es verdad con valor de verdad $\mu_B(b)$, esta regla puede ser expresada como se indica a continuación:

$$\text{IF } \mu_{A_1}(a_1) \wedge \mu_{A_2}(a_2) \wedge \dots \dots \mu_{A_n}(a_n) \text{ THEN } \mu_B(b)$$

$$\text{IF } A_1 \text{ es } a_1 \wedge A_2 \text{ es } a_2 \dots \dots A_n \text{ es } a_n \text{ THEN } B \text{ es } b$$

3.2.3 Mecanismos de inferencia en un sistema modelado a través de las reglas lógicas difusas

Se consideran 2 reglas difusas IF THEN, para facilitar el desarrollo de los mecanismos de inferencia de la referencia (Chennakesava R. Alavala, 2000),

$$\text{IF } x \text{ es } A_1 \text{ AND } y \text{ es } B_1 \text{ THEN } z \text{ es } C_1$$

$$\text{IF } x \text{ es } A_2 \text{ AND } y \text{ es } B_2 \text{ THEN } z \text{ es } C_2$$

$$x \text{ es } x=x_0, y \text{ es } y=y_0 \text{ c es } z_0$$

A Mecanismo de inferencia Mamdani

La implicación es modelada por ecuación 3.4, el mínimo operador, la sentencia and (\wedge) es definida por el mínimo operador y la sentencia conectiva (\vee), es definida por el máximo operador.

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$$

$$C(w) = (\alpha_1 \wedge C_1(w)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(w)) \quad (3.4)$$

Para determinar el valor z_0 se puede utilizar cualquier estrategia de defusificación, una de ellas es la del centro de gravedad.

B Mecanismo de inferencia Tsukamoto

Este mecanismo de inferencia α_1 y α_2 se expresan como:

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$$

z_0 se obtiene de la ecuación del centro de gravedad discreto, ecuación 3.5.

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (3.5)$$

Para n reglas se tiene la ecuación 3.6

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (3.6)$$

C Mecanismo de inferencia Sugeno

En este mecanismo de inferencia para α_1 y α_2 se expresan como:

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$$

z_1^* y z_2^* son las salidas de las reglas individuales

$$z_1^* = a_1x_0 + b_1y_0$$

$$z_2^* = a_2x_0 + b_2y_0$$

z_0 se obtiene de la ecuación 3.7.

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (3.7)$$

Para n reglas se tiene la ecuación 3.8

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i^*}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (3.8)$$

D Mecanismo de inferencia Larsen

La implicación \wedge , es modelada por la operación producto de Larsen, y la sentencia conectiva \vee , es definida por el máximo operador, como se indica en la ecuación 3.9

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$$

$$C(w) = (\alpha_1 \cdot C_1(w)) \vee (\alpha_2 \cdot C_2(w)) \quad (3.9)$$

Para determinar el valor z_0 se puede utilizar cualquier estrategia de defusificación, una de ellas es la del centro de gravedad.

3.2.4 Estrategias de defusificación

Las estrategias de defusificación aquí presentadas se obtienen de la referencia (Chennakesava R. Alavala, 2000).

A Centro de área o gravedad: z_0 es definido como el centroide ,ecuación 3.10.

$$z_0 = \frac{\int zC(z)dz}{\int c(z)dz} \quad (3.10)$$

Si se considera funciones de membresía discretas $C(w)$, z_0 se expresa como indica la ecuación 3.11

$$z_0 = \frac{\sum z_j C(z_j)}{\sum c(z_j)} \quad (3.11)$$

B Primer máximo : z_0 es el primer elemento con mayor grado de membresía del conjunto difuso $C(w)$, como se observa en la figura 3.7.

$$z_0 = \min\{z / C(z) = \max C(w)\}$$

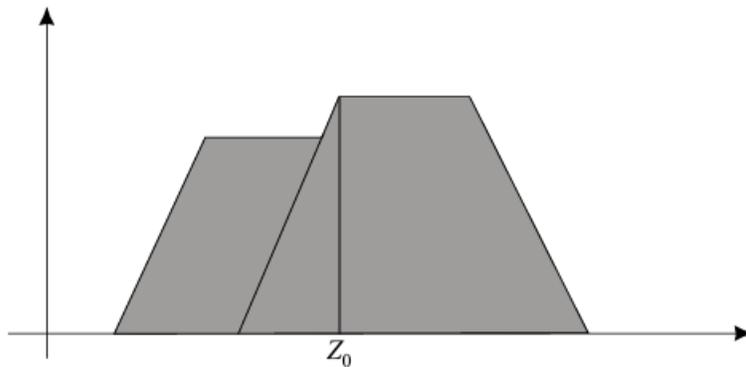


Fig.3.7 Estrategia de defusificación primer máximo(FUZZY LOGIC AND NEURAL NETWORKS BASIC CONCEPTS AND APPLICATIONS)

C Centro máximo: Se define z_0 como la siguiente expresión de la ecuación 3.12, G es el sub conjunto donde se obtienen los mayores valores de membresía C , como se observa en la figura 3.8.

$$z_0 = \frac{\int_G z dz}{\int_G dz} \quad (3.12)$$

Para sistema discreto se define z_0 como la ecuación 3.13, $z_1 \dots z_n$, elementos del universo w , con máximos valores de C

$$z_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n z_j \quad (3.13)$$

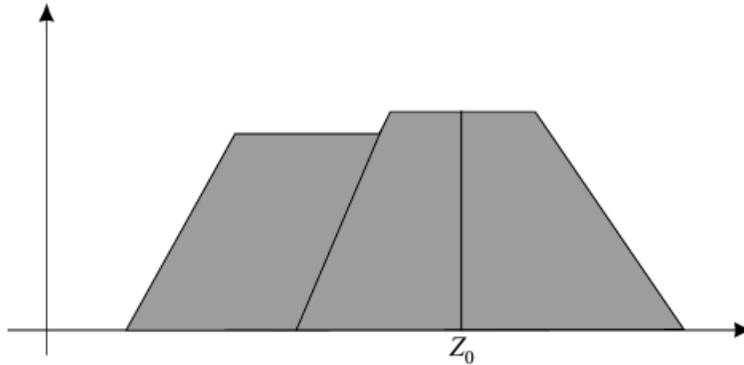


Fig.3.8 Estrategia de defusificación centro máximo (FUZZY LOGIC AND NEURAL NETWORKS BASIC CONCEPTS AND APPLICATIONS)

D Máximo: Se elige un valor arbitrario con mayor grado de membresía $C(w)$

$$z_0 \in \{z / C(z) = \max C(w)\}$$

E Defusificación por discriminación de altura: Los elementos del universo W , con grado de membresía menor que un valor α , no son considerados, y el valor z_0 se calcula por el método del centro de área de los elementos con grado de membresía mayores o iguales a α , ecuación 3.14, figura 3.9.

$$z_0 = \frac{\int_{\alpha} zC(z)dz}{\int_{\alpha} c(z)dz} \tag{3.14}$$

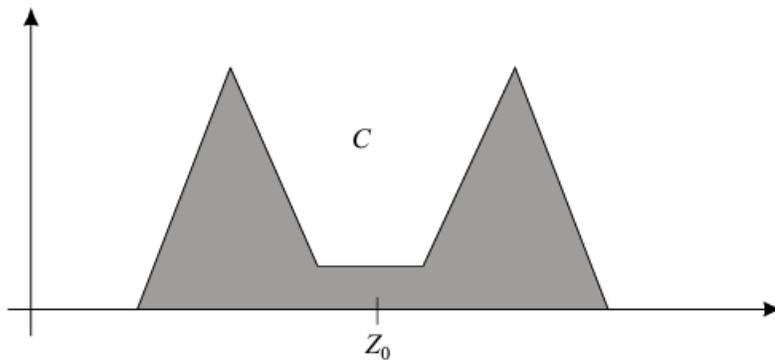


Fig.3.9 Estrategia de defusificación por discriminación de altura(FUZZY LOGIC AND NEURAL NETWORKS BASIC CONCEPTS AND APPLICATIONS)

3.2.5 Control Difuso

El control difuso consiste de una etapa de fusificación del error, un conjunto de reglas difusas que rigen el comportamiento del controlador, un mecanismo de inferencia de las reglas difusas, y una etapa de defusificación para obtener el valor de salida del controlador, como puede observarse en la figura 3.10.

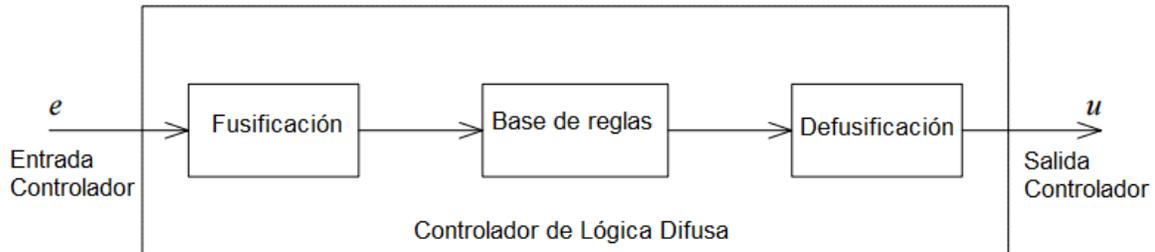


Fig. 3.10 Estructura General de un controlador de Lógica Difusa (Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems 2001)

3.3 Control difuso de la potencia de un aerogenerador

En esta sección se aplicará los conceptos mostrados en el capítulo 3.2.

Para realizar el controlador difuso, primero se debe realizar la fusificación de las variables del controlador a través de funciones de pertenencia, es decir se deben determinar las funciones de pertenencia de las señales del error $e(t)$, velocidad del viento $v(t)$ y ángulo de paso $\beta(t)$. Luego se genera la base de reglas difusas en función de las simulaciones del sistema. Finalmente se realiza la defusificación para hallar la señal de control $\beta_0(t)$.

El diagrama del controlador difuso se muestra en la figura 3.11

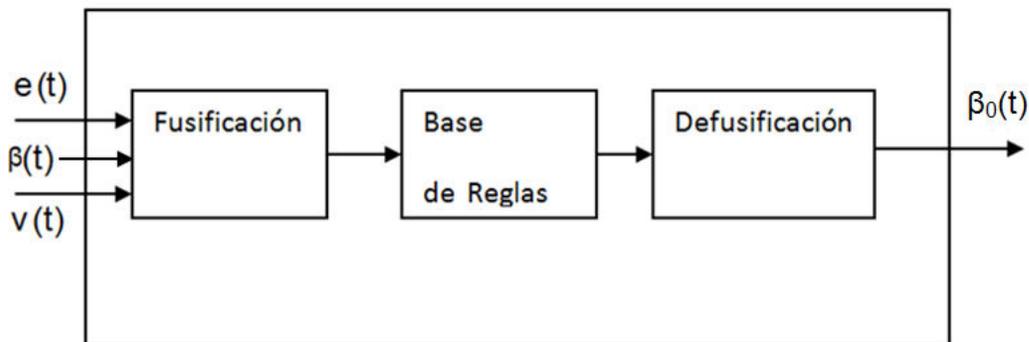


Fig. 3.11 Controlador Difuso

3.3.1 Funciones de pertenencia de las variables del controlador:

Para el diseño del controlador se realizaron simulaciones para estudiar el comportamiento de la planta, y establecer la base de reglas difusas más adecuadas, durante las simulaciones se busco obtener la máxima potencia para velocidades bajas del viento y para velocidades altas se busco obtener la potencia de referencia, estableciéndose los rangos de velocidad críticos que son considerados en el controlador difuso. Es posible obtener un control adecuado con un menor número de funciones de pertenecía de velocidad, considerando solo las velocidades medias y altas pero no se consideraría obtener la máxima potencia a velocidades bajas.

A. Entrada del controlador error $e(t)$:

Se consideran 7 funciones de pertenencia:

HNE: Error negativo alto, función de pertenencia trapezoidal

MNE: Error negativo mediano, función de pertenencia triangular

LNE: Error negativo bajo, función de pertenencia triangular

CE: Error cercano a cero, función de pertenencia triangular

LPE: Error positivo bajo, función de pertenencia triangular

MPE: Error positivo mediano, función de pertenencia triangular

HPE: Error positivo alto, función de pertenencia trapezoidal

Las características de las funciones de pertenencia de $e(t)$, se observan en la figura 3.12.

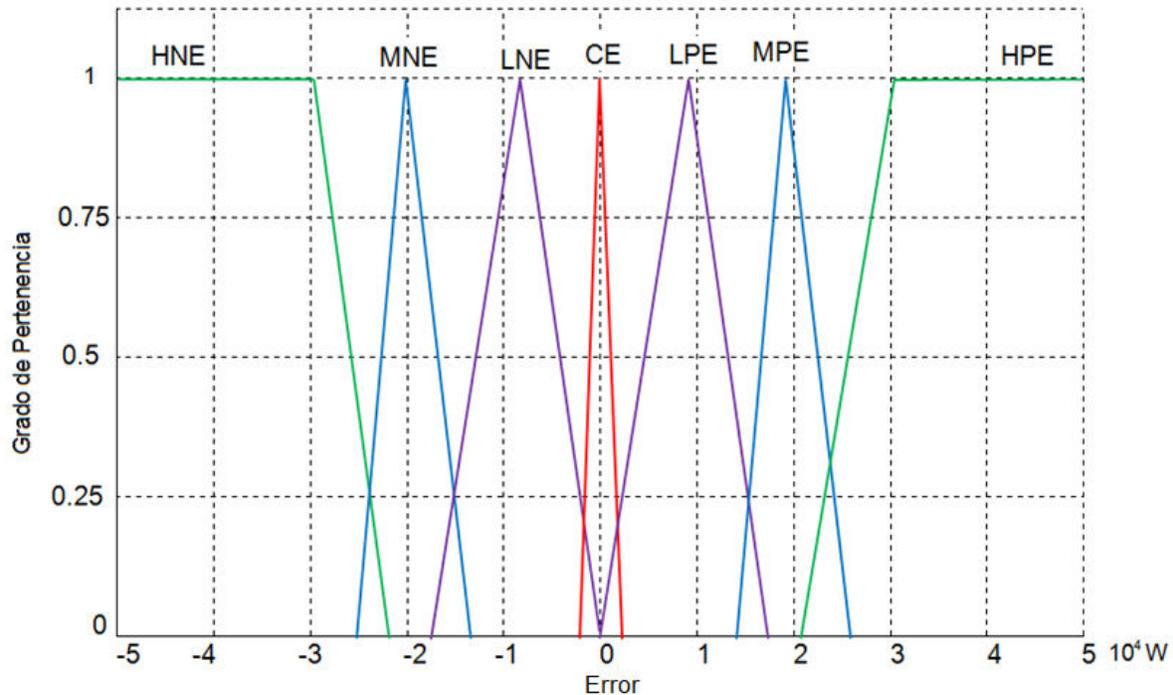


Fig. 3.12 Funciones de Pertenencia del error $e(t)$

B. Entrada del controlador velocidad del viento $v(t)$:

Se consideran 7 funciones de pertenencia:

HBV: Velocidad muy baja, función de pertenencia trapezoidal

MBV: Velocidad medianamente baja, función de pertenencia triangular

LBV: Velocidad baja, función de pertenencia triangular

CV: Velocidad media, función de pertenencia triangular

LAV: Velocidad alta, función de pertenencia triangular

MAV: Velocidad medianamente alta, función de pertenencia triangular

HAV: Velocidad muy alta, función de pertenencia trapezoidal

Las características de las funciones de pertenencia de $v(t)$, se observan en la figura 3.13.

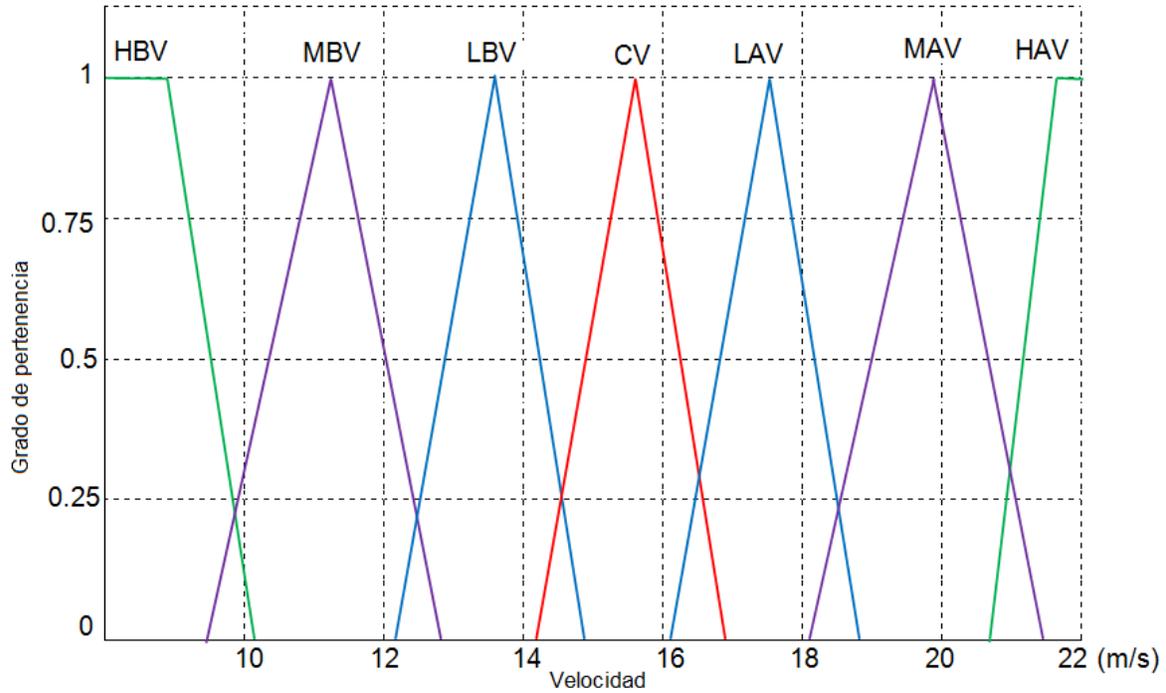


Fig. 3.13 Funciones de Pertenencia de la velocidad $v(t)$

C. Salida del controlador ángulo de paso $\beta(t)$:

Se consideran 7 funciones de pertenencia:

- BH: Ángulo de paso β muy bajo, función de pertenencia triangular
- BM: Ángulo de paso β medianamente bajo, función de pertenencia triangular
- BL: Ángulo de paso β bajo, función de pertenencia triangular
- CB: Ángulo de paso β medio, función de pertenencia triangular
- AL: Ángulo de paso β alto, función de pertenencia triangular
- AM: Ángulo de paso β medianamente alto, función de pertenencia triangular
- AH: Ángulo de paso β muy alto, función de pertenencia triangular

Las características de las funciones de pertenencia de $\beta(t)$, se observan en la figura 3.14.

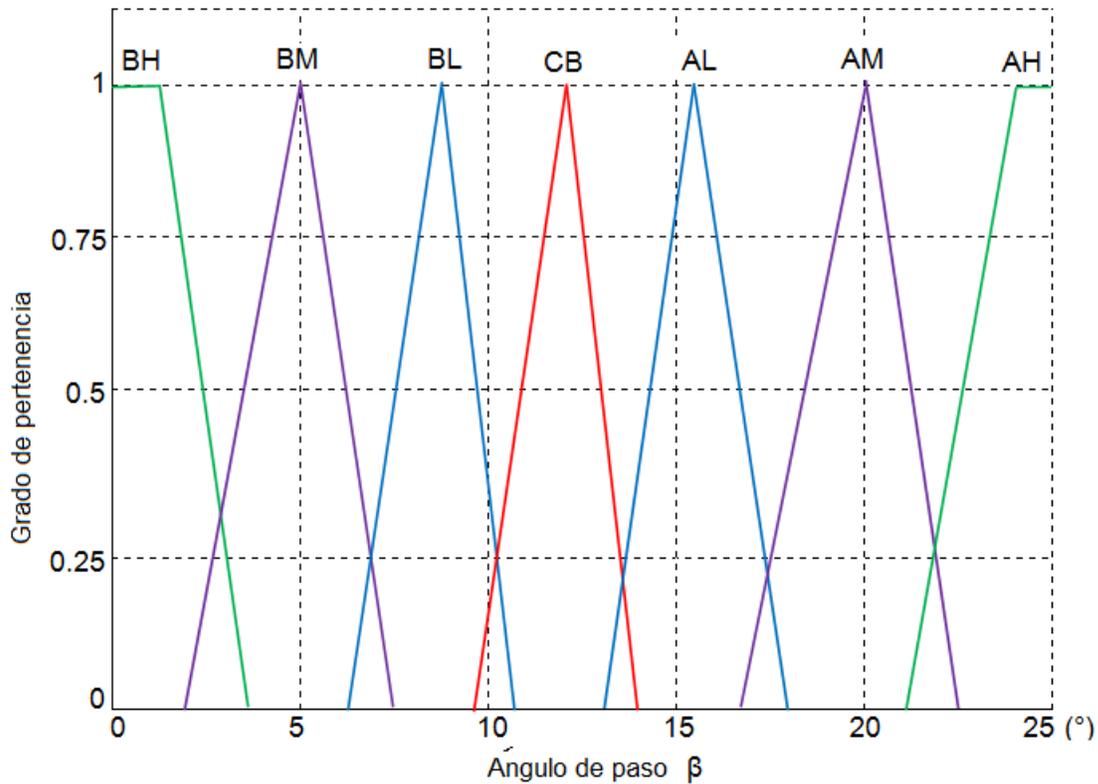


Fig. 3.14 Funciones de Pertenencia del ángulo de paso $\beta(t)$

3.3.2 Base de Reglas difusas

En el libro “Flexible neuro fuzzy system” (Leszek Rutkowski, 2004) se indica como una conclusión que el mecanismo de inferencia Mamdani, responde mejor para la aproximación de sistemas no lineales al compararlo con los sistemas de inferencia lógicos como el Takagi Sugeno, como el sistema a controlar es no lineal se eligió este mecanismo de inferencia. La implicación **AND** es modelada por el mínimo operador, y la sentencia conectiva es definida por el máximo operador.

Se consideró el siguiente conjunto de 49 reglas difusas IF...THEN, entre las funciones de pertenencia de las señales de entrada y salida.

1. **IF** $e(t)$ es HNE **AND** $v(t)$ es HBV **THEN** $\beta(t)$ es BM
2. **IF** $e(t)$ es HNE **AND** $v(t)$ es MBV **THEN** $\beta(t)$ es BL
3. **IF** $e(t)$ es HNE **AND** $v(t)$ es LBV **THEN** $\beta(t)$ es AL
4. **IF** $e(t)$ es HNE **AND** $v(t)$ es CV **THEN** $\beta(t)$ es AM

5. **IF** $e(t)$ es HNE **AND** $v(t)$ es LAV **THEN** $\beta(t)$ es AH
6. **IF** $e(t)$ es HNE **AND** $v(t)$ es MAV **THEN** $\beta(t)$ es AH
7. **IF** $e(t)$ es HNE **AND** $v(t)$ es HAV **THEN** $\beta(t)$ es AH
8. **IF** $e(t)$ es MNE **AND** $v(t)$ es HBV **THEN** $\beta(t)$ es BH
9. **IF** $e(t)$ es MNE **AND** $v(t)$ es MBV **THEN** $\beta(t)$ es BM
10. **IF** $e(t)$ es MNE **AND** $v(t)$ es LBV **THEN** $\beta(t)$ es AL
11. **IF** $e(t)$ es MNE **AND** $v(t)$ es CV **THEN** $\beta(t)$ es AM
12. **IF** $e(t)$ es MNE **AND** $v(t)$ es LAV **THEN** $\beta(t)$ es AM
13. **IF** $e(t)$ es MNE **AND** $v(t)$ es MAV **THEN** $\beta(t)$ es AH
14. **IF** $e(t)$ es MNE **AND** $v(t)$ es HAV **THEN** $\beta(t)$ es AH
15. **IF** $e(t)$ es LNE **AND** $v(t)$ es HBV **THEN** $\beta(t)$ es BH
16. **IF** $e(t)$ es LNE **AND** $v(t)$ es MBV **THEN** $\beta(t)$ es BM
17. **IF** $e(t)$ es LNE **AND** $v(t)$ es LBV **THEN** $\beta(t)$ es CB
18. **IF** $e(t)$ es LNE **AND** $v(t)$ es CV **THEN** $\beta(t)$ es AL
19. **IF** $e(t)$ es LNE **AND** $v(t)$ es LAV **THEN** $\beta(t)$ es AM
20. **IF** $e(t)$ es LNE **AND** $v(t)$ es MAV **THEN** $\beta(t)$ es AH
21. **IF** $e(t)$ es LNE **AND** $v(t)$ es HAV **THEN** $\beta(t)$ es AH
22. **IF** $e(t)$ es CE **AND** $v(t)$ es HBV **THEN** $\beta(t)$ es BH
23. **IF** $e(t)$ es CE **AND** $v(t)$ es MBV **THEN** $\beta(t)$ es BM
24. **IF** $e(t)$ es CE **AND** $v(t)$ es LBV **THEN** $\beta(t)$ es BL
25. **IF** $e(t)$ es CE **AND** $v(t)$ es CV **THEN** $\beta(t)$ es AL
26. **IF** $e(t)$ es CE **AND** $v(t)$ es LAV **THEN** $\beta(t)$ es AM
27. **IF** $e(t)$ es CE **AND** $v(t)$ es MAV **THEN** $\beta(t)$ es AM
28. **IF** $e(t)$ es CE **AND** $v(t)$ es HAV **THEN** $\beta(t)$ es AH
29. **IF** $e(t)$ es LPE **AND** $v(t)$ es HBV **THEN** $\beta(t)$ es BH
30. **IF** $e(t)$ es LPE **AND** $v(t)$ es MBV **THEN** $\beta(t)$ es BH
31. **IF** $e(t)$ es LPE **AND** $v(t)$ es LBV **THEN** $\beta(t)$ es BL
32. **IF** $e(t)$ es LPE **AND** $v(t)$ es CV **THEN** $\beta(t)$ es CB
33. **IF** $e(t)$ es LPE **AND** $v(t)$ es LAV **THEN** $\beta(t)$ es AM
34. **IF** $e(t)$ es LPE **AND** $v(t)$ es MAV **THEN** $\beta(t)$ es AM
35. **IF** $e(t)$ es LPE **AND** $v(t)$ es HAV **THEN** $\beta(t)$ es AH

- 36. **IF** $e(t)$ es MPE **AND** $v(t)$ es HBV **THEN** $\beta(t)$ es BH
- 37. **IF** $e(t)$ es MPE **AND** $v(t)$ es MBV **THEN** $\beta(t)$ es BH
- 38. **IF** $e(t)$ es MPE **AND** $v(t)$ es LBV **THEN** $\beta(t)$ es BH
- 39. **IF** $e(t)$ es MPE **AND** $v(t)$ es CV **THEN** $\beta(t)$ es BL
- 40. **IF** $e(t)$ es MPE **AND** $v(t)$ es LAV **THEN** $\beta(t)$ es AL
- 41. **IF** $e(t)$ es MPE **AND** $v(t)$ es MAV **THEN** $\beta(t)$ es AL
- 42. **IF** $e(t)$ es MPE **AND** $v(t)$ es HAV **THEN** $\beta(t)$ es AM
- 43. **IF** $e(t)$ es HPE **AND** $v(t)$ es HBV **THEN** $\beta(t)$ es BH
- 44. **IF** $e(t)$ es HPE **AND** $v(t)$ es MBV **THEN** $\beta(t)$ es BH
- 45. **IF** $e(t)$ es HPE **AND** $v(t)$ es LBV **THEN** $\beta(t)$ es BM
- 46. **IF** $e(t)$ es HPE **AND** $v(t)$ es CV **THEN** $\beta(t)$ es BL
- 47. **IF** $e(t)$ es HPE **AND** $v(t)$ es LAV **THEN** $\beta(t)$ es AL
- 48. **IF** $e(t)$ es HPE **AND** $v(t)$ es MAV **THEN** $\beta(t)$ es AL
- 49. **IF** $e(t)$ es HPE **AND** $v(t)$ es HAV **THEN** $\beta(t)$ es AM

Este conjunto de reglas puede ser expresado en la matriz de reglas de la figura 3.15.

v \ e	HBV	MBV	LBV	CV	LAV	MAV	HAV
HNE	BM	BL	AL	AM	AH	AH	AH
MNE	BH	BM	AL	AM	AM	AH	AH
LNE	BH	BM	CB	AL	AM	AH	AH
CE	BH	BM	BL	AL	AM	AM	AH
LPE	BH	BH	BL	CB	AM	AM	AH
MPE	BH	BH	BH	BL	AL	AL	AM
HPE	BH	BH	BM	BL	AL	AL	AM

Fig. 3.15 Matriz de reglas del controlador difuso

3.3.3 Defusificación

La estrategia considerada es la del centro de gravedad. El controlador se implementa utilizando la herramienta GUI fuzzy de simulink, en la cual se ingresan las funciones de pertenencia de entradas y salidas, las reglas de lógica difusa, el modelo de AND, OR, Implicación, sentencia conectiva y el método de defusificación, en la figuras 3.16 y 3.17 se muestra la elección de las características del controlador difuso.

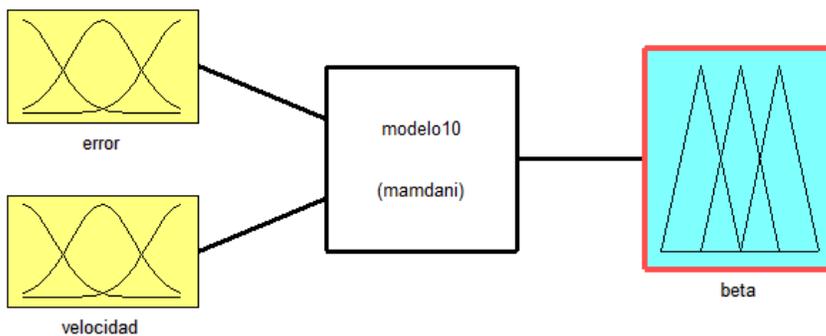


Fig. 3.16 Controlador Difuso con la herramienta fuzzy de simulink

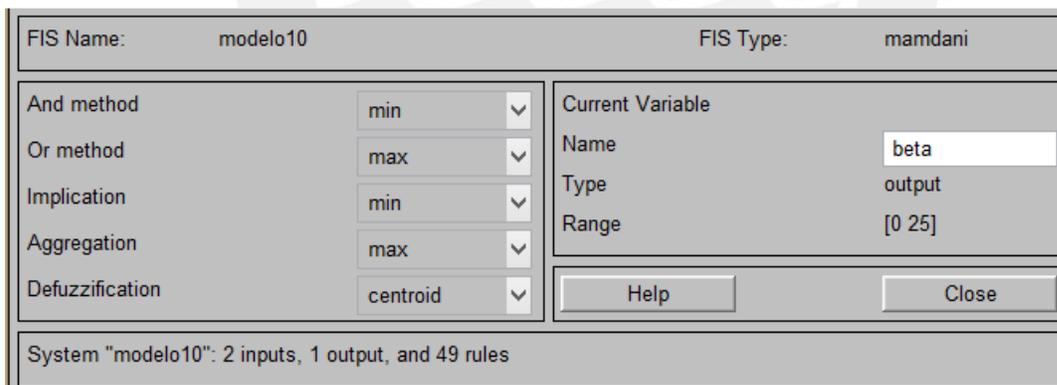


Fig. 3.17 Características del controlador difuso de la herramienta fuzzy de simulink

3.4 CONCLUSIONES:

Se desarrolló el controlador difuso considerando como entradas de fusificación los conjuntos difusos del error y de la velocidad del viento, el conjunto difuso de salida es el ángulo de paso, el mecanismo de inferencia de simulink utilizado es Mamdani, se utilizó un conjunto de 49 reglas IF...THEN, halladas a partir de simulaciones del sistema completo, que permiten conocer su funcionamiento y establecer las reglas difusas. El método de defusificación seleccionado para determinar el ángulo β_0 es el método del centroide.



CAPITULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL CONTROL DIFUSO DE LA POTENCIA DE UN AEROGENERADOR

4.1 Control difuso de la potencia de un aerogenerador, mediante la variación del ángulo de paso β

Se va a realizar la simulación del control difuso de la potencia del aerogenerador, desarrollado en el capítulo 3, considerando los modelos del aerogenerador del capítulo 2, es decir los modelos de la turbina, del sistema de transmisión compuesto por los engranajes, del actuador de la variación del ángulo de paso β , y del generador de inducción jaula de ardilla.

4.1.1 Control de la potencia mecánica de la turbina por variación del ángulo de paso β .

En el sistema realimentado se considera como señal de entrada de referencia $P_r = 0.66\text{MW}$, la señal realimentada es la potencia mecánica de la turbina, los parámetros de la turbina, engranajes y generador se muestran en el anexo 1. El gráfico del diagrama del sistema completo se muestra en simulink en la figura 3.18.

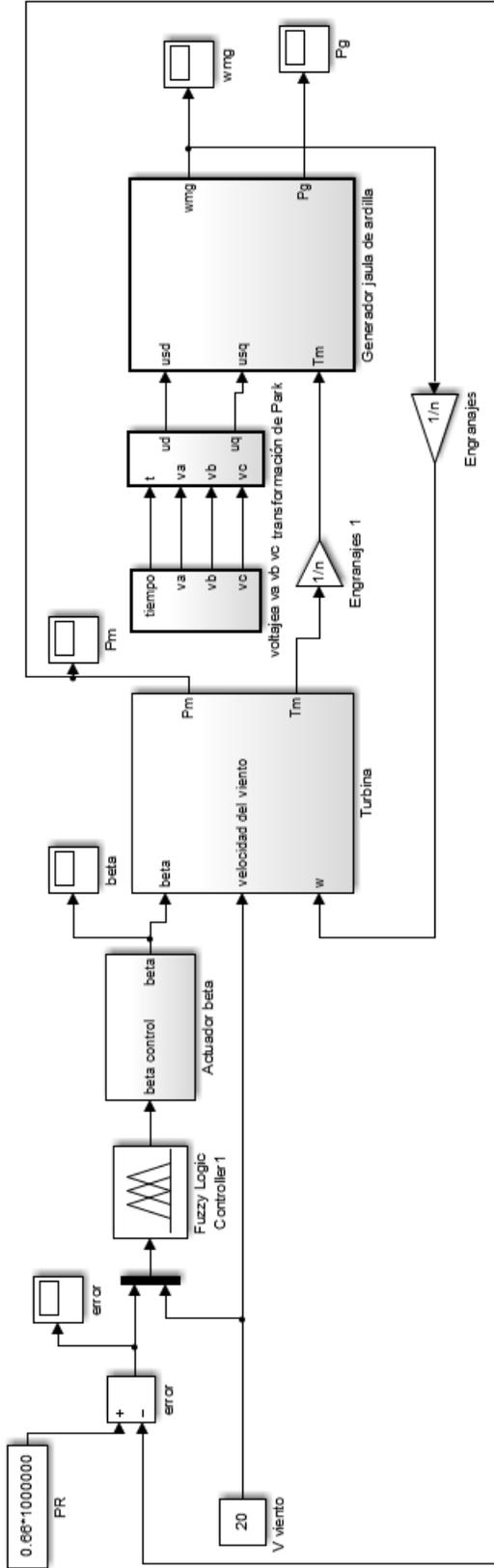


Fig. 3.18 Sistema de control de lazo cerrado

Para la velocidad del viento $v(t)=7$ m/s se obtienen la gráficas del ángulo de paso β y la potencia mecánica generada, en las figuras 3.19 y 3.20.

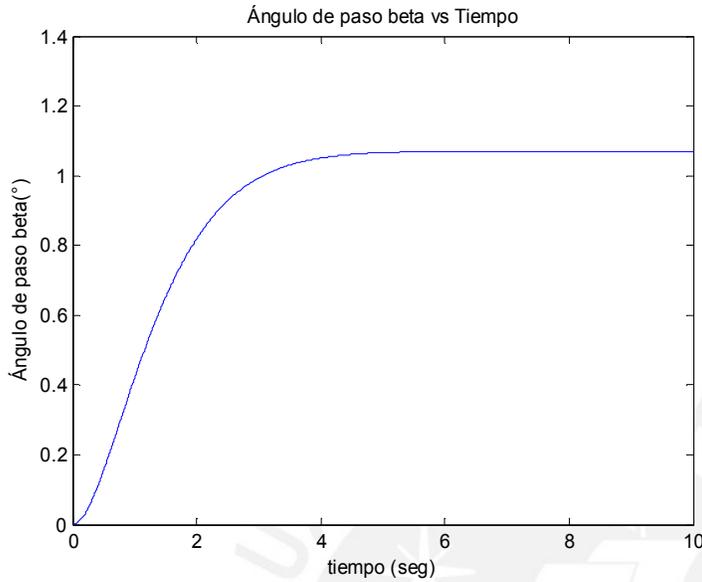


Fig. 3.19 Ángulo de paso para velocidad del viento $v=7$ m/s

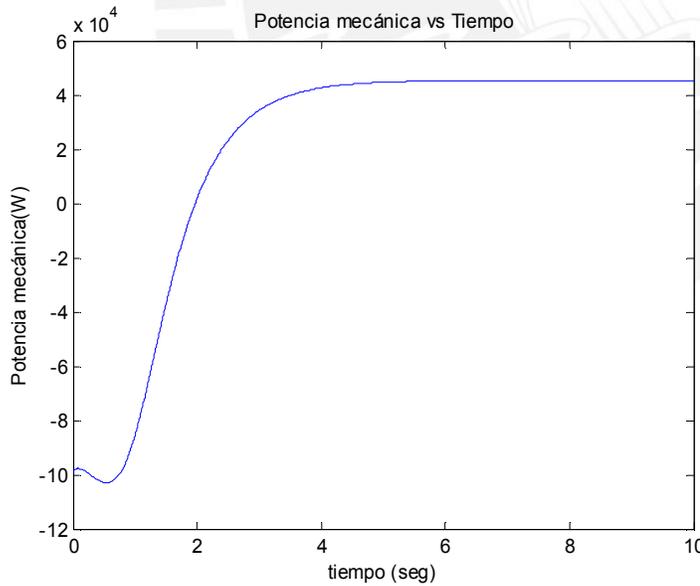


Fig. 3.20 Potencia mecánica para velocidad del viento $v=7$ m/s

Para la velocidad del viento $v(t)=10$ m/s se obtienen la gráficas del ángulo de paso β y la potencia mecánica generada, en las figuras 3.21 y 3.22.

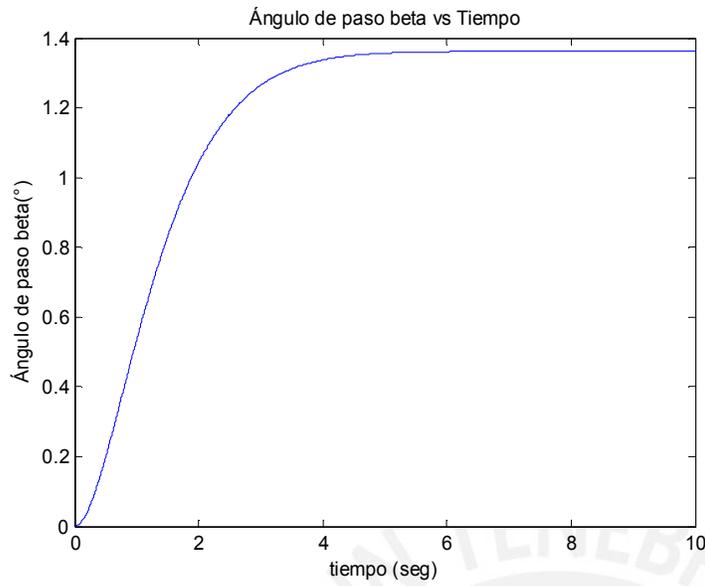


Fig. 3.21 Ángulo de paso para velocidad del viento $v=10$ m/s

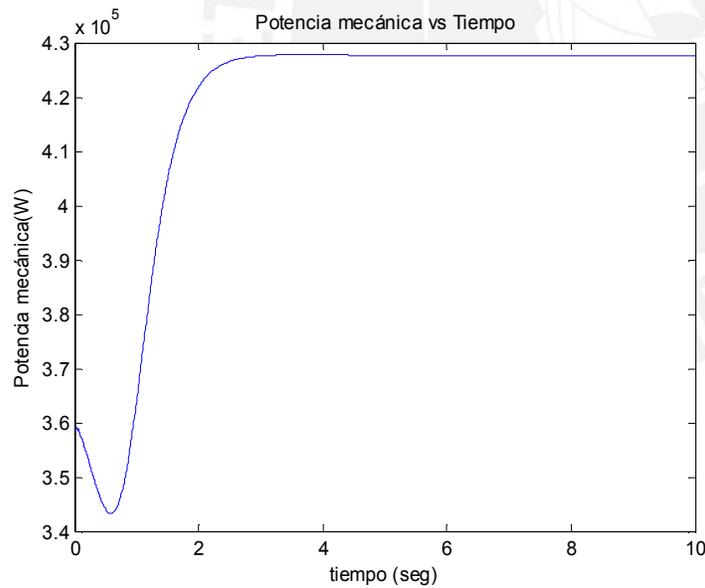


Fig. 3.22 Potencia mecánica para velocidad del viento $v=10$ m/s

Para la velocidad del viento $v(t)=14$ m/s se obtienen la gráficas del ángulo de paso β y la potencia mecánica generada, y el error en las figuras 3.23 , 3.24 y 3.25

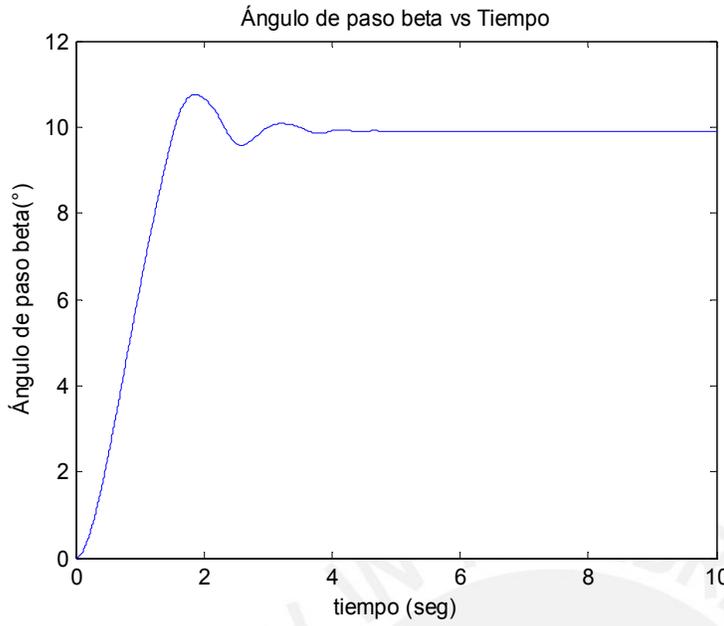


Fig. 3.23 Ángulo de paso para velocidad del viento $v=14$ m/s

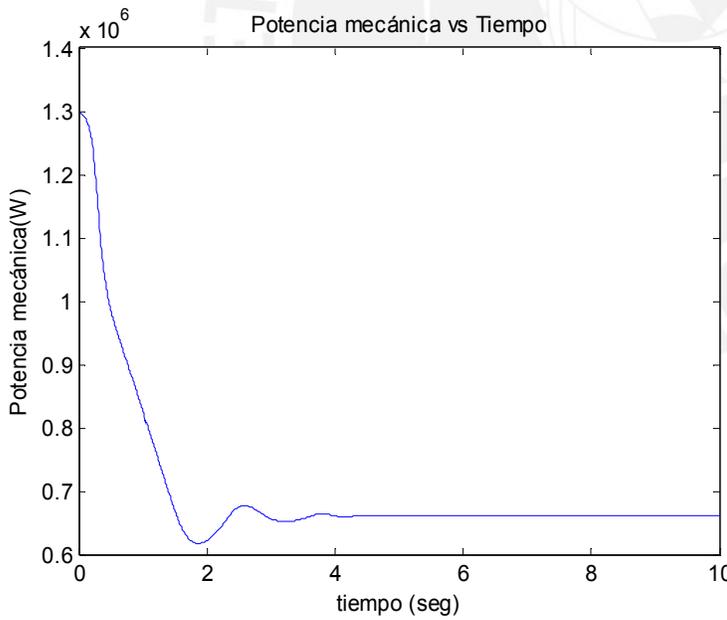


Fig. 3.24 Potencia mecánica para velocidad del viento $v=14$ m/s

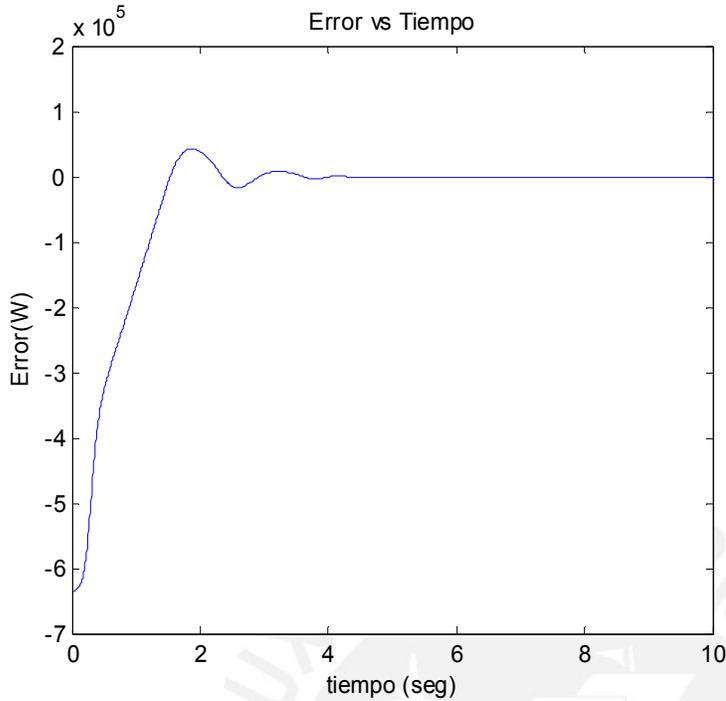


Fig. 3.25 Error para velocidad del viento $v=14$ m/s

Para la velocidad del viento $v(t)=16$ m/s se obtienen la gráficas del ángulo de paso β , la potencia mecánica generada, y la señal de error en las figuras 3.26, 3.27 y 3.28.

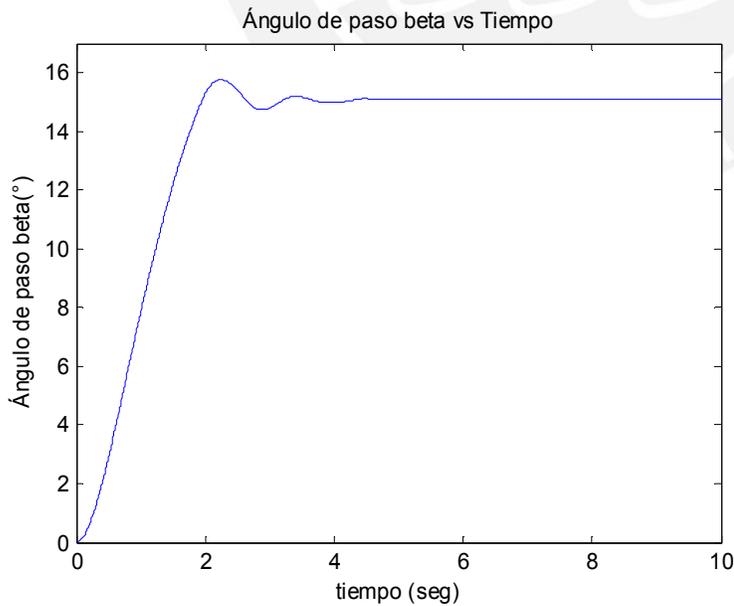


Fig. 3.26 Ángulo de paso para velocidad del viento $v=16$ m/s

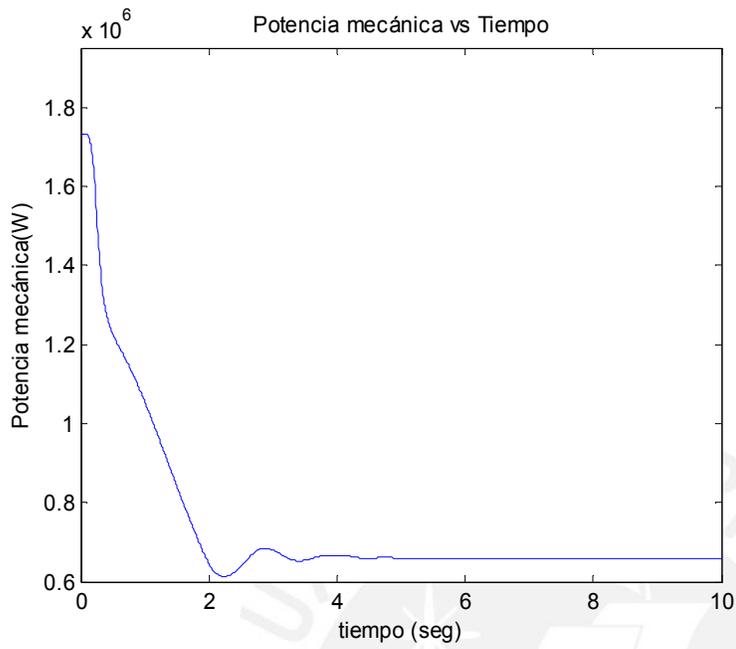


Fig. 3.27 Potencia mecánica para velocidad del viento $v=16$ m/s

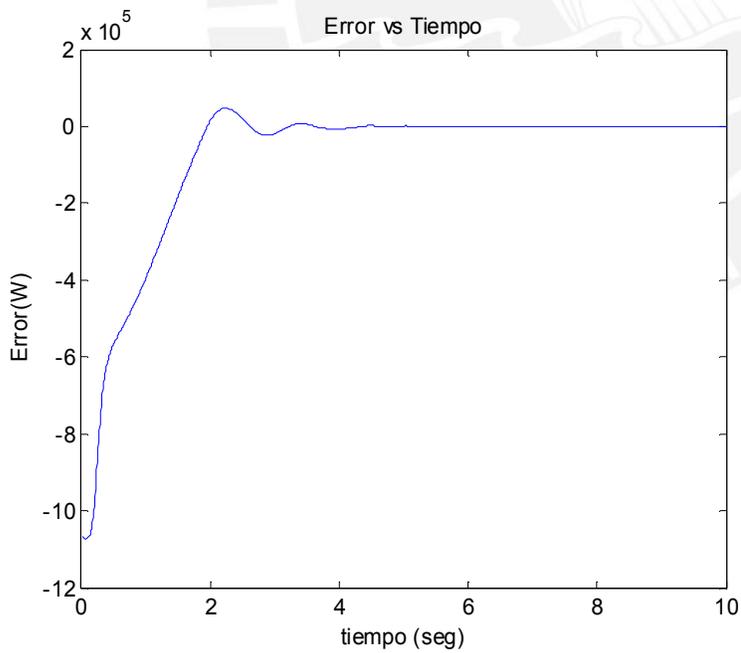


Fig. 3.28 Error para velocidad del viento $v=16$ m/s

Para la velocidad del viento $v(t)=20$ m/s se obtienen la gráficas del ángulo de paso β , la potencia mecánica generada, y la señal de error en las figuras 3.29, 3.30 y 3.31.

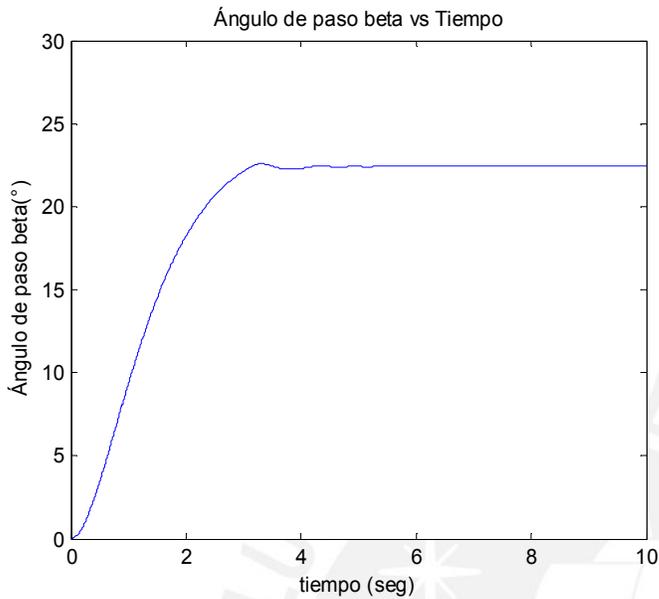


Fig. 3.29 Ángulo de paso para velocidad del viento $v=20$ m/s

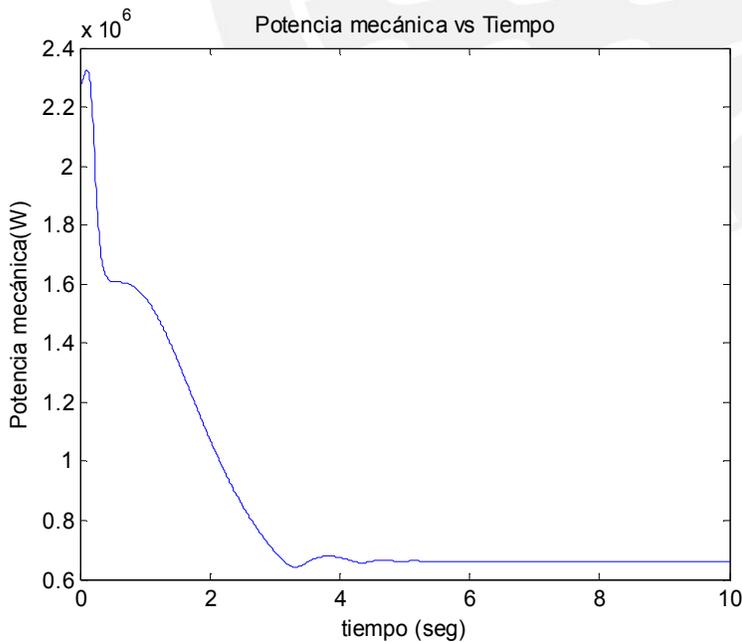


Fig. 3.30 Potencia mecánica para velocidad del viento $v=20$ m/s

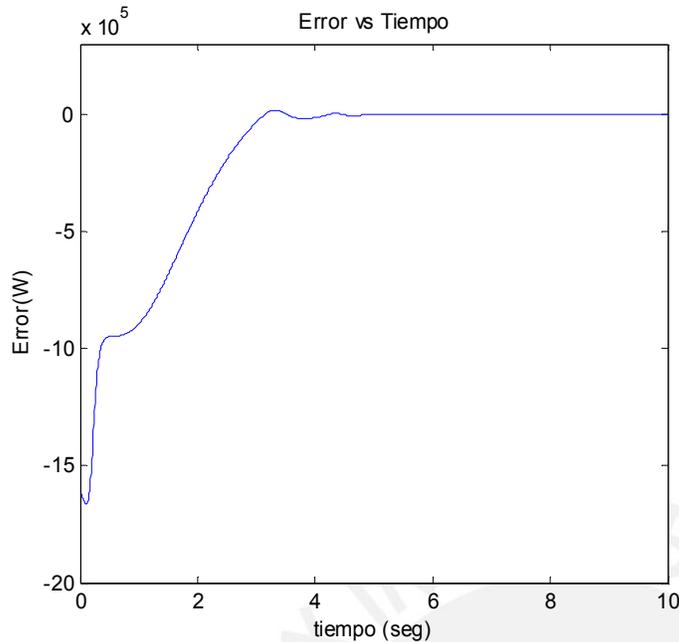


Fig. 3.31 Error para velocidad del viento $v=20$ m/s

Con la intención de mejorar el funcionamiento del controlador difuso se añadió una constante proporcional K a la salida del controlador difuso (figura 3.32). Para poder comparar el comportamiento del sistema controlado se utilizó la función $f(t)$, igual a la integral del error cuadrático, durante el tiempo de ejecución de las simulaciones T .

$$f(t) = \int_0^T e(t)^2 \quad (4.1)$$

En la tabla 4.1 se muestra la variación de $f(t)$ para diferentes valores de K , considerando una velocidad de viento alta $v=18$ m/s .

Tabla 4.1 Variación de $f(t)$ mediante cambios de la ganancia K ($T=10\text{seg}$)($v=18\text{m/s}$)

K	$f(t) \times 10^{12} \text{ W}$
0.5	3.8127
1	1.0544
1.2	0.99498
1.5	3.1165



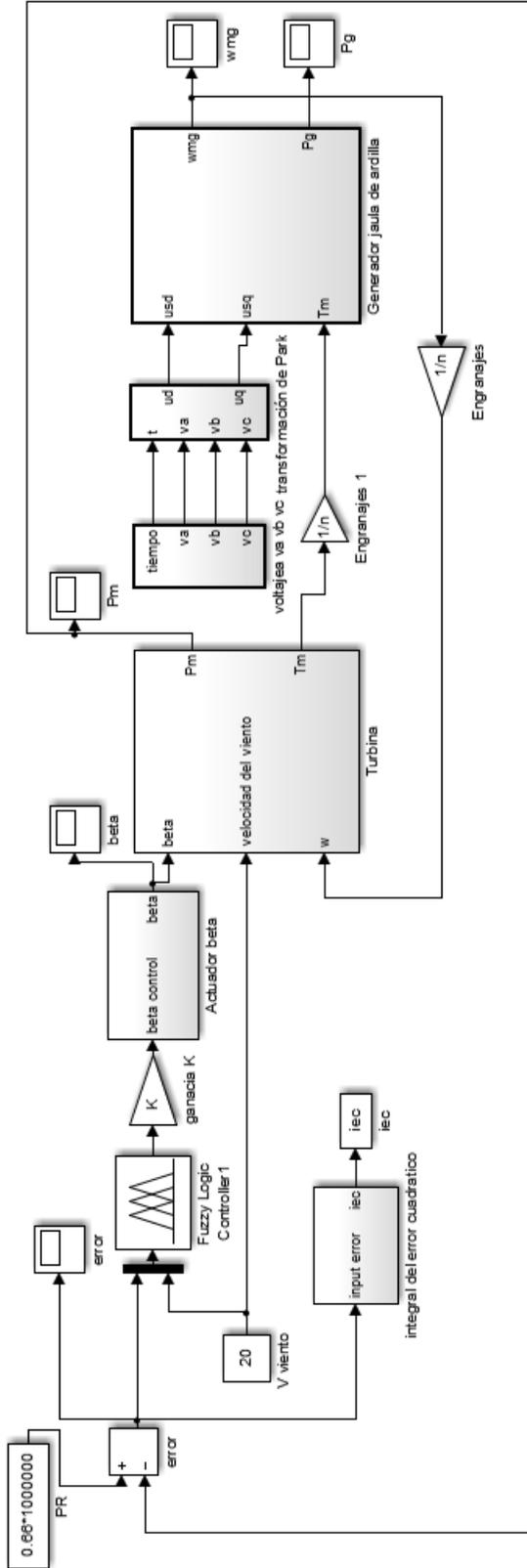


Fig. 3.32 Control difuso incluyendo ganancia K



Se desarrollo un programa iterativo para ejecutar simulink mediante la opción sim de MATLAB, y obtener una tabla de valores de la función $f(t)$ para diferentes variaciones de la ganancia K en un rango discreto de velocidades del viento ,se busco el valor mínimo de $f(t)$ mediante el comando min de MATLAB ,se obtiene el valor $K=1.15$ como un valor adecuado .

4.1.2 Comparación control difuso y control PID de la potencia mecánica de la turbina por variación del ángulo de paso β .

Se realizan simulaciones del control PID de la potencia mecánica de la turbina como se muestra en la figura 3.33.Los parámetros del PID (ideal) fueron obtenidos de la herramienta tune de MATLAB, para una velocidad del viento alta $v=18$ m/s, debido a que los valores obtenidos de la sintonización aplicando el método de Ziegler Nichols presenta demasiadas oscilaciones durante el transitorio. La tabla 4.2 muestra los valores obtenidos.

Para el control PID ideal, señal de entrada error $e(t)$, señal de salida $u(t)$:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = P \left(1 + \frac{I}{s} + Ds \right) \quad (4.2)$$

P: Constante Proporcional

I: Constante Integrativa

D: Constante derivativa

Tabla 4.2 Parámetros PID

P	I	D
-1.59865126193023e-05	1.69245398791907	0

La figura 3.34 muestra una comparación de la potencia mecánica obtenida con el controlador PID y el controlador difuso, para velocidad del viento $V=16$.

La figura 3.35 muestra una comparación de la potencia mecánica obtenida con el controlador PID y el controlador difuso, para velocidad del viento $V=18$.

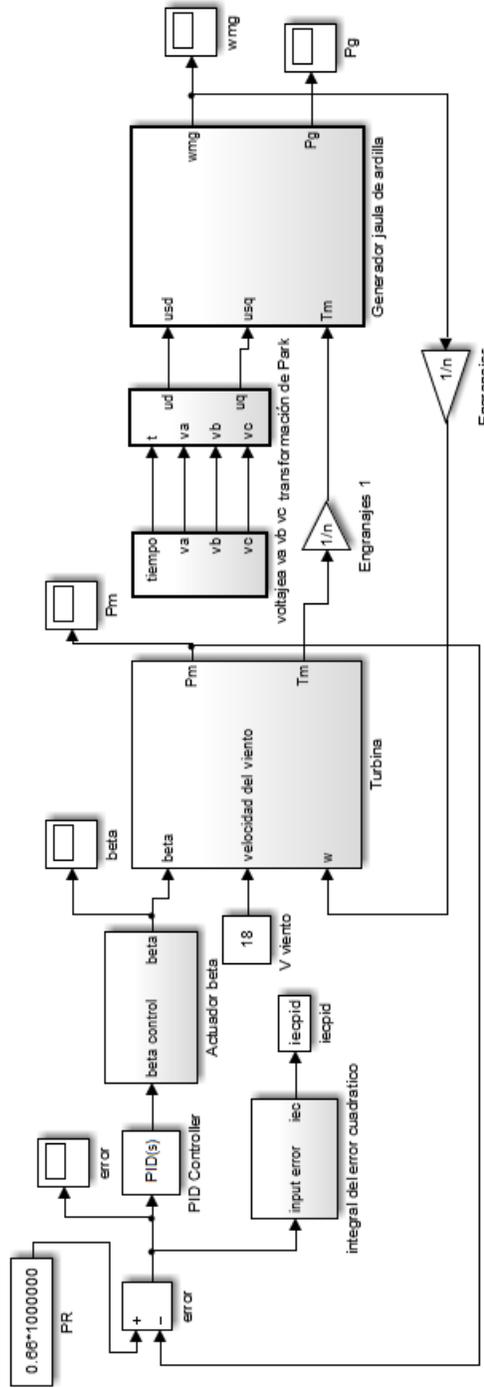


Fig. 3.33 Control PID

La figura 3.36 muestra una comparación de la potencia mecánica obtenida con el controlador PID y el controlador difuso, para velocidad del viento $V=20$.

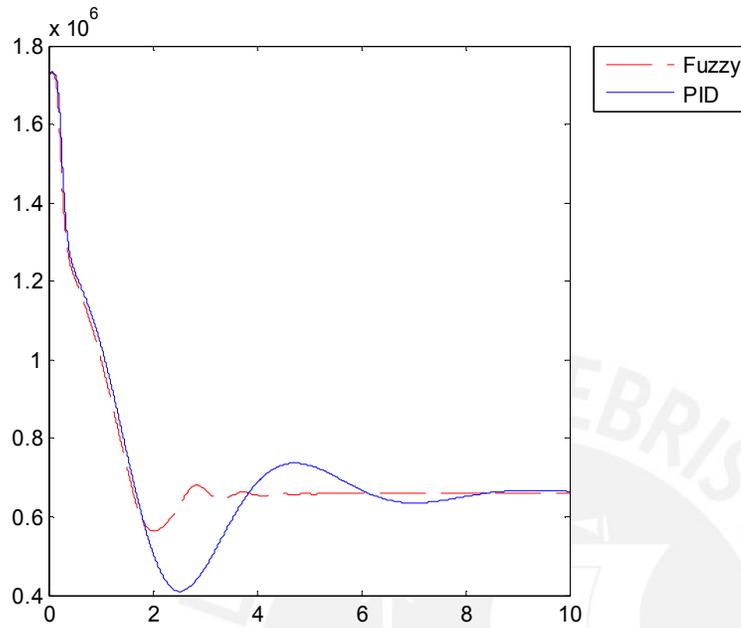


Fig. 3.34 Comparación de la potencia mecánica para control pid y control difuso $v=16$ m/s

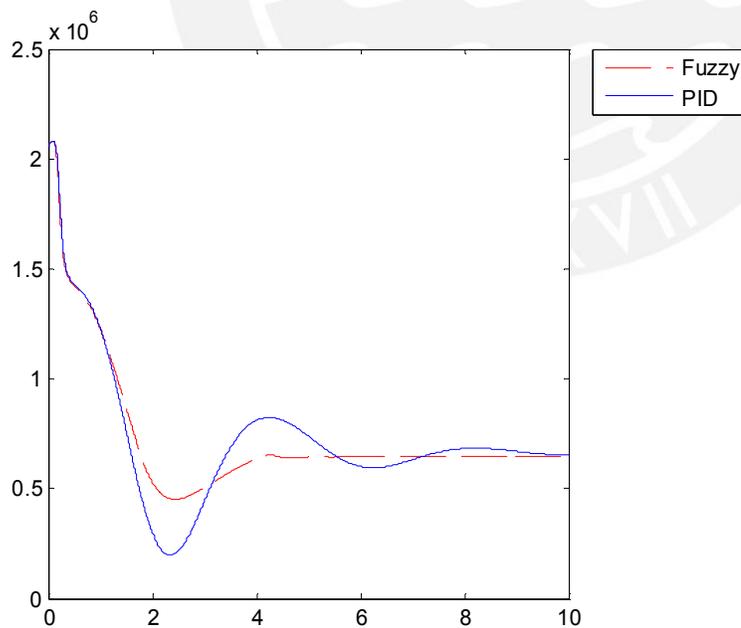


Fig. 3.35 Comparación de la potencia mecánica para control pid y control difuso $v=18$ m/s

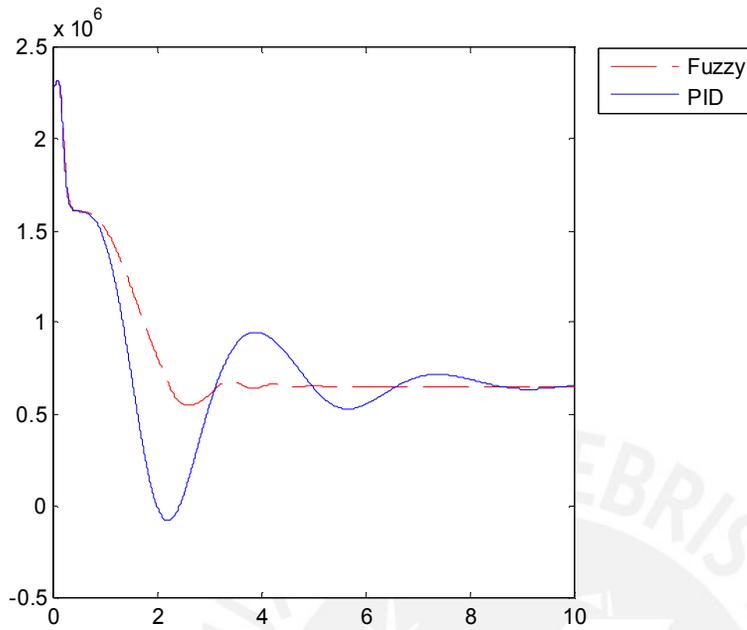


Fig. 3.36 Comparación de la potencia mecánica para control pid y control difuso $v=20$ m/s.

En la tabla 4.1 se muestra la variación de la integral del error cuadrático $f(t)$, para un periodo de tiempo $T=10$ s, utilizando el controlador difuso y el controlador PID.

Tabla 4.3 Comparación de $f(t)$ para controlador difuso y controlador PID

$v(t)$ m/s	$f(t) \times 10^{12}$ W Control Difuso	$f(t) \times 10^{12}$ W Control PID
16	0.49748	0.60349
18	0.98300	1.1539
20	1.6014	1.8740

4.2 Control de la potencia eléctrica del generador por variación del ángulo de paso β .

En el sistema realimentado se considera como señal de entrada de referencia $P_r = 0.66$ MW, la señal realimentada es la potencia eléctrica generada. El gráfico del diagrama en simulink que muestra en la figura 3.37

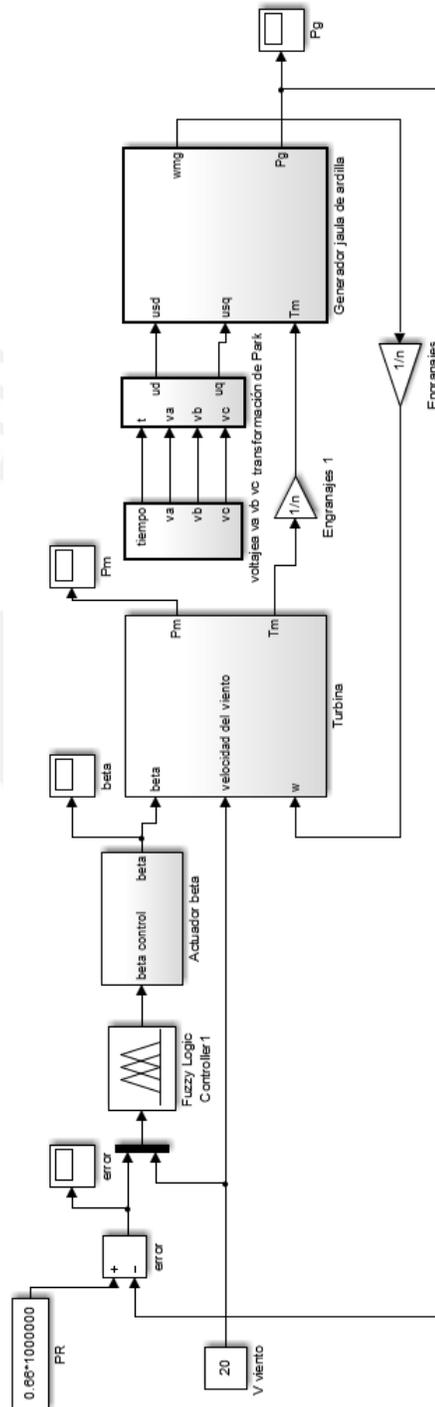


Fig. 3.37 Sistema de Control de lazo cerrado

Para la velocidad del viento $v(t)=18$ m/s se obtienen la gráficas del ángulo de paso β y la potencia eléctrica generada, en las figuras 3.38 , 3.39 .

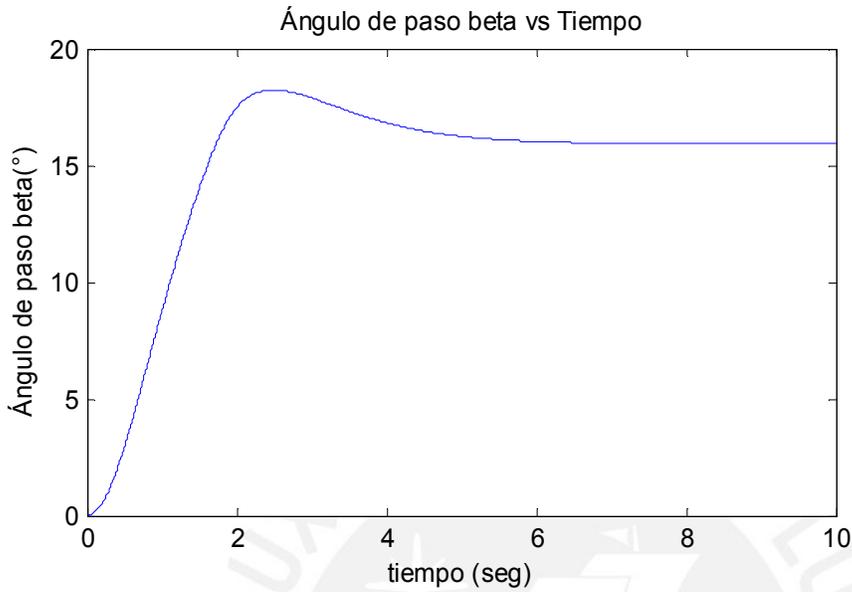


Fig. 3.38 Ángulo de paso para velocidad del viento $v=18$ m/s

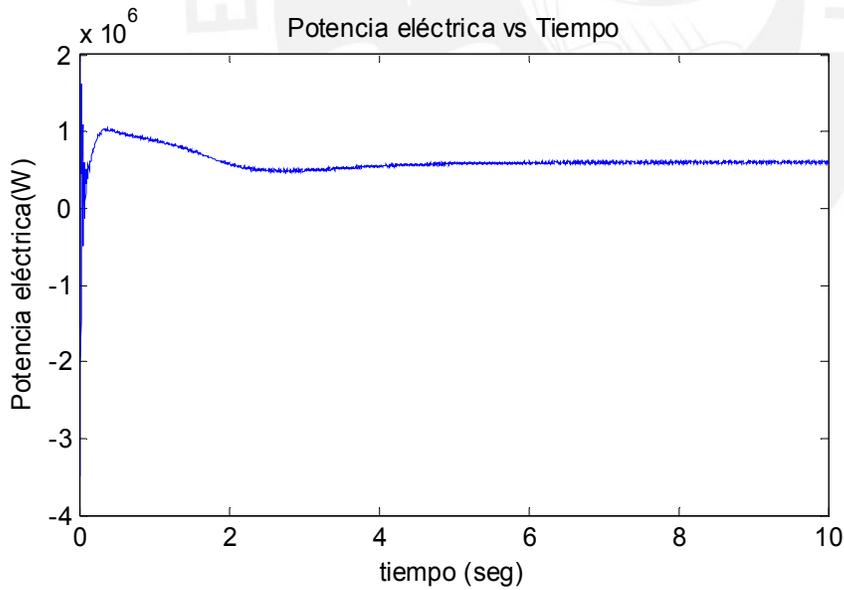


Fig. 3.39 Potencia eléctrica para velocidad del viento $v=18$ m/s

Para la velocidad del viento $v(t)=20$ m/s se obtienen la gráficas del ángulo de paso β y la potencia eléctrica generada, en las figuras 3.40 , 3.41

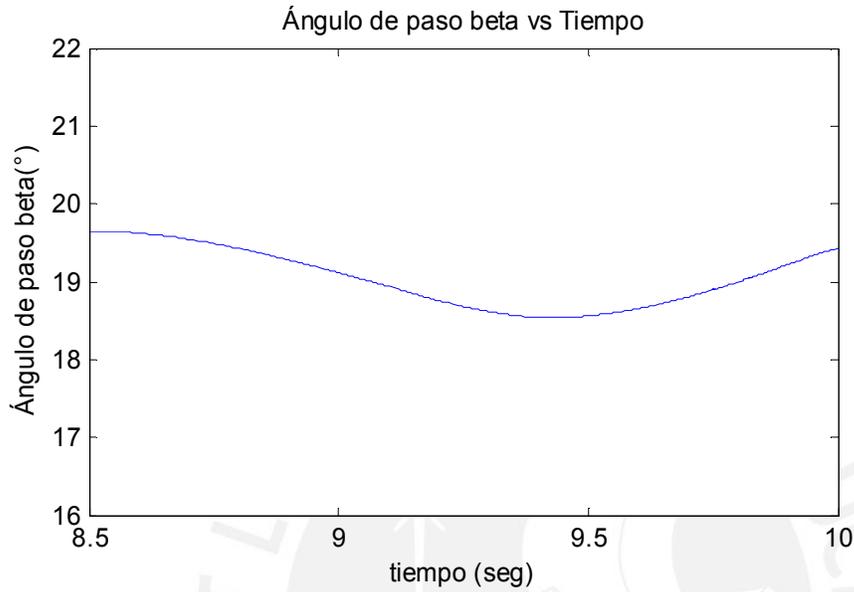


Fig. 3.40 Ángulo de paso para velocidad del viento $v=20$ m/s

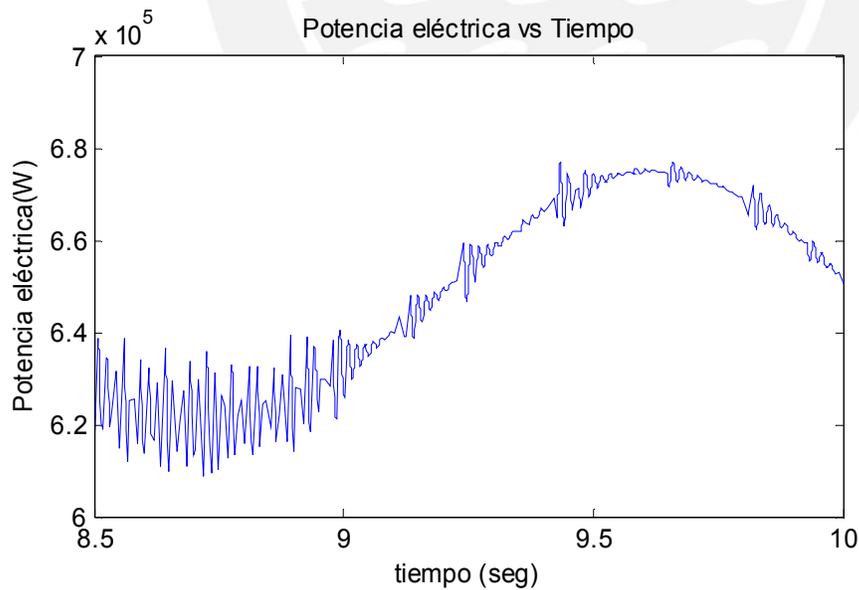


Fig. 3.41 Potencia eléctrica para velocidad del viento $v=20$ m/s

Para la velocidad del viento $v(t)=21$ m/s se obtienen la gráficas del ángulo de paso β y la potencia eléctrica generada, en las figuras 3.42 , 3.43

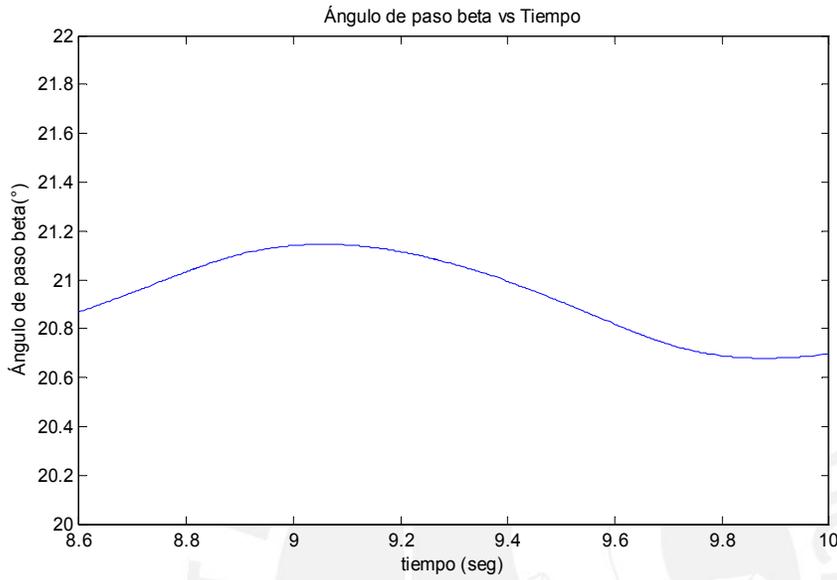


Fig. 3.42 Ángulo de paso para velocidad del viento $v=21$ m/s

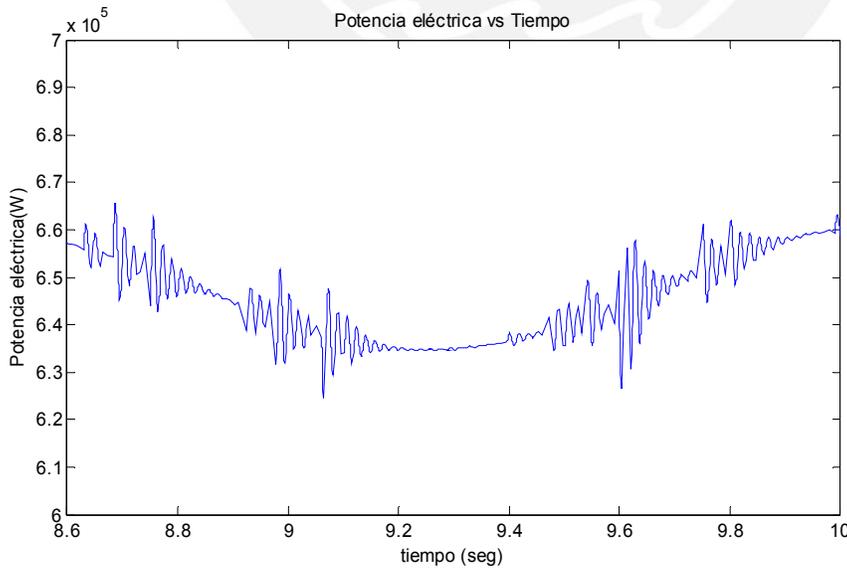


Fig. 3.43 Potencia eléctrica para velocidad del viento $v=21$ m/s

4.3 Conclusiones

Conclusiones relacionadas con el Control de la potencia mecánica de la turbina por variación del ángulo de paso β :

Para velocidades del viento menores a 12 m/s (figuras 3.20 y 3.22) el controlador permite que la potencia mecánica sea la máxima posible.

Para velocidades mayores de 12 m/s el control difuso controla adecuadamente la potencia mecánica, a su valor de referencia $P_r=0.66$ MW con un error estacionario menor al 2% (figuras 3.25, 3.28, 3.31).

Para el diseño del controlador difuso se considero una velocidad máxima del viento de 21 m/s (funciones de pertenencia de la velocidad del viento), por lo que el control es adecuado hasta este valor máximo.

Se mejoró el control difuso al añadirse una ganancia $K=1.15$ a la salida del controlador, pues se reduce la integral del error cuadrático.

Conclusiones relacionadas con la comparación Control difuso y Control PID de la potencia mecánica de la turbina por variación del ángulo de paso β :

De las figuras 3.34, 3.35 y 3.36, se concluye que el control difuso permite obtener una curva de potencia más suave, con menores amplitudes de oscilación, que la obtenida con el control PID.

De la tabla 4.3 se puede concluir que el control difuso presenta un menor valor de la integral del error cuadrático.

Conclusiones relacionadas con el Control de la potencia eléctrica de la turbina por variación del ángulo de paso β :

De las figuras 3.39, 3.41 y 3.43, se concluye que el control difuso controla adecuadamente la potencia eléctrica, con un error estacionario menor al 4%.

CONCLUSIONES GENERALES:

Se realizó el modelo completo continuo del aerogenerador, considerando un modelo del actuador de la variación del ángulo de paso β , los parámetros de los modelos de la turbina y del generador jaula de ardilla de artículos especializados.

El modelo del generador jaula de ardilla del aerogenerador fue desarrollado y simulado a partir de las ecuaciones en el tiempo que modelan su funcionamiento, obtenidas de artículos especializados, sin realizar linealizaciones, ni simplificaciones.

Se diseñó el controlador difuso de la potencia del aerogenerador, por variación del ángulo de paso β , obteniéndose una respuesta estacionaria de la potencia mecánica de la turbina y eléctrica del generador con un error menor al 2%.

Se mejoró el controlador difuso, para reducir la integral del error cuadrático de la potencia, añadiendo una ganancia proporcional K a la salida del controlador difuso, obteniéndose un mejor control.

Se comprobó mediante las simulaciones del control de la potencia mecánica del aerogenerador, que el control difuso permite que la respuesta transitoria presente menores amplitudes de oscilación, que la respuesta obtenida con el controlador PID, mientras los tiempos de establecimiento son similares.

RECOMENDACIONES:

Realizar una sintonización de las funciones de pertenencia del control difuso mediante algoritmos genéticos para mejorar el diseño del controlador difuso y compararlo con otro control no lineal avanzado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Ackermann, Thomas ,(2005). *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons
- Anaya-Lara Olimpo; Jenkins Nick; Ekanayake Janaka (2009) *Wind Energy Generation Systems: Modelling and Control*. John Wiley & Sons.
- Fernando D.Bianchi; Hernán De Battista; Ricardo J. Mantz (2007) *Wind Turbine Control System*. London:Springer-Verlag.
- Guanrong Chen,Trung Tat Pham (2000) *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems* .CRC Press
- Chen, Z. and Blaabjerg, F. (2006). *Wind Energy –The World’s Fastest Growing Energy Source*.IEEE Power Electronics Society Newsletter, 3,pages: 15-18
- Chennakesava R. Alavala (2000) *FUZZY LOGIC AND NEURAL NETWORKS BASIC CONCEPTS AND APPLICATIONS* .NEW AGE INTERNATIONAL (P) LIMITED, PUBLISHERS
- Etienne Audierne a, Jorge Elizondo b, Leonardo Bergami a, Humberto Ibarra a, Oliver Probst a,(2010) *Analysis of the furling behavior of small wind turbines*
- Ferreira, J.C. ; Machado, I.R. ; Watanabe, E.H. ; Rolim, L.G.B.(2011) *Wind power system based on Squirrel Cage Induction Generator* . Power Electronics Conference (COBEP), Brazilian .pages:943-948
- A. Ishchenko, J.M.A. Myrzik, and W.L. Kling, Member, (2007) *Linearization of Dynamic Model of Squirrel-Cage Induction Generator Wind Turbine*. Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE pages:1-8
- Jamieson, Peter, (2011),*Innovation in Wind Turbine Design* Jamieson, Peter. John Wiley & Sons
- Katsuhiko Ogata,(1993),*Ingeniería de Control Moderna*, PrenticeHall
- Kistley,James L (2010).*Electric Power Principles: Sources, Conversion, Distribution and Use*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Kumar C.H.S; Sarma A.V.R.S; Prasad P.V.N (2006) *Fuzzy Logic Based Control of Wind Turbine Driven Squirrel Cage Induction Generator Connected to Grid*.

- Drives and Energy Systems.2006.PEDES'06 International Conference on, pages:1-6.
- Leszek Rutkowski,(2004).*Flexible Neuro-Fuzzy Systems.Structures, Learning and Performance Evaluation*.Kluwer Academic Publishers.
- Macêdo A.V.A; Mota W.S (2012) *Wind turbine pitch angle control using Fuzzy Logic*.Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition(T&D-LA).Sixth IEEE/PES,pages:1-6.
- Mesamanolis A; Mademlis C; Kioskeridis I (2012) *A fuzzy Logic based control strategy for maximum efficiency of Wind Energy Conversion System*.
Power Electronics, Electrical Drives,Automation and Motion (SPEEDAM),2012 International Symposium on, pages:7-12.
- Movahednasab, A. ; Madani, S.M. ; Shahbazi, M.M.(2008), *A reduced order model and control for a wind turbine induction generators*. Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE . pages:1095-1100
- Nikola K. Kasabov (1998) *Foundations of Neural Networks,Fuzzy Systems,and Knowledge Engineering*
- Osley - López González,Alberto Nilo - Basanta Otero(2011)*Simulación del Comportamiento Dinámico de un Pequeño Aerogenerador de Imán Permanente Sin Multiplicador en operación autónoma haciendo uso del MatLab*
Ingeniería Energética Vol. XXXII, 3/2011 Agosto – Noviembre pages: 75 - 86
- Shepherd, William ,(2011) *Electricity Generation Using Wind Power*. World Scientific Publishing Co.
- Slootweg J.G; Polinder H; Kling W.L. (2001) *Dynamic modelling of a wind turbine with Doubly Fed Induction Generator*. Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, pages: 664-669, vol 1.
- Torres Salamao L. A;Gamez-Cuatzin H (2012) *Fuzzy Logic control and PI comparison for a 1.5MW horizontal axis wind turbine*.
System Theory Control and Computing (ISCTCC), 2012 16th International Conference on, pages: 1-6.
- Trilla L;Gomis-Bellmunt O;Junyent-Ferré A;Álvarez A. E;Sudrià-Andreu A (2010) *Control of a squirrel cageinduction generator wind farm connected to a single power converter*. Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International, pages:1-6