

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA CONEXIÓN DE GENERADORES
EÓLICOS EN LA OPERACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA.**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MASTER EN
SISTEMAS DE CONTROL.**

SILVANA DEL PILAR GAMBOA BENITEZ

spgaben@yahoo.com

DIRECTOR: ALBERTO SANCHEZ PhD.

alberto.sanchez@petrobras.com

QUITO, FEBRERO 2008

DECLARACIÓN

Yo SILVANA DEL PILAR GAMBOA BENÍTEZ, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

SILVANA GAMBOA BENÍTEZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Ingeniera SILVANA DEL PILAR GAMBOA BENÍTEZ, bajo mi supervisión.

ALBERTO SÁNCHEZ PhD.

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que en forma desinteresada colaboraron con información, ideas, sugerencias e hicieron posible este trabajo, entre ellos a mi director de tesis, Dr. Alberto Sánchez, miembros del tribunal Dr. Santiago Grijalva y Dr. Gabriel Salazar, y al coordinador de la Maestría Ing. Patricio Burbano MSc.

DEDICATORIA

A Paulo, Ariel y Gabriela.

CONTENIDO

RESUMEN	VIII
PRESENTACIÓN	IX
objetivos.....	X
CAPITULO 1. ENERGÍA EÓLICA.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 SISTEMAS DE TURBINAS EÓLICAS.....	2
1.2.1 POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR UN GENERADOR EÓLICO	2
1.2.2 SISTEMAS DE CONVERSIÓN ELÉCTRICA DE LAS TURBINAS EÓLICAS. 6	6
1.2.2.1 SISTEMA AERODINÁMICO	6
1.2.2.1.1 Control de Potencia Aerodinámica.....	6
1.2.2.1.2 Turbina Eólica Controladas por Angulo de Inclinación (Pitch Controlled Wind Turbine) 7	7
1.2.2.1.3 Turbinas Eólicas Controladas por Efecto Stall (Stall Controlled Wind Turbines).....	8
1.2.2.2 SISTEMA ELÉCTRICO.....	9
1.2.2.2.1 Sistemas de Velocidad Fija	10
1.2.2.2.2 Sistemas de Velocidad Variable.....	10
1.2.2.3 SISTEMAS DE GENERACIÓN USADOS COMÚNMENTE.....	11
1.2.2.3.1 Turbina eólica de velocidad constante con generador de inducción de jaula de ardilla 11	11
1.2.2.3.2 Turbinas eólicas de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado 12	12
1.2.2.3.3 Turbina eólica de velocidad variable con generador sincrónico.....	13
1.2.2.4 INTEGRACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA.....	14
1.2.2.5 INVESTIGACIONES Y DESARROLLOS.....	15
CAPITULO 2. MODELACIÓN DEL SISTEMA DE TURBINA EÓLICA.....	18
2.1 MODELACIÓN DEL SISTEMA AERODINÁMICO.....	18
2.1.1 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA (POWER TRAIN)	18
2.1.2 TORQUE AERODINÁMICO	21
2.1.3 ACTUADOR DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN	22
2.1.4 MODELO DEL VIENTO	23
2.1.5 AERODINÁMICA DE LA TURBINA EÓLICA	24
2.2 MODELACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO.....	26
2.3 MODELACIÓN DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN	27

2.3.1	TRANSFORMACIONES TRIFÁSICAS	27
2.3.1.1	Transformación de Clarke	27
2.3.1.2	Transformación de Park	28
2.3.2	MODELO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN	29
2.3.2.1	Campo Magnético Rotativo y Deslizamiento	29
2.3.2.2	Modelo de la Máquina de Inducción Trifásica.....	31
2.3.2.3	Modelo de la Máquina de Inducción en un Eje de Referencia Arbitrario qd0	34
2.3.2.3.1	Ecuaciones de Voltaje qd0	35
2.3.2.3.2	Ecuaciones qd0 del flujo de concatenación.....	36
2.3.2.3.3	Ecuaciones de torque en qd0	38
2.3.2.3.4	Voltajes	40
2.3.2.3.5	Ecuación de Torque.....	41
2.3.2.4	Generador de Inducción Doblemente Alimentado.....	45
2.3.2.5	Control de Energía de Deslizamiento.....	46
2.3.2.5.1	Cascada Subsíncrona (Control de velocidad del motor por energía de deslizamiento).....	46
2.3.2.5.2	Cascada Sub-Hipersíncrona.....	46
CAPITULO 3. CONTROLADORES PARA TURBINAS EÓLICAS		49
3.1	CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO (MODEL PREDICTIVE CONTROL MPC).....	49
3.1.1	CONCEPTOS BÁSICOS.....	49
3.2	ESTRATEGIA DE LOS CONTROLADORES PREDICTIVOS.....	50
3.3	CONTROLADORES PREDICTIVOS	52
3.3.1	MODELO DE PREDICCIÓN	52
3.3.1.1	Modelo del Proceso.....	53
3.3.1.1.1	Respuesta Impulsional.....	53
3.3.1.1.2	Respuesta ante Escalón.	53
3.3.1.1.3	Función de Transferencia.	54
3.3.1.1.4	Espacio de Estado.....	54
3.3.1.2	Modelo de las Perturbaciones	55
3.3.2	RESPUESTA LIBRE Y FORZADA	55
3.3.3	FUNCIÓN OBJETIVO.....	56
3.3.4	RESTRICCIONES.....	57
3.3.5	OBTENCIÓN DE LA LEY DE CONTROL	58
3.4	CONTROL PREDICTIVO USANDO MODELO EN VARIABLES DE ESTADO	58

3.5	IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO DE UNA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDAD VARIABLE.....	63
3.5.1	DISEÑO DEL CONTROLADOR.....	64
3.5.1.1	Requerimientos de Control.....	64
3.5.1.2	Estrategia de Control.....	65
3.5.1.3	Restricciones.....	65
3.5.1.4	Observador.....	66
3.5.1.5	Implementación del MPC.....	70
3.6	CONTROL DEL GENERADOR DE DOBLE ALIMENTACIÓN.....	71
CAPITULO 4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TURBINA EÓLICA.....		75
4.1	MATLAB, SIMULINK Y SIMPOWERSYSTEM.....	75
4.2	SIMULACIÓN DE UNA TURBINA EÓLICA.....	76
4.2.1	MODELO DEL VIENTO.....	76
4.2.2	MODELO DE LA TURBINA EÓLICA.....	76
4.3	SIMULACIÓN DEL OBSERVADOR DE LA TURBINA EÓLICA.....	80
4.4	SIMULACIÓN DEL CONTROL PREDICTIVO DE LA TURBINA EÓLICA	82
4.5	SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN.....	86
4.6	SIMULACIÓN DEL CONTROL DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN DE DOBLE ALIMENTACIÓN.....	92
4.6.1	SIMULACIÓN CON UNA BARRA INFINITA.....	92
4.6.2	SIMULACIÓN CON UNA SISTEMA DE TRANSMISIÓN.....	99
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		113
5.1	CONCLUSIONES.....	113
5.2	RECOMENDACIONES.....	116
REFERENCIAS.....		118

RESUMEN

Uno de los temas de actualidad está relacionado con el desarrollo y uso de fuentes de energías renovables, como parte de la solución a la problemática del deterioro ambiental, además, de la necesidad de conservar las reservas de combustibles fósiles. La desventaja de estas formas de energía es su elevado costo de instalación, producción y mantenimiento, por lo que las principales investigaciones referentes a energías renovables están orientándose a reducirlos mediante el mejoramiento de la eficiencia de los sistemas.

La energía eólica es una de las formas de energía renovable de más rápido crecimiento, como consecuencia de ello se han incrementado las investigaciones relacionadas a ésta, con el objetivo de incrementar su rango de potencia y maximizar su eficiencia, dando origen entonces a un amplio número de tareas, una buena parte de ellas relacionadas con el control, que de ser exitoso logrará una reducción del costo de este tipo de energía.

El rápido incremento de la capacidad de las granjas eólicas que penetran en los sistemas nacionales interconectados puesto que ya no se habla de turbinas de baja potencia ubicadas en lugares remotos cuyo efecto era insignificante, sino de grandes granjas eólicas generando una buena parte de la energía total consumida, esto a despertado el interés por los efectos que la interacción de este tipo de generadores con un sistema eléctrico de potencia pueden producir.

El presente trabajo está orientado a analizar los efectos producidos por la interconexión de generadores eólicos en un sistema eléctrico de potencia, para lo cual se trabaja con sistema de turbina eólica de velocidad variable con generador de inducción de doble alimentación, por ser el sistema que se muestra como la mejor opción para el control de potencia generada en un sistema de generación eólica, del mismo que se realiza un control de la potencia activa y reactiva generada.

PRESENTACIÓN

En el presente trabajo se hace un estudio referente a la generación de energía eléctrica a partir del viento, generación eólica, con el objetivo de presentar alternativas de control para mejorar la eficiencia en la producción de la energía, así como determinar los posibles efectos que puede observarse sobre un sistema eléctrico de potencia cuando un generador eólico se interconecte.

En el Capítulo 1 se hace un estudio general de la generación eólica con el objetivo de determinar el estado del arte en cuanto a este tema se refiere. Se presentan las expresiones físicas asociadas a la conversión de energía eólica. A continuación se presentan las estructuras más comunes de sistemas de generación eólica, se hace referencia a ciertas estrategias de control, y finalmente se resumen brevemente investigaciones relacionadas con el tema.

En el Capítulo 2 se procede a desarrollar los modelos de las partes que constituyen un generador eólico, se inicia con la modelación del torque aerodinámico, luego se desarrolla la parte mecánica y luego el generador eléctrico.

En el Capítulo 3 se consideran posibles formas de controlar un generador eólico, para ello se diseña un control predictivo para la parte aerodinámica de una turbina eólica, y un control de potencia reactiva del generador en base a controladores PID en cascada, aplicando el control vectorial de la máquina de inducción.

En el Capítulo 4 se simula en el programa computacional MATLAB/Simulink tanto los modelos obtenidos como los controles diseñados.

En el Capítulo 5 se analizan resultados y se elaboran las conclusiones.

OBJETIVOS

Objetivo General

El Objetivo General es estudiar los efectos eléctricos y electromecánicos de la conexión de generadores eólicos a un sistema eléctrico de potencia.

Objetivos Específicos

Los Objetivos Específicos son:

- Realizar la modelación y simulación de un sistema de generación eólico.
- Analizar la aplicabilidad de alguna técnica de control avanzado o control inteligente como alternativa para el control de generadores eólicos.
- Investigar los efectos eléctricos y electromecánicos de la integración de un sistema de generación eólico a sistemas eléctricos de potencia.

CAPITULO 1. ENERGÍA EÓLICA

1.1 INTRODUCCIÓN

La protección del medio ambiente junto a la necesidad de conservar las reservas de combustibles fósiles, ha estimulado el uso de energías renovables [10]. La desventaja de estas formas de energía es su elevado costo de instalación, producción y mantenimiento, por lo que las principales investigaciones referentes a energías renovables están orientándose a reducir los mismos [3].

Una de las formas de energía renovable de más rápido crecimiento a nivel mundial en los últimos años es la energía eólica, triplicándose su capacidad entre los años 2000 y 2004 [6], como consecuencia de ello se han incrementado las investigaciones relacionadas con esta. Las investigaciones referentes a energía eólica se concentran hoy en incrementar su rango de potencia y maximizar su eficiencia aerodinámica, tareas que no se muestran sencillas tomando en cuenta que las turbinas eólicas son estructuras grandes y flexibles, expuestas a ambientes ruidosos, presentando un sin número de problemas de control, que al ser solucionados han llevado a una reducción del costo de este tipo de energía [6].

También, como consecuencia del rápido incremento de la energía eólica, ya no se habla de algunas turbinas eólicas ubicadas en lugares remotos cuyo efecto era insignificante frente a un sistema eléctrico de potencia, sino de grandes granjas eólicas con cientos de MW de capacidad penetrado a los sistemas nacionales interconectados, generando una buena parte de la energía total consumida. Por lo que la interacción de este tipo de generadores con un sistema eléctrico de potencia es también de interés.

Además, la energía eléctrica no es una forma de energía que puede almacenarse y disponerse de ella en cualquier instante, sino que la generación dependerá de la demanda, y teniendo en cuenta que el recurso usado para generar electricidad en un sistema eólico es el viento, la producción de energía queda determinada por la cantidad de viento disponible en ese momento, el que generalmente varía en

forma aleatoria. Se hace importante por lo tanto el desarrollo de modelos, que permitan obtener una predicción de la velocidad del viento y por lo tanto disponer de un estimado de la cantidad de energía generada, lo que ayudará a la planificación de su integración al sistema eléctrico de potencia.

El presente trabajo está orientado a analizar los efectos producidos por la interconexión de generadores eólicos a un sistema eléctrico de potencia, para lo cual se trabaja con sistema de turbina eólica de velocidad variable con generador de inducción de doble alimentación, por ser el sistema que se muestra como la mejor opción para el control de potencia generada en un sistema de generación eólica, del mismo que se realiza un control de la potencia activa y reactiva generada.

En este primer capítulo se realizará una breve introducción a los sistemas de generación eólica; principios básicos de operación, métodos de control, los sistemas de conversión más comunes, e integración de generadores eólicos a los sistemas eléctricos de potencia.

1.2 SISTEMAS DE TURBINAS EÓLICAS

1.2.1 POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR UN GENERADOR EÓLICO

Para describir la potencia generada por un generador eólico se inicia mostrando el diagrama de bloques de un sistema eólico de conversión de energía La Figura 1.1 [4]

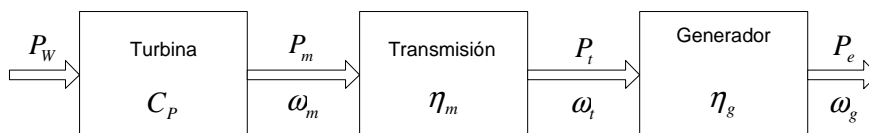


Figura 1.1 Diagrama de bloques de un sistema eólico - eléctrico

La entrada al sistema de generación eólica es la potencia presente en el viento, la misma que incrementa en forma proporcional al cubo de su velocidad [3]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1.1)$$

Donde:

v velocidad del viento [m/s]

A Área de barrido de las aspas [m²]

ρ Densidad del aire [kg/m³]

P_w Potencia del viento [W]

De esta potencia se puede capturar con una turbina eólica de área efectiva **A** una fracción de la potencia disponible en el viento, la misma que es determinada por el coeficiente de potencia de la turbina, la expresión para la potencia capturada es por lo tanto

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p(\lambda, \theta) \cdot A \cdot v^3 \quad (1.2)$$

Donde: C_p Coeficiente de potencia de la turbina eólica

La salida de potencia de la turbina P_m pasa a través del sistema de transmisión, la potencia P_m se ve reducida dependiendo de la eficiencia de dicha transmisión. La potencia de entrada al generador después de la transmisión es por lo tanto,

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot \eta_m \cdot A \cdot v^3 \quad (1.3)$$

Donde: P_t Potencia de entrada al generador [W]

η_m Eficiencia de la transmisión

La potencia de salida del generador (potencia generada) determinada por la eficiencia del generador esta dada por

$$P_e = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot A \cdot v^3 \quad (1.4)$$

Donde: P_e Potencia de salida del generador [W]

η_g Eficiencia del generador

El coeficiente de potencia de la turbina C_p depende de las características particulares del diseño de las aspas de la turbina y su orientación con respecto a la dirección del viento [3], C_p puede ser representado como una función de la relación entre la velocidad en el extremo de la aspa con la velocidad del viento (tip speed ratio λ) [2], así como del ángulo de inclinación de la aspa (pitch β [grados]) [4,5], esto se puede observar en la Figura 1.2.

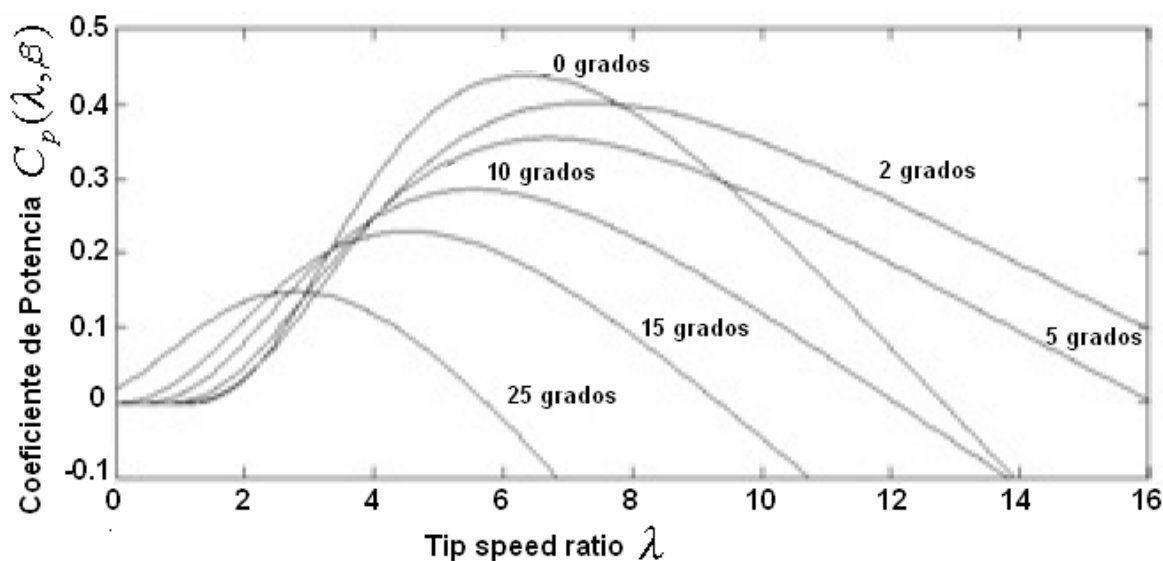


Figura 1.2 C_p como función de λ y β

El ratio de la velocidad, λ , es igual a la relación entre la velocidad en el extremo del aspa de la turbina v_t [m/s] sobre la velocidad del viento v [m/s].

$$\lambda = \frac{v_t}{v} \quad (1.5)$$

También puede ser expresada en función de la velocidad angular del rotor ω_m y del radio del rotor R .

$$\lambda = \frac{\omega_m \cdot R}{v} \quad (1.6)$$

El ángulo de inclinación, β , es definido como el ángulo entre el eje longitudinal de la aspa y el plano del rotor, como se muestra Figura 1.3.

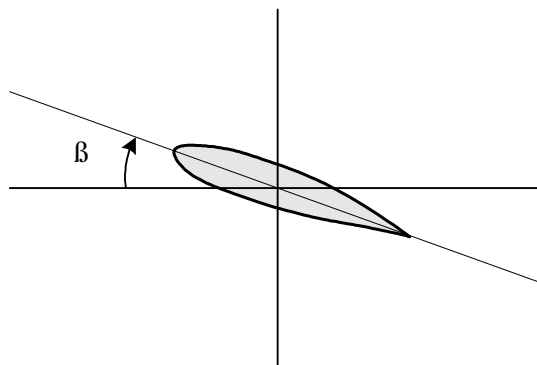


Figura 1.3 Grafico del ángulo β

Se puede concluir entonces, que la cantidad de potencia capturada por la turbina desde el viento será máxima cuando C_p tenga un valor óptimo, el mismo que al depender de λ y β , puede ser regulado por la calibración de estos. Para esta calibración se considerará que si la velocidad de viento varía, se puede alcanzar el óptimo valor de C_p ajustando la velocidad del rotor en forma proporcional a la variación de la velocidad del viento. Es decir, la velocidad de la turbina determina la eficiencia de la conversión de la energía del viento en energía mecánica, para una determinada velocidad de viento, una determinada geometría de las aspas y una determinada orientación de la turbina [1], esto puede comprobarse en el Figura 1.2, donde se ha usado la siguiente ecuación genérica para determinar el valor del coeficiente de potencia en función de λ y β [20].

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (1.7)$$

Donde:

$C_1=0.5176$, $C_2=116$, $C_3=0.4$, $C_4=5$ y $C_6=0.0068$.

y

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Esto sugiere el uso de técnicas de control de velocidad variable de los generadores eólicos, donde su velocidad debe variar en forma proporcional a la

velocidad del viento con el objetivo de maximizar la energía capturada, desplazando a técnicas de control donde la velocidad de la turbina se mantiene constante, en las cuales una considerable variación de la velocidad del viento reduce la energía capturada por la turbina de velocidad fija. Por lo tanto, el control de velocidad del rotor provee los medios para regular la cantidad de energía captura desde el viento. C_p tiene un valor teórico máximo de $16/27=0.593$ [3].

En la práctica ambas técnicas son usadas, operación a velocidad fija y operación a velocidad variable, si bien donde la variación de la velocidad del viento es considerable la estrategia de velocidad variable se muestra más atractiva que la de velocidad fija.

1.2.2 SISTEMAS DE CONVERSIÓN ELÉCTRICA DE LAS TURBINAS EÓLICAS

1.2.2.1 SISTEMA AERODINÁMICO

1.2.2.1.1 Control de Potencia Aerodinámica

Las turbinas eólicas son diseñadas para producir energía eléctrica en la forma más económica posible, es por ello necesario establecer una velocidad de viento a la cual la turbina eólica genere su máxima potencia de salida esta velocidad es de alrededor de 15 m/s, no se justifica diseñar turbinas eólicas cuya potencia máxima se de a velocidades mayores puesto que estas no son frecuentes [11].

Pero cuando el viento registre velocidades mayores, y por lo tanto la potencia en el viento supera la potencia aerodinámica nominal de la turbina, es necesario disipar el exceso de energía para evitar daños en la turbina, para ello toda turbina debe ser provista de un control de potencia aerodinámica [11], que no es más que un limitador de la eficiencia aerodinámica en altas velocidades de viento [3], existen dos métodos de control de la potencia aerodinámica el control mediante variación del ángulo de inclinación o por el efecto Stall.

1.2.2.1.2 Turbina Eólica Controladas por Angulo de Inclinación (*Pitch Controlled Wind Turbine*)

En las turbinas eólicas que se incorpore el control por ángulo de inclinación, el controlador electrónico de la turbina está midiendo la potencia de salida de la turbina varias veces por segundo, y cuando la potencia se demasiado alta es enviada la orden a los actuadores hidráulicos o eléctricos de girar un cierto ángulo a la aspa de la turbina fuera de la dirección del viento, y por el contrario si la velocidad del viento disminuye nuevamente la aspa retorna a la posición inicial. La variación de este ángulo no es considerable mas bien es pequeña muchas veces es fracción de grado.

Para que este tipo de control pueda ser aplicado las aspas del rotor de la turbina debe diseñarse de tal forma que estas puedan girar al rededor de su eje longitudinal como se puede ver en la Figura 1.4



Figura 1.4 Aspa indicando como se realiza el giro

El controlador y los actuadores en este caso deben ser cuidadosamente diseñados para garantizar que el giro de la aspa sea el adecuado, puesto que generalmente el ángulo de giro es de unos cuantos grados cada vez que cambia el viento, y solo el mantener las aspas con un adecuado ángulo de giro

garantizan, en este tipo de control, el maximizar la salida de potencia para todas las velocidades de viento.

1.2.2.1.3 Turbinas Eólicas Controladas por Efecto Stall (Stall Controlled Wind Turbines)

Stall Pasivo (Passive Stall)

A diferencia de lo que ocurre en el control por ángulo de inclinación de las aspas, no pueden girar sino que están fijas a un ángulo constante.

En este control el perfil geométrico de la aspa es aerodinámicamente diseñado, para asegurar que el momento en que la velocidad del viento se vuelva muy grande, se genere turbulencia sobre el lado posterior del aspa (efecto aerodinámico del stall) Figura 1.5, disminuyendo la fuerza de elevación de la aspa que actúa sobre el rotor, lo que conlleva a una disminución del coeficiente de potencia C_p .

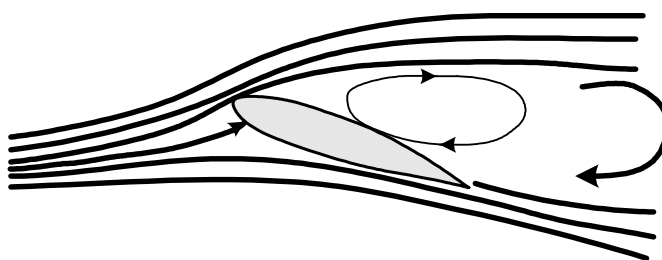


Figura 1.5 Efecto aerodinámico del stall

Para este caso el controlador no necesita un diseño complejo y se evitan partes móviles en el rotor, pero por otra parte requiere un complejo diseño aerodinámico de la aspa, pues se debe garantizar que la turbulencia en la cara posterior de la aspa incremente gradualmente, y no aparezca abruptamente cuando la velocidad llegue a su valor crítico, además se debe garantizar que la turbulencia no genere vibración.

Las aspas de turbinas eólicas diseñadas para control stall son ligeramente torneadas a lo largo de su eje longitudinal [7].

Active Stall Controlled Wind Turbines

Al hablar de este tipo de control podríamos considerar una combinación entre el control a través del efecto stall y control por ángulo de inclinación, puesto que a diferencia del control de stall pasivo ahora es necesario que las aspas puedan girar en su eje longitudinal como en el control por ángulo de inclinación, a bajas velocidades el control es similar al control por ángulo de inclinación es decir las aspas giran cierto ángulo dependiendo de la velocidad del viento, pero cuando se superan los valores nominales de potencia a diferencia del control por ángulo de inclinación, las aspas giran en sentido contrario (ángulos de inclinación β negativos) de lo que en un control por ángulo de inclinación lo haría, esto incrementa el ángulo de ataque sumiendo a la aspa en un profundo stall, con lo cual se disipa el exceso de energía en el viento.

La ventaja de este control es que la salida de potencia puede ser regula en forma más precisa que en el control pasivo, evita sobrepasar la potencia nominal cuando inician ráfagas de viento, además a altas velocidades la turbina puede trabajar exactamente a la potencia nominal.

Otros métodos de control de potencia

Algunos diseños antiguos de turbinas usan alerones para controlar la potencia del rotor, modificando la geometría de la aspa para obtener una fuerza de elevación extra.

Otra posibilidad pero solo aplicable a turbinas de baja potencia (1 kW o menos), es girar el rotor de la turbina contra el viento (yaw control), no resulta muy práctico puesto que el movimiento de todo el rotor puede ejercer mucha tensión en la estructura de la turbina.

1.2.2.2 SISTEMA ELÉCTRICO

Los generadores que se utilicen dependerán del tipo del sistema, en función de su velocidad los sistemas de velocidad fija y lo sistemas de velocidad variable.

1.2.2.2.1 Sistemas de Velocidad Fija

En los sistemas de velocidad fija el generador eléctrico que generalmente es un generador de inducción de jaula de ardilla, es conectado directamente al sistema eléctrico de potencia, por lo que la frecuencia del sistema eléctrico de potencia fija en un valor constante la velocidad en el eje del generador, que frente a un incremento de velocidad del viento no se observa variación en la velocidad del eje sino incremento de la potencia activa entregada al sistema eléctrico de potencia. Si bien presenta ventajas como el prescindir de un conversor estático para convertir frecuencia variable a la frecuencia del sistema eléctrico de potencia, también presenta desventajas como que un brusco cambio de velocidad en el viento fuerza a los componentes mecánicos de la turbina, ya que estos serán los que absorban buena parte del incremento de potencia antes de que el sistema de control pueda actuar [6].

Generalmente el control aerodinámico de potencia se lo realiza a través de regulación por el principio del stall.

1.2.2.2.2 Sistemas de Velocidad Variable

En los sistemas de velocidad variable casi siempre el generador es un generador sincrónico, que no es conectado directamente al sistema eléctrico de potencia sino a través de un conversor estático, por lo que la velocidad del generador dependerá de la velocidad de viento, y para convertir la frecuencia variable de entrada a la frecuencia fija de la barra infinita se hace uso de un conversor estático, con el que también se controla la potencia activa y reactiva.

Dentro de los sistemas de velocidad variable también se puede incluir aquellos que usan generadores de inducción de doble alimentación los que su estator es directamente conectado al sistema eléctrico de potencia, y el rotor es conectado a través de un conversor estático al mismo sistema eléctrico de potencia. En este sistema la potencia de salida es controlada y maximizada mediante el ajuste de la velocidad de rotación de la turbina, que como se indica en párrafos anteriores se puede lograr que el coeficiente de potencia de la turbina C_p sea el óptimo si la velocidad de la turbina varía con la velocidad del viento.

La ventaja de trabajar con sistemas de velocidad variable es que se puede maximizar la energía capturada (manipular C_p), y puede permanecer por mayor tiempo operando en este punto; comparado con un sistema de velocidad fija, muestra un mejor desempeño frente a fluctuaciones de potencia y carga.

La desventaja de este sistema es el costo de la electrónica de potencia que se requiere para el control de potencia y frecuencia.

Generalmente el control aerodinámico de potencia se lo realiza a través de variación del ángulo de inclinación de la aspa.

Si se considera que la velocidad del viento, y por lo tanto su potencia varía considerablemente, la generación a velocidad variable se muestra como una mejor opción comparada con los sistemas de velocidad fija.

1.2.2.3 SISTEMAS DE GENERACIÓN USADOS COMÚNMENTE

Las topologías más comunes de sistemas de generación son [3], [11]:

Turbina eólica de velocidad fija con generador de inducción de jaula de ardilla

Turbina eólica de velocidad variable con generador sincrónico

Turbina eólica de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado

1.2.2.3.1 Turbina eólica de velocidad constante con generador de inducción de jaula de ardilla

Como este es un sistema de velocidad fija el generador es conectado directamente al sistema eléctrico de potencia. En este sistema se incluye una caja reductora entre el rotor de la turbina y el generador, para adaptar la velocidad baja del rotor de la turbina a la alta velocidad del generador eléctrico, lo que permite que un generador de inducción estándar pueda ser usado para esta aplicación. Casi siempre, la potencia es limitada mediante el principio del stall pasivo (classic stall principle); donde si la velocidad del viento incrementa sobre la velocidad nominal, el coeficiente de potencia inherentemente se reduce, entonces la potencia producida por la turbina permanece cercana a la potencia nominal. En

algunos casos se usa el principio del *active stall*: donde ángulos de inclinación negativos son usados para limitar la potencia [3].

Este tipo de sistema se muestra en la Figura 1.6.

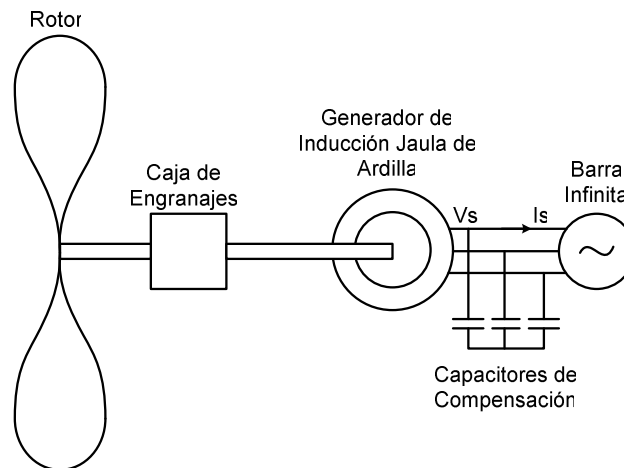


Figura 1.6 Turbina eólica de velocidad fija con generador de inducción de jaula de ardilla

1.2.2.3.2 Turbinas eólicas de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado

En este tipo de sistema se usa un generador de inducción de rotor devanado para tener acceso al rotor. Tanto el estator como el rotor son alimentados, de allí su nombre de generador de doble alimentación. El estator es directamente conectado al sistema eléctrico de potencia, el rotor es conectado también al sistema eléctrico de potencia a través de un convertor estático con el objetivo de controlar las corrientes del rotor. El acceso directo al rotor permite controlar la amplitud y la fase de la corriente del rotor, permitiendo regular el factor de potencia y la forma de las corrientes de salida [1]. Además, esta característica puede ser utilizada para minimizar pérdidas asociadas con el punto de operación dado, o para alcanzar otros objetivos de control que permitan mejorar el performance. Esta capacidad está directamente relacionada con el hecho de que el sistema de doble alimentación necesita un grado de libertad, frecuencia, para establecer el punto de máxima potencia de la turbina, dejando un grado de libertad, magnitud de la corriente, para otras leyes de control, como la maximización de la eficiencia [2].

Un rango de velocidad de aproximadamente de entre el 60% al 110% de la velocidad nominal, son suficientes para un buen rendimiento de energía, esto se logra haciendo uso de la ventaja que al trabajar con velocidad variable, el tip speed ratio λ , y por lo tanto el coeficiente de potencia C_p de la turbina, puede mantenerse al valor que garantiza una optima captación de energía [3].

En este sistema se incluye una caja reductora entre el rotor de la turbina y el generador eléctrico, por lo que no es necesario características especiales de diseño del generador eléctrico.

Los generadores de inducción de doble alimentación se han convertido en la alternativa más popular cuando es necesario un amplio rango de operación de velocidad del viento. La flexibilidad en la operación ha permitido el desarrollo de mejorados algoritmos de control de velocidad, e incluso a permitido incluir otros objetivos de control, sin reducir la eficiencia en la regulación de velocidad.

Un sistema de este tipo se muestra en la Figura 1.7.

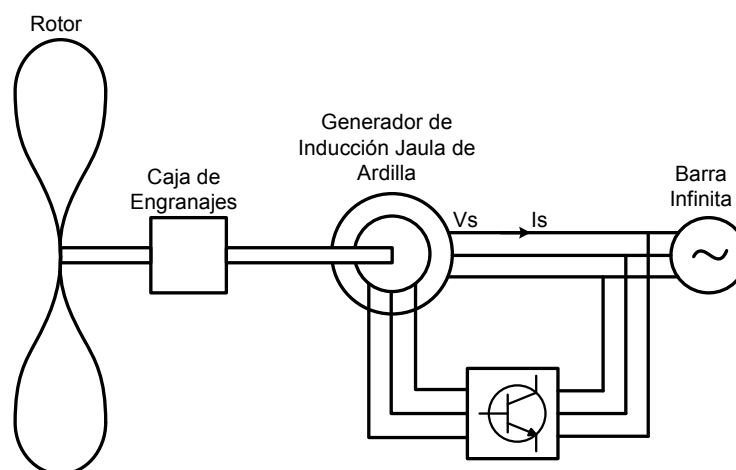


Figura 1.7 Turbina eólica de velocidad variable y generador de inducción doblemente alimentado

1.2.2.3.3 Turbina eólica de velocidad variable con generador sincrónico

Dentro de este tipo de sistema existen algunas variaciones del mismo,

Generador sincrónico con caja reductora

Generador sincrónico multipolo con control de campo

Generador sincrónico multipolo de magneto permanente

Pero los tres comparten una característica, pues que la potencia total de la turbina circula a través del convertor estático que convierte la frecuencia variable del generador a la frecuencia constante de la red, además que permite un control más rápido de la potencia activa y reactiva, ya que el generador esta desacoplado de la red, por el enlace de DC del convertor estático [12].

Cuando el sistema no incluye la caja reductora los generadores son bastante grandes, y tienen que ser desarrollados específicamente para esta aplicación porque tiene que producir un alto torque.

A velocidades de viento mayores a la velocidad nominal de la turbina, la potencia es reducida mediante la variación del ángulo de inclinación de las aspas [3].

Un sistema de este tipo se muestra en la Figura 1.8.

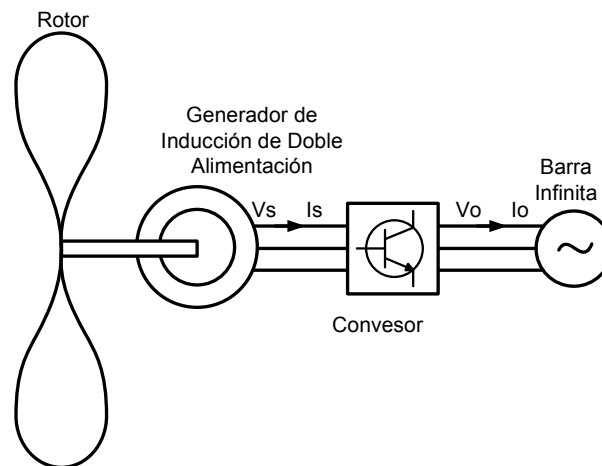


Figura 1.8 Turbina eólica de velocidad variable con generador sincrónico

1.2.2.4 INTEGRACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA

Como el porcentaje de la capacidad energía eólica ha incrementado, se ha incrementado también la importancia de predicciones metereológicas de la velocidad del viento, para estimar la cantidad de energía generada por la granja eólica, lo que servirá para establecer el valor de la electricidad producida, ayudará con la planificación requerida de horarios para su integración. Además, modelos

precisos pueden asegurar el éxito del desarrollo, se puede maximizar los beneficios y minimizar los riesgos.

Las posibles barreras para el uso de la tecnología eólica podrían venir de las cuestiones de la integración, incluyendo la transmisión y las restricciones del sistema, políticas de operación y una falta de entendimiento de los impactos de la energía eólica en los sistemas eléctricos de potencia. Por ahora los estándares que son esperados para facilitar la interconexión y la operación económica de grandes plantas eólicas están siendo propuestos. El rápido incremento de la inyección dentro de los sistemas eléctricos de potencia presenta grandes desafíos para los operadores de los sistemas eléctricos de potencia. La productividad de las granjas eólicas fluctúa con el clima, mientras que el sistema eléctrico de potencia necesita mantener un balance constante de suministro y demanda. Los efectos de la fluctuación de la energía eólica sobre la regulación y estabilidad de los sistemas está siendo estudiada con el objetivo de que los operadores y planificadores sienta la seguridad de incrementar la cantidad de energía eólica en el un sistema eléctrico de potencia. Una alternativa para proveer un suministro estable al sistema eléctrico de potencia es la combinación entre energía eólica e hidroeléctrica. Investigaciones concernientes a la generación, transmisión, y costos de la integración sistemas eólicos e hidráulicos está siendo llevada a cabo.

Otras aplicaciones de la energía eólica están siendo también exploradas para abrir nuevos mercados, por ejemplo el uso de la energía eólica para la producción de hidrógeno. Estas aplicaciones pueden abrir oportunidades para proveer energía limpia y de bajo costo en otros sectores incluidos el transporte.

Esta previsto que la industria de la energía eólica todavía siga desarrollándose rápidamente, nuevas tecnologías están siendo activamente explotadas a través de actividades de investigación y desarrollo, también las aplicaciones de la energía eólica está expandiéndose dentro de amplias áreas [12].

1.2.2.5 INVESTIGACIONES Y DESARROLLOS

Tal como se menciona en la parte anterior la energía eólica se ha convertido en la fuente energía de mayor desarrollo en los últimos años, por lo que tecnología de

innovación relacionada con la energía eólica esta bajo una activa investigación y desarrollo con el objetivo de reducir los costos e incrementar la eficiencia.

Dentro del sistema mismo de conversión las investigaciones se concentran en producir sistemas de transmisión (drivetrain) más ligeros que los sistemas de transmisión convencionales, así también cajas reductoras (gearbox) de alta eficiencia mecánica y potencia, para que el torque y la velocidad angular sean óptimamente convertidas para los generadores eléctricos de alta velocidad.

Un área clave de mejoras es la conversión de potencia a través de avanzados componentes de electrónica de potencia para reducir costos e incrementar eficiencia. Nuevos dispositivos de electrónica de potencia se encuentran en estudio para explorar la potencialidad de remplazar el silicio por el carburo de silicio, el cual tiene la ventaja de manejar altas corrientes y voltajes y soportar ambientes de alta temperatura. Esto podría reducir el tamaño de los convertidores y mejorar su performance.

Varias topologías para multi-MW convertidor electrónico de potencia, incluidos convertidores multinivel y tecnología de enlaces AC son desarrollados para proveer conversión de energía con características de costo efectivo, alta confiabilidad y potencia limpia.

Los trabajos más recientes están orientados a diseñar y fabricar aspas que incorporen materiales de bajo peso. Algunos nuevos materiales para aspas han sido desarrollados, incluyendo fibra de carbono e híbridos de vidrio y carbono. Aunque la fibra de carbono es más costosa que la fibra de vidrio tradicional, la primera es mucho más fuerte y ligera que los materiales tradicionales. Nuevos procesos de manufactura también están siendo desarrollados.

Algunos trabajos relacionados con torres de turbina también están siendo desarrollados, incluyendo el uso de torres híbridas de concreto y acero para torres más altas para turbinas multi-MW, y el método para construir las torres en el sitio para reducir los costos de fabricación y transporte.

También existen varias investigaciones referentes a la instalación de granjas eólicas mar adentro, puesto que estas presentan mayor estabilidad debido a que el viento tiene un flujo más laminar sobre el agua, pero este tipo de granjas eólicas tienen como inconveniente el desarrollo de las bases, en lo que ahora se concentran las investigaciones con el objetivo de desarrollar bases para aguas más profundas.

Además se está trabajando en turbinas eólicas para áreas de baja velocidad de viento, con el objetivo de reducir el costo de la energía en dichas áreas al incrementar la energía capturada, además de reducir el costo inicial, incrementar la confiabilidad, y reducir los costos de mantenimiento [3], [11].

CAPITULO 2. MODELACIÓN DEL SISTEMA DE TURBINA EÓLICA

2.1 MODELACIÓN DEL SISTEMA AERODINÁMICO

2.1.1 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA (POWER TRAIN)

La dinámica de la transmisión puede ser representada por un modelo de masa; donde las pérdidas se representan por un coeficiente de amortiguamiento viscoso en el eje de alta como en el de baja velocidad. Para la mayor parte de turbinas eólicas, la dinámica del sistema de transmisión puede representarse por el modelo lineal mostrado en la Figura 2.1 [18].

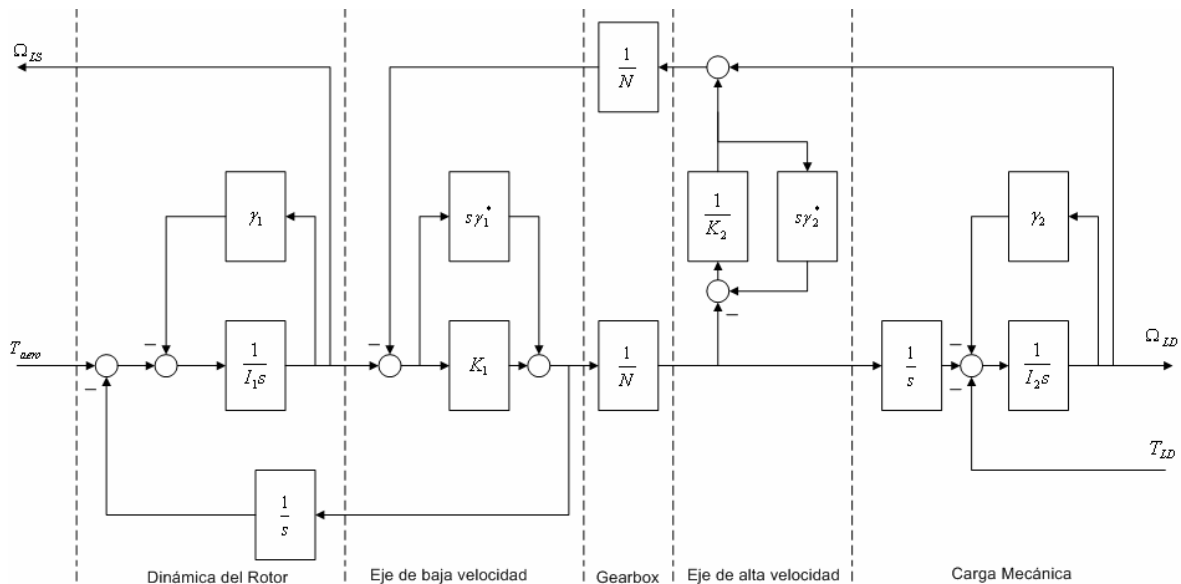


Figura 2.1 Dinámica de la Transmisión

La función de transferencia que relaciona la velocidad del rotor Ω_{LS} y la velocidad del generador Ω_{LD} con el torque aerodinámico T_{aero} y el torque de reacción del generador T_{LD} será

$$\begin{bmatrix} \Omega_{LS} \\ \Omega_{LD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{aero} \\ T_{LD} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Donde las matrices serán aproximadamente:

$$\begin{aligned}
A(s) &\approx \frac{s^2 I_2 (K_1 + N^2 K_2) + s(K_1 + N^2 K_2) \left(\gamma_2 + \frac{(K_1^2 \gamma_2^* + N^2 K_2^2 \gamma_1^*)}{(K_1 + N^2 K_2)^2} \right) + K_1 K_2}{p(s)} \\
B(s) &\approx -\frac{NK_1 K_2}{p(s)} \\
C(s) &\approx \frac{NK_1 K_2}{p(s)} \\
D(s) &\approx -\frac{s^2 I_1 (K_1 + N^2 K_2) + s(K_1 + N^2 K_2) \left(\gamma_1 + N^2 \frac{(K_1^2 \gamma_2^* + N^2 K_2^2 \gamma_1^*)}{(K_1 + N^2 K_2)^2} \right) + N^2 K_1 K_2}{p(s)}
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Una buena aproximación se da si $\gamma_1^* = \gamma_2^* = 0$

$$\begin{aligned}
A(s) &\approx \frac{s^2 I_2 (K_1 + N^2 K_2) + s(K_1 + N^2 K_2) \gamma_2 + K_1 K_2}{p(s)} \\
B(s) &\approx -\frac{NK_1 K_2}{p(s)} \\
C(s) &\approx \frac{NK_1 K_2}{p(s)} \\
D(s) &\approx -\frac{s^2 I_1 (K_1 + N^2 K_2) + s(K_1 + N^2 K_2) \gamma_1 + N^2 K_1 K_2}{p(s)}
\end{aligned}$$

Donde

$$p(s) = s^3 I_1 I_2 (K_1 + N^2 K_2) + s^2 \left((K_1 + N^2 K_2) (I_1 \gamma_2 + I_2 \gamma_1) \right) + s (K_1 K_2 (I_1 + N^2 I_2)) + K_1 K_2 (\gamma_1 + N^2 \gamma_2) \tag{2.3}$$

Finalmente la dinámica total viene dada por,

$$\dot{x}_{PT} = A_{PT} x_{PT} + B_{PT} T \tag{2.4}$$

Donde:

$$x_{PT} = [\Omega_{LD} \quad T_{LS} \quad \Omega_{LS}]^T, \quad T = [T_{LD} \quad T_{aero}]^T$$

$$A_{PT} = \begin{bmatrix} -\gamma_2/I_2 & 1/NI_2 & 0 \\ -\hat{K}_1/N & 0 & \hat{K}_1 \\ \left(\gamma/N - \gamma\hat{K}_1/(N^3K_2)\right)/I_1 & -1/I_1 & -\left(\gamma_1 + \gamma - \gamma\hat{K}_1/(N^2K_2)\right)/I_1 \end{bmatrix}$$

$$B_{PT} = \begin{bmatrix} -1/I_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/I_1 \end{bmatrix}$$

Donde T_{LS} y Ω_{LS} es el torque y la velocidad respectivamente en el lado de baja velocidad del eje de la turbina. Ω_{HS} es la velocidad en el lado de alta velocidad del eje, Ω_{LD} es la velocidad del generador, T_{aero} es el torque generado por el rotor, T_{LD} es el torque de reacción del generador (desarrollado a través del circuito de electrónica de potencia).

Donde:

- N Relación de la caja reductora
- I_1 Inercia del rotor
- I_2 Inercia del generador
- K_1 Rigidez del eje en el lado de baja velocidad
- K_2 Rigidez del eje en el lado de alta velocidad
- γ_1 Coeficiente de amortiguamiento del eje en el lado de baja velocidad
- γ_2 Coeficiente de amortiguamiento del eje en el lado de alta velocidad
- γ_1^* Coeficiente interno de amortiguamiento del eje en el lado de baja velocidad
- γ_2^* Coeficiente interno de amortiguamiento del eje en el lado de alta velocidad

Para un aerogenerador de potencia nominal de 1MW los valores de los parámetros son $N=58$; $I_1=1.0295 \times 10^6$; $I_2=42.82$; $K_1=1.0106 \times 10^8$; $K_2=4.85 \times 10^6$; $\gamma_1=1.5176 \times 10^4$; $\gamma_2=4.5112$; $\gamma=2.6538 \times 10^5$;

$$\hat{K}_1 = K_1 / \left(1 + \frac{K_1}{K_2 N^2} \right) \quad (2.5)$$

La función de transferencia equivalente quedará determinada por

$$\Omega_{LD}(s) = \frac{-(0.02335s^2 + 0.00633s + 2.279)T_{LD}(s) + 0.0393T_{aero}(s)}{s^3 + 0.3764s^2 + 794.9s + 20.57} \quad (2.6)$$

2.1.2 TORQUE AERODINÁMICO

El torque aerodinámico esta dado por,

$$T_{aero} = \frac{1}{2} \rho \pi v^2 R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (2.7)$$

Debido a que la aerodinámica del sistema de la turbina eólica es no lineal, es necesario buscar un punto específico de operación [18]

$$\Delta T_{aero} = \frac{\partial T_{aero}}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial T_{aero}}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial T_{aero}}{\partial U} \Delta U \quad (2.8)$$

Para este caso

$$T_{aero} = K_V V^2 + K_\beta \beta \quad (2.9)$$

Donde para un generador de potencia nominal de 1 MW

$$K_V = \frac{\partial T_{aero}}{\partial V} = 3200$$

$$K_\beta = \frac{\partial T_{aero}}{\partial \beta} = -29500$$

Finalmente, el torque aerodinámico es modelado por

$$T_{aero} = 3200V^2 - 29500\beta \quad (2.10)$$

2.1.3 ACTUADOR DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN

Si bien en varias ocasiones no se considera la dinámica del actuador del ángulo de inclinación [18], es importante señalar las ecuaciones que describen dicha dinámica:

$$\dot{x} = A_p x_p + B_p \hat{\beta}, \quad \beta = C_p x_p \quad (2.11)$$

Donde:

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -526.62 & -28.57 & -1022.73 \\ v(\hat{\beta}) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 1022.73 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_p = [0 \ 0 \ 1]$$

Donde

β Ángulo de inclinación actual de la aspa

$\hat{\beta}$ Ángulo de inclinación demandado en la aspa

$$Y \quad v(\hat{\beta}) = \begin{cases} 1 & \hat{\beta} \geq 0 \\ 0 & \hat{\beta} \leq 0 \end{cases}$$

Representa las restricciones en la posición.

En este sistema se deben considerar además las siguientes restricciones: en ángulo de la aspa puede ser solo positivo, la tasa de cambio del actuador hidráulico del ángulo de inclinación debe ser menor que (0.4V-2.8) deg/s sobre el rango de operación de la velocidad del viento medida sobre los 24 m/s. La operación del generador debe estar dentro de los rangos de diseños, es decir no puede operar más allá de la potencia nominal. La velocidad del rotor esta limitada en Ω_{LSmax} , el torque de reacción del generador, T_{LD} , debe ser positivo y menor a T_{LDmax} , y cuando las fluctuaciones en la velocidad del viento induzcan transitorios,

alrededor del punto de operación en estado estable, en la velocidad del rotor, estos transitorios deben mantenerse estrictamente menores que 3.264 Rad./sec bajo el rango normal de las condiciones de operación [18].

2.1.4 MODELO DEL VIENTO

El rotor interactúa con un complejo campo de viento variante en tiempo y espacio, sin embargo este puede ser representado por una única velocidad de viento, que se considera igual sobre todo el disco del rotor, la que se define como la velocidad del viento efectiva, de la cual un modelo conveniente es una ecuación lineal estocástica, en la que se definirá una velocidad de viento media V_{mean} [21].

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{point} \\ \dot{a}_{x_1} \\ \dot{a}_{x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_w(V_{mean}) & 0 & 0 \\ \frac{\tau_1}{\tau_2\tau_3} & 0 & 0 \\ \frac{\tau_2\tau_3 - \tau_1(\tau_2 + \tau_3)}{\tau_2^2\tau_3^2} & \frac{1}{\tau_2\tau_3} & \frac{(\tau_2 + \tau_3)}{\tau_2\tau_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{point} \\ a_{x_1} \\ a_{x_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_w(V_{mean}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \eta \quad (2.12)$$

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{point} \\ a_{x_1} \\ a_{x_2} \end{bmatrix}$$

donde $\tau_1 = \beta/\sqrt{2}$, $\tau_2 = \tau_1\sqrt{a}$, $\tau_3 = \beta/\sqrt{a}$, $\beta = 33.8/V_{mean}$, $a = 0.55$ y η es un ruido blanco Gaussiano de media cero y varianza unitaria. Posibles valores para a_w y b_w están dados en la Tabla 2-1

V_{mean} (m/s)	a_w	b_w
12	0.068	0.88
16	0.092	1.37
20	0.114	1.77

Tabla 2-1 Valores para a_w y b_w

2.1.5 AERODINÁMICA DE LA TURBINA EÓLICA

Finalmente, la aerodinámica, la dinámica del sistema de transmisión y de la unidad de generación de potencia son combinados y el modelo total del sistema es obtenido. Entonces, la dinámica de una turbina de velocidad variable esta dada por

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2.13)$$

$$\Omega = CX + DU$$

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma_2/I_2 & 1/NI_2 & 0 \\ -\hat{K}_1/N & 0 & \hat{K}_1 \\ \left(\gamma/N - \gamma\hat{K}_1/(N^3K_2)\right)/I_1 & -1/I_1 & -\left(\gamma_1 + \gamma - \gamma\hat{K}_1/(N^2K_2)\right)/I_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1/I_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_\beta/I_1 & K_V/I_1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} \Omega_{LD} \\ T_{LS} \\ \Omega_{LS} \end{bmatrix}, \quad U_T = \begin{bmatrix} T_{LD} \\ V \\ P \end{bmatrix}, \quad \Omega = \begin{bmatrix} \Omega_{LD} \\ \Omega_{LS} \end{bmatrix}$$

Del cual luego se separan las entradas controlables y las perturbaciones medibles

$$\dot{X} = AX + B_C U_C + B_V V \quad (2.14)$$

$$\Omega = CX$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma_2/I_2 & 1/NI_2 & 0 \\ -\hat{K}_1/N & 0 & \hat{K}_1 \\ \left(\gamma/N - \gamma\hat{K}_1/(N^3K_2)\right)/I_1 & -1/I_1 & -\left(\gamma_1 + \gamma - \gamma\hat{K}_1/(N^2K_2)\right)/I_1 \end{bmatrix}$$

$$B_C = \begin{bmatrix} -1/I_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_\beta/I_1 \end{bmatrix}, \quad B_V = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_V/I_1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X = [\Omega_{LD} \quad T_{LS} \quad \Omega_{LS}]^T$$

$$U_C = [T_{LD} \quad \beta]^T, \quad V = [V]$$

Donde:

U_C entradas controlables

V entradas no-controlables (velocidad del viento)

El sistema tiene dos entradas controlables: el torque de reacción del generador T_{LD} y el ángulo de inclinación de la aspa β , y una entrada no controlable, que es la velocidad del viento V . Hay dos salidas: la velocidad del lado de baja velocidad del eje, Ω_{LS} , y la velocidad del generador Ω_{LD} , estas son presentadas en la Figura 2.2.

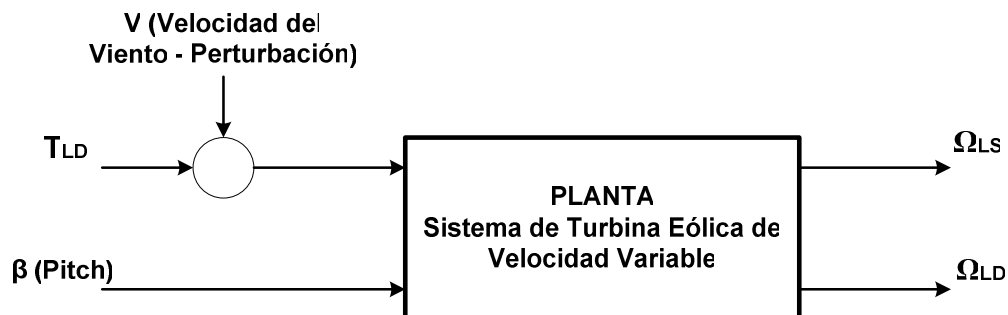


Figura 2.2 Entradas y Salidas del Sistema Eólico- Eléctrico

2.2 MODELACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

En el modelo mecánico se considera solo la transmisión (drive train) [13], para la modelación se plantea como entradas el torque aerodinámico T_{aero} y la velocidad del generador Ω_{LD} , y como salidas la velocidad del rotor Ω_{LS} , el ángulo de giro del rotor θ_{LS} y el torque en el eje de alta velocidad Ω_{HS} .

La transmisión convierte el torque aerodinámico ejercido en el rotor en el torque ejercido en el eje de baja velocidad, el torque aerodinámico es reducido a través de una caja de engranajes. El modelo de la transmisión se representa como el modelo de dos masas conectadas a través de un eje flexible de baja velocidad, el que es modelado a través de una rigidez K_1 y un coeficiente de amortiguamiento γ_1 . Las masas usadas en el modelo corresponden a una gran inercia correspondiente al rotor de la turbina I_1 , representando las aspas y el hub, y una pequeña inercia representado el generador I_2 , pero generalmente la inercia del generador se incluye en el modelo del generador. Se considera que la caja de engranajes es ideal y su relación de cambio esta dada por N . El eje de alta velocidad se puede asumir rígido [13,16]. Un esquema del sistema mecánico se muestra en la Figura 2.3.

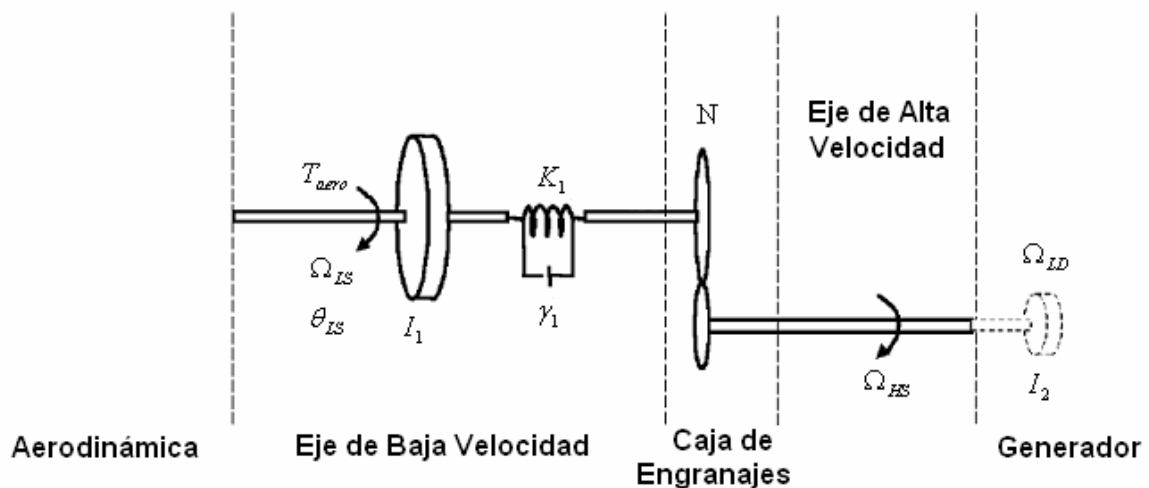


Figura 2.3 Sistema Mecánico de una Turbina Eólica

El modelo mecánico en variables de estado esta representado por:

$$\bar{Y} = \begin{pmatrix} K_1 N & 0 & \gamma_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \bar{X} + \begin{pmatrix} -\gamma_1 N^2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \bar{U} \quad (2.15)$$

Donde:

$$\bar{U} = \begin{pmatrix} \Omega_{LD} \\ T_{aero} \end{pmatrix}, \quad \bar{Y} = \begin{pmatrix} \Omega_{HS} \\ \theta_{LS} \\ \Omega_{LS} \end{pmatrix}, \quad \bar{X} = \begin{pmatrix} \theta_k \\ \theta_{LS} \\ \Omega_{LS} \end{pmatrix}$$

2.3 MODELACIÓN DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN

Para iniciar con la modelación del generador de inducción es necesario previamente introducir las transformaciones trifásicas.

2.3.1 TRANSFORMACIONES TRIFÁSICAS

En el estudio de los sistemas de potencia, las transformadas matemáticas son frecuentemente utilizadas para desacoplar variables, facilitando la solución de difíciles ecuaciones con coeficientes variantes en el tiempo o para referir todas las variables a un sistema de referencia común [15].

2.3.1.1 Transformación de Clarke

Las dos variables estacionarias de la transformación de Clarke son representadas con α y β . En esta transformada el eje α coincide con el eje de la fase α y el eje β se encuentra a $\pi/2$ del eje α . Esta transformada es bidireccional, por lo que una tercera variable puede ser añadida, y es la conocida como la componente de secuencia cero [15].

$$[f_{\alpha\beta 0}] = [T_{\alpha\beta 0}] [f_{abc}] \quad (2.16)$$

Donde la matriz de transformación $[T_{\alpha\beta 0}]$, esta dada por

$$[T_{\alpha\beta 0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La transformación inversa es

$$[T_{\alpha\beta 0}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.3.1.2 Transformación de Park

La transformación de Park o transformación de tres fases a dos fases es utilizada en el análisis de máquina eléctricas. La transformada de Park se usa generalmente para transformar cantidades del estator de las máquinas eléctricas a un sistema de referencia dq de dos ejes, donde el eje q adelanta en $\pi/2$ al eje d , lo que facilita la solución computacional de transitorios. Un claro ejemplo es el modelo de la máquina de inducción, donde se transforma ecuaciones diferenciales con inductancias variantes en el tiempo a ecuaciones diferenciales con inductancias de valor constante [15].

La transformación es expresada usualmente en términos del ángulo θ que es el ángulo entre el eje q y el eje α , como se muestra en la Figura 2.4:

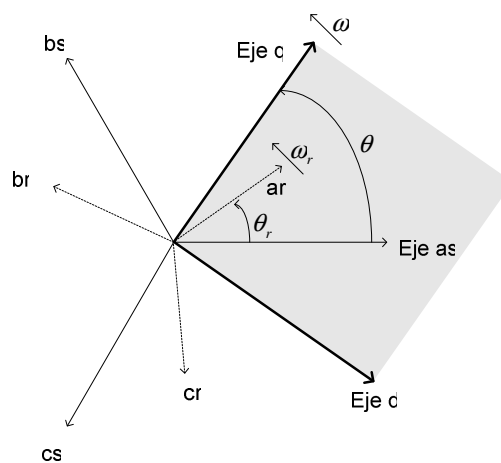


Figura 2.4 Ejes de Referencia qd0

La ecuación de transformación es de la forma:

$$[f_{qd0}] = [T_{qd0}(\theta_q)] [f_{abc}] \quad (2.19)$$

Donde la matriz de transformación esta dada por

$$[T_{qd0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Y su inversa esta dada por

$$[T_{qd0}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.3.2 MODELO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

2.3.2.1 Campo Magnético Rotativo y Deslizamiento

El flujo de corrientes trifásicas balanceadas a través de los bobinados del estator simétricamente colocado, producen un campo rotativo de fuerza magneto motriz [15] dado por

$$F(\theta_a^e, t) = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{N}{P} I_m \cos(\theta_a^e - \omega_e t) A.turn \quad (2.22)$$

Donde θ_a^e es el ángulo eléctrico medido desde el eje de la fase α , $\omega_e (=2\pi f_e)$ es la velocidad angular de la fuerza magnetomotriz mmf del estator en radianes eléctricos por segundo, y f_e es la frecuencia de las corrientes de excitación. En radianes mecánicos por segundo, la velocidad sincrónica es

$$\omega_{sm} = \frac{2}{P} \omega_e \quad (2.23)$$

En revoluciones por minuto, la velocidad sincrónica es

$$N_s = \frac{60\omega_{sm}}{2\pi} = \frac{120f_e}{P} \quad (2.24)$$

Cuando el rotor está girando a una velocidad estable de ω_{rm} radianes mecánicos por segundo, la velocidad relativa o velocidad de deslizamiento entre el rotor y el campo rotativo sincrónico del estator, F , es

$$\text{slipspeed} = \omega_{sm} - \omega_{rm} \quad (2.25)$$

El deslizamiento en por unidad, s , es definido como la velocidad de deslizamiento normalizada, es decir

$$s = \frac{\omega_{sm} - \omega_{rm}}{\omega_{sm}} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} \quad (2.26)$$

El deslizamiento s es negativo en operación como generador cuando el rotor gira sobre la velocidad sincrónica.

La velocidad de deslizamiento puede ser expresada como $s\omega_e$ o $s\omega_{sm}$, y la frecuencia de deslizamiento como sf_e . Cuando ω_{rm} es menor que la velocidad sincrónica, ω_{sm} , los conductores del rotor giran con una velocidad relativa de $s\omega_{sm}$ en la dirección positiva con respecto al movimiento del flujo del entrehierro. Como resultado, los voltajes inducidos en los devanados del rotor tienen la frecuencia de deslizamiento sf_e . Cuando el rotor es cerrado, los voltajes inducidos producen circulación de corriente en el circuito del rotor. La magnitud de las corrientes del rotor es determinada por la magnitud del voltaje inducido y las impedancias del rotor a la frecuencia de deslizamiento.

Cuando el rotor está parado, ω_{rm} es cero o $s=1$, por lo que la frecuencia en el arranque es f_e . Conforme el motor acelera alcanzando la velocidad sincrónica, el deslizamiento decrece.

De la misma manera que el flujo de corriente en el estator, las corrientes del rotor establecerán su propio campo magnetomotriz f_{rm} que rota a $s\omega_{sm}$ rad/seg con respecto al rotor. Debido a que el rotor está girando a la velocidad ω_{rm} , la velocidad absoluta del campo magnetomotriz f_{rm} del rotor es igual a la velocidad sincrónica, esto es

$$\omega_{rm} + s\omega_{sm} = \omega_{sm} \quad (2.27)$$

Con los campos magnetomotrices del rotor y el estator girando a la misma velocidad, un torque constante será producido en estado estable cuando la diferencia de magnitud y de fase de estos f_{rms} es constante.

2.3.2.2 Modelo de la Máquina de Inducción Trifásica

Las ecuaciones de voltaje de los circuitos del rotor y del estator magnéticamente acoplados, como el de la Figura 2.5,

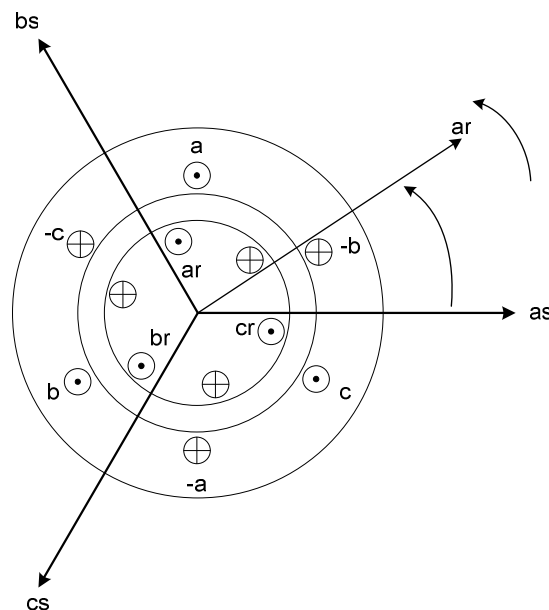


Figura 2.5 Máquina de Inducción

Pueden ser escritas de la siguiente manera:

Ecuaciones de voltaje del estator

$$v_{as} = r_s i_{as} + \frac{d}{dt} \lambda_{as} \quad (2.28)$$

$$v_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \lambda_{bs} \quad (2.29)$$

$$v_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \lambda_{cs} \quad (2.30)$$

Ecuaciones de voltaje del rotor

$$v_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d}{dt} \lambda_{ar} \quad (2.31)$$

$$v_{br} = r_s i_{br} + \frac{d}{dt} \lambda_{br} \quad (2.32)$$

$$v_{cr} = r_s i_{cr} + \frac{d}{dt} \lambda_{cr} \quad (2.33)$$

Ecuaciones del flujo de Concatenación

Usando notación matricial el flujo de concatenación de los devanados del rotor y el estator esta dada por

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Donde

$$\lambda_s^{abc} = (\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs})^t$$

$$\lambda_r^{abc} = (\lambda_{ar}, \lambda_{br}, \lambda_{cr})^t$$

$$i_s^{abc} = (i_{as}, i_{bs}, i_{cs})^t$$

$$i_r^{abc} = (i_{ar}, i_{br}, i_{cr})^t$$

Donde las sub-matrices de las inductancias están dadas por

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$\mathbf{L}_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$\mathbf{L}_{sr}^{abc} = \left[\mathbf{L}_{rs}^{abc} \right]^t = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Donde L_{ls} y L_{lr} son las inductancias de dispersión por fase de los devanados del estator y del rotor, L_{ss} y L_{rr} son las autoinductancias de los devanados del estator y del rotor, L_{sm} y L_{rm} son las inductancias mutuas entre devanados del estator y del rotor respectivamente, y L_{sr} es el valor pico de la inductancia mutua entre el estator y el rotor.

Cuando se desprecia las perdidas reluctivas en el hierro, se puede expresar algunas de estas inductancias en términos de las vueltas de los devanados de estator y rotor N_s y N_r , y la permeanza del entrehierro, P_g

$$L_{ss} = N_s^2 P_g \quad (2.38)$$

$$L_{rr} = N_r^2 P_g \quad (2.39)$$

$$L_{sm} = N_s^2 P_g \cos \left(\frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.40)$$

$$L_{rm} = N_r^2 P_g \cos \left(\frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.41)$$

$$L_{sr} = N_s N_r P_g \quad (2.42)$$

La máquina de inducción idealizada es descrita a través de seis ecuaciones diferenciales de primer orden, una por cada devanado. Estas ecuaciones diferenciales son acopladas unas a otras a través de las inductancias mutuas entre los devanados. Es importante destacar que los términos que relacionan el

estator al rotor son función de la posición del rotor; entonces cuando el rotor gira, estos términos varían con el tiempo [15].

Transformaciones matemáticas como qd o $\alpha\beta$ pueden facilitar el análisis de los transitorios, pues transforman las ecuaciones diferenciales con inductancias variantes en el tiempo en ecuaciones diferenciales con inductancias de valor constante.

2.3.2.3 Modelo de la Máquina de Inducción en un Eje de Referencia Arbitrario $qd0$

Se asume que la máquina en análisis es una máquina ideal es decir, se asume que tiene un entrehierro simétrico.

Para modelar la máquina primero se obtienen las ecuaciones en un eje de referencia arbitrario, el que esta rotando a una velocidad de ω en la dirección del giro del rotor. Esto permite que el modelo en un eje de referencia estacionario se lo obtenga si $\omega = 0$, o en un eje de referencia que rota a una velocidad sincrónica si $\omega = \omega_e$.

La relación entre las cantidades abc y $qd0$, cantidades que se indican en la Figura 2.4, se las obtiene aplicando las transformaciones que se indican a continuación:

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}(\theta)] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Donde la variable f puede ser voltajes de fase, corrientes de fase o flujos de concatenación de la máquina.

El primer cuadrante del eje de referencia rota a una velocidad arbitraria $\omega(t)$. El ángulo de transformación $\theta(t)$, entre el eje q del eje de referencia rotativo y el eje estacionario a del devanado del estator puede ser expresado como

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) \quad \text{elect.rad.} \quad (2.44)$$

De forma similar el ángulo del rotor $\theta_r(t)$, entre los ejes de la fase a del estator y del rotor para rotor a velocidad $\omega_r(t)$, se expresa de la siguiente manera:

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad \text{elect.rad.} \quad (2.45)$$

Donde los ángulos $\theta(0)$ y $\theta_r(0)$ son los valores iniciales de estos ángulos al inicio del tiempo t.

La matriz de transformación $qd0$, $[T_{qd0}(\theta)]$, es

$$[T_{qd0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$[T_{qd0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

2.3.2.3.1 Ecuaciones de Voltaje $qd0$

Los voltajes abc de los devanados del estator pueden ser expresados por

$$v_s^{abc} = p\lambda_s^{abc} + r_s^{abc} i_s^{abc} \quad (2.48)$$

Aplicando la transformación a la expresión anterior

$$v_s^{qd0} = [T_{qd0}(\theta)] p [T_{qd0}(\theta)]^{-1} [\lambda_s^{qd0}] + [T_{qd0}(\theta)] r_s^{abc} [T_{qd0}(\theta)]^{-1} [i_s^{qd0}] \quad (2.49)$$

El siguiente término de derivada en el tiempo se puede expresar como

$$p[T_{qd0}(\theta)]^{-1}[\lambda_s^{qd0}] = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} [\lambda_s^{qd0}] + [T_{qd0}(\theta)]^{-1} [p\lambda_s^{qd0}] \quad (2.50)$$

Sustituyendo en la ecuación de voltaje se obtiene

$$v_s^{qd0} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_s^{qd0} + p\lambda_s^{qd0} + r_s^{qd0} i_s^{qd0} \quad (2.51)$$

Donde

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{y} \quad r_s^{qd0} = r_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De forma similar las cantidades del rotor se llevan al sistema de referencia qd , donde el ángulo de transformación es $(\theta - \theta_r)$ y la transformación es $[T_{qd0}(\theta - \theta_r)]$

$$v_r^{qd0} = (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_r^{qd0} + p\lambda_r^{qd0} + r_r^{qd0} i_r^{qd0} \quad (2.52)$$

2.3.2.3.2 Ecuaciones $qd0$ del flujo de concatenación

De la misma forma que para el voltaje se procede a aplicar la transformación

$$\lambda_s^{qd0} = [T_{qd0}(\theta)] (L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc}) \quad (2.53)$$

Remplazando las corrientes abc

$$\lambda_s^{qd0} = [T_{qd0}(\theta)] L_{ss}^{abc} [T_{qd0}(\theta)]^{-1} i_s^{qd0} + [T_{qd0}(\theta)] L_{sr}^{abc} [T_{qd0}(\theta - \theta_r)]^{-1} i_r^{qd0}$$

$$\lambda_s^{qd0} = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} i_s^{qd0} + \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{ss} \end{bmatrix} i_r^{qd0} \quad (2.54)$$

En forma similar para las cantidades del rotor

$$\lambda_r^{qd0} = [T_{qd0}(\theta - \theta_r)]L_{rs}^{abc} [T_{qd0}(\theta)]^{-1} i_s^{qd0} + [T_{qd0}(\theta - \theta_r)]L_{rr}^{abc} [T_{qd0}(\theta - \theta_r)]^{-1} i_r^{qd0} \quad (2.55)$$

$$\lambda_s^{qd0} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_s^{qd0} + \begin{bmatrix} L_{lr} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} i_r^{qd0} \quad (2.56)$$

Resumiendo en una sola matriz

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Donde las cantidades del rotor son referidas a los valores del lado del estator, de acuerdo a las siguientes expresiones

$$\lambda'_{qr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{qr} \quad (2.58)$$

$$\lambda'_{dr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{dr} \quad (2.59)$$

$$i'_{qr} = \frac{N_r}{N_s} i_{qr} \quad (2.60)$$

$$i'_{dr} = \frac{N_r}{N_s} i_{dr} \quad (2.61)$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr} \quad (2.62)$$

Y L_m , la inductancia de magnetización del lado del estator, es

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{sr} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{rr} \quad (2.63)$$

2.3.2.3.3 Ecuaciones de torque en $qd0$

La suma de la potencia instantánea de entrada a través de los seis devanados del estator y del rotor esta dada por [15]

$$p_{in} = v_{as} i_{as} + v_{bs} i_{bs} + v_{cs} i_{cs} + v'_{ar} i'_{ar} + v'_{br} i'_{br} + v'_{cr} i'_{cr} \quad W \quad (2.64)$$

En cantidades $qd0$

$$p_{in} = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} + 2v_{0s} i_{0s} + v'_{qr} i'_{qr} + v'_{dr} i'_{dr} + 2v'_{0r} i'_{0r}) \quad W \quad (2.65)$$

Remplazando ecuación en la ecuación anterior las ecuaciones

$$v_s^{qd0} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_s^{qd0} + p \lambda_s^{qd0} + r_s^{qd0} i_s^{qd0} \quad y \quad (2.66)$$

$$v_r^{qd0} = (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_r^{qd0} + p \lambda_r^{qd0} + r_r^{qd0} i_r^{qd0} \quad (2.67)$$

sumando los términos de la forma $\omega \lambda i$ que representa la cantidad de energía convertida a trabajo mecánico, y dividiendo para la velocidad mecánica, se obtiene que el torque electromecánico desarrollado por la máquina esta dado por

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} \left[\omega (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\lambda'_{dr} i'_{qr} - \lambda'_{qr} i'_{dr}) \right] \quad (2.68)$$

Usando las relaciones de flujo de concatenación, se tiene que

$$\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} = -(\lambda'_{dr} i'_{qr} - \lambda'_{qr} i'_{dr}) = L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (2.69)$$

Por lo que la ecuación de torque puede expresarse

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) \quad \text{N.m.} \quad (2.70)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad \text{N.m.} \quad (2.71)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \quad \text{N.m.} \quad (2.72)$$

Expresando las ecuaciones en términos de flujo de concatenación por segundo ψ en lugar de flujos de concatenación λ , y reactancias x en lugar de inductancias L , las cuales están relacionadas por la frecuencia angular base ω_b

$$\psi = \omega_b \lambda \quad \text{V o por unidad} \quad (2.73)$$

$$x = \omega_b L \quad \text{H o por unidad} \quad (2.74)$$

Donde $\omega_b = 2\pi f_{no\ min\ al}$ radianes eléctricos por segundo, $f_{no\ min\ al}$ es la frecuencia nominal en Hertz de la máquina. Por lo que para una máquina las cantidades base con un voltaje nominal $V_{no\ min\ al}$, P numero de polos y potencia aparente $S_{no\ min\ al}$

Voltaje base $V_b = \sqrt{2/3} V_{no\ min\ al}$

Potencia aparente base $S_b = S_{no\ min\ al}$

Corriente pico base $I_b = 2S_b / 3V_b$

Impedancia base $Z_b = V_b / I_b$

Torque base $T_b = S_b / \omega_{bm}$

Donde $\omega_{bm} = 2\omega_b / P$

Por lo que se puede concluir que para una máquina de inducción simétrica en un sistema de referencia arbitrario las ecuaciones correspondientes son

2.3.2.3.4 Voltajes

$$v_{qs} = \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \quad (2.75)$$

$$v_{ds} = \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \quad (2.76)$$

$$v_{0s} = \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} + r_s i_{0s} \quad (2.77)$$

$$v'_{qr} = \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{dr} + r'_r i'_{qr} \quad (2.78)$$

$$v'_{dr} = \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{qr} + r'_r i'_{dr} \quad (2.79)$$

$$v'_{0r} = \frac{p}{\omega_b} \psi'_{0r} + r'_r i'_{0r} \quad (2.80)$$

Donde

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

2.3.2.3.5 Ecuación de Torque

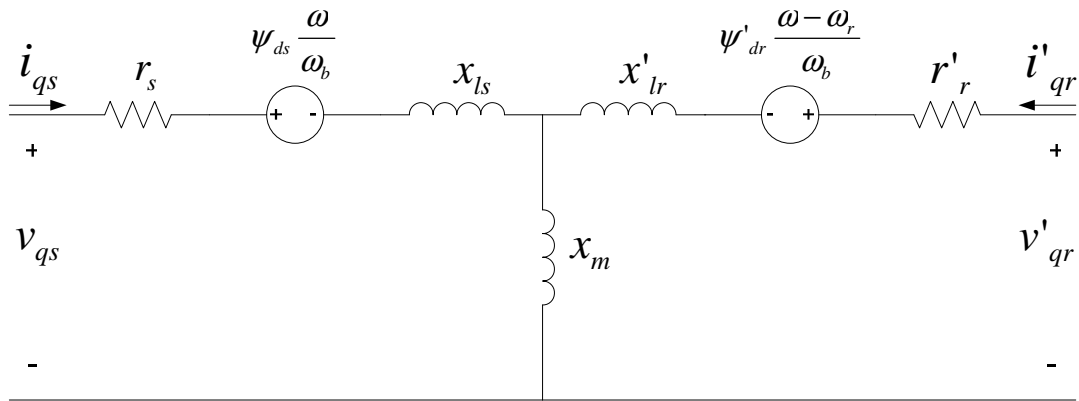
$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} \left[\frac{\omega}{\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) + \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} (\psi'_{dr} i'_{qr} - \psi'_{qr} i'_{dr}) \right]$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi'_{qr} i'_{dr} - \psi'_{dr} i'_{qr}) \quad (2.82)$$

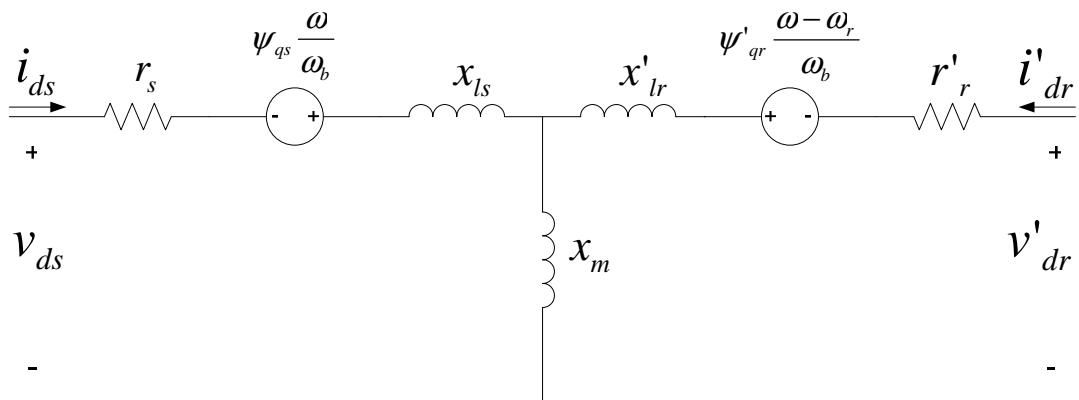
$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} x_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds})$$

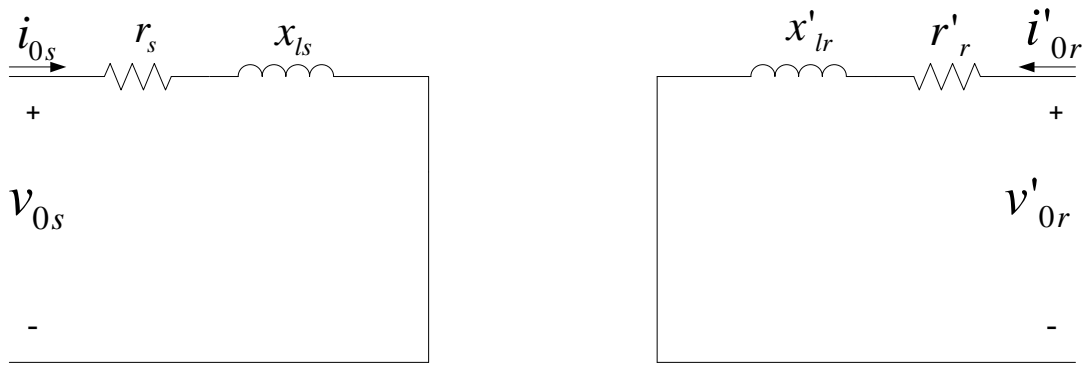
De las ecuaciones anteriores se puede concluir que el circuito equivalente sugerido es el mostrado en la Figura 2.6:



Eje q



Eje d



Secuencia 0

Figura 2.6 Circuito Equivalente de una Máquina de Inducción

Para la simulación las ecuaciones son reorganizadas de la siguiente manera [15]:

$$\psi_{qs} = \omega_b \int \left[v_{qs} - \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{qs} - \psi_{mq}) - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} \right] dt \quad (2.83)$$

$$\psi_{ds} = \omega_b \int \left[v_{ds} - \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md}) + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} \right] dt \quad (2.84)$$

$$i_{0s} = \frac{\omega_b}{x_{ls}} \int [v_{0s} - i'_{0s} r_s] dt \quad (2.85)$$

$$\psi'_{qr} = \omega_b \int \left[v'_{qr} - \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi'_{qr} - \psi_{mq}) - \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr} \right] dt \quad (2.86)$$

$$\psi'_{dr} = \omega_b \int \left[v'_{dr} - \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi'_{dr} - \psi_{md}) + \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} \right] dt \quad (2.87)$$

$$i'_{0r} = \frac{\omega_b}{x'_{lr}} \int [v'_{0r} - i'_{0r} r'_r] dt \quad (2.88)$$

$$\psi_{mq} = x_m (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.89)$$

$$\psi_{md} = x_m (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (2.90)$$

$$\psi_{qs} = x_{ls} i_{qs} + \psi_{mq} \quad (2.91)$$

$$\psi'_{qr} = x'_{lr} i'_{qr} + \psi_{mq} \quad (2.92)$$

$$\psi_{ds} = x_{ls} i_{ds} + \psi_{md} \quad (2.93)$$

$$\psi'_{dr} = x'_{lr} i'_{dr} + \psi_{md} \quad (2.94)$$

$$\psi_{0s} = x_{ls} i_{0s} \quad (2.95)$$

$$\psi'_{0r} = x'_{lr} i'_{0r} \quad (2.96)$$

$$i_{qs} = \frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{x_{ls}} \quad (2.97)$$

$$i'_{qr} = \frac{\psi'_{qr} - \psi_{mq}}{x'_{lr}} \quad (2.98)$$

$$i_{ds} = \frac{\psi_{ds} - \psi_{md}}{x_{ls}} \quad (2.99)$$

$$i'_{dr} = \frac{\psi'_{dr} - \psi_{md}}{x'_{lr}} \quad (2.100)$$

$$i_{0s} = \frac{\psi_{0s}}{x_{ls}} \quad (2.101)$$

$$i'_{0r} = \frac{\psi'_{0r}}{x'_{lr}} \quad (2.102)$$

Si

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}} \quad (2.103)$$

Entonces

$$\psi_{mq} = x_M \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{x'_{lr}} \right) \quad (2.104)$$

$$\Psi_{md} = x_M \left(\frac{\Psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\Psi'_{dr}}{x'_{lr}} \right) \quad (2.105)$$

Para finalizar la modelación, se determina la ecuación de movimiento del rotor igualando el torque de inercia al torque de aceleración,

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (2.106)$$

Donde

J Inercia del motor

T_{em} Torque electromagnético

T_{mech} Torque mecánico

T_{damp} Torque de amortiguamiento

Donde si el torque mecánico es negativo la máquina trabaja como motor, por el contrario si el torque es positivo trabaja como generador. El torque de amortiguamiento tiene dirección contraria a la rotación [15].

Si la velocidad mecánica del rotor puede expresarse por

$$\omega_{rm} = \frac{2\omega_r}{P} \quad (2.107)$$

Reemplazando en la ecuación de movimiento

$$2J \frac{\omega_b}{P} \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right) = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (2.108)$$

Se concluye que la velocidad del rotor puede determinarse a partir de la ecuación

$$\left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right) = \int \left[\frac{P}{2J\omega_b} (T_{em} + T_{mech} - T_{damp}) \right] dt \quad (2.109)$$

Este modelo se implementa en SimPowerSystems de MATLAB/Simulink.

2.3.2.4 Generador de Inducción Doblemente Alimentado

La configuración del generador de inducción doblemente alimentado (DFIG Doubly-Fed Induction Generator) consiste de un generador de inducción con rotor devanado, del cual el estator esta conectado directamente a la red eléctrica y el rotor conectado a través de un conversor de frecuencia back-to-back [16], [27], este esquema puede observarse en la Figura 2.7.

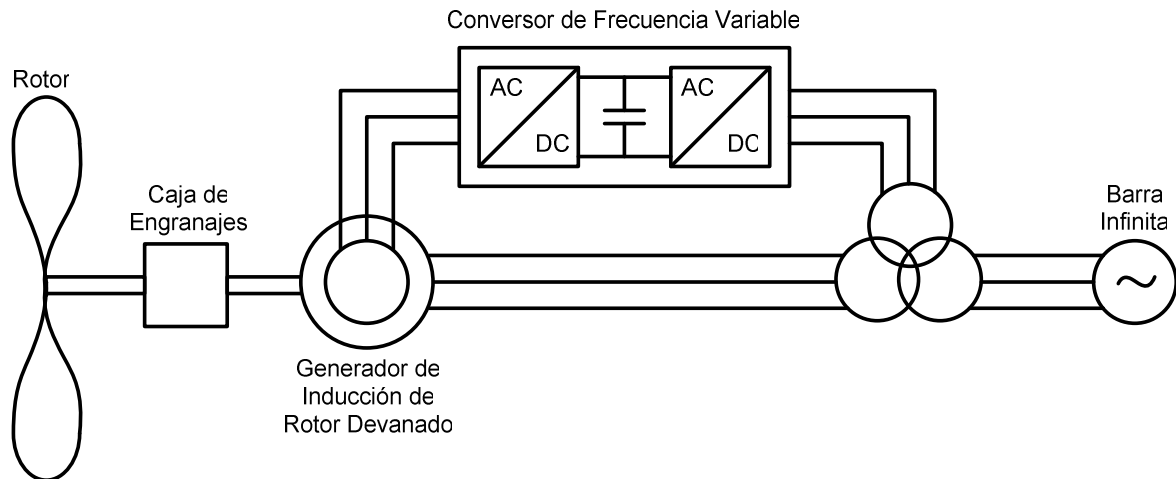


Figura 2.7 Generador de Inducción de Doble Alimentación

El conversor back-to-back es un conversor de frecuencia bidireccional, es decir puede operar con potencia en ambas direcciones. El conversor esta formado por dos fuentes de voltaje con un bus de DC común.

El conversor conectado al rotor controla en forma independiente la potencia activa del generador y la potencia reactiva producida o absorbida desde la red. En cambio el conversor conectado a la red debe mantener el acoplamiento de DC independientemente de la magnitud y la dirección de la potencia y garantiza la operación del conversor con factor de potencia unitario, con el objetivo de que por el rotor el intercambio de potencia entre el generador y la red solo sea activa.

La configuración del DFIG se la puede considerar dentro de los controles de energía de deslizamiento [17], por lo cual se revisa brevemente conceptos relacionados con esta forma de control.

2.3.2.5 Control de Energía de Deslizamiento

Los manejadores para control de energía de deslizamiento son usados con máquinas trifásicas de rotor devanado. El estator es conectado al sistema trifásico de potencia. El rotor es controlado a través de un convertidor en cascada, el que es conectado en los anillos deslizantes. Hay dos clases de convertidores en cascada, la cascada subsincrónica y la cascada sub- e hipersincrónica que es muy utilizada en aplicaciones prácticas.

2.3.2.5.1 Cascada Subsincrónica (Control de velocidad del motor por energía de deslizamiento).

En la cascada subsincrónica la variación de velocidad se consigue a través de la realimentación. Si bien los manejadores con convertidores en cascada subsincrónica son de bajo costo, solo puede usarse en operaciones donde la velocidad es menor que la velocidad sincrónica, y sus aplicaciones generalmente son de variación de velocidad con la máquina trabajando como motor.

2.3.2.5.2 Cascada Sub-Hipersincrónica

Principio Básico

Este tipo de sistema puede ser aplicado cuando la máquina de inducción es conectada a un sistema de potencia AC a través del estator, y su velocidad tiene que variar en un rango limitado de velocidades alrededor de la velocidad sincrónica. En este caso se hace necesaria una excitación que ingresará por el rotor, tal como se muestra en la Figura 2.8, donde la excitación trifásica consiste de un convertidor de frecuencia variable. La ventaja sobre la cascada subsincrónica es que en este caso la máquina puede trabajar como motor manejando una carga o como generador cuando este es manejado, por una turbina por ejemplo.

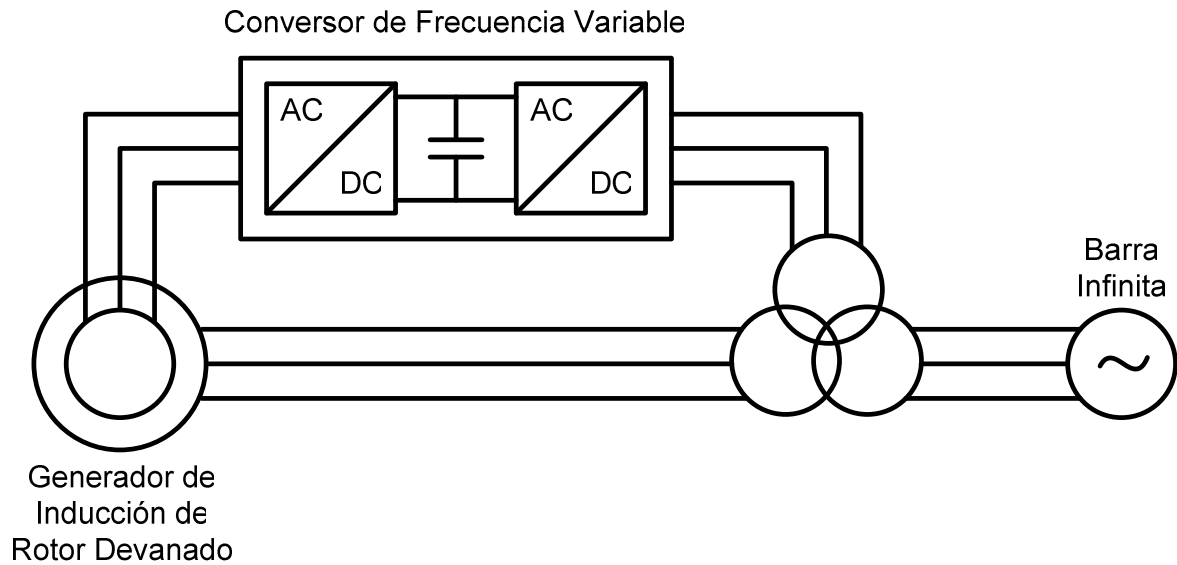


Figura 2.8 Generador de Inducción de Doble Alimentación

Modo de Operación

Como se indica en el principio de operación cuando una máquina de inducción es alimentada con una frecuencia fija pero gira a una velocidad distinta a la sincrónica sea esta mayor o menor $\omega_{rm} = \omega_{sm} \mp s\omega_{sm}$, se hace necesario un campo de excitación rotatorio con respecto al rotor, cuya función es compensar la diferencia entre la velocidad mecánica actual ω_{rm} y la velocidad mecánica sincrónica ω_{sm} [17].

$$\omega_{rm} \pm s\omega_{sm} = \omega_{sm} \quad (2.110)$$

Es por esto que el sistema de excitación debe alimentar corriente trifásica a la frecuencia de deslizamiento en los devanados del rotor, la frecuencia de deslizamiento se puede obtener mediante la velocidad mecánica del rotor, a partir de la expresión de la ecuación

$$f_{slip} = \frac{P \cdot s\omega_{sm}}{2\pi} \quad (2.111)$$

Donde P es el número de par de polos

El sistema de excitación debe ser una fuente trifásica de corriente ajustable en frecuencia, amplitud y ángulo de fase, las cuales generarán un campo de excitación rotativo en el rotor. La velocidad angular de este campo de excitación – movimiento relativo al rotor y en el sentido de giro del rotor – aparece como velocidad sincrónica angular relativa al estator – solamente si la frecuencia de deslizamiento es derivada de la velocidad medida mediante la siguiente ecuación (2.112).

$$2\pi f_{slip} + P\omega_m = 2\pi \cdot 60Hz \quad (2.112)$$

El campo de excitación actúa a través del entrehierro sobre el estator dando lugar a una fuerza magnetomotriz en el estator. De esta manera, la corriente de estator y sus componentes activos y reactivos, ya sea si la corriente fuera tomada o retornada a la red de 60 Hz, pueden ser controladas libremente a través de las corrientes del rotor.

El control de la corriente de estator, vía la corriente del rotor, tiene sentido solamente si la potencia nominal del convertidor del rotor puede ser mantenida en un bajo valor en relación con la potencia de la máquina. Las siguientes consideraciones muestran que este es el caso: El voltaje del sistema de AC generará un campo magnético rotativo en el estator, la frecuencia angular ω es determinada por la frecuencia de la red $f = 60Hz$. Relativo al rotor, que está girando con velocidad n y a la frecuencia angular $\omega = 2\pi \cdot n \cdot P$, este campo magnético gira solamente con la frecuencia angular de deslizamiento. El voltaje que este campo magnético induce en el rotor por lo tanto es bajo. Lo mismo ocurre con el voltaje de salida del convertidor necesario para controlar la corriente del rotor contra los voltajes inducidos. Esto significa, si la velocidad de deslizamiento n_{slip} con respecto a la velocidad sincrónica n_{syn} permanece dentro de ciertos límites, la capacidad del convertidor es pequeña comparada con la potencia de la máquina.

CAPITULO 3. CONTROLADORES PARA TURBINAS EÓLICAS

3.1 CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO (MODEL PREDICTIVE CONTROL MPC)

Dentro de las metodologías de control avanzado la única que ha causado un impacto significativo es el *Control Predictivo*. Este ha sido aplicado principalmente en la industria petroquímica, pero actualmente esta siendo ampliamente aplicado en otros sectores de la industria [12], [28]

3.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Si bien el control predictivo no es una estrategia de control específica, los controladores predictivos presentan la misma estructura básica [28], caracterizada por los siguientes elementos:

Uso explícito de un modelo para predecir la salida del proceso en futuros instantes de tiempo.

Horizonte de predicción.

Cálculo de las señales de control minimizando una cierta función objetivo.

Estrategia deslizante, por lo que el horizonte de predicción se va desplazando hacia el futuro (lo que implica aplicar la primera señal de control en cada instante y desechar el resto, repitiendo el cálculo en cada instante de muestreo).

El MPC presenta una serie de ventajas, alguna de ellas se enumeran a continuación:

Permite tratar fácilmente problemas de control multivariable

Posee intrínsecamente compensación del retardo

Permite el tratamiento de restricciones

Puede tener en cuenta limitaciones de los actuadores

Atractivo para personas sin conocimiento profundo de control, pues los conceptos resultan muy intuitivos, y de fácil sintonización.

Por otra parte como inconveniente esta la necesidad de un modelo apropiado que escriba el proceso, además del alta carga computacional que puede requerir la resolución del algoritmo.

3.2 ESTRATEGIA DE LOS CONTROLADORES PREDICTIVOS

Para explicar la metodología de los controladores predictivos se hace referencia a la Figura 3.1

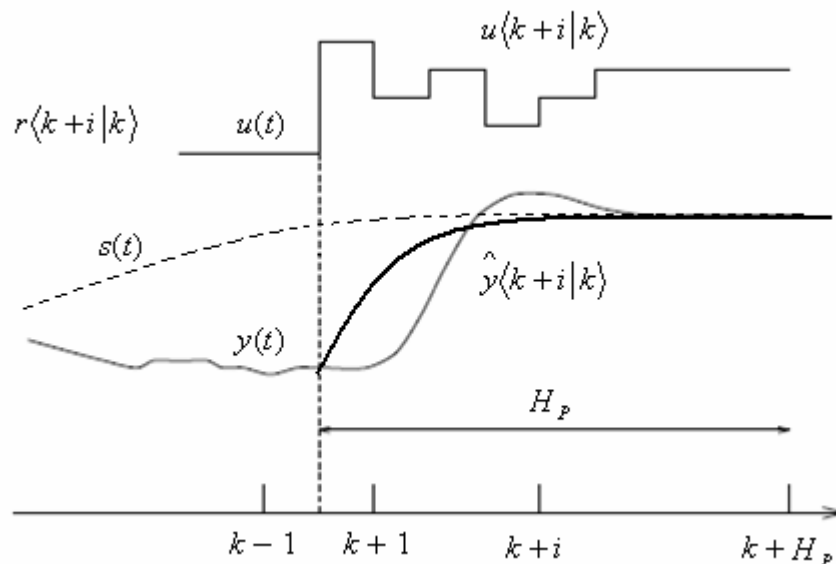


Figura 3.1 Estrategia del Control Predictivo

Se define un horizonte de predicción H_p , dentro del cual se predice la salida del proceso haciendo uso del modelo de la planta.

En el instante k usando el modelo se calculan las salidas para el horizonte H_p . Las salidas calculadas o salidas predichas $\hat{y}\langle k+i|k\rangle$ $i=1\dots H_p$ depende de las entradas y salidas pasadas hasta el instante k y de las señales de control futuras

$u\langle k+i|k\rangle \quad i=0\dots H_p-1$ que son las que deben aplicarse al sistema y son las que se deben calcular (se conoce todo excepto la señal de control $u\langle k+i|k\rangle|_{i=0}$).

Las señales de control futuras se calculan optimizando un determinado criterio, en el que se pretende mantener el proceso lo más próximo a una trayectoria de referencia $r\langle k+i|k\rangle$, que puede ser el set point o una suave aproximación a este.

La forma de expresar este criterio es a través de una función cuadrática del error entre la predicción de la salida y la trayectoria de referencia también predicha, además se suele incluir el esfuerzo de control.

Con un criterio cuadrático si el modelo es lineal y no existen restricciones se puede obtener una solución explícita, caso contrario se debe usar un método iterativo de optimización.

También se incluye consideraciones sobre la estructura de la ley de control futura, una consideración común suele ser que la señal de control permanecerá constante a partir de cierto instante.

La estructura básica del MPC se puede resumir [28] en el siguiente diagrama de bloques, ver Figura 3.2.

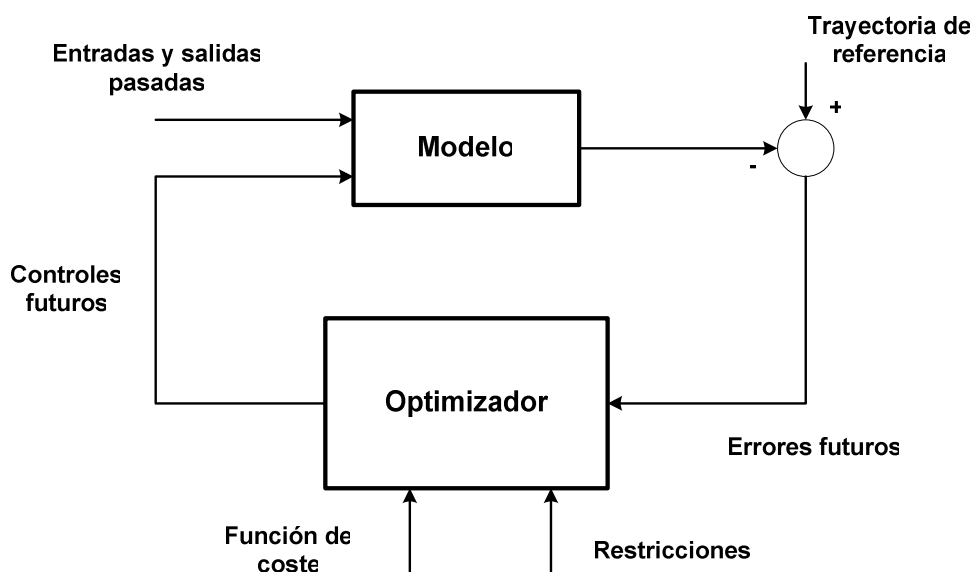


Figura 3.2 Estructura Básica del MPC

El modelo se usa para predecir las salidas futuras del proceso, basándose en las futuras señales de control propuestas.

Las futuras señales de control son calculadas por el optimizador, teniendo en cuenta la función de objetivo o de coste que penaliza el futuro error de seguimiento así como las restricciones.

Entonces, se puede concluir que el modelo juega un papel importante para el correcto desempeño del controlador predictivo, por lo que si bien el modelo debe ser sencillo y fácil de usar también debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso, garantizando que la predicción se aproxime a la salida real.

Otra parte importante es el optimizador que es el que proporciona las acciones de control.

3.3 CONTROLADORES PREDICTIVOS

Como se menciona anteriormente los controladores predictivos tienen ciertos elementos comunes que son:

Modelo de Predicción

Función Objetivo

Obtención de la Ley de Control

Dependiendo de cómo los elementos anteriormente señalados varíen surgen los distintos algoritmos de control.

3.3.1 MODELO DE PREDICCIÓN

Como se menciona en la parte superior, el modelo es un elemento muy importante del controlador predictivo, debido que en base a este se calculará la salida del proceso en instantes futuros, es por ello necesario que dicho modelo capture al máximo la dinámica del proceso, representando adecuadamente la relación de las salidas con las entradas medibles.

Las entradas medibles serán variables manipuladas, y otras se pueden considerar como perturbaciones medibles, es por ello necesario no solo el modelo del

proceso sino también un modelo de las perturbaciones, donde se pretende describir el comportamiento no reflejado en el modelo del proceso, siendo común encontrar en el modelo de predicción estas dos partes.

3.3.1.1 Modelo del Proceso

Los modelos más usados en el control predictivo son los siguientes [28]:

3.3.1.1.1 Respuesta Impulsional.

La salida se relaciona con la entrada por la ecuación:

$$y(t) = \sum_{j=1}^N h_j u(t-j) = H(z^{-1})u(t) \quad (3.1)$$

Donde h_j son los valores muestreados al aplicar un impulso unitario, N es del orden de 40 – 50, y $H(z^{-1}) = h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_N z^{-N}$.

En este caso no se requiere información previa del proceso, haciendo simple la identificación, además que permite describir fácilmente dinámicas complejas como fase no mínima o retardos, pero solo permite representar procesos estables y sin integradores.

La predicción en este caso esta dada por:

$$\hat{y}(k+i) = \sum_{j=1}^{H_p} h_j u(k+i-j|k) = H(Z^{-1})u(k+i|k) \quad (3.2)$$

3.3.1.1.2 Respuesta ante Escalón.

La salida y la entrada del proceso se relacionan por la ecuación:

$$y(t) = y_0 + \sum_{j=1}^N g_j \Delta u(t-j) = y_0 + G(z^{-1})(1-z^{-1})u(t) \quad (3.3)$$

El procedimiento es similar al anterior con la diferencia que g_j son los valores muestreados ante una entrada escalón y $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$. El valor y_0 suele considerarse como cero por lo que el predictor toma la forma:

$$\hat{y}(k+i) = \sum_{j=1}^{H_p} g_j \Delta u \langle k+i-j | k \rangle \quad (3.4)$$

3.3.1.1.3 Función de Transferencia.

La relación entre la entrada y la salida se representan por:

$$y(t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t) \quad (3.5)$$

Donde $A(z^{-1})$ y $B(z^{-1})$ son polinomios

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na}$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb}$$

Si bien se necesitan pocos parámetros, es necesario un conocimiento previo del proceso con la finalidad de determinar el orden de los polinomios, esta representación es posible usarla en procesos inestables.

3.3.1.1.4 Espacio de Estado.

La representación es la siguiente:

$$x(t) = Ax(t-1) + Bu(t-1) \quad (3.6)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

Donde x es el estado y A, B y C son las matrices de entrada y salida del sistema.

La predicción viene dada por:

$$\hat{y}(k+i) = CA^i x(k) + \sum_{j=1}^i CA^{j-1} Bu(k+i-j) \quad (3.7)$$

La ventaja de esta representación es la facilidad para sistemas multivariables; pero el inconveniente que puede surgir es la dificultad en la realización de cálculos y la necesidad de un observador sino todos los estados del sistema son medibles.

3.3.1.2 Modelo de las Perturbaciones

Para representar las perturbaciones un modelo bastante usado es el ARIMA (Auto-Regressive and Integrated Moving Average) Auto regresivo Integrado de Media Móvil, el modelo es

$$n(t) = \frac{C(z^{-1})e(t)}{D(z^{-1})} \quad (3.8)$$

Donde $D(z^{-1})$ incluye el integrador $\Delta = 1 - z^{-1}$

$e(t)$ es un ruido de media cero

$C(z^{-1})$ es un polinomio que generalmente se considera 1

Al incluir un integrador se consigue un control con error nulo en régimen permanente.

3.3.2 RESPUESTA LIBRE Y FORZADA

En el control predictivo es común expresar las acciones de control como la suma de dos señales [12], [28]

$$u(t) = u_f(t) + u_c(t) \quad (3.9)$$

$u_f(t)$, corresponde a los instantes anteriores a k (entradas pasadas), y que en el futuro permanecerá constante e igual al último valor de la variable manipulada.

La señal $u_c(t)$ vale cero en el pasado, y corresponde a las señales de control en los instantes futuros.

Con las acciones de control separadas la predicción de la salida también se separa en dos partes, $y_f(t)$ es la respuesta libre que se genera cuando la variable manipulada es $u_f(t)$, y $y_c(t)$ es la respuesta forzada que se genera cuando la variable manipulada es $u_c(t)$ [28], lo cual se puede observar en la Figura 3.3.

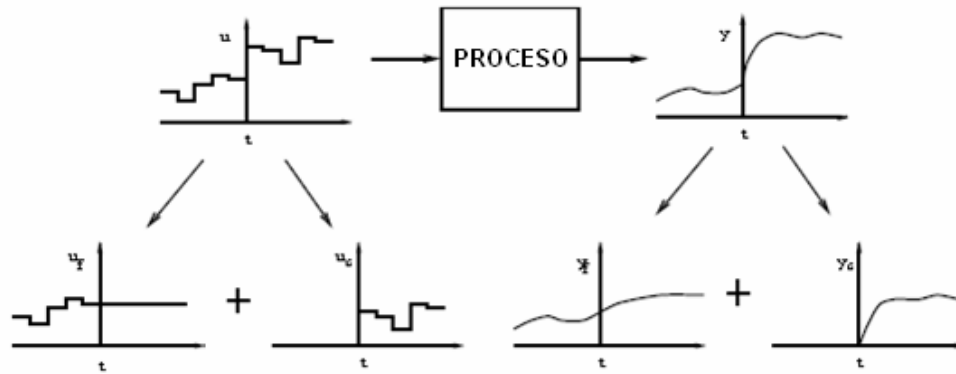


Figura 3.3 Respuesta Libre y Forzada

3.3.3 FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo busca penalizar primero, que la salida futura en el horizonte considerado siga a una determinada señal de referencia, y segundo, el esfuerzo de control requerido para hacerlo, la expresión para esto es:

$$V(k) = \sum_{i=H_w}^{H_p} Q(i) \left[\hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k) \right]^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} R(i) \left[\Delta \hat{u}(k+i|k) \right]^2 \quad (3.10)$$

H_w y H_p son el horizonte mínimo y máximo de predicción y son los límites de los instantes en los que se desea que la salida siga a la referencia.

H_u es el horizonte de control que no necesariamente es igual al horizonte de predicción.

Los coeficientes $Q(i)$ y $R(i)$ son secuencias que pondera el comportamiento futuro, generalmente se eligen valores constantes o secuencias exponenciales, por ejemplo

$$Q(i) = \alpha^{H_p-1} \quad (3.11)$$

Estos pueden ser usados como parámetros de sintonización:

Si $0 < \alpha < 1$ se penalizan más a los errores más alejados de k , lo que produce un control más suave y sin mayor esfuerzo.

Si $\alpha > 1$ se penalizan los primeros errores provocando un control más brusco.

Si a H_w se le asigna un valor grande es porque no importa que haya errores en los primeros instantes, también en casos de procesos con retardos H_w debe ser mayor al retardo. En casos de sistemas de fase no mínima, H_w permite eliminar la respuesta inversa en los primeros instantes.

Otro parámetro importante es la trayectoria de referencia $r(k+i)$, que no necesariamente es la referencia real, la trayectoria de referencia frecuentemente se asume que es una aproximación exponencial desde el valor actual de la salida hacia el set point o referencia real, ver Figura 3.4.

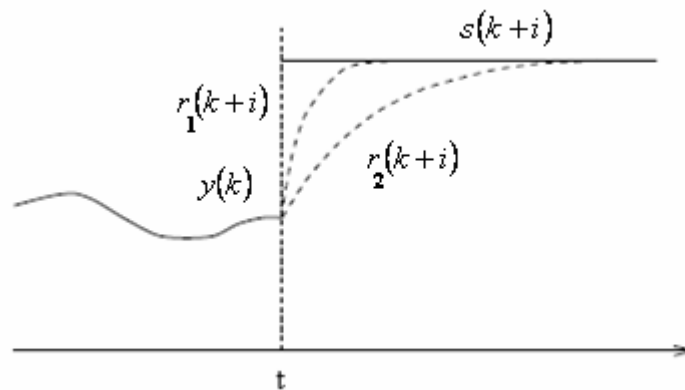


Figura 3.4 Trayectoria de Referencia

$$r(k) = y(k) \quad (3.12)$$

$$r(k+i) = \lambda r(k+i-1) + (1-\lambda)s(k+i) \quad i = 1, \dots, H_p \quad (3.13)$$

Donde λ toma un valor entre 0 y 1, mientras más próximo a 1 la respuesta es más suave. La trayectoria de referencia entonces puede ser calibrada, y definirá un aspecto muy importante del comportamiento de la planta controlada en lazo cerrado.

3.3.4 RESTRICCIONES

En la práctica todo proceso está sujeto a restricciones, y en varios casos la operación es mucho más eficiente cuando se trabaja en puntos de operación

cercanos a restricciones, pero resultara catastrófico si el proceso sobrepasara esa restricción.

El fuerte del control predictivo es la posibilidad de considerar las restricciones dentro de la función objetivo [12], [28]. Generalmente se consideran límites en la amplitud y la velocidad de cambio de la señal de control y límites en las salidas:

$$\begin{aligned} u_{\min} &\leq u(t) \leq u_{\max} \quad \forall t \\ du_{\min} &\leq u(t) - u(t-1) \leq du_{\max} \quad \forall t \\ y_{\min} &\leq y(t) \leq y_{\max} \quad \forall t \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.3.5 OBTENCIÓN DE LA LEY DE CONTROL

Para obtener la señal de control $u\langle k+i|k\rangle$ se debe minimizar la función objetivo, para lo cual se obtiene la predicción de la salida usando el modelo, se remplaza en la función objetivo y luego de la minimización se obtienen los valores de la señal de control.

Pero la solución no es fácil de obtener por la cantidad de variables independientes $(H_p - H_w - 1)$, de esto con el objeto de reducir tal cantidad de variables, se plantea el horizonte de control H_U , que generalmente considera que después de H_U no hay variación en la señal de control.

$$\Delta u(k+j-1) = 0 \quad j \geq H_U \quad (3.15)$$

3.4 CONTROL PREDICTIVO USANDO MODELO EN VARIABLES DE ESTADO

Suponiendo que el modelo discreto lineal en el espacio de estado, es el modelo correspondiente al proceso al que se aplicará un control predictivo:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3.16)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (3.17)$$

$$x(0) = X_0 \quad (3.18)$$

Para construir el predictor correspondiente al sistema cuyo modelo se encuentra expresado en el espacio de estado, se procede a calcular los valores futuros del modelo hasta un tiempo i :

$$1. \quad x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$

$$2. \quad x(k+2) = Ax(k+1) + Bu(k+1)$$

$$x(k+2) = A[Ax(k) + Bu(k)] + Bu(k+1)$$

$$x(k+2) = A^2x(k) + ABu(k) + Bu(k+1)$$

$$3. \quad x(k+3) = Ax(k+2) + Bu(k+2)$$

$$x(k+3) = A[A^2x(k) + ABu(k) + Bu(k+1)] + Bu(k+2)$$

$$x(k+3) = A^3x(k) + A^2Bu(k) + ABu(k+1) + Bu(k+2)$$

$$4. \quad x(k+4) = Ax(k+3) + Bu(k+3)$$

$$x(k+4) = A^4x(k) + A^3Bu(k) + A^2Bu(k+1) + ABu(k+2) + Bu(k+3)$$

Por lo que para la iteración i

$$i. \quad x(k+i) = A^i x(k) + \sum_{j=1}^i A^{i-j} Bu(k+j)$$

Si la predicción de la salida $\hat{y}(k+i|k)$ en k para el instante i estará dada por:

$$\hat{y}(k+i|k) = Cx(k+i) + Du(k+i) \quad (3.19)$$

Asumiendo que la matriz D es igual a cero y reemplazando $x(k+i)$

$$\hat{y}(k+i|k) = C \left[A^i x(k) + \sum_{j=1}^i A^{i-j} Bu(k+j) \right] \quad (3.20)$$

Entonces la predicción vendrá dada por la expresión:

$$\hat{y}\langle k+i|k\rangle = CA^i x(k) + \sum_{j=1}^i CA^{j-1} Bu(k+i-j) \quad (3.21)$$

Desarrollando la expresión en forma matricial para un horizonte de predicción H_p :

$$\begin{bmatrix} \hat{y}\langle k+1|k\rangle \\ \hat{y}\langle k+2|k\rangle \\ \hat{y}\langle k+3|k\rangle \\ \vdots \\ \hat{y}\langle k+H_p|k\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{H_p} \end{bmatrix} X(k) + \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2 B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ CA^{H_p-1} B & CA^{H_p-2} B & CA^{H_p-3} B & \dots & CB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+H_p-1) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Asignando una notación para cada matriz, la ecuación de predicción puede expresarse por

$$\hat{Y}(k) = \Gamma X(k) + HU(k) \quad (3.23)$$

Donde

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} \hat{y}\langle k+1|k\rangle \\ \hat{y}\langle k+2|k\rangle \\ \hat{y}\langle k+3|k\rangle \\ \vdots \\ \hat{y}\langle k+H_p|k\rangle \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{H_p} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2 B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ CA^{H_p-1} B & CA^{H_p-2} B & CA^{H_p-3} B & \dots & CB \end{bmatrix}$$

Para representar el conjunto de las referencias se usa la matriz $\hat{R}(k)$, esto se reemplaza en la función objetivo, para proceder a minimizar dicha función y obtener la señal del control $U(k)$. La función objetivo usada en el caso de expresar en forma matricial queda definida por:

$$V(k) = \hat{E}^T(k) Q \hat{E}(k) + U^T(k) R U(k) \quad \text{Donde } Q > 0 \text{ y } R \geq 0 \quad (3.24)$$

El error de la salida estimada con respecto a la referencia estará dado por:

$$\hat{R}(k) - \hat{Y}(k) = \hat{E} = \hat{R}(k) - \Gamma X(k) - H U(k) \quad (3.25)$$

Remplazando en la función objetivo

$$V(k) = \left[\hat{R}(k) - \Gamma X(k) - H U(k) \right]^T Q \left[\hat{R}(k) - \Gamma X(k) - H U(k) \right] + U^T(k) R U(k)$$

$$V(k) = \hat{R}^T(k) Q \hat{R}(k) + X^T(k) \Gamma^T Q \Gamma X(k) - 2 \hat{R}^T(k) Q \Gamma X(k) + 2 U^T(k) H^T Q \Gamma X(k) - 2 U^T(k) H^T Q \hat{R}(k) + U^T(k) H^T Q H U(k) + U^T(k) R U(k)$$

$$V(k) = \hat{R}^T(k) Q \hat{R}(k) + X^T(k) \Gamma^T Q \Gamma X(k) - 2 \hat{R}^T(k) Q \Gamma X(k) + U^T(k) H^T Q \left[2 \Gamma X(k) - 2 \hat{R}(k) + H U(k) \right] + U^T(k) R U(k)$$

$$V(k) = \hat{R}^T(k) Q \hat{R}(k) + X^T(k) \Gamma^T Q \Gamma X(k) - 2 \hat{R}^T(k) Q \Gamma X(k) + U^T(k) \left\{ H^T Q \left[2 \Gamma X(k) - 2 \hat{R}(k) + H U(k) \right] + R U(k) \right\}$$

$$V(k) = \hat{R}^T(k) Q \hat{R}(k) + X^T(k) \Gamma^T Q \Gamma X(k) - 2 \hat{R}^T(k) Q \Gamma X(k) + U^T(k) \left\{ 2 H^T Q \left[X(k) - \hat{R}(k) + H U(k) \right] + R U(k) \right\}$$

$$V(k) = \hat{R}^T(k) Q \hat{R}(k) + X^T(k) \Gamma^T Q \Gamma X(k) - 2 \hat{R}^T(k) Q \Gamma X(k) + U^T(k) \left\{ 2 H^T Q \Gamma X(k) - 2 H^T Q \hat{R}(k) + H^T Q H U(k) + R U(k) \right\}$$

$$V(k) = \hat{R}^T(k) Q \hat{R}(k) + X^T(k) \Gamma^T Q \Gamma X(k) - 2 \hat{R}^T(k) Q \Gamma X(k) + U^T(k) \left\{ 2 H^T Q \Gamma X(k) - 2 H^T Q \hat{R}(k) + [H^T Q H + R] U(k) \right\} \quad (3.26)$$

Para minimizar la función:

$$\frac{\partial V(k)}{\partial U(k)} = 0$$

$$\frac{\partial V(k)}{\partial U(k)} = 2 H^T Q \Gamma X(k) - 2 H^T Q \hat{R}(k) + [H^T Q H + R] U(k) + U^T(k) [H^T Q H + R] = 0$$

$$\frac{\partial V(k)}{\partial U(k)} = 2 H^T Q \Gamma X(k) - 2 H^T Q \hat{R}(k) + [H^T Q H + R] U(k) + U^T(k) [H^T Q H + R] = 0$$

$$\frac{\partial V(k)}{\partial U(k)} = 2 H^T Q \Gamma X(k) - 2 H^T Q \hat{R}(k) + 2 [H^T Q H + R] U(k) = 0$$

$$H^T Q \Gamma X(k) - H^T Q \hat{R}(k) + [H^T Q H + R] U(k) = 0$$

$$H^T Q \left[\Gamma X(k) - \hat{R}(k) \right] + [H^T Q H + R] U(k) = 0$$

$$- H^T Q \left[\hat{R}(k) - \Gamma X(k) \right] + [H^T Q H + R] U(k) = 0$$

$$U(k) = \frac{H^T Q \left[\hat{R}(k) - \Gamma X(k) \right]}{H^T Q H + R}$$

$$U(k) = (H^T Q H + R)^{-1} H^T Q \left[\hat{R}(k) - \Gamma X(k) \right] \quad (3.27)$$

$$\hat{R}(k) - \Gamma X(k) = E^0 \quad (3.28)$$

$$U(k) = (H^T Q H + R)^{-1} H^T Q E^0 \quad (3.29)$$

Con lo cual simplificando la expresión, la señal de control puede ser evaluada a través de la siguiente relación:

$$U(k) = K_0 E^0$$

donde
$$K_0 = (H^T Q H + R)^{-1} H^T Q$$

Es posible entonces determinar los pasos a seguir para la ejecución de un control predictivo, los pasos se enumeran a continuación:

Construcción de las matrices dinámicas H y Γ .

Calcular la ganancia K_0 .

Calcular E_0 .

Calcular $U(k)$.

Implementar $U(k)$.

Medición de los estados $X(k)$.

Se regresa al paso 3 para iniciar una nueva iteración.

3.5 IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO DE UNA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDAD VARIABLE

Para la implementación del MPC en una Turbina Eólica de Velocidad Variable se usa el modelo en espacio de estado de la planta, el mismo que fue implementado en el Capítulo 2, en la sección 2.1.5.

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$\Omega = CX + DU$$

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma_2/I_2 & 1/NI_2 & 0 \\ -\hat{K}_1/N & 0 & \hat{K}_1 \\ \left(\gamma/N - \gamma\hat{K}_1/(N^3K_2)\right)/I_1 & -1/I_1 & -\left(\gamma_1 + \gamma - \gamma\hat{K}_1/(N^2K_2)\right)/I_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1/I_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_\beta/I_1 & K_V/I_1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} \Omega_{LD} \\ T_{LS} \\ \Omega_{LS} \end{bmatrix}, \quad U_T = \begin{bmatrix} T_{LD} \\ V \\ P \end{bmatrix}, \quad \Omega = \begin{bmatrix} \Omega_{LD} \\ \Omega_{LS} \end{bmatrix}$$

3.5.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR

El sistema multivariable de turbina eólica opera en forma más conveniente (salida de potencia máxima) cuando este opera cerca del torque de reacción máxima y la máxima velocidad del rotor del generador, pero el torque de reacción máxima y la máxima velocidad del rotor del generador son dos restricciones del sistema. También, teniendo en cuenta las limitaciones del actuador y que el sistema es de naturaleza multivariable, el uso de un control predictivo se muestra como una conveniente opción de control.

3.5.1.1 Requerimientos de Control

El principal objetivo es maximizar la salida de potencia maximizando la eficiencia de la conversión de energía, sin olvidar los límites de operación de la turbina

eólica (carga excesiva y daños asociados a la fatiga en la estructura y en la transmisión) y las restricciones físicas (tasa de cambio de los actuadores) [18].

Objetivos adicionales son minimizar las oscilaciones en la potencia de salida, y reducir los componentes mecánicos mientras se maximiza los beneficios económicos.

3.5.1.2 Estrategia de Control

El control de la velocidad rotacional de las máquinas eléctricas acopladas al generador eólico, es una de las más significantes características de todo el diseño aplicada a un sistema de turbina eólica [1]. Pero, el control de la velocidad permite una regulación de la eficiencia de la conversión, y la cantidad de la energía capturada desde el viento.

Bajo el estado estable nominal la velocidad del rotor es regulada, maximizando la captura de energía a través del ajuste del torque de reacción del generador, mientras se mantiene el ángulo de inclinación en cero. La potencia máxima es generada cuando [6], [18].

$$T_{LD} = K_v V^2 / 2N \quad (3.30)$$

Cuando la velocidad del rotor esta sobre la velocidad nominal, el controlador debe mantener a la máxima velocidad a través de la regulación del torque de reacción del generador. También, si el torque es mayor que el máximo, este debe ser mantenido al máximo valor a través de la regulación del ángulo de inclinación de la aspa.

3.5.1.3 Restricciones

Las restricciones (restricciones físicas) del sistema son

Amplitud de la entrada de control

$$0 \leq T_{LD} \leq T_{\max} \quad (3.31)$$

$$0 \leq \beta \quad (3.32)$$

entonces

$$\begin{bmatrix} 1/T_{\max} & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{LD} \\ \beta \\ 1 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Tasa de cambio de las entradas de control

$$\Delta\beta \leq (0.4V - 1.8) \text{deg/sec} \quad (3.34)$$

Entonces

$$\begin{bmatrix} 0 & 1/0.4V & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{LD} \\ \Delta\beta \\ 1 \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3.35)$$

Amplitud de la salida

$$0 \leq \Omega_{LD} \leq \Omega_{LD}^{\max} \quad (3.36)$$

Entonces

$$\begin{bmatrix} 1/\Omega_{LD}^{\max} & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_{LD}^{\max} \\ \Omega_{LS}^{\max} \\ 1 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

3.5.1.4 Observador

Debido a que no todas las variables de estado del sistema son medibles, es necesario el diseño y la implementación de un observador [12],[29], como se muestra en la Figura 3.5.

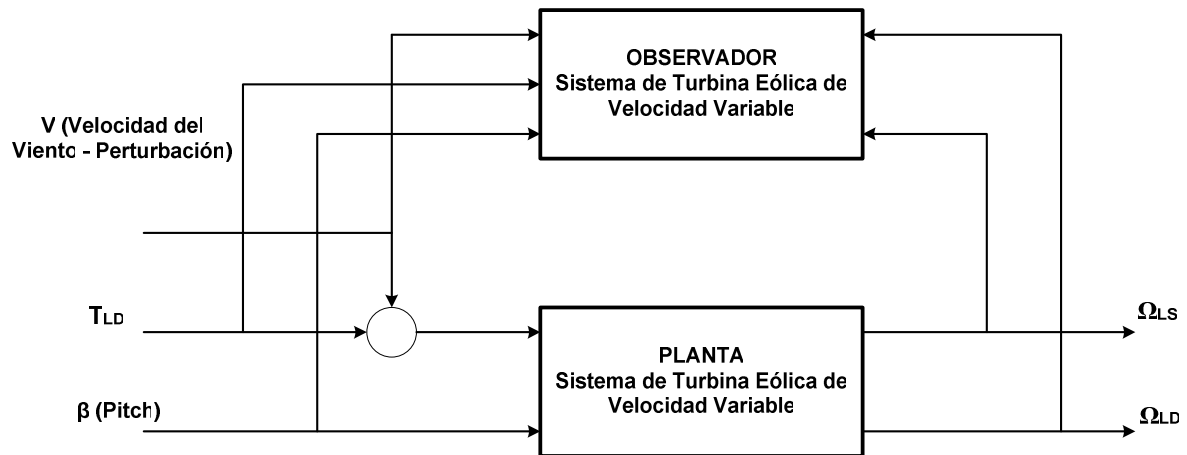


Figura 3.5 Observador de la Turbina Eólica

Primero se obtienen los valores numéricos de las matrices A, B, C y D del sistema.

$$A = \begin{bmatrix} -0.1015 & 4.026 \times 10^{-4} & 0 \\ -1.7533 \times 10^6 & 0 & 1.0169 \times 10^8 \\ 4.4167 \times 10^{-3} & -9.7135 \times 10^{-7} & -0.2709 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.02335 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.1083 \times 10^{-3} - 0.0287 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Para diseñar se define el modelo del observador mediante la ecuación (3.38) [29]:

$$\dot{\tilde{X}} = A\tilde{X} + BU + K_e(Y - C\tilde{X}) \quad (3.38)$$

Se obtiene el polinomio característico de A

$$P_a = s^3 + 0.3763s^2 + 804.6837s + 20.8121 = 0$$

A partir del cual se define

$$a_1 = 0.3763$$

$$a_2 = 804.6837$$

$$a_3 = 20.8121$$

Con lo cual se forma la matriz W

$$W = \begin{bmatrix} a_2 & a_1 & 1 \\ a_1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 804.6837 & 0.3763 & 1 \\ 0.3763 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Debido a que el sistema tiene dos salidas a partir de la matriz C se obtiene C_1 y C_2

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = [1 \ 0 \ 0]$$

$$C_2 = [0 \ 0 \ 1]$$

Se define la matriz de transformación $Q = (WN^*)^{-1}$ para C_1 y C_2 donde N es la matriz de observabilidad.

$$N = \left[C^* \mid A^* C^* \mid \dots \mid (A^*)^{n-1} C^* \right] \quad (3.39)$$

Entonces para C_1

$$N_1 = \left[C_1^* \mid A^* C_1^* \mid \dots \mid (A^*)^{n-1} C_1^* \right]$$

Y para C_2

$$N_2 = \begin{bmatrix} C_2^* & A^* C_2^* & \dots & (A^*)^{n-1} C_2^* \end{bmatrix}$$

Y las matrices de transformación son

$$Q_1 = (WN_1^*)^{-1} \quad y \quad Q_2 = (WN_2^*)^{-1}$$

Se determinan los polos de la planta en base al polinomio característico

$$U = \begin{bmatrix} -0.1752 + 28.3662i \\ -0.1752 - 28.3662i \\ -0.0259 \end{bmatrix}$$

Examinando los polos de la planta se desplazan a la derecha y los polos usados para el diseño del observador son

$$U_d = \begin{bmatrix} -0.1652 + 28.3662i \\ -0.1652 - 28.3662i \\ -0.0159 \end{bmatrix}$$

Con los cuales se obtienen el polinomio deseado para el observador

$$P_d = s^3 + 0.3463s^2 + 804.6738s + 12.7942 = 0$$

Del cual se obtienen los coeficientes

$$\alpha_1 = 0.3463$$

$$\alpha_2 = 804.6738$$

$$\alpha_3 = 12.7942$$

Si $K_e = Q\delta$ se debe obtener δ

$$\delta = \begin{bmatrix} \alpha_3 & a_3 \\ \alpha_2 & a_2 \\ \alpha_1 & a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -8.0179 \\ -0.0099 \\ -0.0300 \end{bmatrix}$$

Se determinan las matrices K_{e1} y K_{e2}

$$K_{e1} = Q_1 \delta = \begin{bmatrix} -0.0300 \\ -4.3232 \\ -0.0001 \end{bmatrix}$$

$$K_{e2} = Q_2 \delta = \begin{bmatrix} 7.6852 \\ 4.1847 \times 10^4 \\ -0.0300 \end{bmatrix}$$

Entonces

$$K_e = [K_{e1} \quad K_{e2}] = \begin{bmatrix} -0.0300 & 7.6852 \\ -4.3232 & 4.1847 \times 10^4 \\ -0.0001 & -0.0300 \end{bmatrix}$$

3.5.1.5 Implementación del MPC

Con el objeto de implementar el control predictivo, se usará el `mpcblock` [25], para lo cual es necesario determinar la dinámica de la planta (matrices A, B, C, D), los polos deseados del observador, el horizonte de predicción H_p , el horizonte de control H_U , las restricciones, y los valores correspondientes a las matrices Q y R de la función de costo. De los cuales todos ya se han definido en las secciones anteriores, excepto los horizontes de predicción, horizonte de control, y los valores de Q y R, los cuales se definen a continuación.

$$H_p = 7$$

$$H_U = 3$$

$$R = [0.025 \quad 1.9]$$

$$Q = [16 \quad 9]$$

Para determinar estos valores se procedió a la calibración ya en la planta aplicando el control predictivo, Figura 3.6.

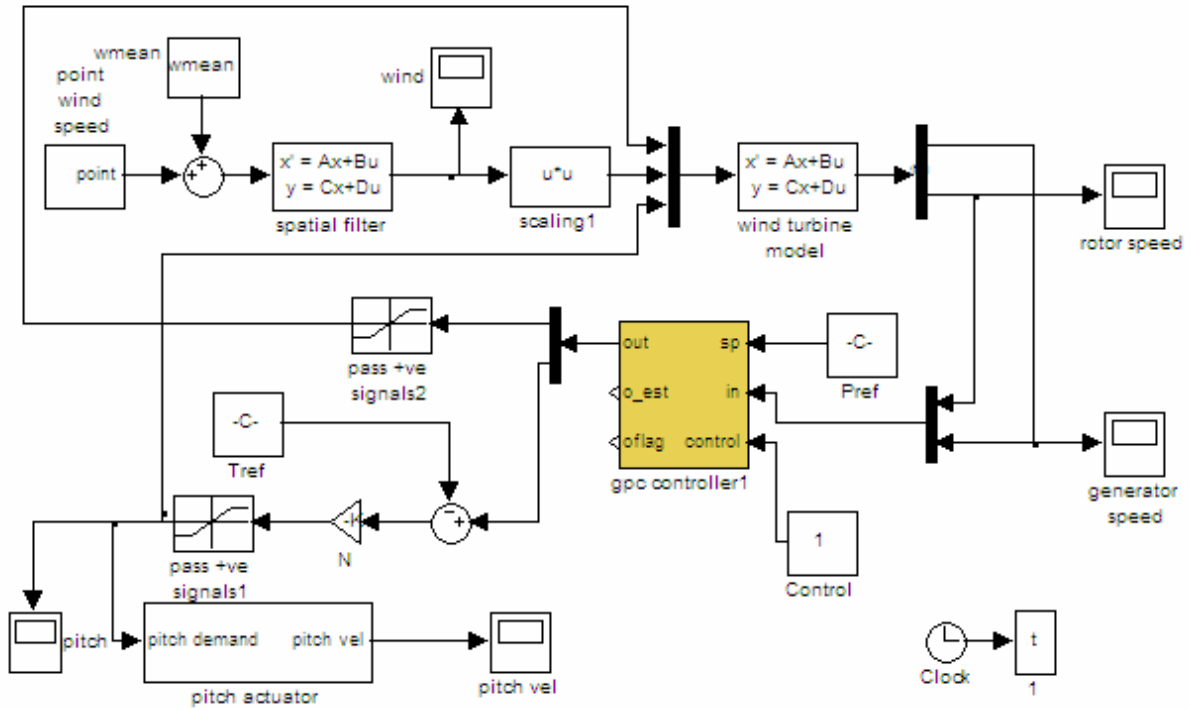


Figura 3.6 Control Predictivo de una Turbina Eólica

3.6 CONTROL DEL GENERADOR DE DOBLE ALIMENTACIÓN

El generador de inducción de doble alimentación debe su nombre a que está alimentado tanto por el estator como por el rotor, por lo que se puede considerar como un control por energía de deslizamiento, como se hace referencia en el Capítulo 2, ya que el rotor también es alimentado a través de un convertor de frecuencia variable, que será el que permita manipular el deslizamiento de la máquina, controlando la velocidad del generador o la potencia que la turbina entregue al sistema eléctrico de potencia.

Para analizar el principio de operación del generador de inducción doblemente alimentado se lo hará usando el modelo en los ejes $qd0$ (usando la transformada de Clarke Capítulo 2), por las facilidades que presenta el momento del desarrollo del control vectorial, para lo cual se modela el generador de inducción con

respecto a un sistema de referencia que rota a la velocidad sincrónica y se encuentra alineado ya sea con el flujo del estator Ψ_s , el flujo del entrehierro Ψ_m o el flujo del rotor Ψ_r , en este caso específico se trabaja con el sistema alineado con el flujo del estator.

En este caso se procede a controlar la potencia suministrada por la turbina eólica, la cual se realiza a través de dos controladores en cascada, como se muestra en la Figura 3.7:

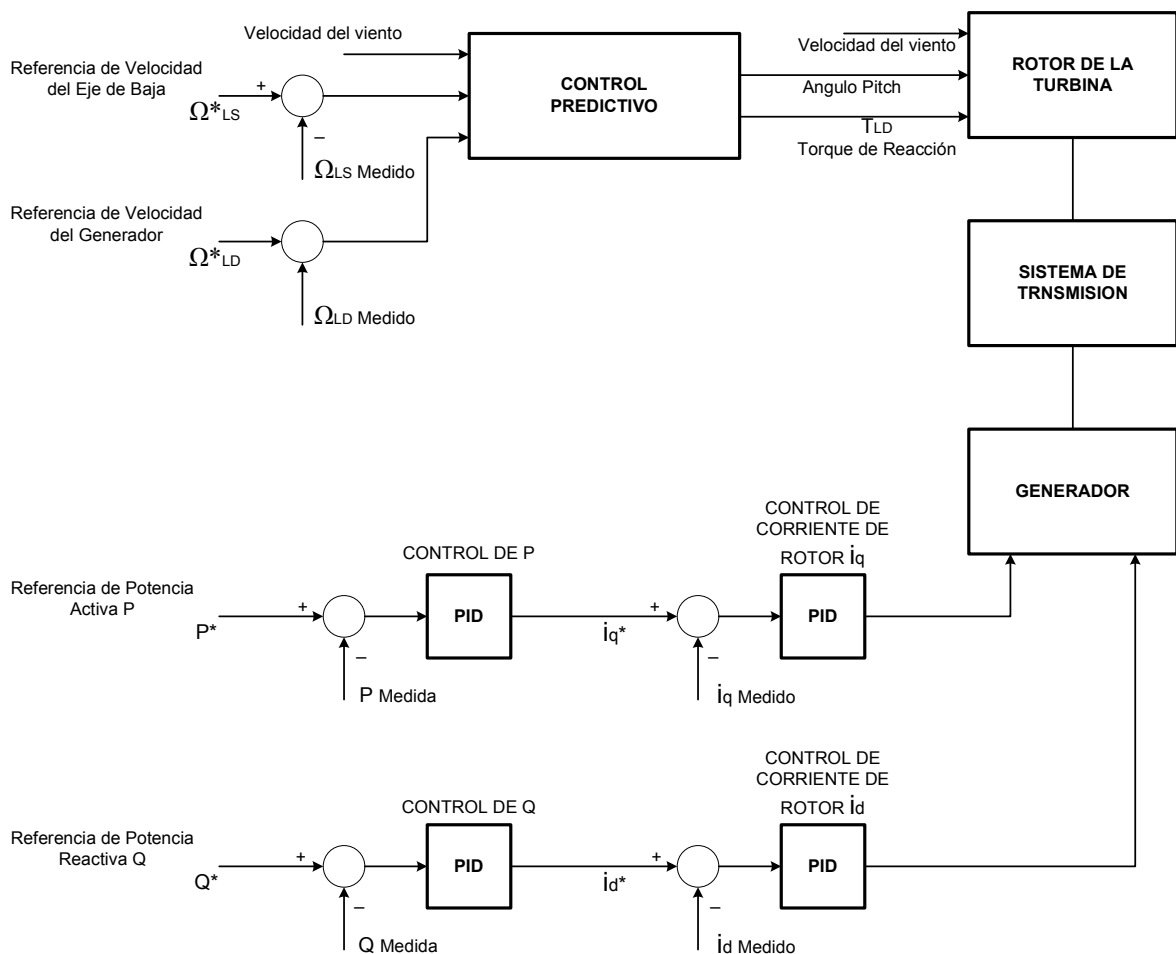


Figura 3.7 Control del Generador de Inducción de Doble Alimentación

El controlador más externo del control en cascada se encarga de controlar la potencia, entregando una referencia de corriente de rotor al controlador de corriente del rotor, que es el controlador más interno de la cascada.

Se puede observar que son dos controladores uno para la potencia activa y otro para la potencia reactiva. El control de la potencia activa se lo logra controlando

la componente q de la corriente del rotor, en cambio la potencia reactiva se la controla a través de la componente d de la corriente del rotor, estas componentes se obtienen tomando como referencia un sistema de ejes rotacionales alineado con el flujo del estator, para el control de potencia es necesario el desarrollo de un control vectorial puesto que es el que permite el control independiente entre potencia activa y reactiva.

En un sistema eléctrico de potencia el control de la estabilidad no es el único objetivo, el control de la potencia reactiva se justifica con el objetivo de controlar por ejemplo, el factor de potencia de consumo, aumentar la capacidad de transporte, reducir pérdidas, mantener la tensión [23]. De estos objetivos se destaca la regulación de voltaje con el cual se pretende evitar las variaciones del voltaje en los puntos receptores de un sistema de transmisión o distribución de energía. En las redes de distribución se pretende mantener el voltaje lo más constante posible, mientras que en una red de transmisión es permisible un porcentaje de variación.

Pero, debido a la complejidad y extensión de un sistema de distribución, es conveniente la regulación de la tensión localmente; entre los métodos de regulación de tensión están el de modificación de la reactancia, regulación de voltaje con transformadores y conexión de potencia reactiva [30].

En el caso de este estudio, es de interés la regulación de la tensión a través de la potencia reactiva; para ello en la Figura 3.8, se puede observar que debido a la transmisión de P y Q entre dos puntos, existirá una caída de voltaje; si se considera que R es mucho menor que X , se concluye que la caída se debe principalmente a la componente reactiva.

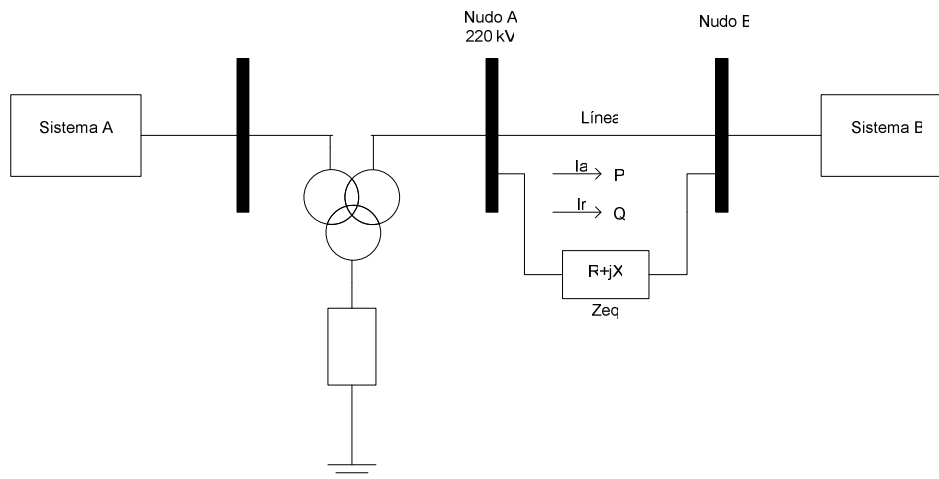


Figura 3.8 Sistema de Transmisión

Pero, si la potencia reactiva consumida en B es generada en este mismo nodo, en lugar de ser transmitida desde A, la componente de corriente reactiva I_r será reducida y con ello la caída de voltaje. Esta forma de regulación de voltaje se define regulación por conexión de potencia reactiva, y la potencia reactiva se la denomina la *potencia de compensación*.

En el presente trabajo se propone como objetivo de control la potencia reactiva, la misma que será controlada por un set-point definido a partir del factor de potencia que garantice el alcanzar y mantener los parámetros eléctricos del sistema al que se encuentre conectado el generador eólico; el control de la potencia reactiva debe realizarse garantizando que la potencia activa no cambie, puesto que la potencia activa será maximizada aplicando el control predictivo anteriormente diseñado.

CAPITULO 4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TURBINA EÓLICA

4.1 MATLAB, SIMULINK Y SIMPOWERSYSTEM

El nombre de MATLAB deriva del termino “MATrix LABoratory”, ya que su principal característica es que permite manipular de manera sencilla y eficiente vectores y matrices. Pero MATLAB también incluye un entorno de programación de alto nivel, más la herramienta Simulink la que es de interés en este caso.

Si bien existen numerosas herramientas informáticas para realizar diversos tipos de estudios de los sistemas de energía eléctrica, el MATLAB se muestra como una opción interesante por ser una herramienta de análisis matemático, que permite mediante la programación por el usuario, simular los sistemas de energía eléctrica. Resumiendo sus ventajas en la Tabla 4-1:

	SimPowerSystems (Simulink)	PowerWorld	PSS/E	ATM-EMTP	PSCAD/E MTDC
Flujo de Cargas	Si ¹	Si	Si	Si ¹	Si ¹
Cortocircuitos	Si	Si ²	Si ²	Si	Si
Distorsión armónica	Si	No	No	Si	Si
Estabilidad de Angulo	Si	No	Si	si	Si
Transitorios electromagnéticos	Si	No	No	Si ³	Si ³

¹ Orientado a inicializar la simulación transitoria

² No analiza el transitorio

³ Especializado en transitorios electromagnéticos

Tabla 4-1 Aplicaciones de los Softwares para Simulación de Sistemas Eléctricos

Simulink permite modelar diagramas de bloques gráficos, simular sistemas dinámicos, evaluar el rendimiento del sistema y refinar el diseño, por estas características Simulink es una herramienta adecuada para el diseño de sistemas

de control, de sistemas de comunicación, de sistemas de energía eléctrica y otras aplicaciones de simulación.

Dentro de Simulink se encuentra la librería SimPowerSystems distribuidos en diferentes grupos: fuentes, elementos, electrónica de potencia, máquinas, medidores, librerías, extras, demostraciones y bloques obsoletos.

4.2 SIMULACIÓN DE UNA TURBINA EÓLICA

Usando la dinámica de una turbina eólica de velocidad variable, se procede a la simulación de esta en MATLAB, más el modelo del viento

4.2.1 MODELO DEL VIENTO

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{point} \\ \dot{a}_{x_1} \\ \dot{a}_{x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_w(V_{mean}) & 0 & 0 \\ \frac{\tau_1}{\tau_2\tau_3} & 0 & 0 \\ \frac{\tau_2\tau_3 - \tau_1(\tau_2 + \tau_3)}{\tau_2^2\tau_3^2} & \frac{1}{\tau_2\tau_3} & \frac{(\tau_2 + \tau_3)}{\tau_2\tau_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{point} \\ a_{x_1} \\ a_{x_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_w(V_{mean}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \eta$$

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{point} \\ a_{x_1} \\ a_{x_2} \end{bmatrix}$$

donde $\tau_1 = \beta/\sqrt{2}$, $\tau_2 = \tau_1\sqrt{a}$, $\tau_3 = \beta/\sqrt{a}$, $\beta = 33.8/V_{mean}$, $a = 0.55$ y η es un ruido blanco Gaussiano de media cero y varianza unitaria.

4.2.2 MODELO DE LA TURBINA EÓLICA

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$\Omega = CX + DU$$

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma_2/I_2 & 1/NI_2 & 0 \\ -\hat{K}_1/N & 0 & \hat{K}_1 \\ \left(\gamma/N - \gamma\hat{K}_1/(N^3K_2)\right)/I_1 & -1/I_1 & -\left(\gamma_1 + \gamma - \gamma\hat{K}_1/(N^2K_2)\right)/I_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1/I_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_\beta/I_1 & K_V/I_1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} \Omega_{LD} \\ T_{LS} \\ \Omega_{LS} \end{bmatrix}, \quad U_T = \begin{bmatrix} T_{LD} \\ V \\ P \end{bmatrix}, \quad \Omega = \begin{bmatrix} \Omega_{LD} \\ \Omega_{LS} \end{bmatrix}$$

Para un aerogenerador de potencia nominal de 1MW, los valores de los parámetros son $N=58$; $I_1=1.0295 \times 10^6$; $I_2=42.82$; $K_1=1.0106 \times 10^8$; $K_2=4.85 \times 10^6$; $\gamma_1=1.5176 \times 10^4$; $\gamma_2=4.5112$; $\gamma=2.6538 \times 10^5$;

El diagrama de bloques implementado en SIMULINK, es el que se muestra en la Figura 4.1:

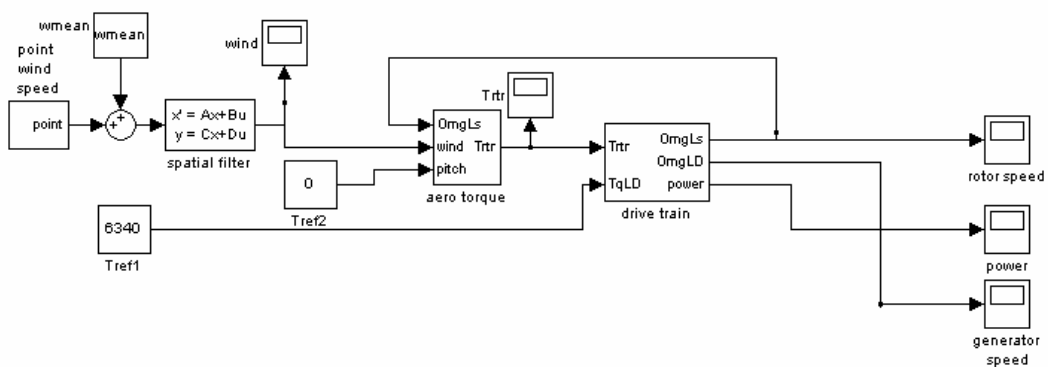


Figura 4.1 Turbina eólica Implementada en Simulink

Los resultados de la simulación obtenidos son los siguientes:

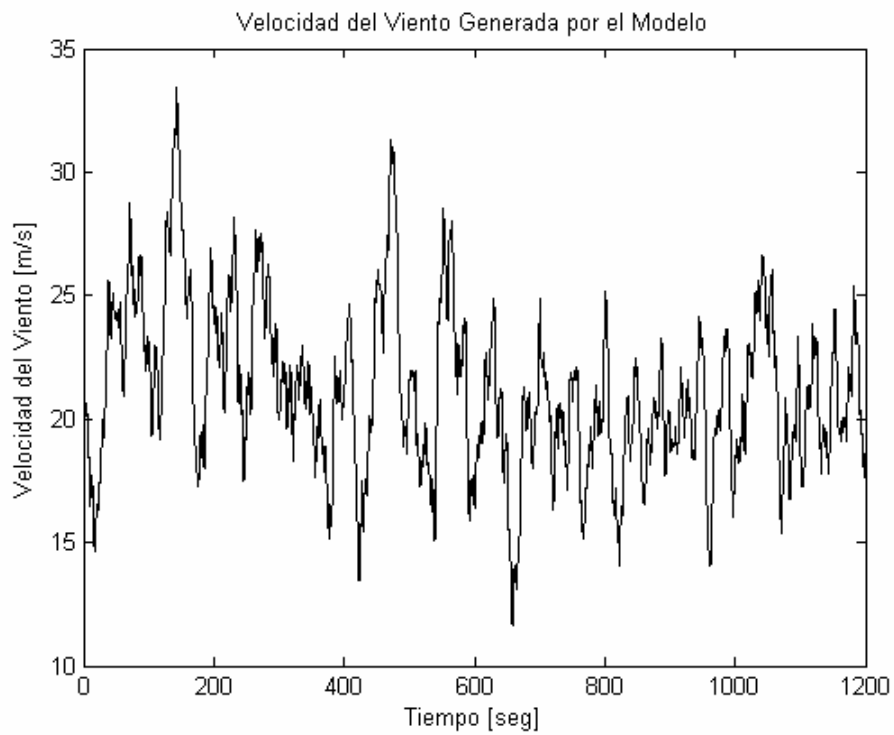


Figura 4.2 Velocidad del Viento

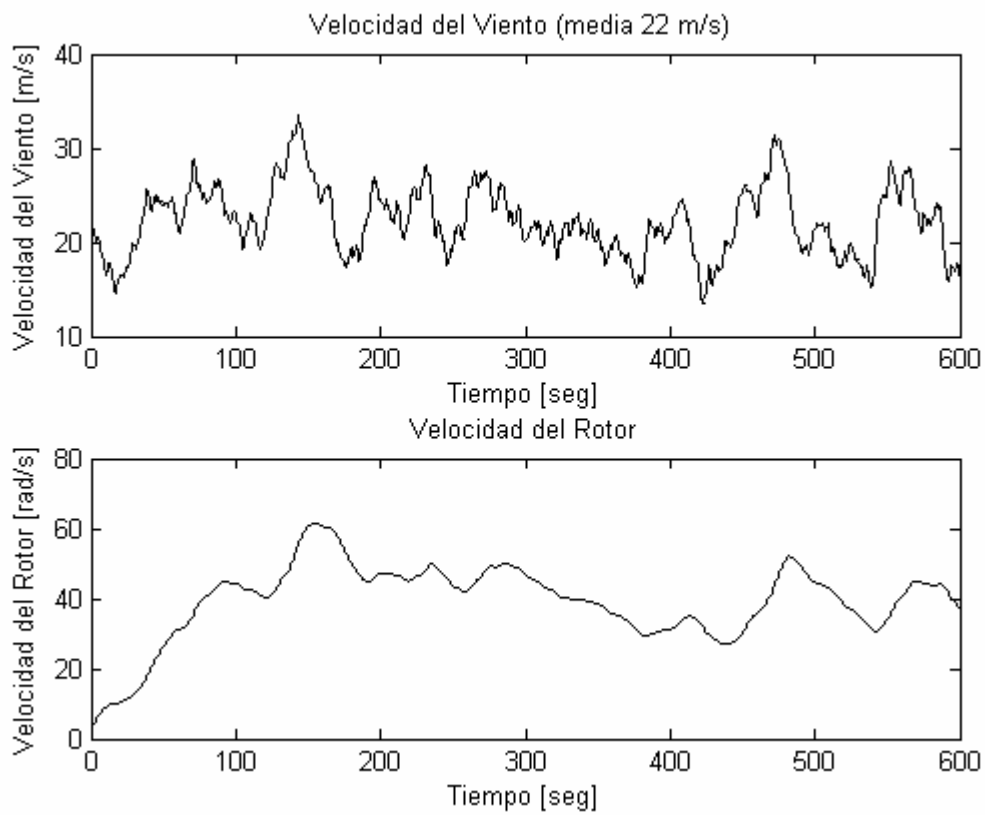


Figura 4.3 Velocidad del Rotor

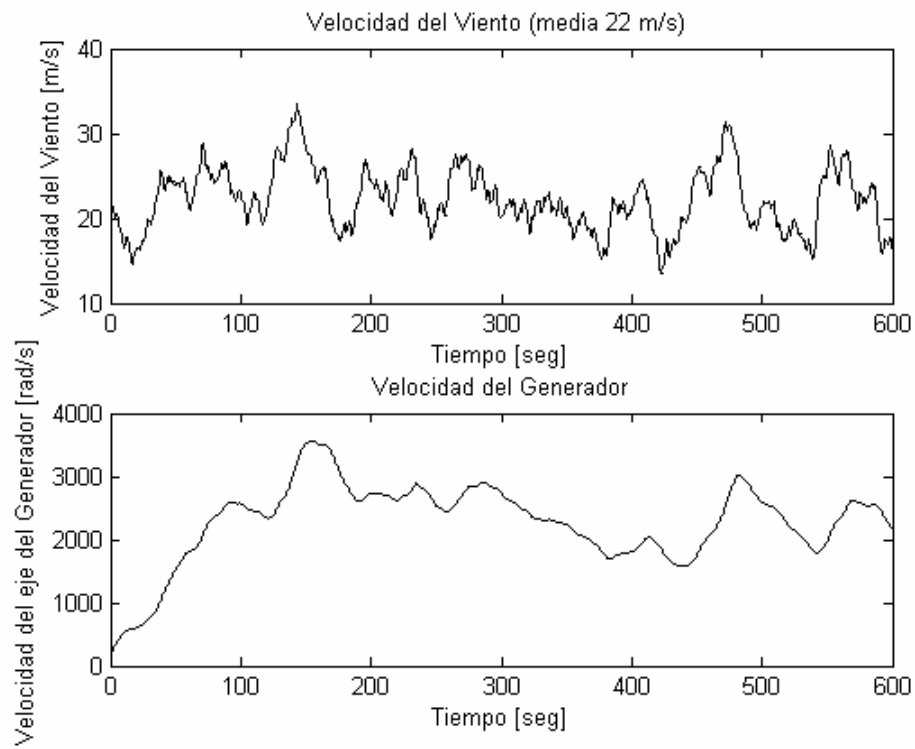


Figura 4.4 Velocidad del Generador

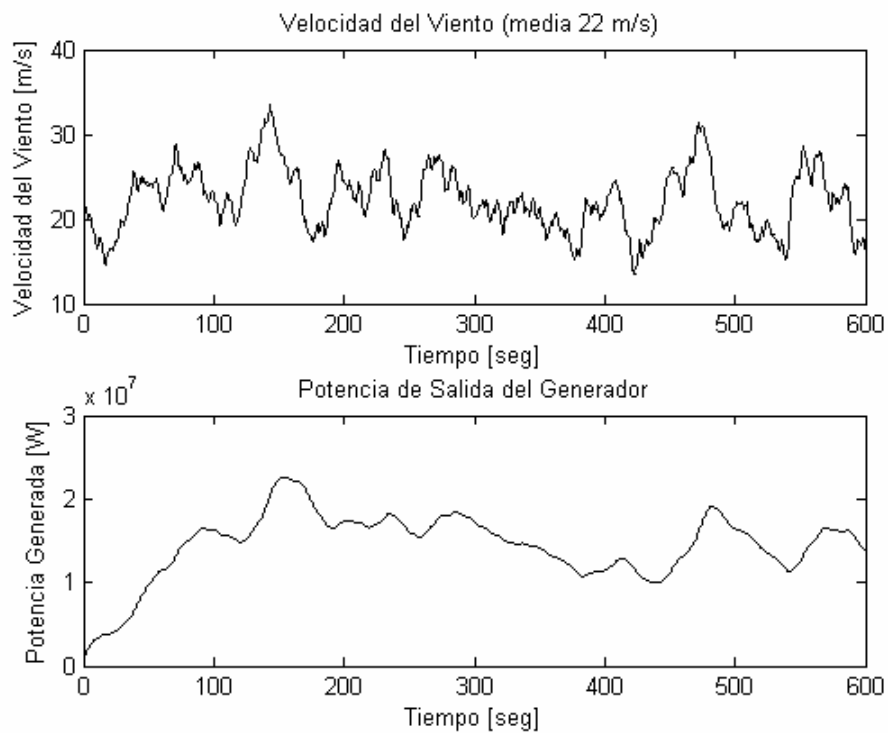


Figura 4.5 Potencia de Salida del Generador

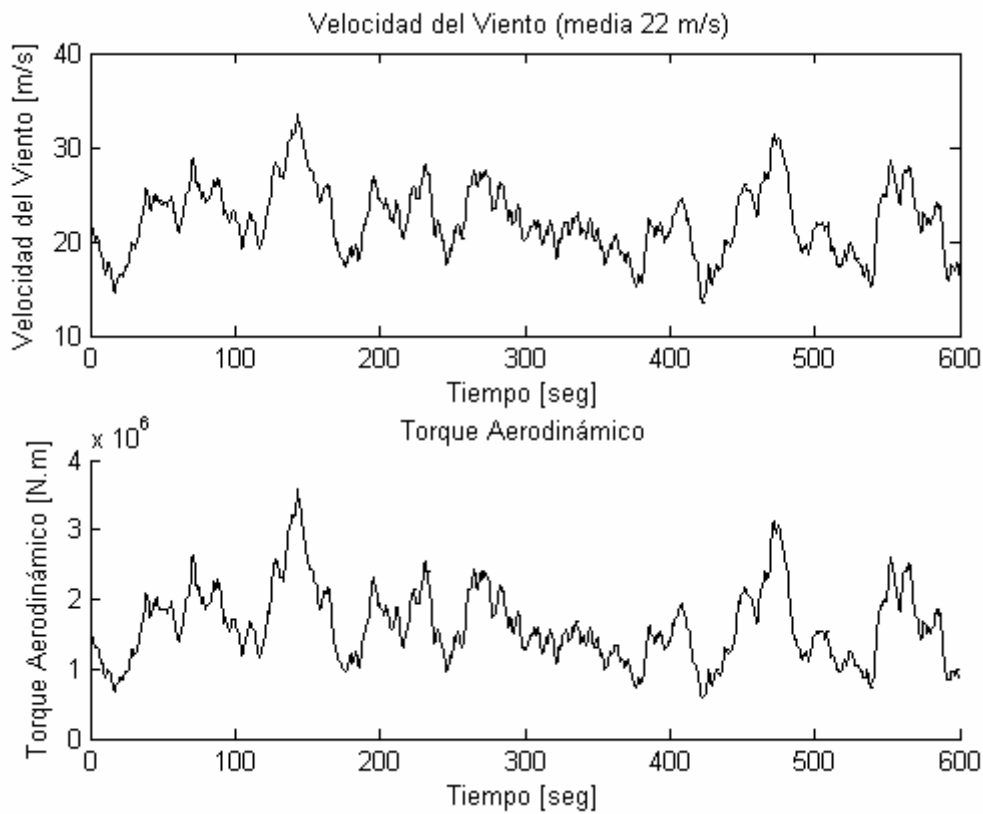


Figura 4.6 Torque Aerodinámico

4.3 SIMULACIÓN DEL OBSERVADOR DE LA TURBINA EÓLICA

Usando los polos deseados para el observador se lo implementa en Simulink, y los resultados de la simulación son los siguientes,

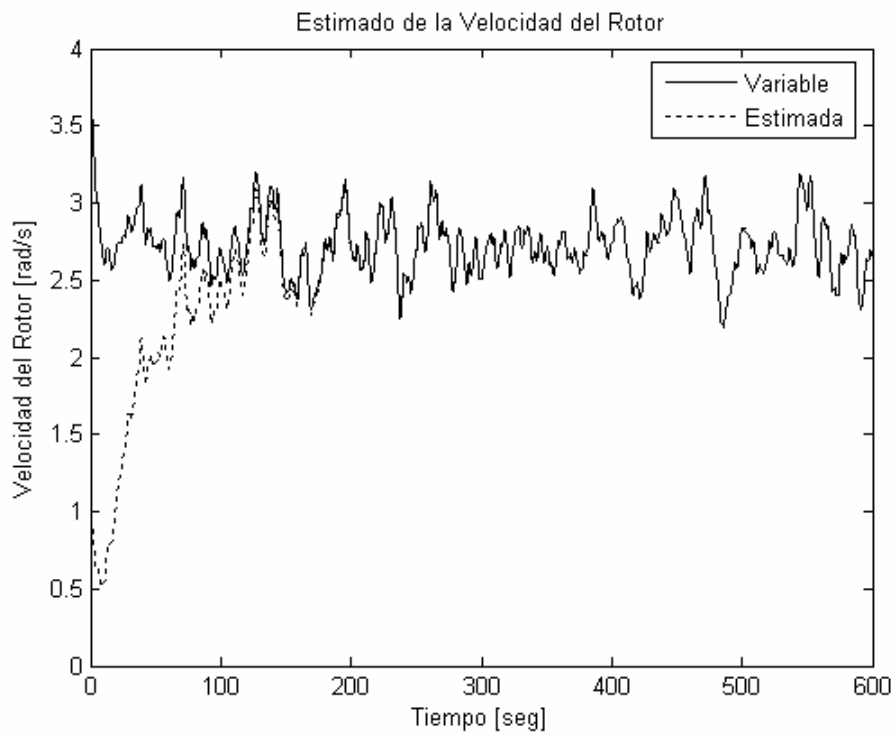


Figura 4.7 Estimación de la Velocidad del Rotor

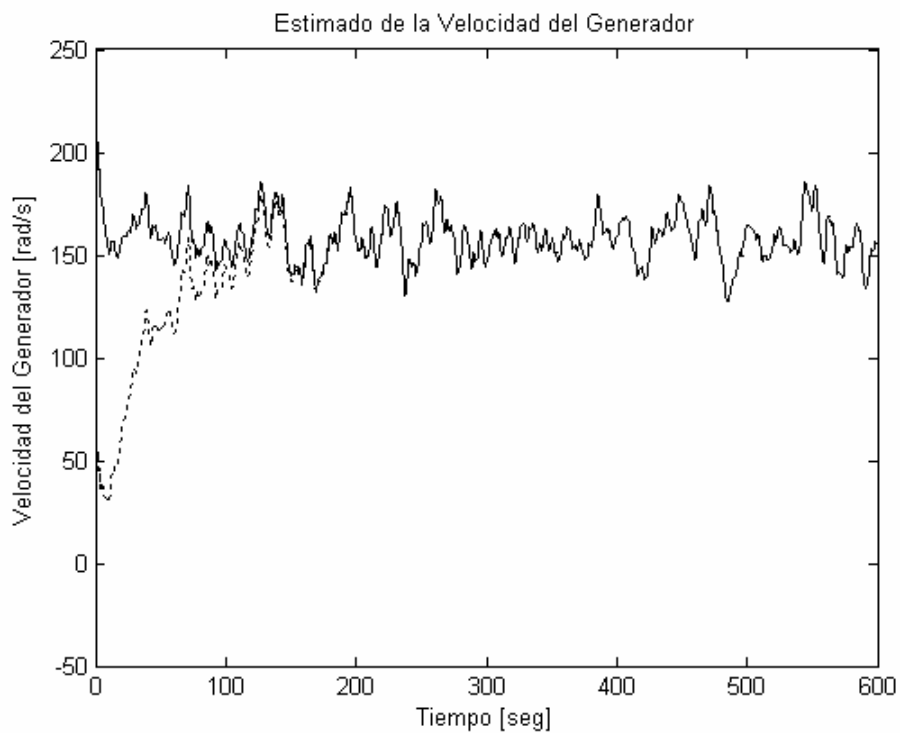


Figura 4.8 Estimación de la Velocidad del Generador

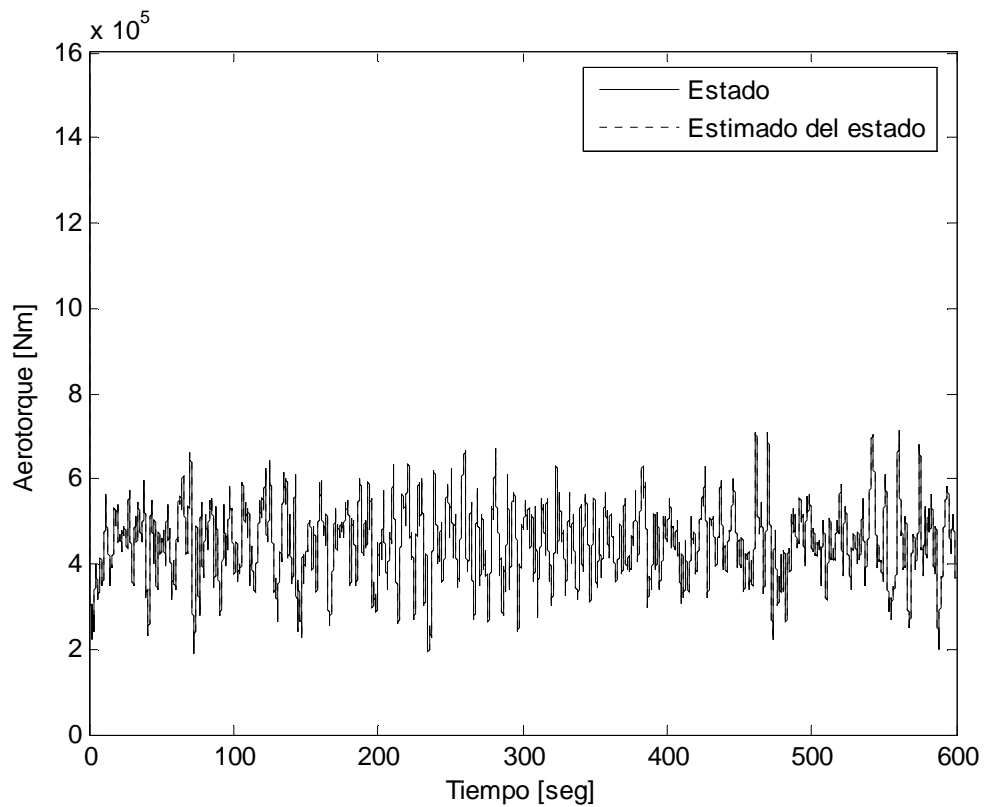


Figura 4.9 Estimación del Torque Aerodinámico

4.4 SIMULACIÓN DEL CONTROL PREDICTIVO DE LA TURBINA EÓLICA

El esquema implementado para la simulación del control predictivo de la turbina eólica de velocidad variable es el mostrado en la Figura 4.10

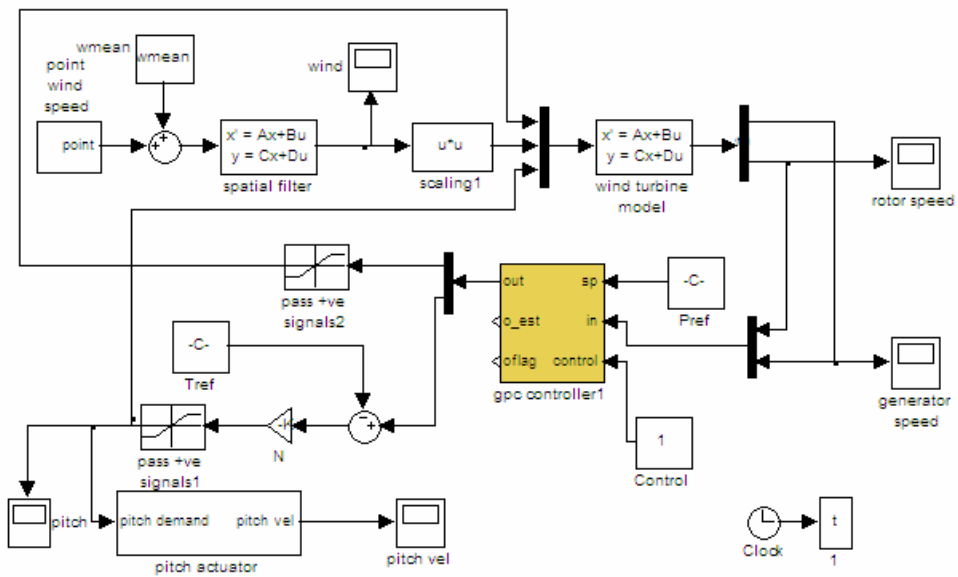


Figura 4.10 Esquema del Control Predictivo Implementado

Los resultados de la simulación del control predictivo aplicado a la turbina eólica de velocidad variable son los siguientes,

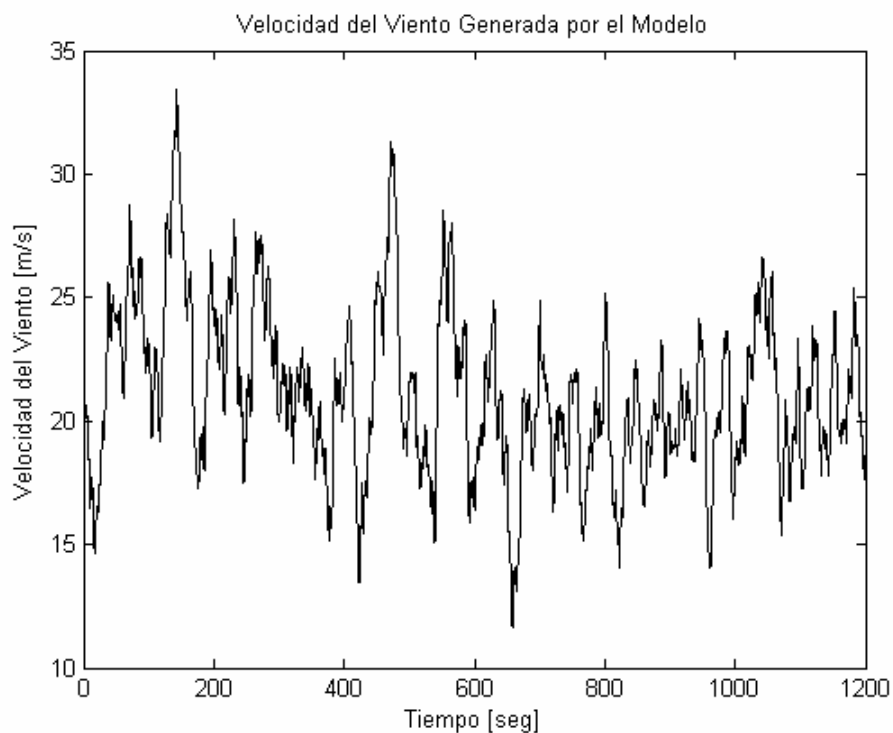


Figura 4.11 Velocidad del Viento

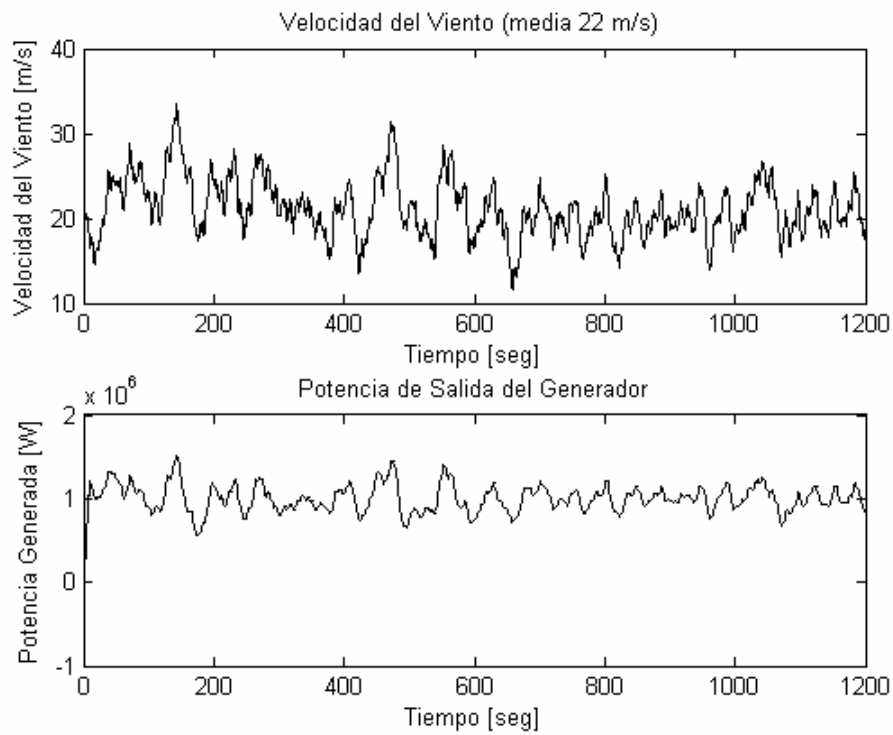


Figura 4.12 Potencia Generada por la Turbina Aplicando el Control Predictivo

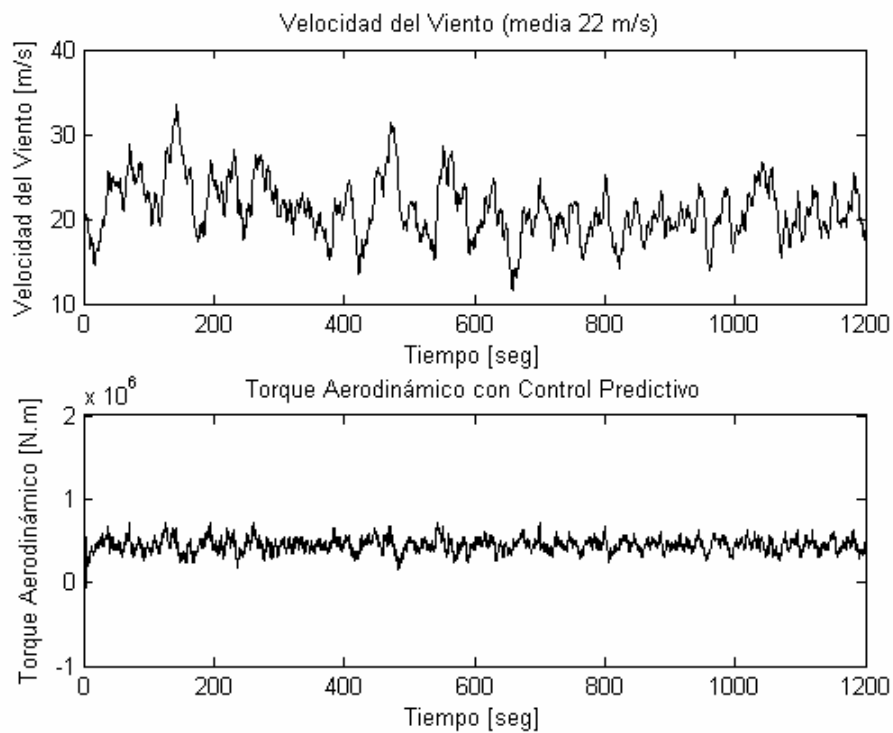


Figura 4.13 Torque Aerodinámico aplicando Control Predictivo

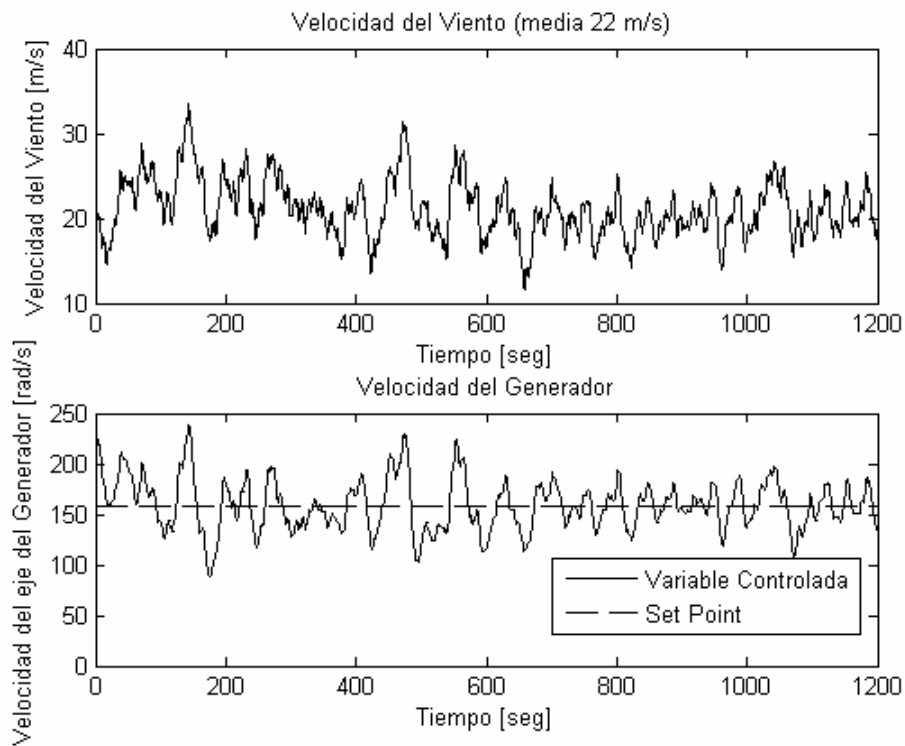


Figura 4.14 Velocidad del Generador aplicando Control Predictivo

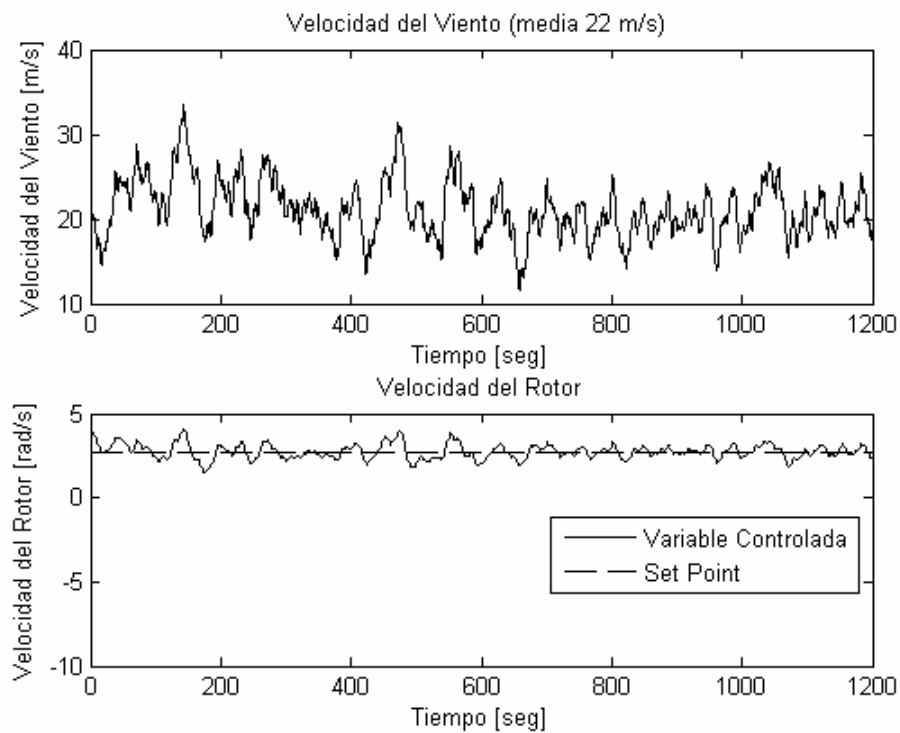


Figura 4.15 Velocidad del Rotor aplicando Control Predictivo

4.5 SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

El modelo obtenido en el capítulo 2 de la máquina de inducción se reorganiza para proceder a la simulación:

$$\psi_{qs} = \omega_b \int \left[v_{qs} - \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{qs} - \psi_{mq}) - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} \right] dt$$

$$\psi_{ds} = \omega_b \int \left[v_{ds} - \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md}) + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} \right] dt$$

$$i_{0s} = \frac{\omega_b}{x_{ls}} \int [v_{0s} - i'_{0s} r_s] dt$$

$$\psi'_{qr} = \omega_b \int \left[v'_{qr} - \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi'_{qr} - \psi_{mq}) - \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr} \right] dt$$

$$\psi'_{dr} = \omega_b \int \left[v'_{dr} - \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi'_{dr} - \psi_{md}) + \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} \right] dt$$

$$i'_{0r} = \frac{\omega_b}{x'_{lr}} \int [v'_{0r} - i'_{0r} r'_r] dt$$

$$\psi_{mq} = x_m (i_{qs} + i'_{qr})$$

$$\psi_{md} = x_m (i_{ds} + i'_{dr})$$

$$\psi_{qs} = x_{ls} i_{qs} + \psi_{mq}$$

$$\psi'_{qr} = x'_{lr} i'_{qr} + \psi_{mq}$$

$$\psi_{ds} = x_{ls} i_{ds} + \psi_{md}$$

$$\psi'_{dr} = x'_{lr} i'_{dr} + \psi_{md}$$

$$\psi_{0s} = x_{ls} i_{0s}$$

$$\psi'_{0r} = x'_{lr} i'_{0r}$$

$$i_{qs} = \frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{x_{ls}}$$

$$i'_{qr} = \frac{\psi'_{qr} - \psi_{mq}}{x'_{lr}}$$

$$i_{ds} = \frac{\psi_{ds} - \psi_{md}}{x_{ls}}$$

$$i'_{dr} = \frac{\psi'_{dr} - \psi_{md}}{x'_{lr}}$$

$$i_{0s} = \frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \qquad i'_{qr} = \frac{\psi'_{0r}}{x'_{lr}}$$

Si

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}}$$

Entonces

$$\psi_{mq} = x_M \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{x'_{lr}} \right) \qquad \psi_{md} = x_M \left(\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}}{x'_{lr}} \right)$$

Para finalizar la modelación, se determina la ecuación de movimiento del rotor igualando el torque de inercia al torque de aceleración,

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp}$$

Donde

J Inercia del motor

T_{em} Torque electromagnético

T_{mech} Torque mecánico

T_{damp} Torque de amortiguamiento

Donde si el torque mecánico es negativo la máquina trabaja como motor, por el contrario si el torque es positivo trabaja como generador. El torque de amortiguamiento tiene dirección contraria a la rotación.

Si la velocidad mecánica del rotor puede expresarse por

$$\omega_{rm} = \frac{2\omega_r}{P}$$

Remplazando en la ecuación de movimiento

$$2J \frac{\omega_b}{P} \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right) = T_{em} + T_{mech} - T_{damp}$$

Se concluye que la velocidad del rotor puede determinarse a partir de la ecuación

$$\left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right) = \int \left[\frac{P}{2J\omega_b} (T_{em} + T_{mech} - T_{damp}) \right] dt$$

Los parámetros de la máquina simulada son los siguientes:

Pn=3 HP	Potencia nominal
Vnom=220	Voltaje rms línea a línea nominal
f=60	Frecuencia nominal
Ls=2*2.0e-3	Inductancia de dispersión estator
Lm=69.31e-3	Inductancia de magnetización
Lr=2.0e-3	Inductancia de dispersión rotor
rs=0.435	Resistencia estator
rr=0.816	Resistencia rotor
P=4	Número de polos
J=0.089 ;	Constante de inercia

Este modelo se implementa en SimPowerSystems de MATLAB/Simulink, del que se obtienen las siguientes respuestas:

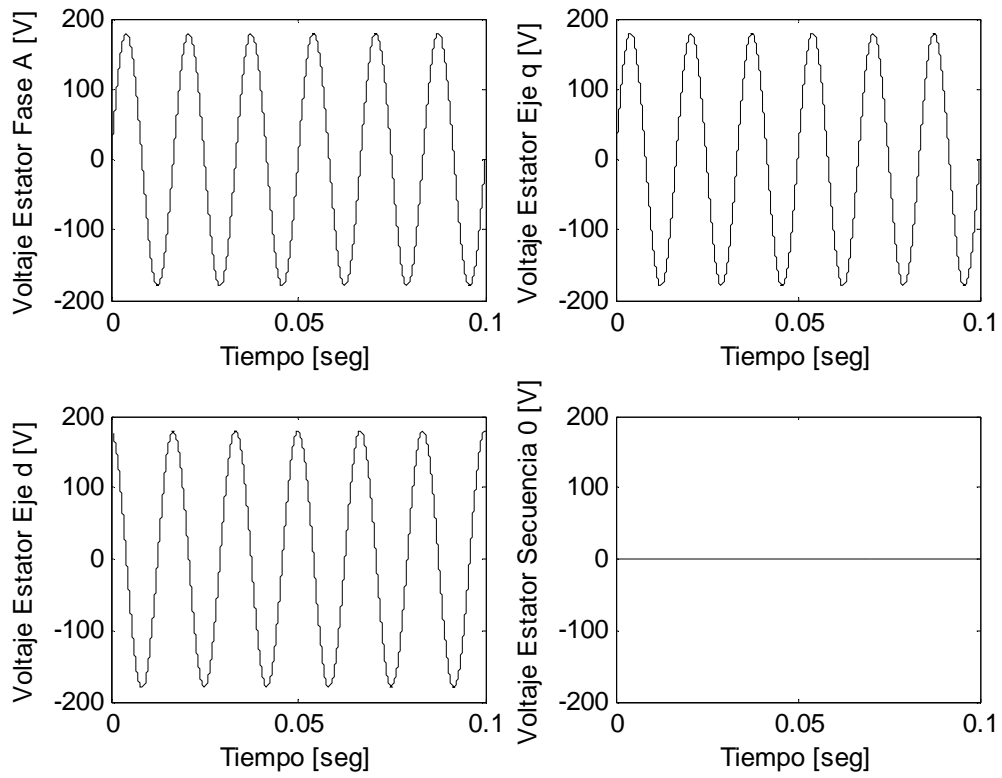


Figura 4.16 Voltaje qd0 del estator

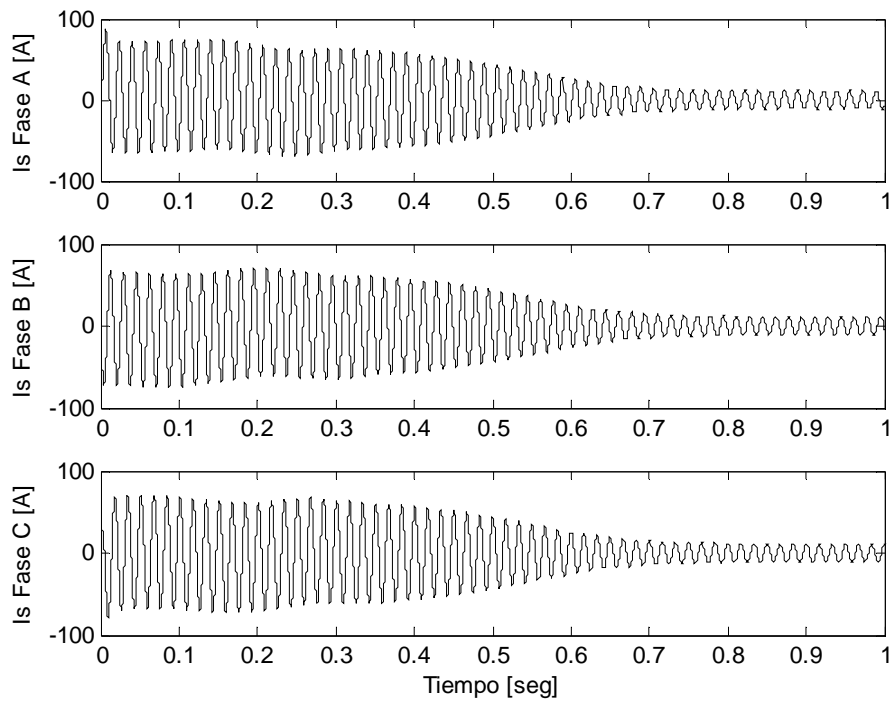


Figura 4.17 Corriente abc estator

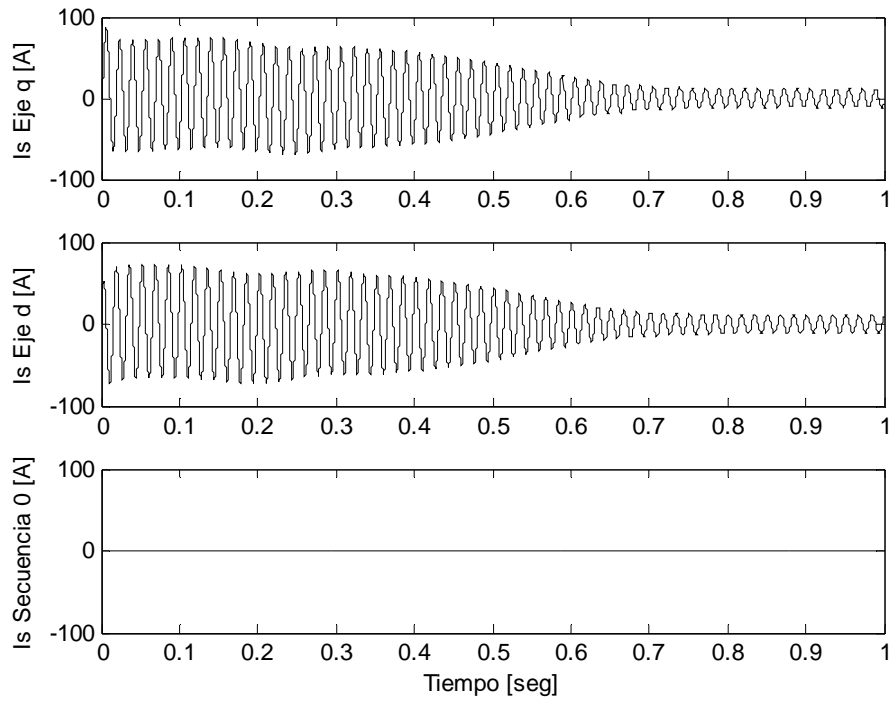


Figura 4.18 Corriente qd0 estator

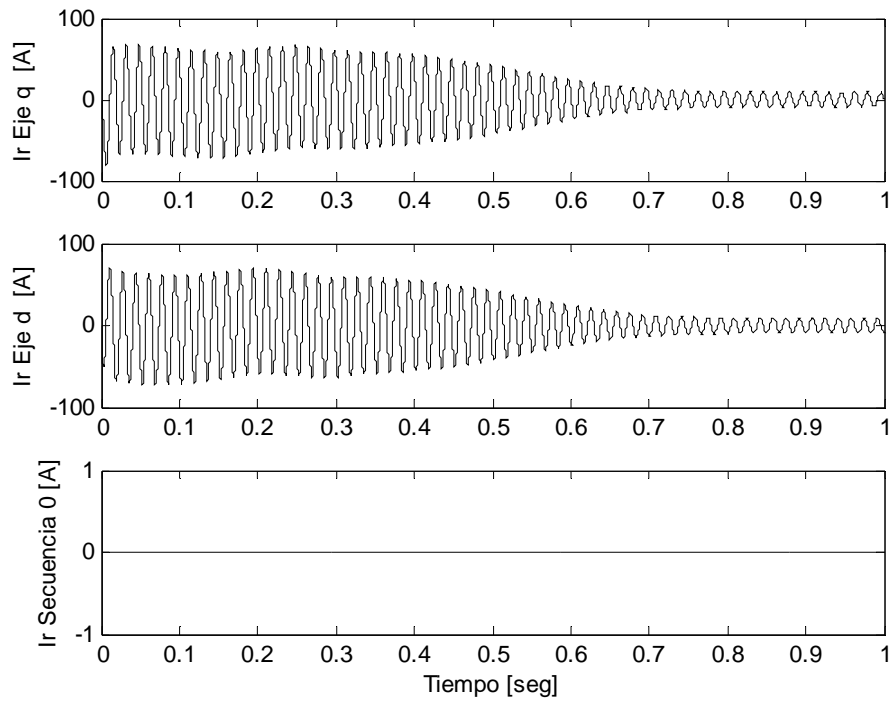


Figura 4.19 Corriente qd0 rotor

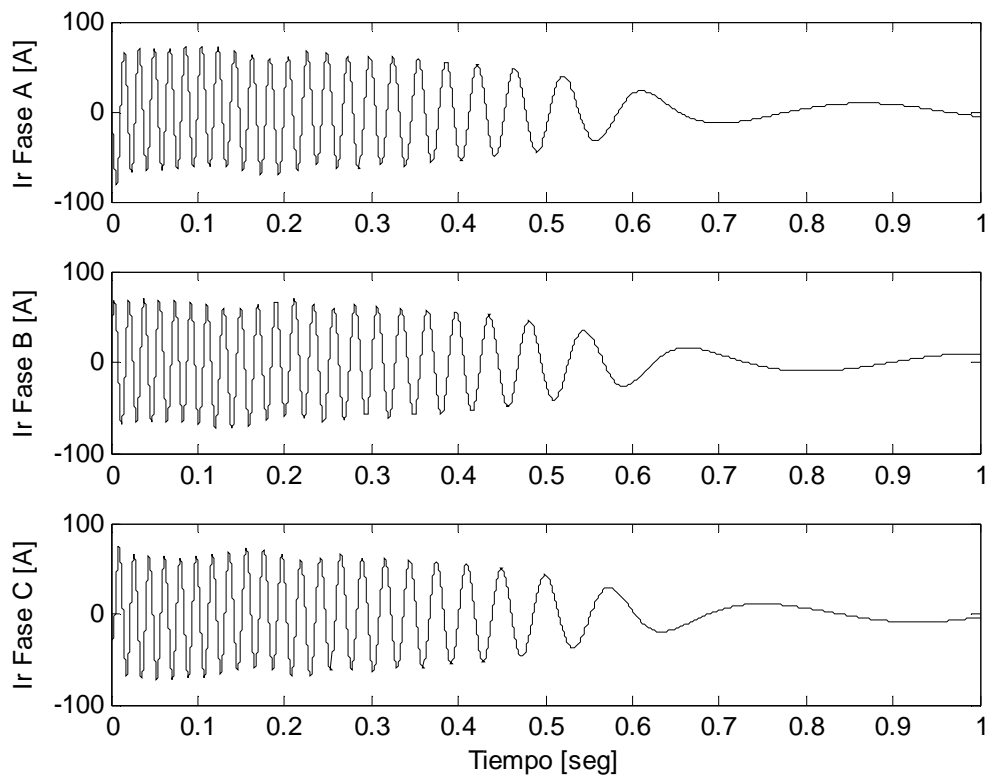


Figura 4.20 Corrientes abc del rotor

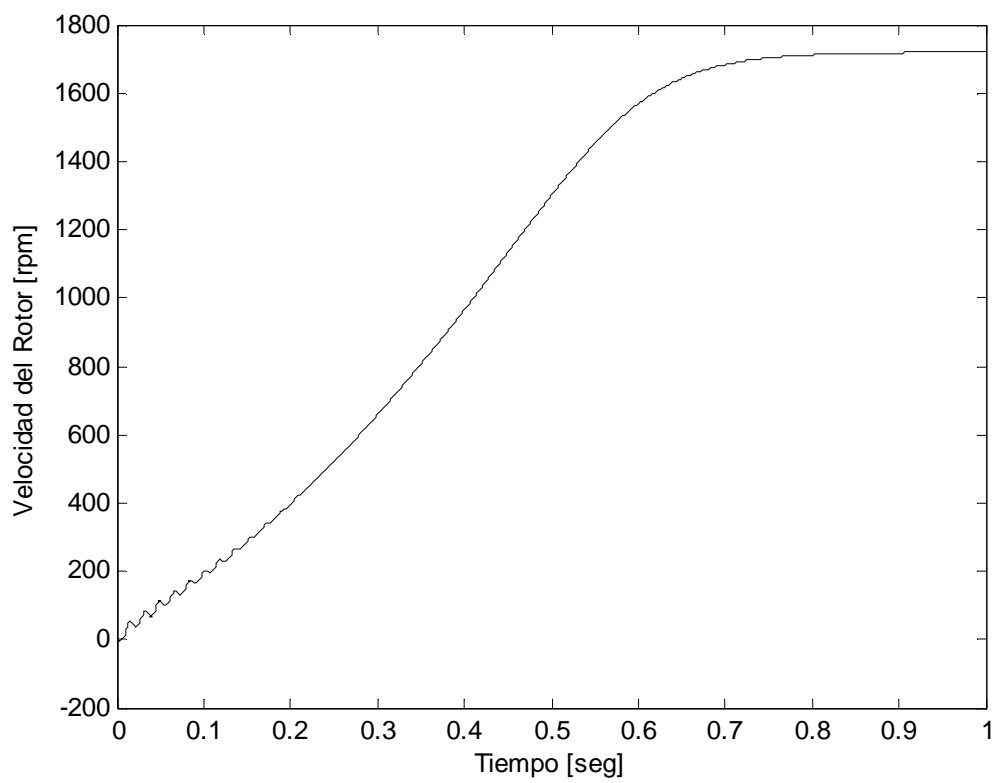


Figura 4.21 Velocidad mecánica del rotor

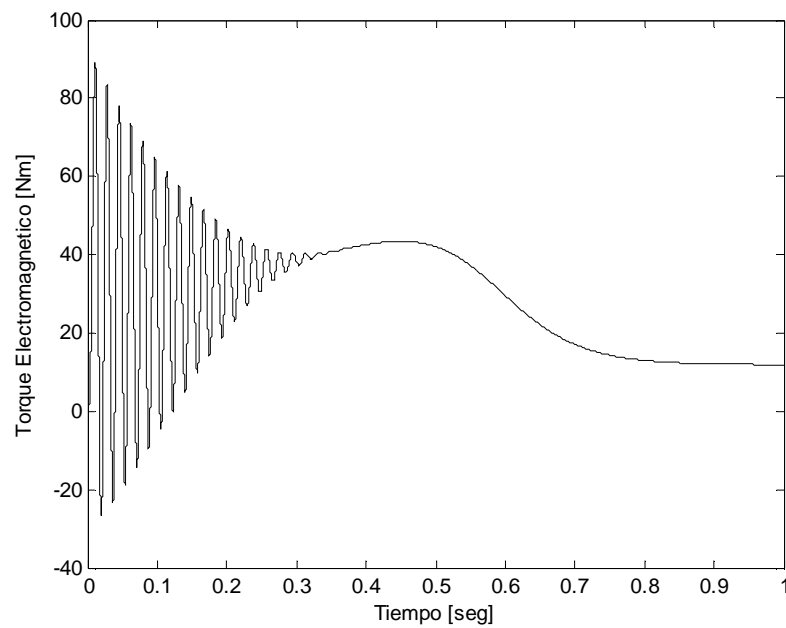


Figura 4.22 Torque electromagnético

4.6 SIMULACIÓN DEL CONTROL DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN DE DOBLE ALIMENTACIÓN

4.6.1 SIMULACIÓN CON UNA BARRA INFINITA

La simulación se implementa para una máquina de las siguientes características

$P_n=1.5e6$ W;	Potencia nominal
$V_{nom}=575$ V	Voltaje rms línea a línea nominal
$f=60$ Hz	Frecuencia nominal
$L_s= 0.0073$ H	Inductancia dispersión estator
$L_m=10.2382$ H	Inductancia de magnetización
$L_r=0.0066$ H	Inductancia dispersión rotor
$r_s=0.1887$ Ω	Resistencia estator
$r_r=0.2709$ Ω	Resistencia rotor

- P=6 Número de polos
- J=5.04 Constante de inercia
- F=0.01 Constante de fricción

El esquema implementado para la simulación del control es el mostrado en la Figura 4.23:

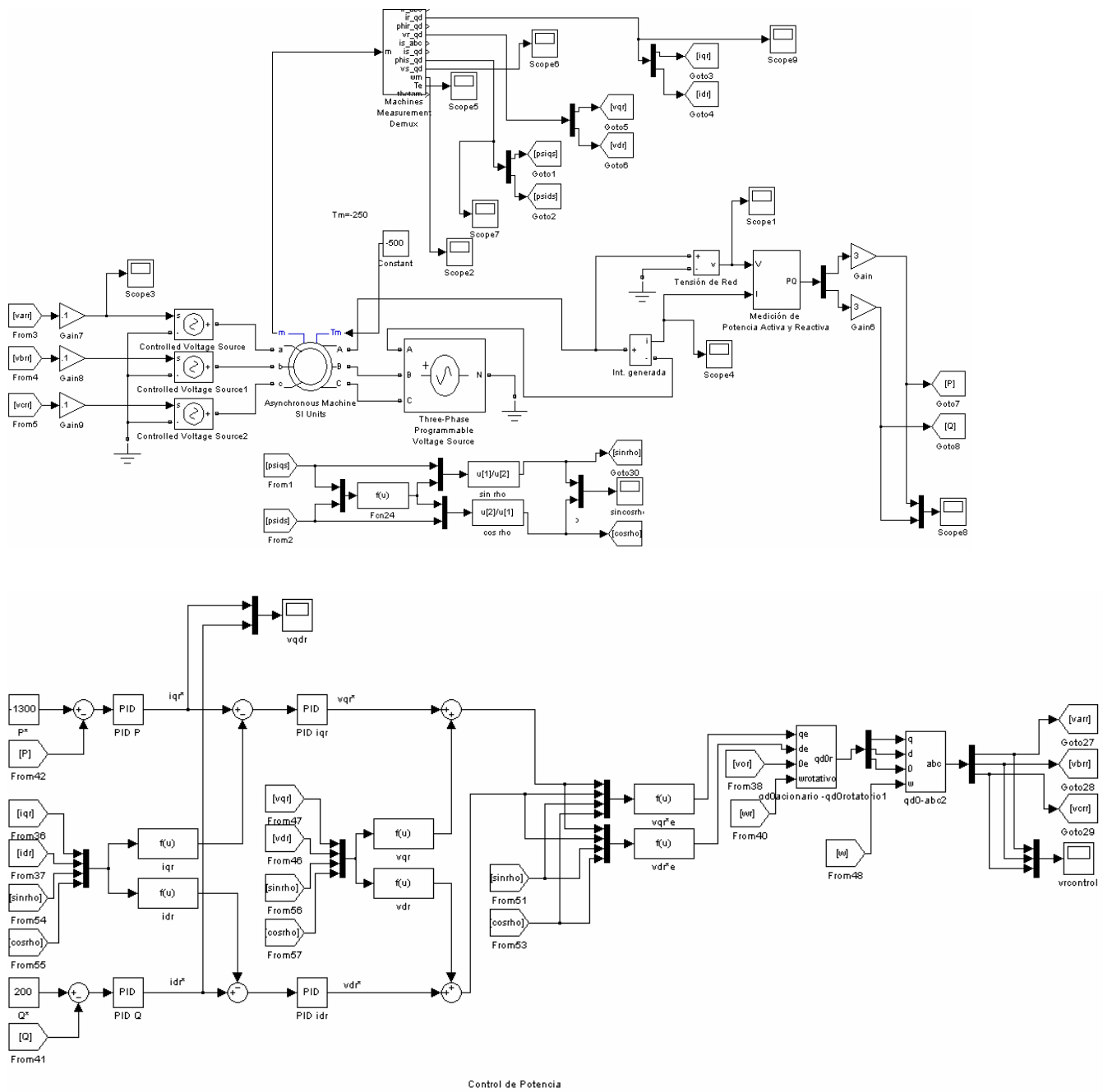


Figura 4.23 Control del Generador

Los resultados obtenidos son los siguientes:

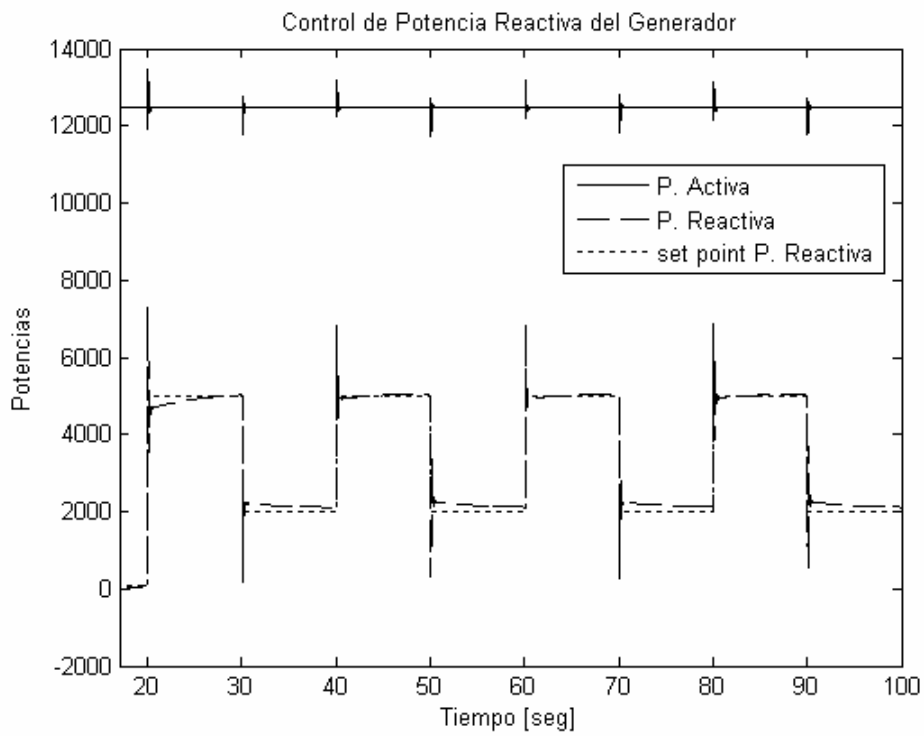


Figura 4.24 Control de Potencia Reactiva

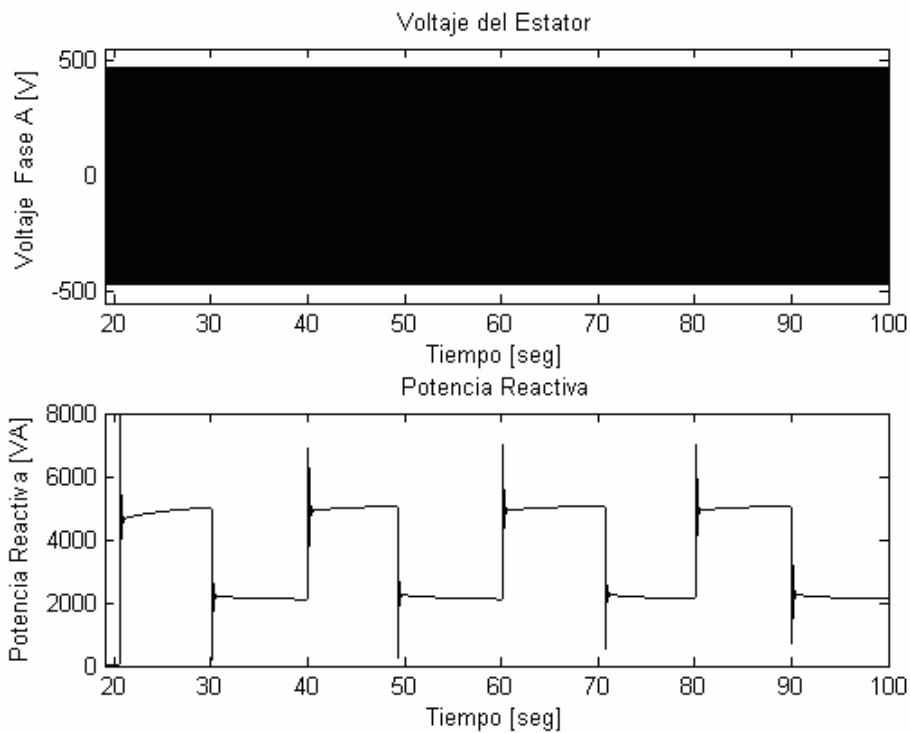


Figura 4.25 Voltaje del Estator (Voltaje Generado)

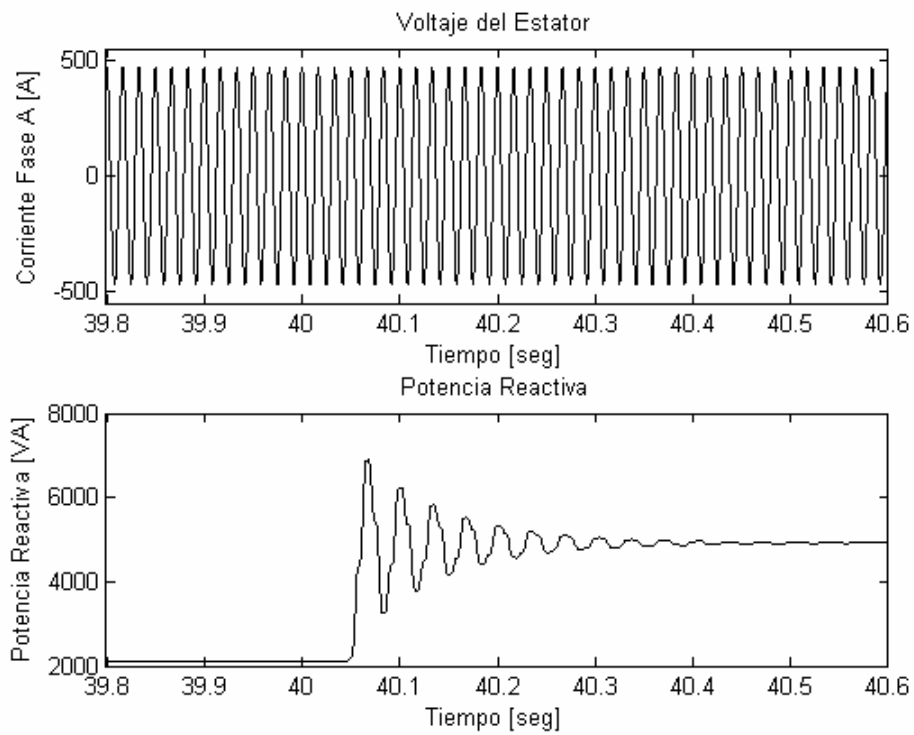


Figura 4.26 Transitorio del Voltaje del Estator en cambio de Set Point de Q

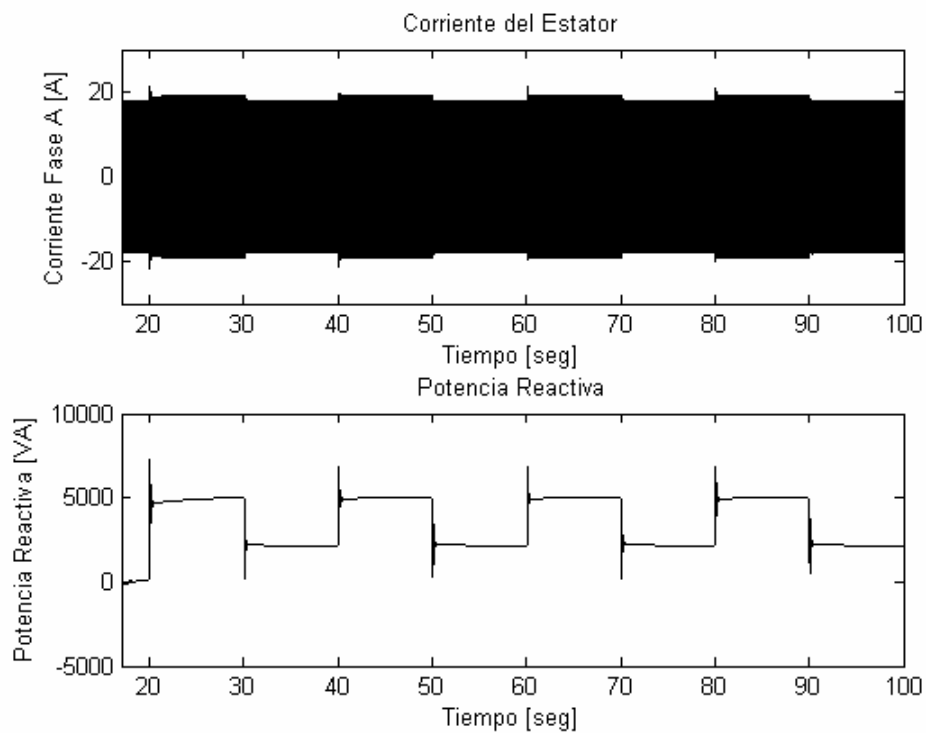


Figura 4.27 Corriente del Estator (Corriente entregada por el Generador)

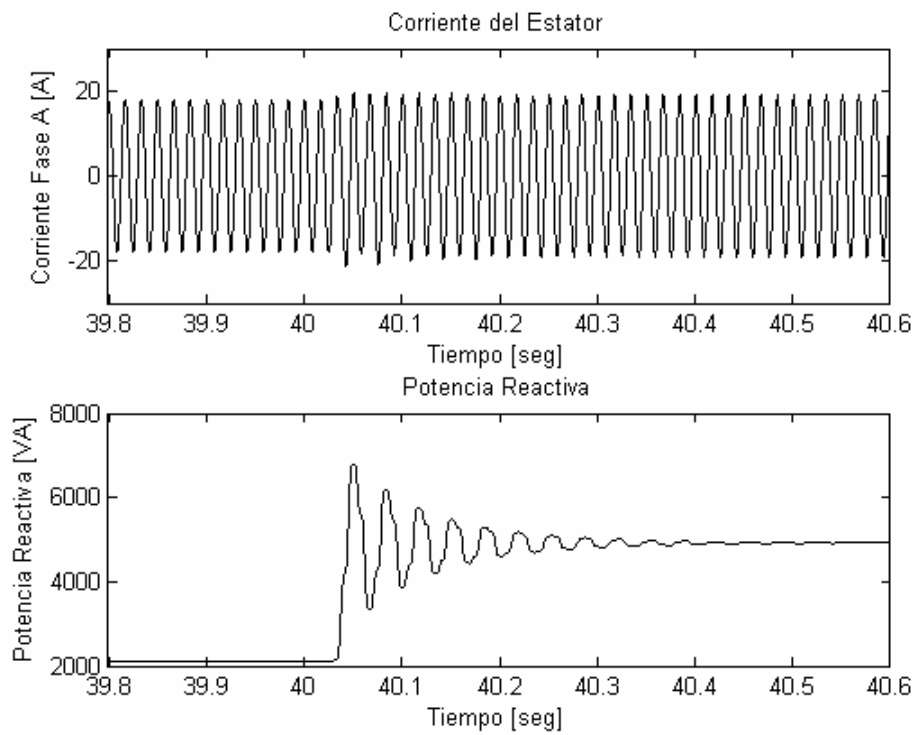


Figura 4.28 Transitorio de la Corriente de Estator en cambio de Set Point de Q

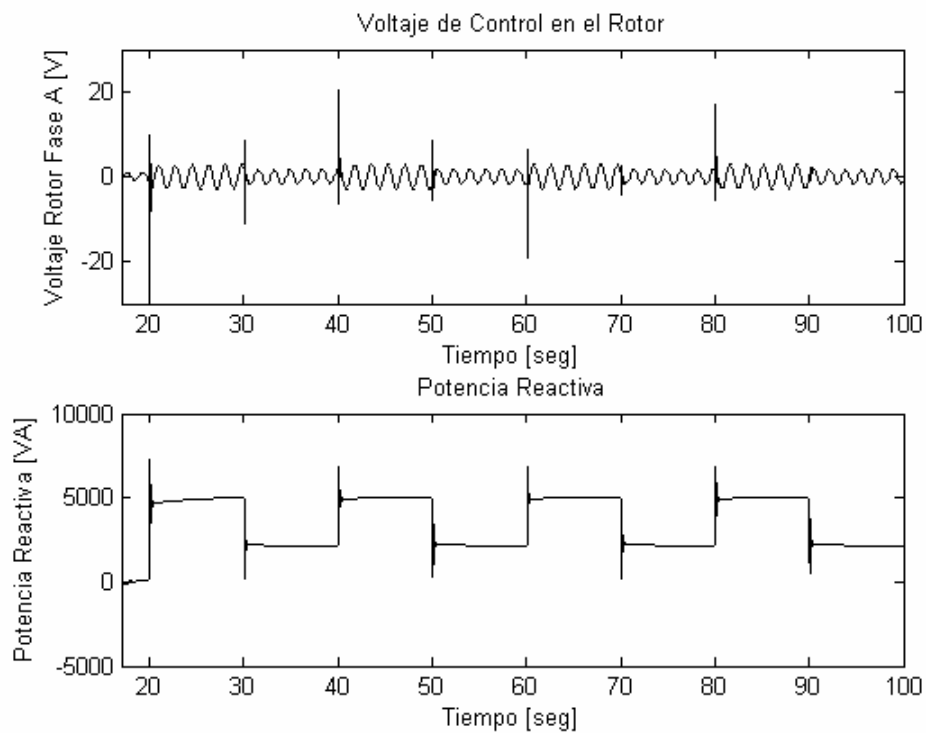


Figura 4.29 Voltaje de Control aplicado al Rotor

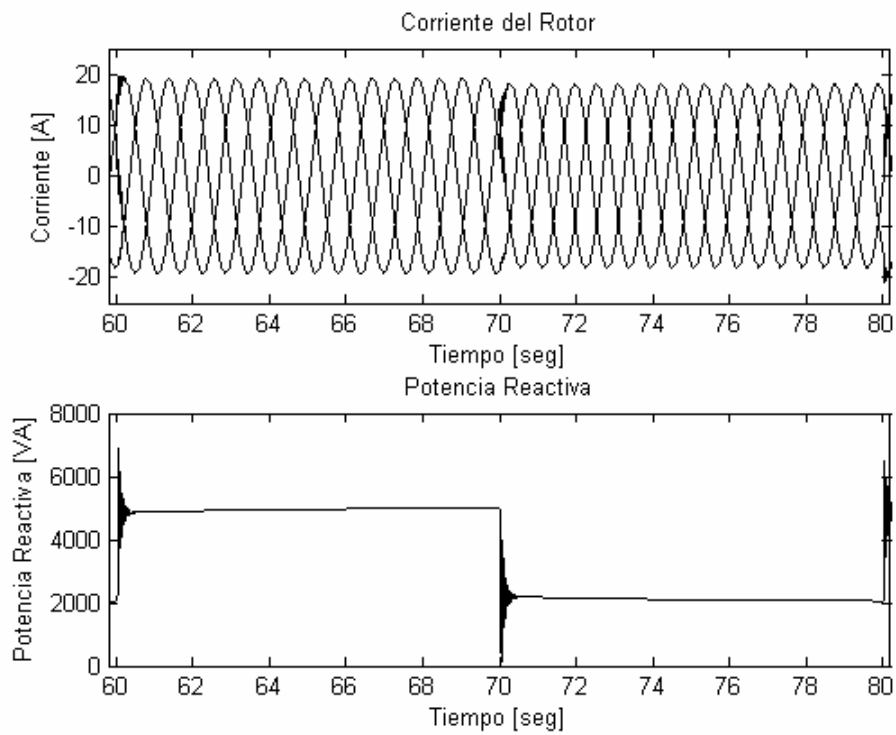


Figura 4.30 Corriente del Rotor durante el control de Q

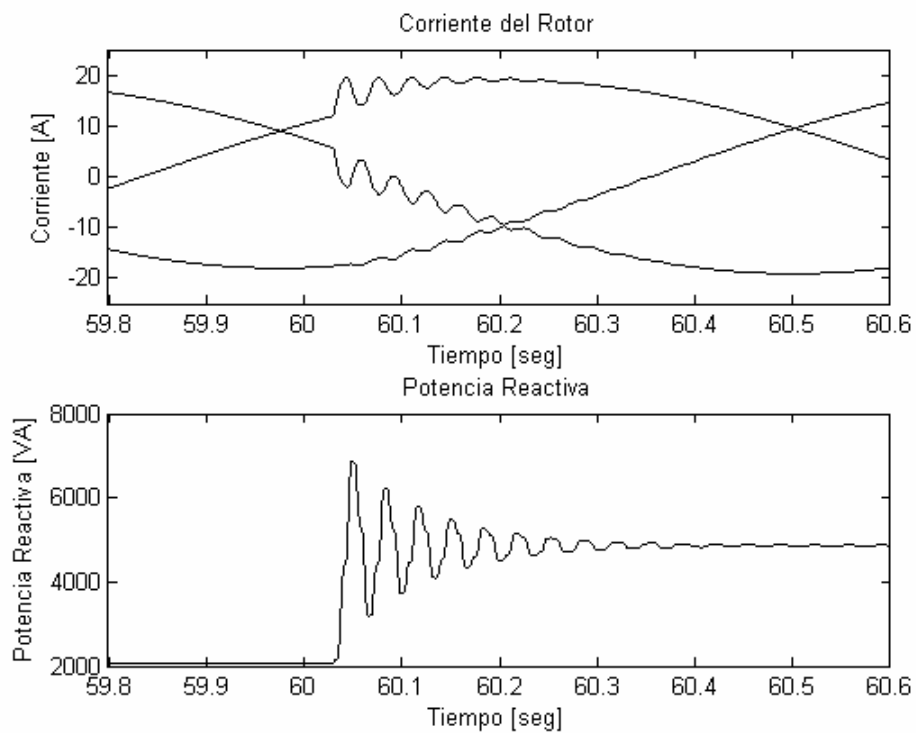


Figura 4.31 Transitorio de la Corriente de Rotor durante cambio de Set Point de Q

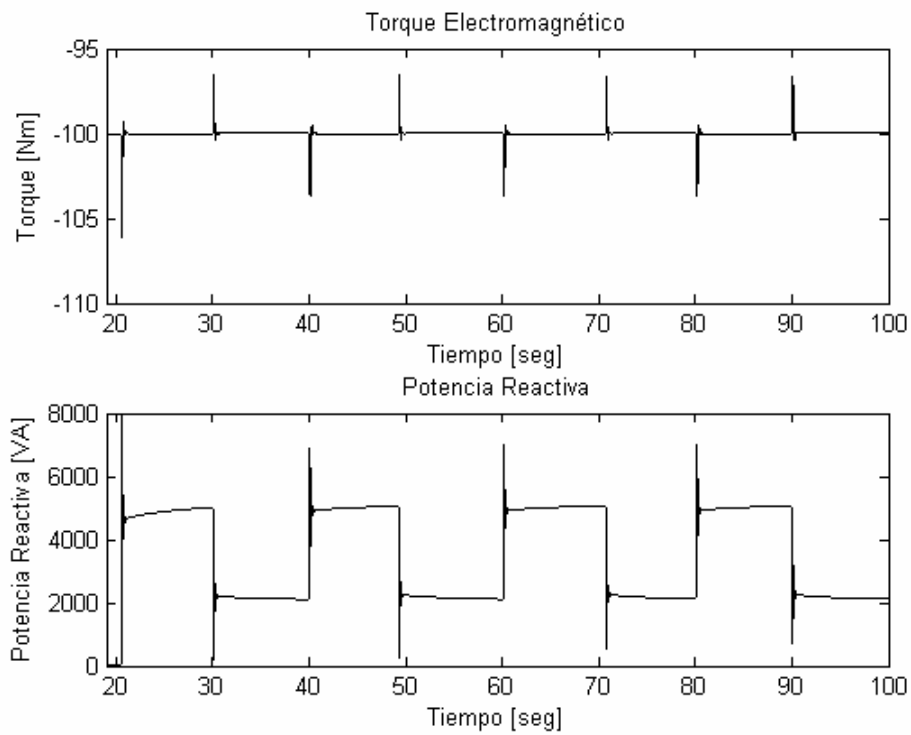


Figura 4.32 Torque Electromagnético durante el Control de Q

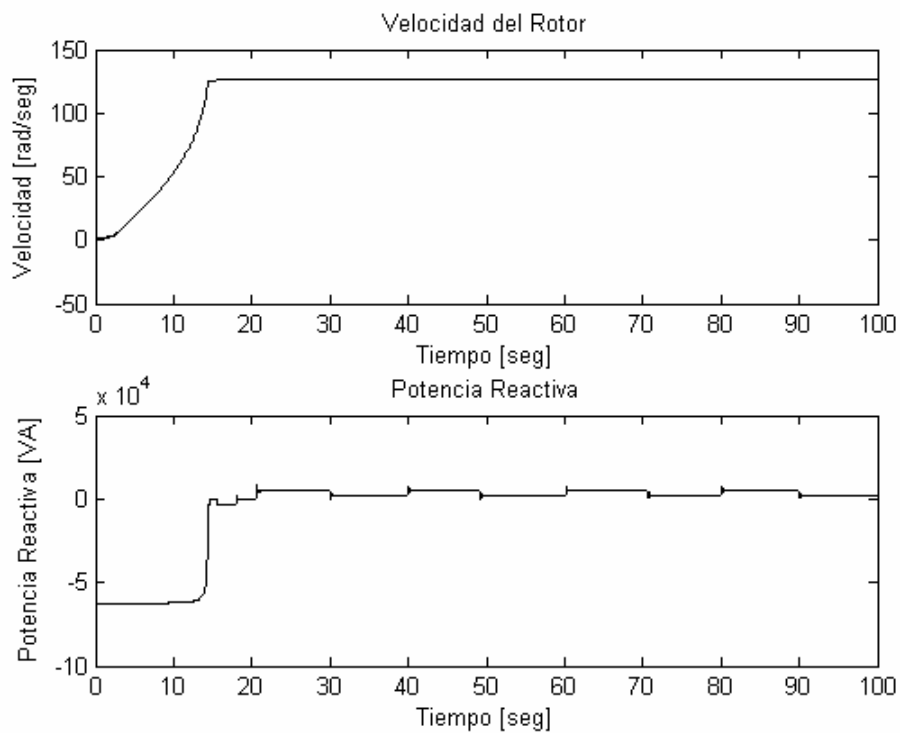


Figura 4.33 Velocidad del Rotor del Generador durante el control de Q

4.6.2 SIMULACIÓN CON UNA SISTEMA DE TRANSMISIÓN

En los resultados mostrados a continuación se estudia el generador eólico con control de potencia reactiva conectado a un sistema eléctrico de potencia, donde los elementos son:

- Una línea aérea trifásica.
- Un transformador YNyd1 con una reactancia trifásica de compensación en el terciario y con los neutros conectados rígidamente a tierra.
- Dos sistemas eléctricos A y B, donde el sistema eléctrico A es el generador en estudio.
- Una impedancia equivalente de la red más la carga conectada entre los nudos A y B.

El diagrama unifilar es el mostrado en la Figura 4.34:

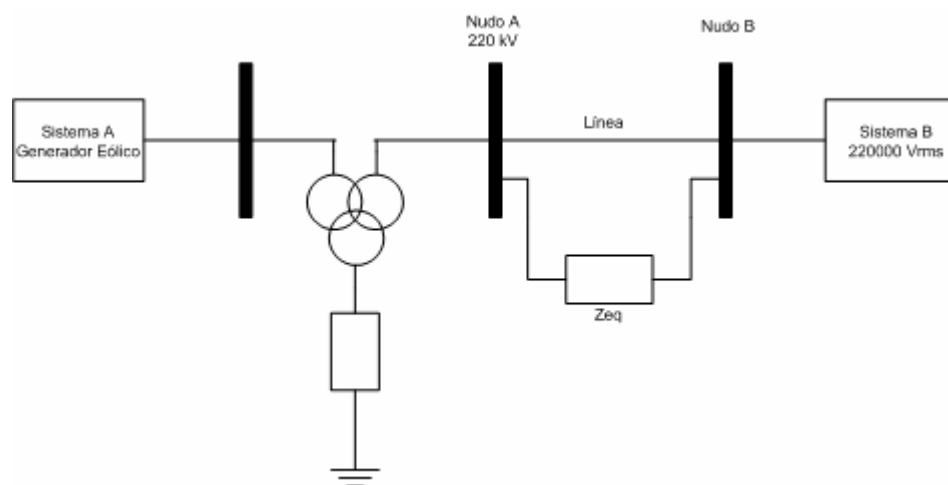


Figura 4.34 Diagrama unifilar del sistema de transmisión simulado [14]

Los datos de los elementos usados para la simulación son los siguientes:

Datos del sistema equivalente

Equivalente del sistema	Tensión (Vrms)	Potencia (MVA)	Angulo de fase (°)	Resistencia (Ω)	Inductancia (H)
Sistema B	20000	1000	3.5	0.462	0.01464

Tabla 4-2 Datos del sistema B usado para la simulación

Datos de la reactancia de compensación y de la impedancia equivalente

	Reactancia de compensación	Impedancia equivalente
Resistencia (Ω)	0	2000
inductancia (H)	1.27	2000

Tabla 4-3 Reactancia de Compensación e Impedancia Equivalente

Datos del transformador		
Potencia Nominal (MVA)		300
Primario	conexión:	YN
	tensión eficaz (V):	575
	resistencia (pu):	0.0025
	inductancia (pu):	0.1
Secundario	conexión:	YN
	tensión eficaz (kV):	20
	resistencia (pu):	0.0025
	inductancia (pu):	0.1
Terciario	conexión:	YN
	tensión eficaz (kV):	20
	resistencia (pu):	0.0025
	inductancia (pu):	0.1
Resistencia de magnetización (pu):		500
Reactancia de magnetización (pu):		500

Tabla 4-4 Datos del transformador

Datos de la línea	
Nº de fases:	3
Resistencia por unidad de logitud (Ω/km):	R1=0.01273 R0=0.3864
Inductancia por unidad de logitud (H/km):	L1=0.9337e-3 L0=4.1264e-3
Capacitancia por unidad de logitud (Ω/km):	C1=12.74e-9 C0=7.751e-9
Longitud (km):	150

Tabla 4-5 Datos de la Línea

El sistema de potencia implementado en Simulink es el mostrado en la Figura 4.35:

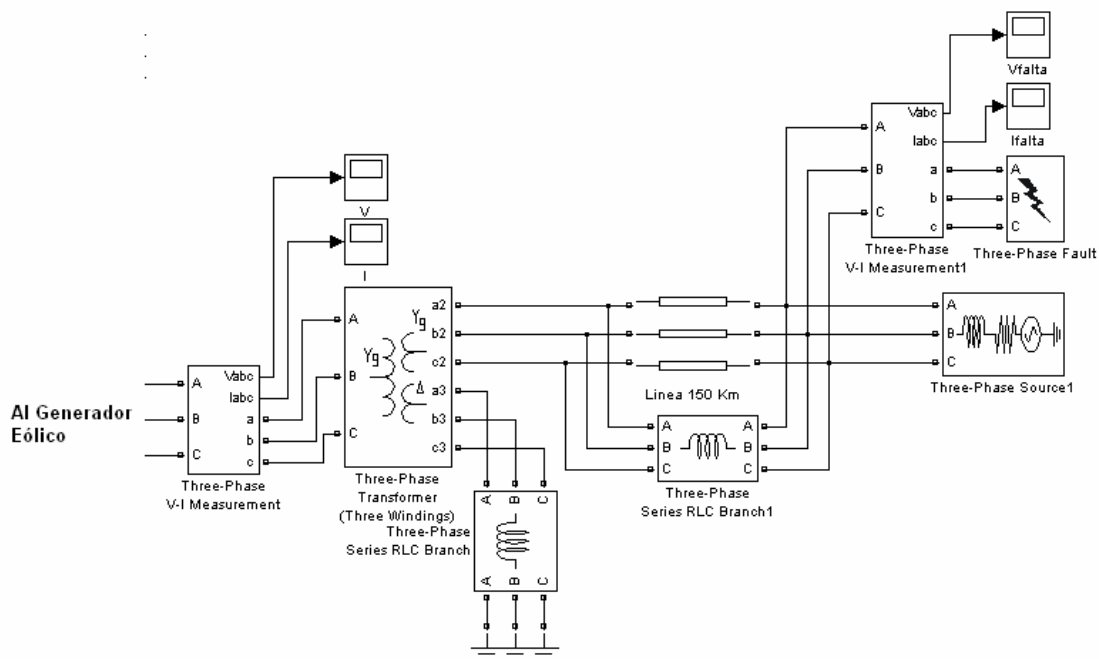


Figura 4.35 Modelo implementado en Simulink del sistema de transmisión simulado [14]

Los resultados de la simulación son los siguientes:

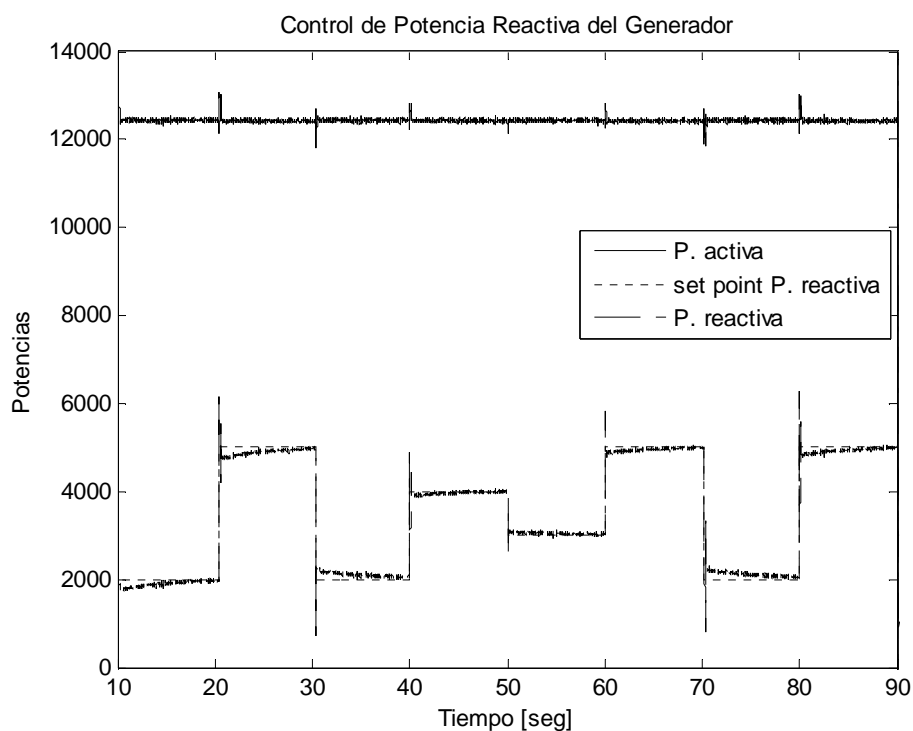


Figura 4.36 Control de Potencia Reactiva

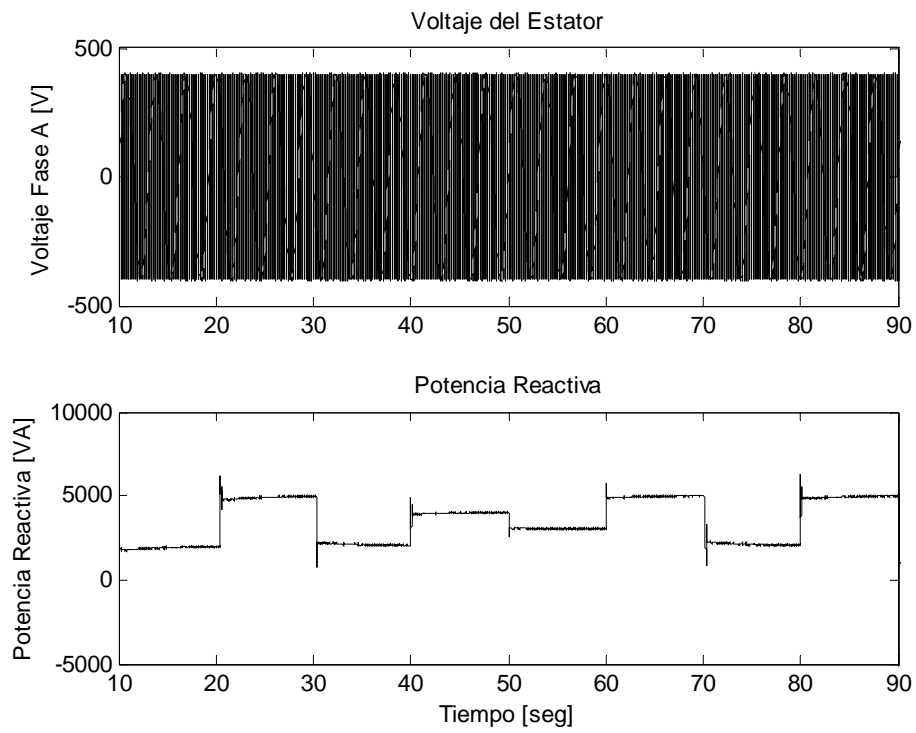


Figura 4.37 Voltaje del Estator (Voltaje Generado)

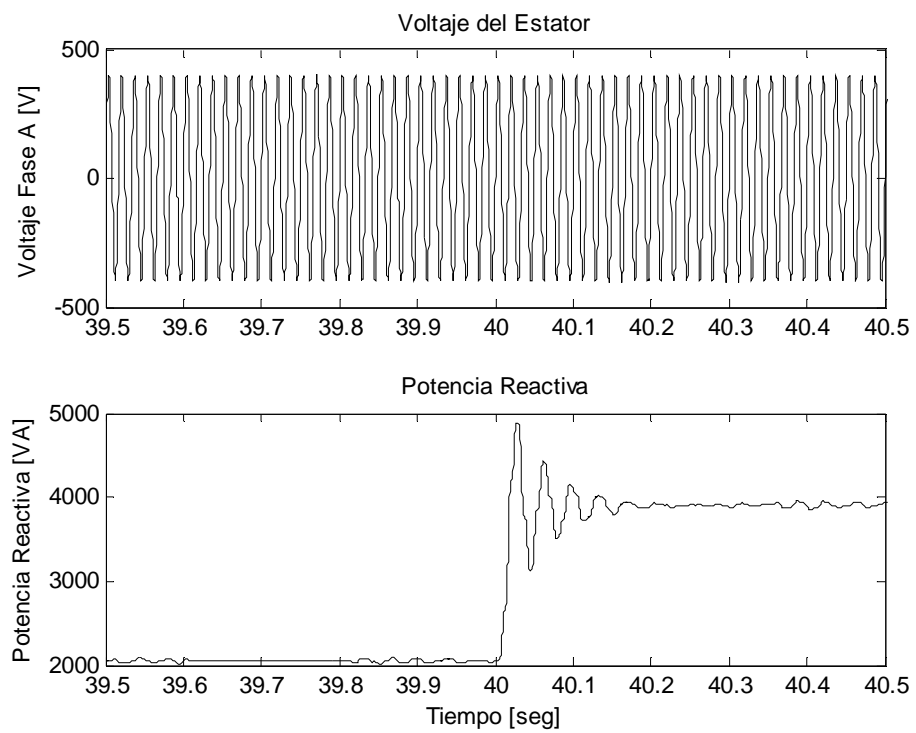


Figura 4.38 Transitorio del Voltaje del Estator en cambio de Set Point de Q

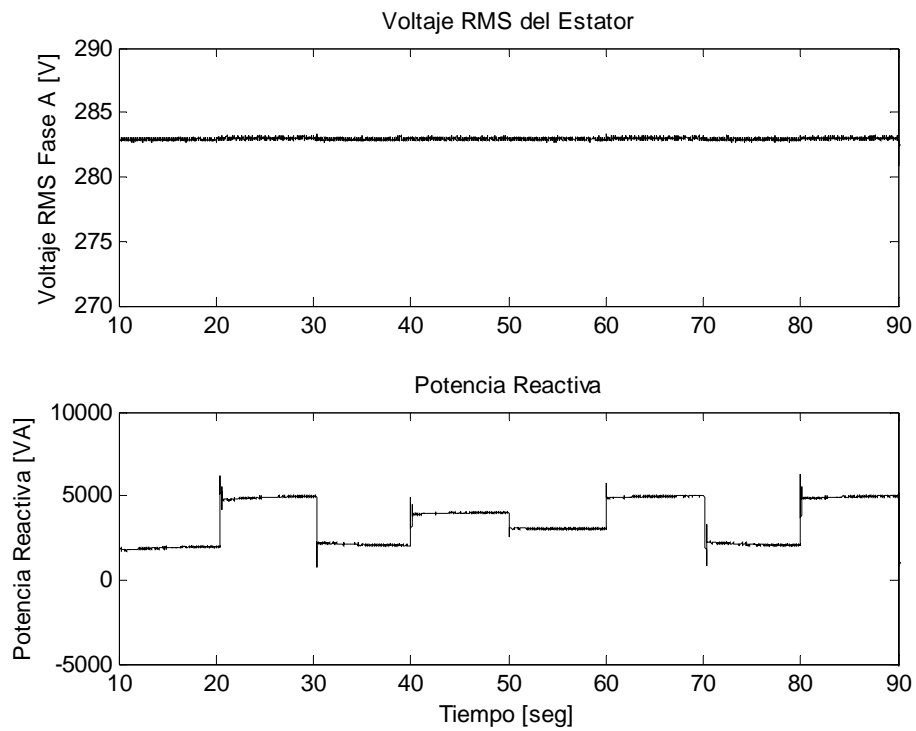


Figura 4.39 Voltaje RMS del Estator (Voltaje Generado)

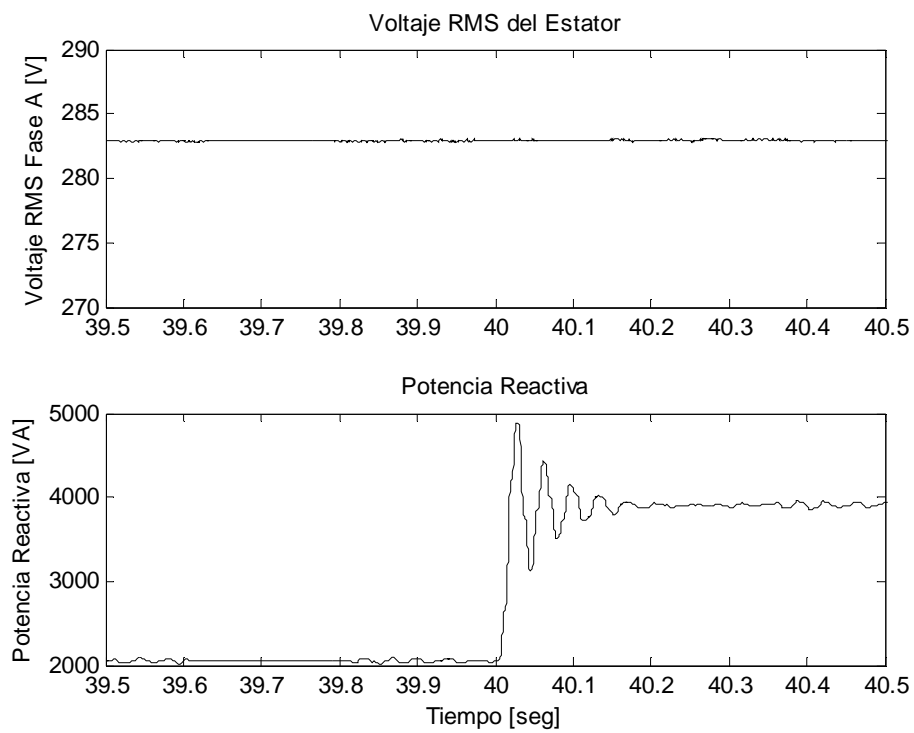


Figura 4.40 Transitorio del Voltaje RMS del Estator en cambio de Set Point de Q

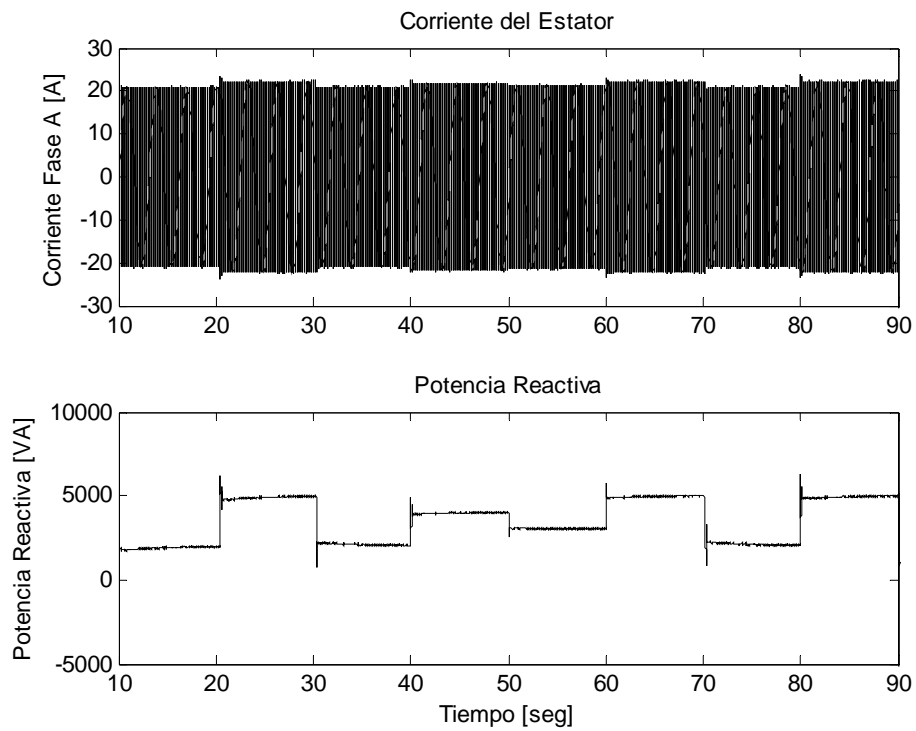


Figura 4.41 Corriente del Estator (Corriente entregada por el Generador)

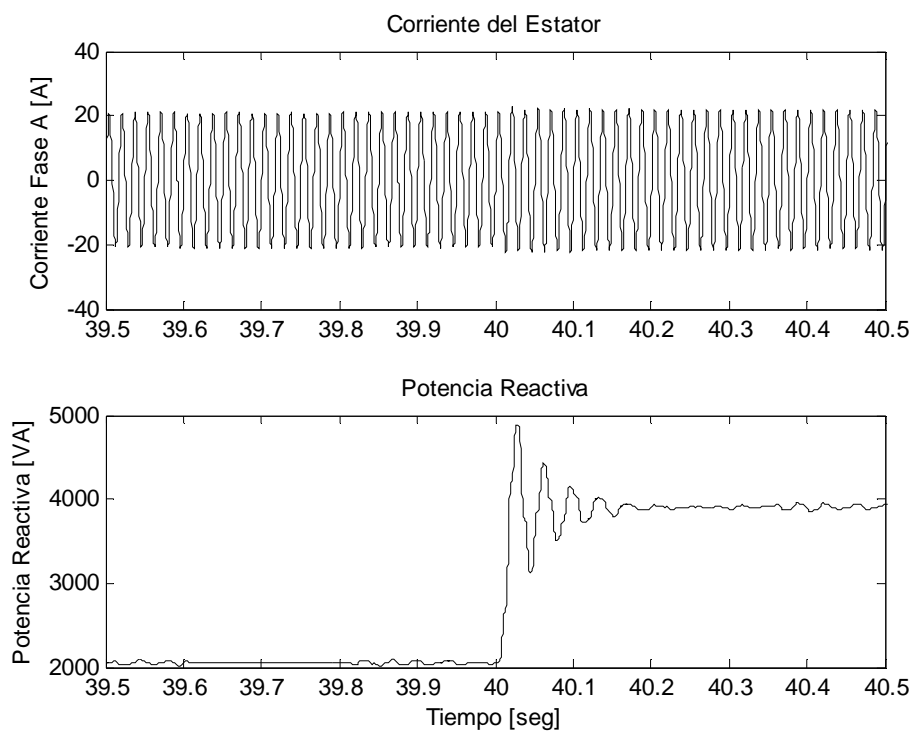


Figura 4.42 Transitorio de Corriente del Estator en cambio de Set Point de Q

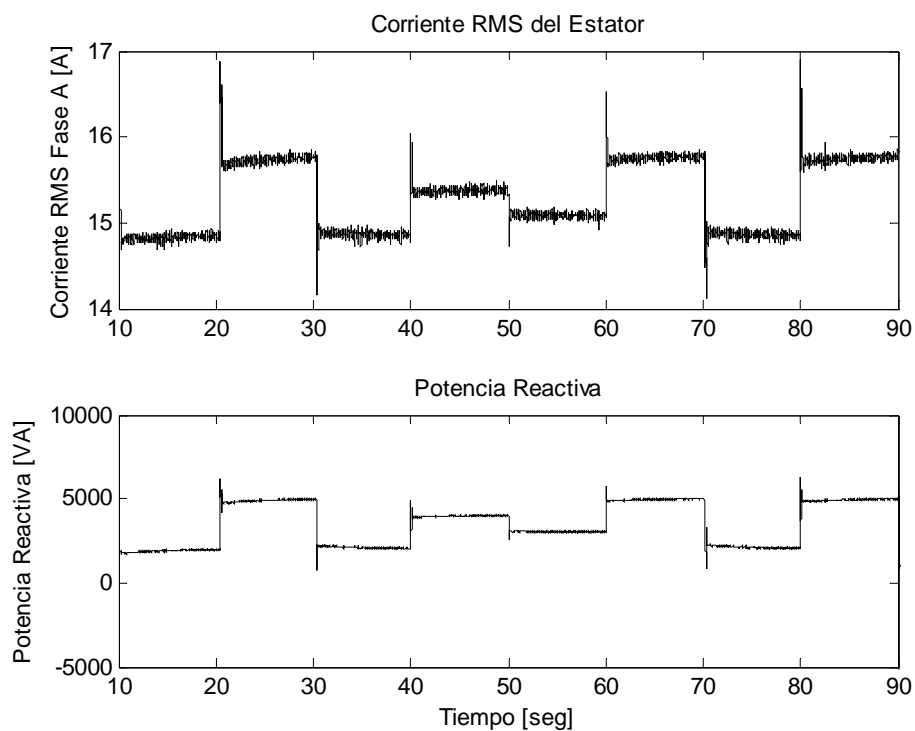


Figura 4.43 Corriente RMS del Estador (Corriente entregada por el Generador)

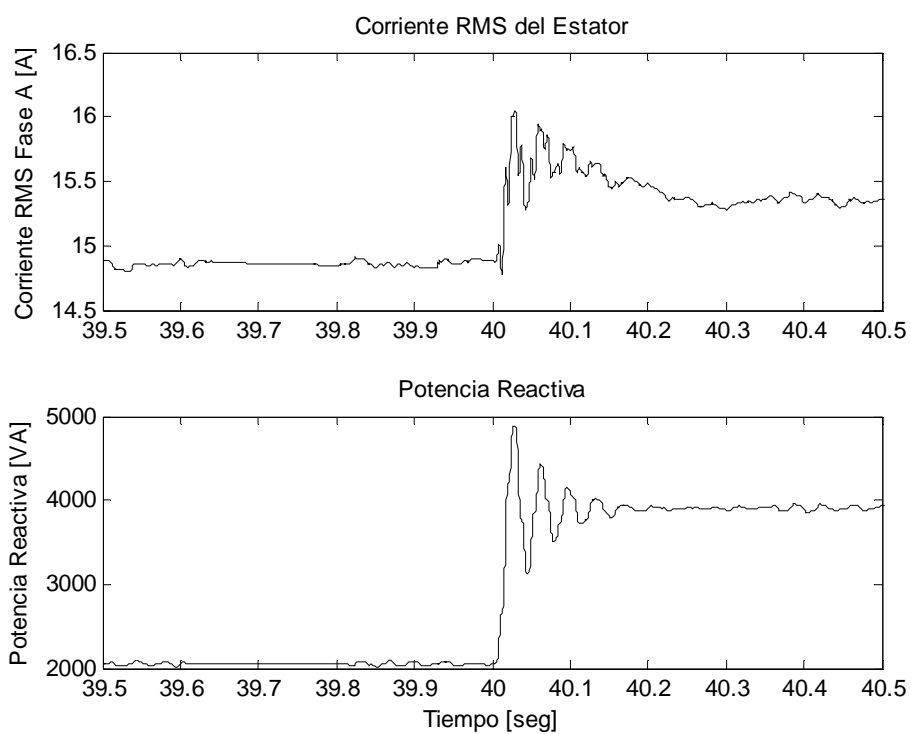


Figura 4.44 Transitorio de Corriente RMS del Estador en cambio de Set Point de Q

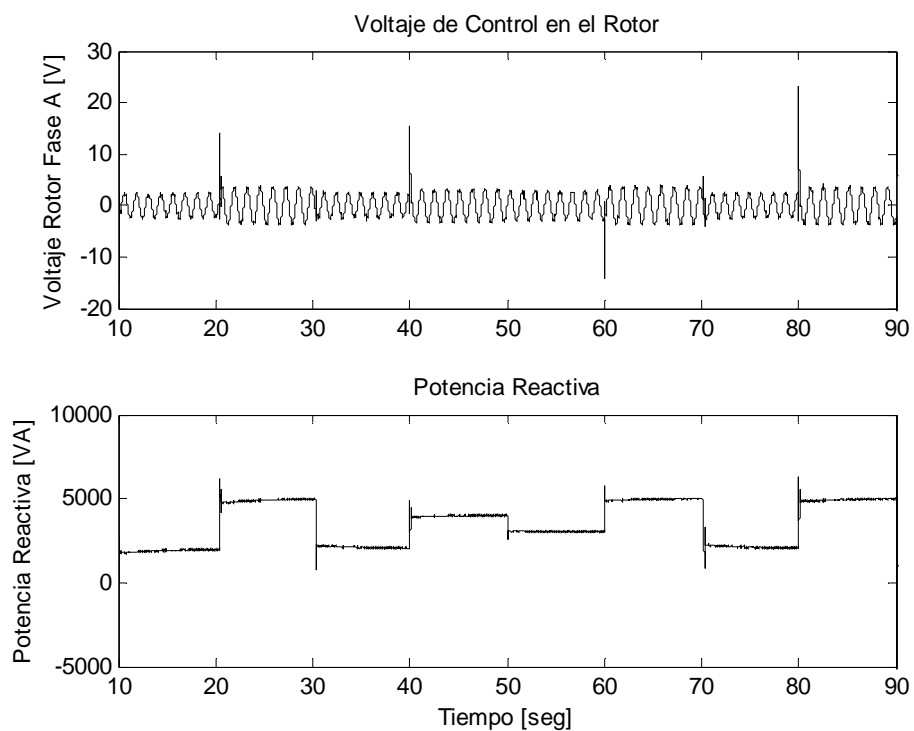


Figura 4.45 Voltaje de Control aplicado al Rotor

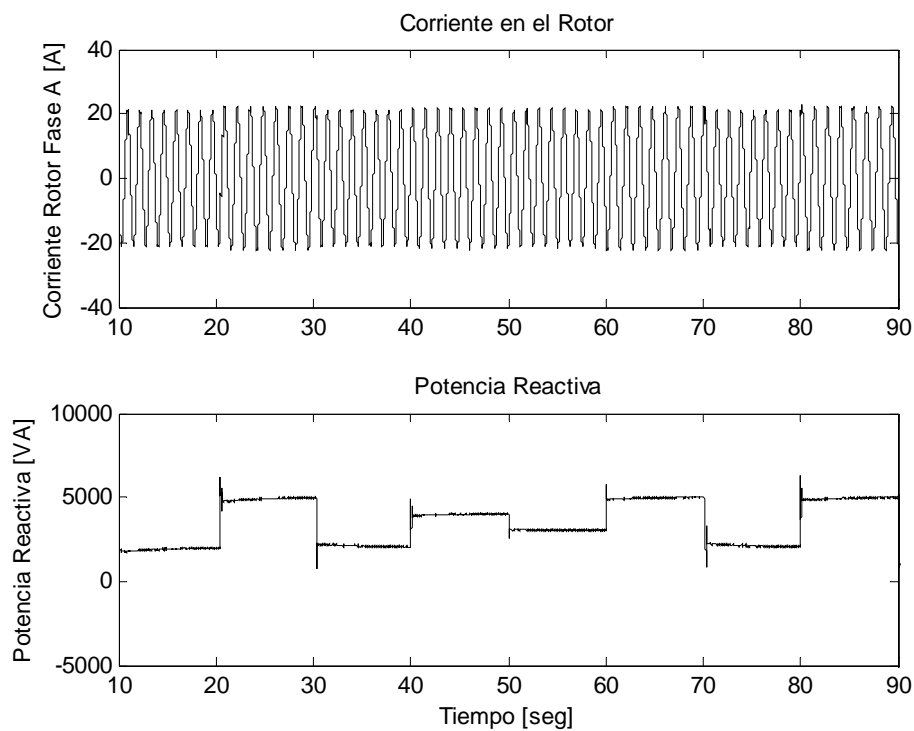


Figura 4.46 Corriente del Rotor durante el control de Q

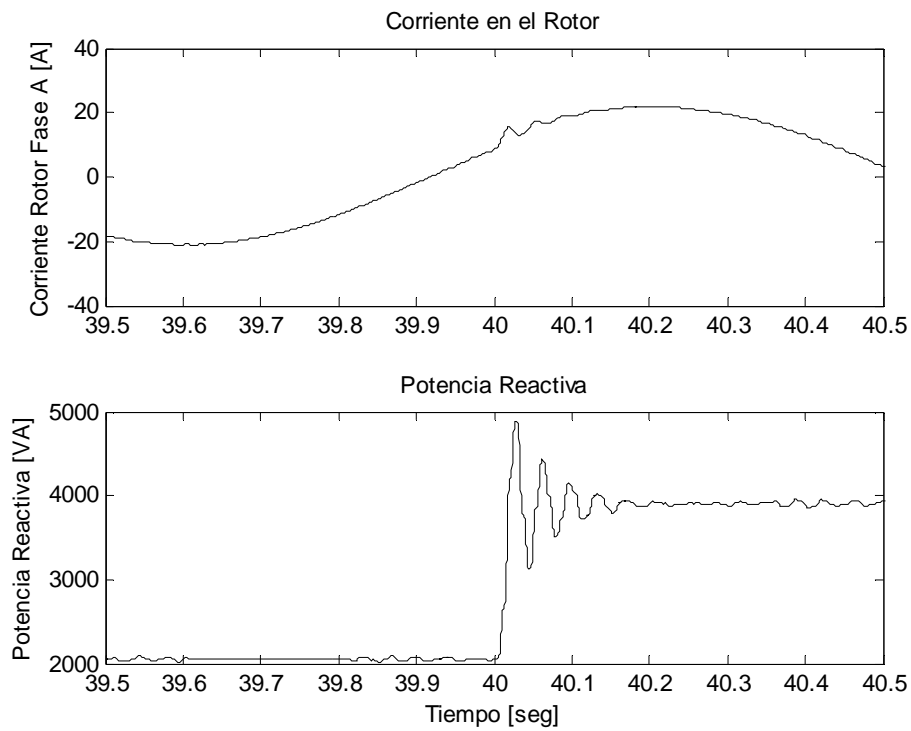


Figura 4.47 Transitorio de Corriente del Rotor en cambio de Set Point de Q

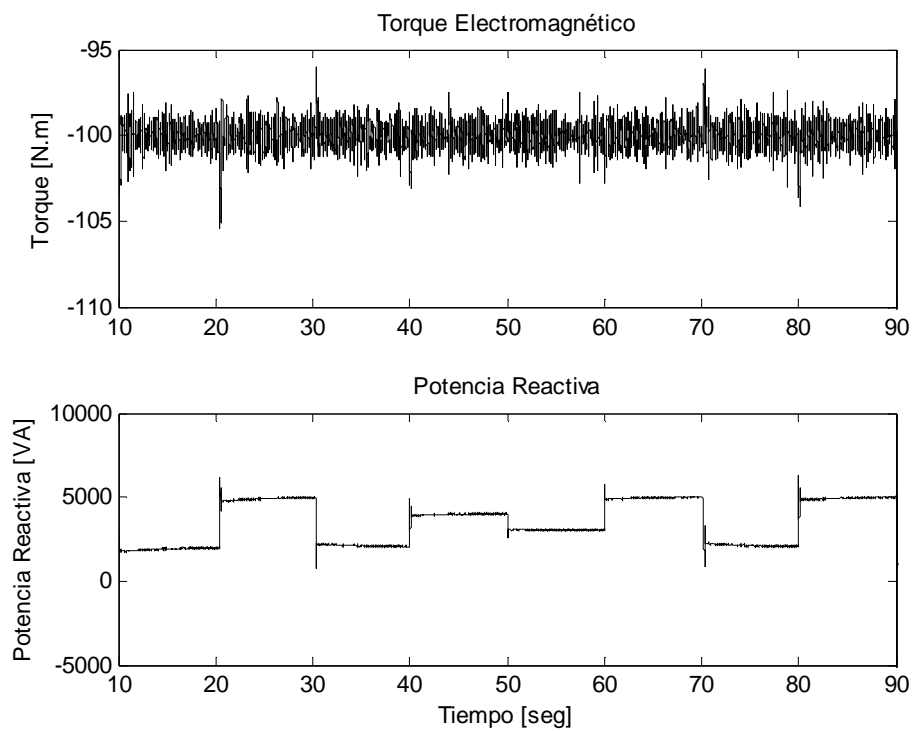


Figura 4.48 Torque Electromagnético durante el Control de Q

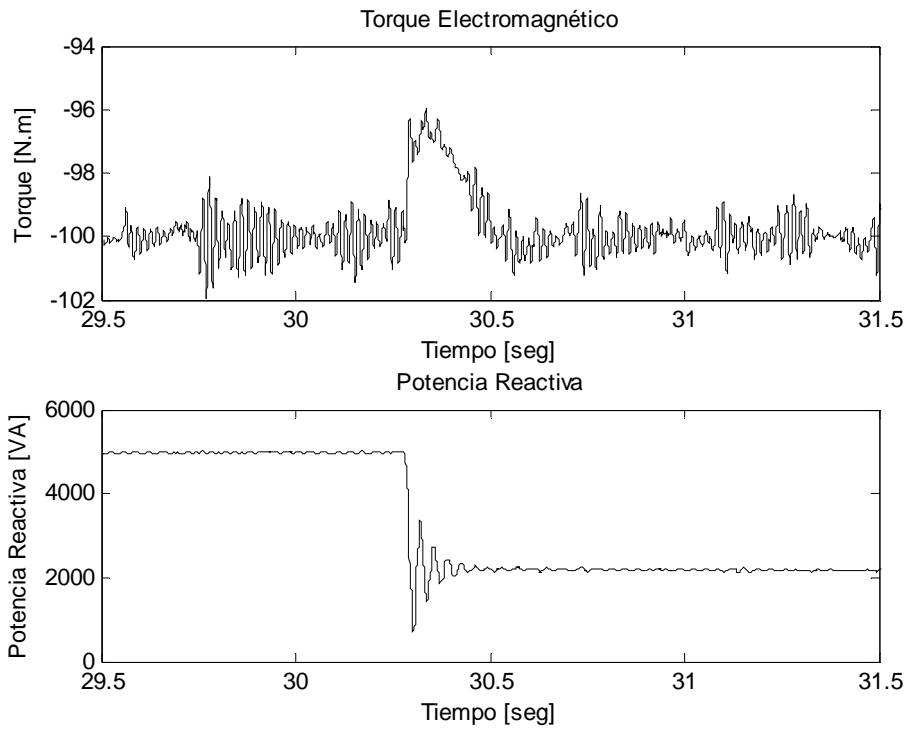


Figura 4.49 Transitorio de Torque Electromagnético en cambio de Set Point de Q

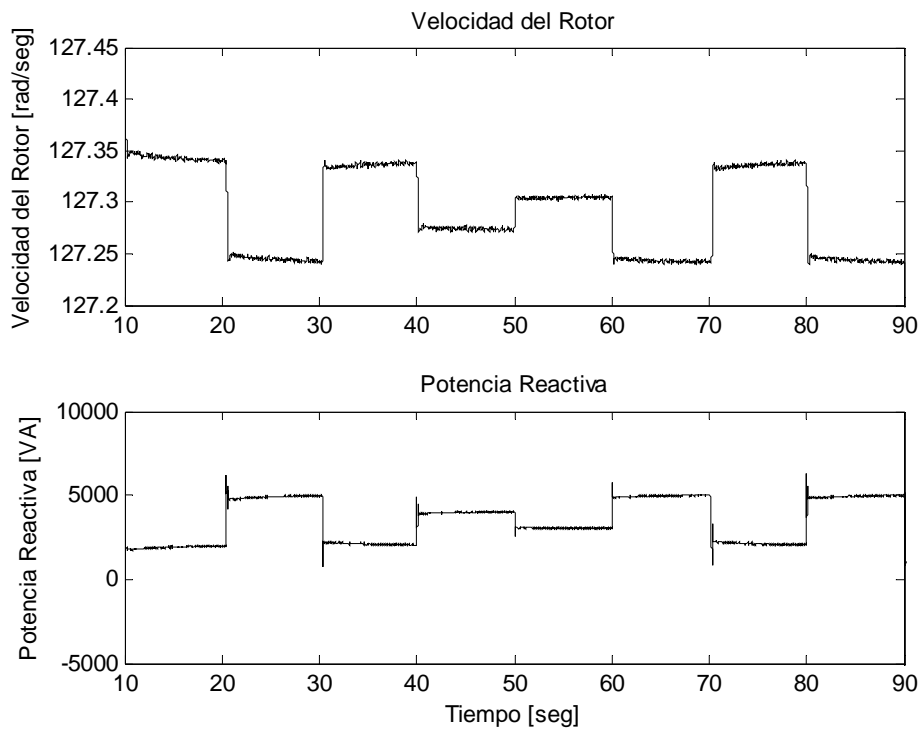


Figura 4.50 Velocidad del Rotor del Generador durante el control de Q

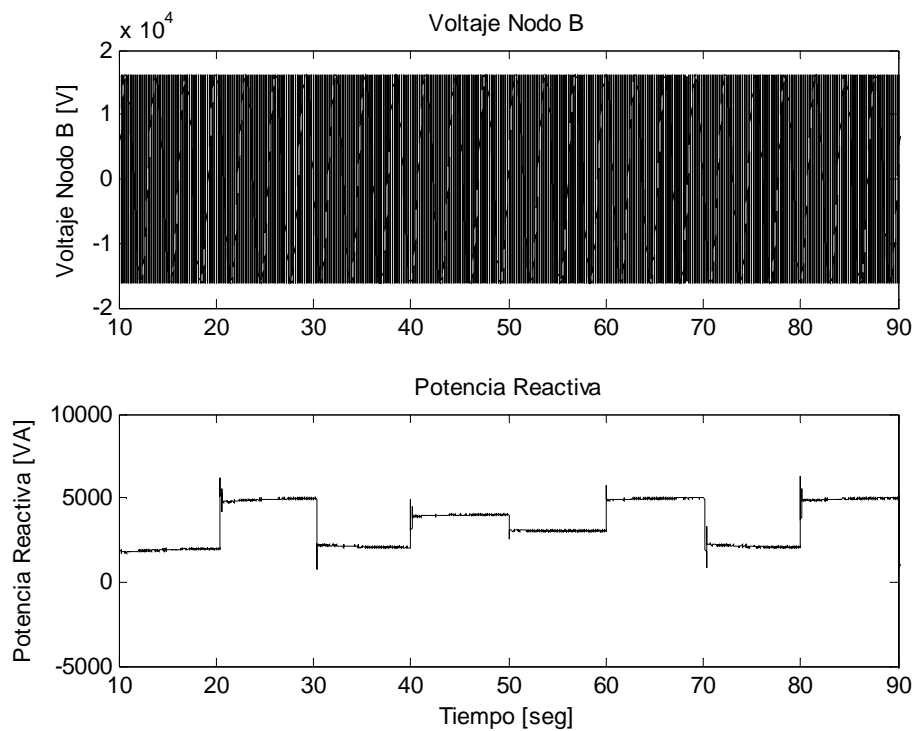


Figura 4.51 Voltaje en el Nodo B durante el control de Q

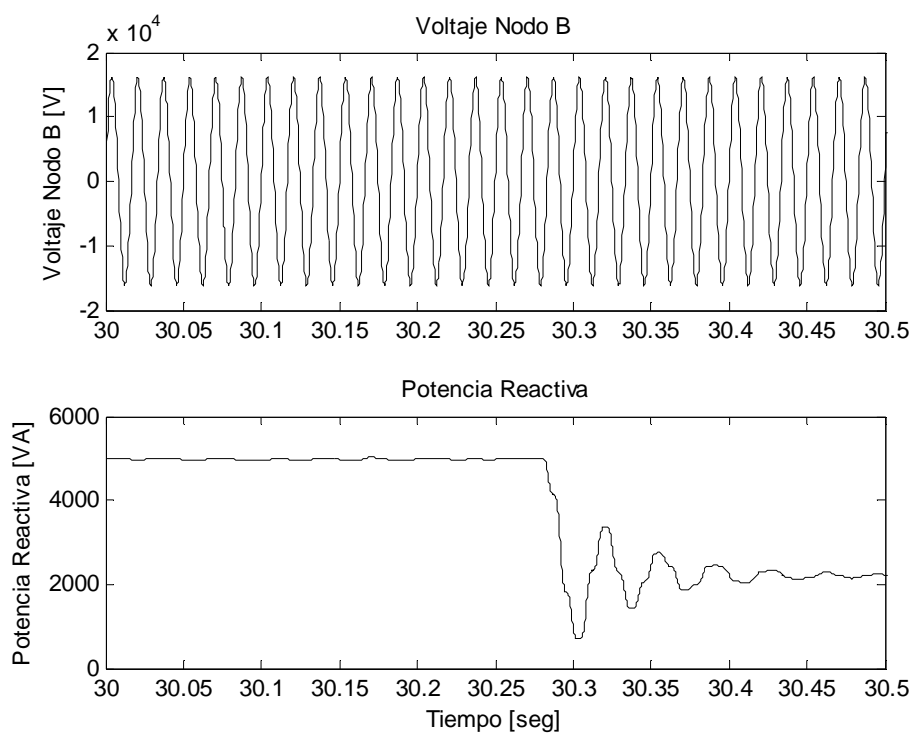


Figura 4.52 Voltaje en el nodo B durante el transitorio de Q

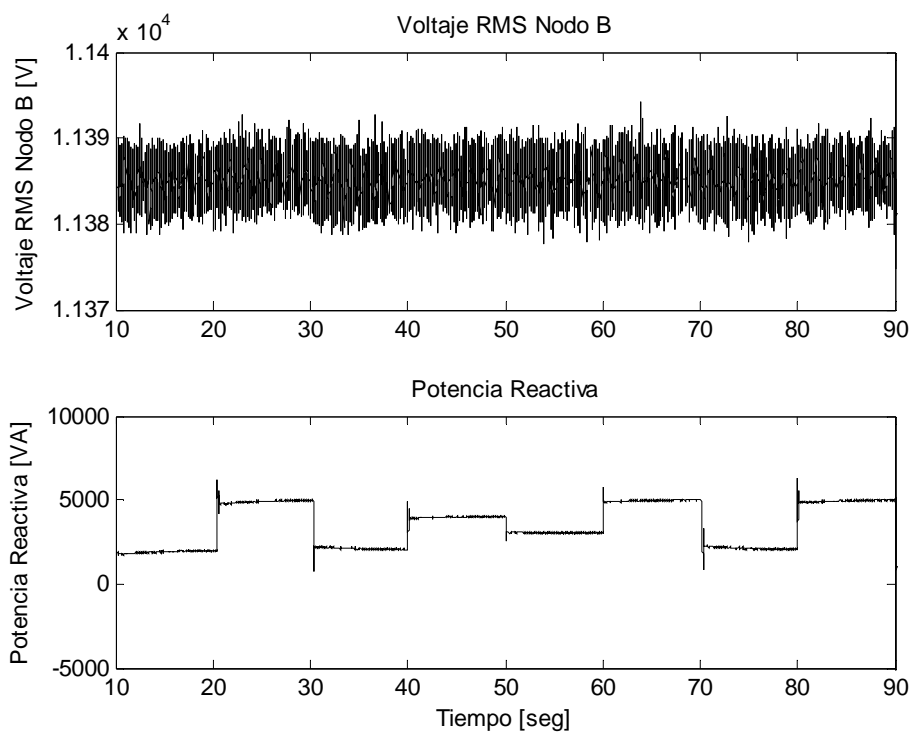


Figura 4.53 Voltaje RMS en el Nodo B durante el control de Q

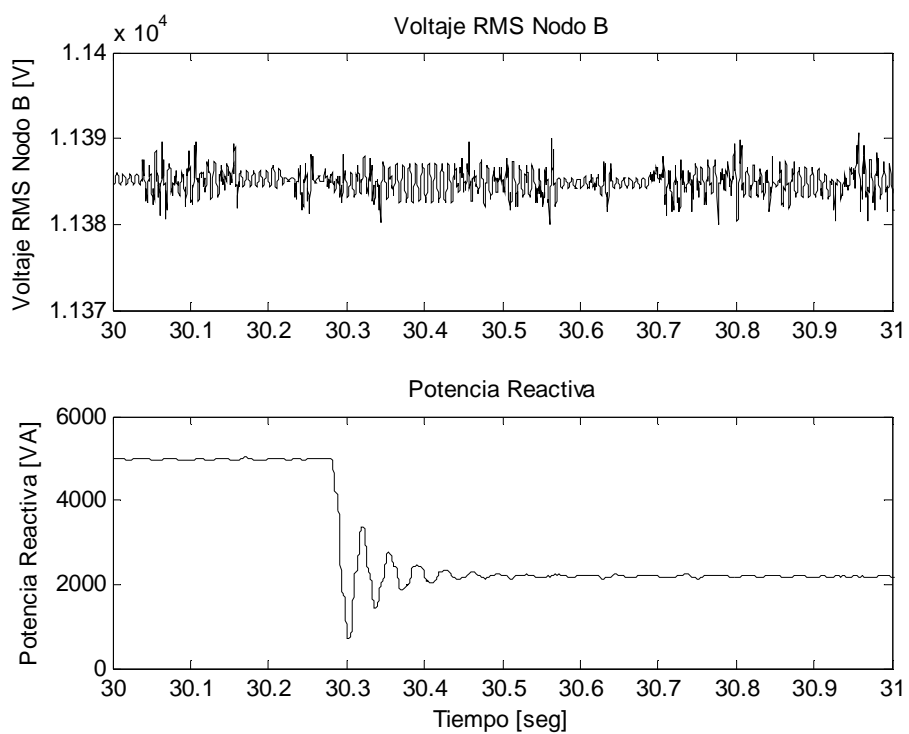


Figura 4.54 Voltaje RMS en el nodo B durante el transitorio de Q

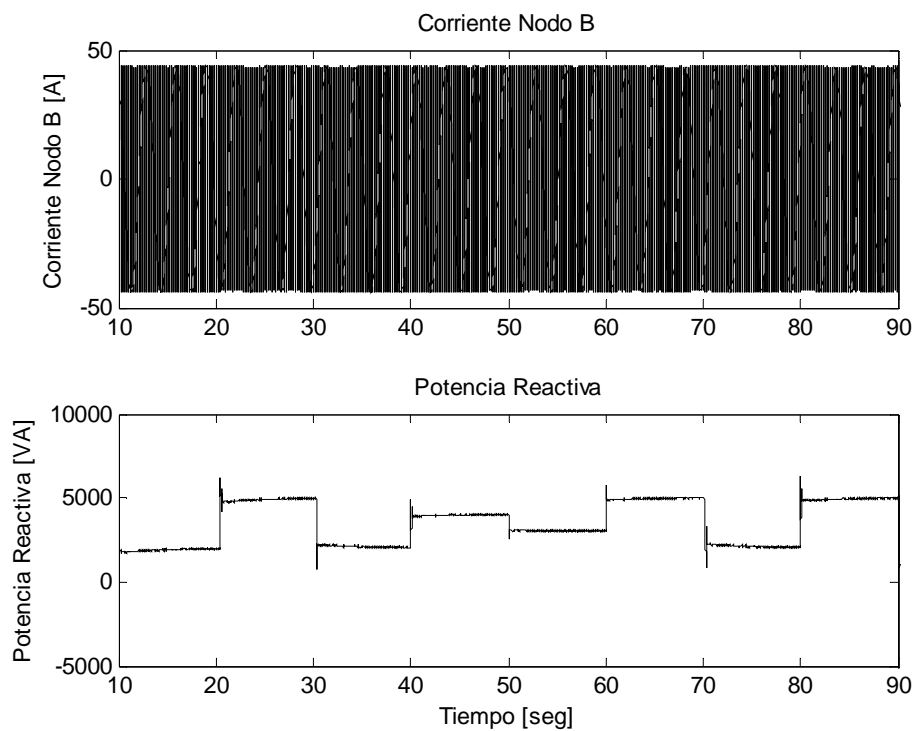


Figura 4.55 Corriente en el nodo B durante el control de Q

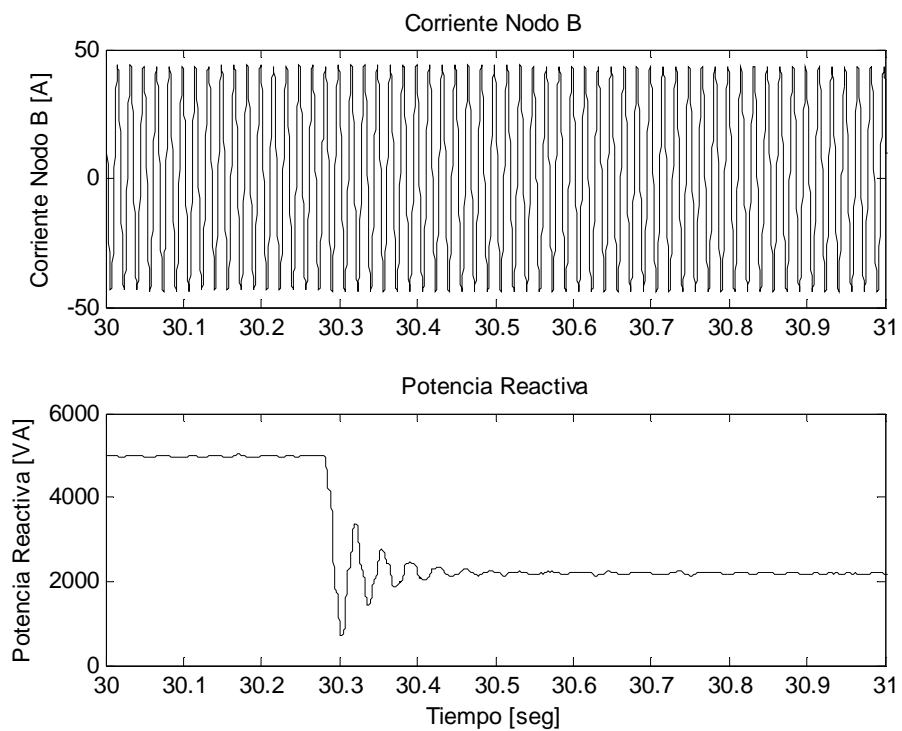


Figura 4.56 Corriente en el nodo B durante el transitorio de Q

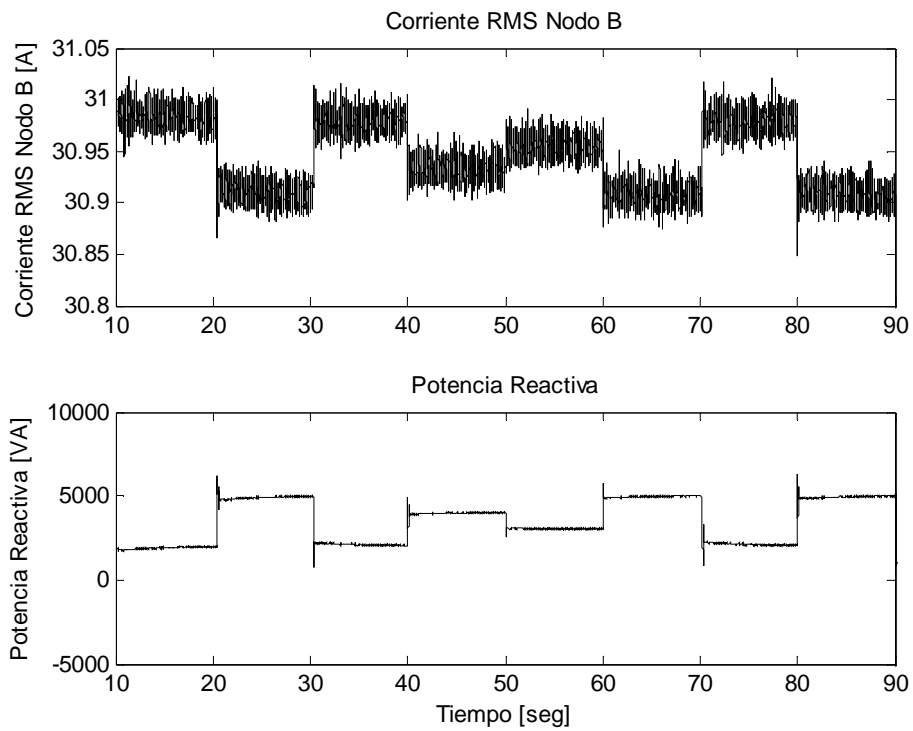


Figura 4.57 Corriente RMS en el nodo B durante el control de Q

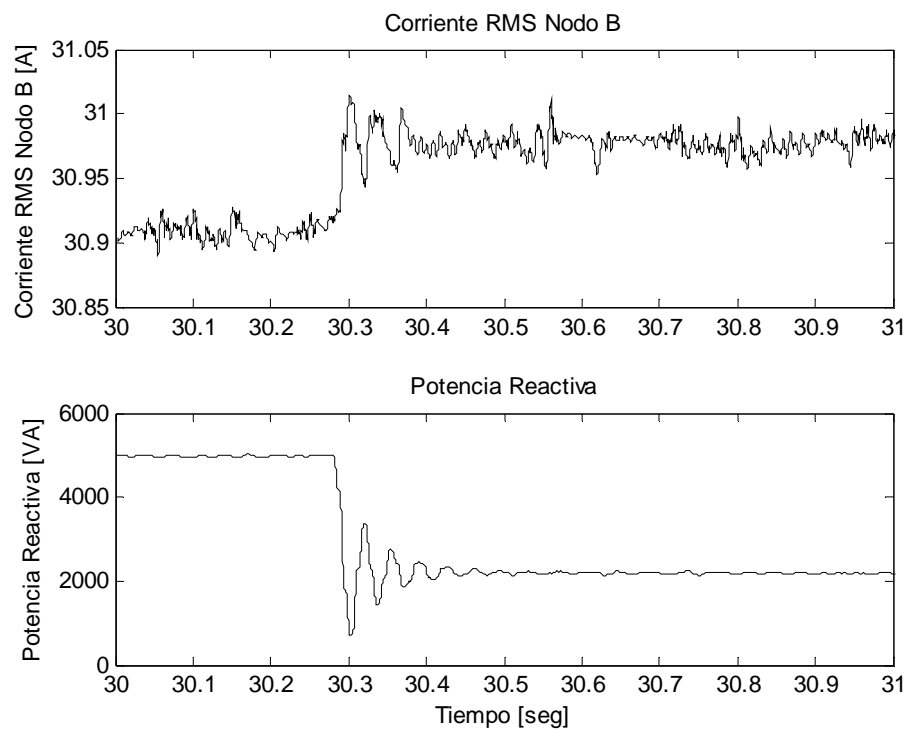


Figura 4.58 Corriente RMS en el nodo B durante el transitorio de Q

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Si se considera que la velocidad del viento y por lo tanto su potencia varia considerablemente, la generación a velocidad variable se muestra como la mejor opción comparada con los sistemas de velocidad fija, si bien la desventaja de este sistema es el costo de la electrónica de potencia que se requiere para el control de potencia y frecuencia. Las ventajas de trabajar con sistemas de velocidad variable es que se puede maximizar la energía capturada (manipular C_p), puede permanecer por mayor tiempo operando a la máxima eficiencia aerodinámica que un sistema de velocidad fija, muestra un mejor desempeño frente a fluctuaciones de potencia y carga que un sistema de velocidad fija.

El control predictivo puede ser usado en una turbina de velocidad variable. El control predictivo se muestra como una conveniente opción de control para el sistema de turbina eólica, porque este puede trabajar con sistemas multivariables, puede tener en cuenta limitaciones de los actuadores y puede operar muy cerca de las restricciones del sistema.

Luego de implementar el control predictivo, al comparar la potencia generada en lazo abierto y en lazo cerrado, se observa que la potencia generada se mantiene cerca al set point (1 MW), a pesar de que la velocidad del viento es variable, esta respuesta es mejor que la obtenida por otros controladores implementados a turbinas de velocidad variable [21].

Si los sistemas de turbina eólica de velocidad variable se muestran como la mejor opción debido a la variabilidad de la velocidad del viento, el generador de inducción de doble alimentación se muestra interesante para este sistema, por la facilidad que presta para trabajar con velocidades menores y mayores a la velocidad sincrónica, pero si bien este tipo de control de generador ya fue propuesto hace algún tiempo aun existen aspectos del mismo deben ser estudiados.

El control del generador de doble alimentación puede ser aplicado y se muestra como una interesante alternativa de control de potencia, para el generador de inducción debido a que se puede realizar un control independiente de la potencia activa y reactiva, pero se debe tener en cuenta que esto es posible mediante el control vectorial de la corriente de rotor, porque es la herramienta que permite trabajar en forma independiente ambas potencias.

Ya realizado el control en el generador de doble alimentación se observa que la potencia reactiva puede variarse mediante el control de la corriente del eje d del rotor, por lo que se el control de la potencia activa de realizarse debe hacerse mediante la variación de la corriente del rotor del eje q .

En un sistema de potencia la mayor parte de la generación eléctrica se obtenía de generadores sincrónicos, mientras que los generadores de inducción eran poco comunes, quizá por lo difícil de controlar la potencia reactiva, sin embargo se muestra una nueva perspectiva del generador de inducción con la introducción del generador de doble alimentación, que al combinarse con el control vectorial, facilitan el desacople del modelo de esta máquina, con lo que se pretende lograr un comportamiento similar al generador sincrónico, donde la potencia activa y reactiva se controlan en forma independiente.

De los resultados de simulación cuando el generador es simulado conectado a una barra infinita se observa que las variaciones en el voltaje no son mayores ni en amplitud, ni en frecuencia, pero si se observa una considerable variación de la corriente que sale del generador. Existe un incremento de su amplitud cuando se incrementa la potencia reactiva, adicionalmente se observa oscilaciones en la amplitud de esta misma corriente en el momento del cambio del set point de la potencia reactiva. En lo correspondiente a la alimentación del rotor se debe recordar que, si bien en forma indirecta, a través del convertor estático esta alimentación también se toma del mismo sistema eléctrico de potencia, por lo que las variaciones de voltaje y corriente del rotor también deben considerarse, por lo que se puede concluir que la principal efecto de la conexión del generador a un sistema eléctrico de potencia es la inyección de armónicos durante las variaciones de potencia reactiva.

Al proceder a simular el sistema eólico en estudio conectado a un sistema de transmisión, se observa que por la pequeña potencia del generador eólico comparada con el sistema de potencia, los efectos son tanto del sistema de potencia sobre el generador eólico, como del eólico sobre el sistema de potencia, esto se evidencia en el torque electromagnético del generador de inducción de doble alimentación, el que al simularse con una barra infinita no presentaba oscilaciones electromecánicas, más que en los cambios de set point de Q; pero al simularse con el sistema de potencia se observa no solo perturbaciones en variaciones del set point, sino que existe variaciones aún cuando la potencia reactiva se ha estabilizado; tomando en cuenta que los problemas de estabilidad dentro de un sistema de potencia se ven reflejados en los rotores de la máquinas como oscilaciones electromecánicas, se puede concluir la necesidad de un control más robusto de la potencia activa, que en el caso específico de este trabajo se había concentrado específicamente en maximizarla y obtener la mayor generación de potencia, y cuyo comportamiento se mostraba satisfactorio conectado a una barra infinita; y si bien las oscilaciones no son considerables, es importante indicar que en un futuro trabajo se debe proceder a un desarrollo de un control robusto que garantice a más de maximización de potencia activa, la posibilidad del control de esta, para garantizar la estabilidad de la potencia; esta tarea podría ser más simple si se considera que la potencia activa puede controlarse usando el control vectorial usado en este trabajo, pero dando mayor énfasis al control de la componente q de la corriente del rotor del generador de inducción de doble alimentación.

Si bien se observa que las variaciones de voltaje tanto en el generador eólico, como en el nodo B, no son considerables, justificado tal vez por la baja potencia del generador en estudio; se puede señalar que el control de la potencia reactiva en un generador de inducción facilitará la regulación de voltaje, al aplicar el método de regulación de tensión por inyección de potencia reactiva en el nodo de interés de regulación; con esto se desplaza al uso de bancos de condensadores o condensadores sincrónicos (máquina sincrónica en vacío), además de las ventajas que conlleva la generación de potencia reactiva en el mismo nodo, como

por ejemplo la reducción de las pérdidas en los conductores al disminuir la componente reactiva entre uno y otro nodo.

5.2 RECOMENDACIONES

El campo de la energía eólica se muestra muy amplio para el desarrollo de la investigación, por lo que se sugiere nuevos trabajos referentes a granjas eólicas, donde cada turbina sea controlada independientemente de tal manera de incrementar el flujo de potencia al sistema eléctrico de potencia.

Se sugiere también el diseño de un control adaptivo de una turbina eólica de velocidad variable pues se muestra como una buena alternativa de control.

Si el principal efecto de la interconexión del generador al sistema eléctrico de potencia es la inyección de armónicos, se debe considerar el estudio del orden de los armónicos y la posibilidad del uso de filtros para evitar su presencia en el sistema eléctrico.

En cuanto al control del generador de inducción de doble alimentación, se sugiere el desarrollo del control de la potencia activa, que se vuelve un atractivo objetivo luego de comprobar en este trabajo que el control vectorial de la corriente del rotor de la máquina facilita el control independiente de potencia activa y reactiva.

En este trabajo el control de la frecuencia de las corrientes del rotor se lo realizó simulando fuentes sinusoidales controlables en frecuencia, amplitud y ángulo de desfasaje, pero cuando este sistema sea implementado debe realizarse usando un convertidor estático el mismo que por su naturaleza trabaja en régimen de conmutación, lo que probablemente causará una inyección de armónicos adicionales al sistema eléctrico de potencia, se sugiere entonces que en un posterior trabajo se incluya el efecto del convertidor estático y la corrección de armónicos respectiva.

El desempeño del controlador de potencia activa y reactiva es satisfactorio en el generador estudiando en este caso, pero es recomendable la experimentación con generadores de mayor potencia, que al conectarse a un sistema eléctrico de

potencia sea buena parte de la energía generada, puesto que en el presente trabajo la influencia sobre el sistema eléctrico de potencia no es mayor debido a la baja potencia del generador.

REFERENCIAS

- [1] S. Domínguez and M. D. McCulloch, “Control Method Comparison of Doubly Fed Wind Generators connected to the Grid by Asymmetric Transmission Lines”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, pp. 986-991, July/August 2000.
- [2] S. Bhowmik, R. Speén, and J.H.R. Enslin, “Performance Optimization for Doubly fed Wind Power Generation Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 4, pp. 949-958, July/August 1999.
- [3] H. Polinder, W.H. de Haan, M.R. Dubois, and J. G. Slootweg, “Basic Operation Principles and Electrical Conversion Systems of wind Turbines”, Electrical Power Processing Group of Delft University of Technology, Paper ref: 069.
- [4] S. H. Jangamshetti, and, V. Gururprasada Rau, M.R. Dubois, “Site Matching of Wind Turbine Generators: A Case Study, Basic Operation Principles and Electrical Conversion Systems of wind Turbines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No.4, pp. 1537-1543, Dec 1999.
- [5] R. Chedid, F. Mrad, and, M. Basma, “Intelligent Control of a Class of Wind Energy Conversion Systems ”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No.4, pp. 1598-1604, Dec 1999.
- [6] K. E. Johnson, L. Y. Pao, M. J. Balas, and L. J. Fingersh, “Control of Variable-Speed Wind Turbine”, IEEE Control Systems magazine, Vol. 26, No.3, pp. 70-81, June 2006.
- [7] Danish Wind Industry Association, “Power Control of Wind Turbine”, www.windpower.org, June 2003.
- [8] D. Hansen, P. Sørensen, L. Janosi, and J. Bech, “Wind Farm Modeling for Power Quality”, The 27th Annual Conference of the IEEE Industry electronics Society, pp. 1959-1964, 2001.

- [9] Y. A. Kazachkov, J. W. Feltes, and R. Zavadil, *“Modelling Wind Farms for Power System Stability Studies”*, IEEE 2003.
- [10] M. Parfit, *“Future Power. Where will the world get its next energy fix”*, National Geographic, August 2005.
- [11] Z. Chen, and F. Blaabjerg, *“WIND ENERGY-The World’s Fastest Growing Energy Source”*, Power Electronics Society, Vol. 18, No.3, Third Quarter 2006.
- [12] J. M. Maciejowski, *“Predictive Control with Constraints”*, Prentice Hall, vol. 36, pp. 986-991, July/August 2000.
- [13] D. Hansen, P. Sørensen, F. Blaabjerg y J. Becho, *“Dynamic Modelling of wind farm grid integration”*, Wind Engineering, vol. 26, No. 4, pp. 191-208, 2004.
- [14] M. I. Zamora, A. J. Mazón, E. Fernandez, K.J. Sagastabeitia, I. Albizu, P. Eguia, E. Torres, V. Valverde, *“Simulación de Sistemas Eléctricos”*, Pearson, Prentice Hall, pp. 499, Madrid, 2005.
- [15] C. M. Ong, *“Dynamic Simulation of Electrical Machinery using MATLAB/Simulink”*, Prentice Hall, pp. 626, New Jersey, 1998.
- [16] H. Hansen, A. Hansen, T. J. Larsen, S. Øye, P. Sørensen and P. Fuglsang, *“Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine”*, Risø National Laboratory, Roskilde-Denmark, January 2005.
- [17] B. K. Bose, *“Power Electronics and Variable Frequency Drives”*, IEEE Press Marketing, United States of America, 1997
- [18] W. E. Leithead, and B. Connor, *“Control of variable speed wind turbines: dynamic models”*, INT. J. CONTROL, Vol. 73, No.13, pp. 1173-1188, 2000.
- [19] W. E. Leithead, and B. Connor, *“Control of variable speed wind turbines: design task”*, INT. J. CONTROL, Vol. 73, No.13, pp. 1189-1212, 2000.

- [20] H. Siegfried, *“Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”*, John Wiley & Sons Ltd., 1998 ISBN 0-471-97143-X. (Referido en la ayuda de SimPowerSystems de MATLAB)
- [21] D. Leith, R. Shorten, W. E. Leithead, O. Mason and P. Curran, *“Issues in the Design of Switched Linear Control Systems: A Benchmark Study”*, The Hamilton Institute Report, 2002.
- [22] W. E. Leithead, S. A. de la Salle, D. Reardon and M. J. Grimble, *“Wind Turbine Control System Modelling and Design Phase I and II”*, D. En. Report prepared by University of Strathclyde Report No. ETSUWN/6012.
- [23] C. J. Carrillo y J. Cidrás, *“Compensador Estático de Potencia Reactiva”*, Universidad de Vigo, 2003.
- [24] J. J. Grainger y W.D. Stevenson *“Análisis de Sistema de Potencia”*, Mc Graw Hill, primera edición, pp. 740, 1996.
- [25] A. Sánchez A. *“Data-driven control design of wastewater treatment systems”*. PhD thesis. Industrial Control Centre, University of Strathclyde, 2004.
- [26] D. W. Novotny, and T. A. Lipo, *“Vector Control and Dynamics of AC”*. Oxford Science Publications, 2006.
- [27] J. R. Saenz, A. Tapia, G. Tapia, F. Jurado, X. Ostolaza, and I. Subia, *“Reactive Power Control of a Wind Farm Through Different Control Algorithms”*. IEEE PEDS 2001. Indonesia.
- [28] C. Bordóns Alba, *“Control Predictivo: Metodología, Tecnología y Nuevas Perspectivas”*. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, Aguadulce, Almería 2000.
- [29] K. Ogata, *“Ingeniería de Control Moderno”*. University of Minnesota, Tercera Edición, Prentice Hall, 1997.

- [30] P. Kundur, "Power System Stability and Control". Power System Engineering Series, Electric Power Research Institute, McGraw Hill, 1993.