

MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO

Investigador
Ing. HERNANDO GONZÁLEZ ACEVEDO

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Maestría en Ingeniería: Área Electrónica
Bucaramanga, Febrero 21 de 2008

MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO

Investigador

Ing. HERNANDO GONZÁLEZ ACEVEDO

Director

Dr. HERMANN R. VARGAS T.

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Maestría en Ingeniería: Área Electrónica
Bucaramanga, Febrero 21 de 2008**

DEDICO ESTE LIBRO A MI FAMILIA:

ORLANDO GONZÁLEZ,

ROSA ACEVEDO Y

CLAUDIA PATRICIA GONZÁLEZ ACEVEDO,

POR SU APOYO INCONDICIONAL

Y SU COMPAÑÍA EN ESTE TIEMPO

HERNANDO GONZÁLEZ ACEVEDO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Hermann Raúl Vargas por su colaboración y dedicación en el desarrollo de este trabajo, por darme la oportunidad de participar como investigador en el Grupo GISEL y ayudarme a desempeñarme como tal.

Agradezco al Dr. Rodolfo Villamizar por su valiosa asesoría brindada en el tema *diseño de reguladores robustos*, uno de los tópicos centrales de este trabajo de investigación.

Agradezco al Msc. Henry Arguello por su valiosa asesoría brindada en el tema algoritmos genéticos, herramienta utilizada en el diseño de los controladores para turbinas eólicas de velocidad variable.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 13

2. ENERGÍA EÓLICA..... 14

2.1 CONTROL DE UN AEROGENERADOR..... 17

2.2 POTENCIAL EÓLICO EN COLOMBIA 19

2.3 PUBLICACIONES RELACIONADAS CON EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN..... 19

2.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 21

3. MODELO MATEMÁTICO DE UNA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDAD VARIABLE23

3.1 MODELO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO 23

3.2 MODELO AERODINÁMICO DE LA TURBINA. 29

3.3 MODELO DEL SISTEMA MECÁNICO. 30

3.4 MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO (DFIG) 32

3.4.1 Sistema de ecuaciones en el marco de referencia natural. 32

3.4.2 Sistema de ecuaciones en el marco $dq0$ 35

3.5 CONTROL POR ORIENTACIÓN DEL FLUJO DEL ESTATOR 38

3.6 CONTROL DE LA VELOCIDAD MECÁNICA DE LA TURBINA 41

3.6.1 Control por entrada en pérdida aerodinámica..... 41

3.6.2 Control por variación del ángulo de paso..... 42

3.7 LINEALIZACIÓN 43

4. DISEÑO DE CONTROLADORES UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS..... 45

4.1 ÍNDICES DE DESEMPEÑO 45

4.2 CONTROLADOR PI 46

4.3 CONTROLADOR ROBUSTO HINF 49

4.4 CONTROLADOR LQG 51

5. CONTROL DE LA POTENCIA Y LA VELOCIDAD MECÁNICA DE UN GENERADOR DFIG..... 55

5.1 CONTROL DE LA VELOCIDAD MECÁNICA DE UN GENERADOR DFIG. 56

5.2	CONTROL DE LA POTENCIA ACTIVA Y EL FACTOR DE POTENCIA DE UN GENERADOR DFIG.	58
5.3	CONTROL DE UN GENERADOR DFIG CON UN REGULADOR ROBUSTO HINF.....	69
5.4	CONTROL DE UN GENERADOR DFIG CON UN REGULADOR LQG.....	76
5.5	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA DE CONTROL	81
6.	CONCLUSIONES	86
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	88
8.	ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Generadores eólicos. a) Turbina de velocidad fija. b) Turbina de velocidad variable. c) Turbina de velocidad variable con generador síncrono multipolo.....	16
Fig. 2 Componentes de un aerogenerador eólico	17
Fig. 3 Espectro de Kaimal	25
Fig. 4 Diagrama de bloques del modelo dinámico de la velocidad del viento	28
Fig. 5 PSD para una secuencia de datos de la velocidad del viento	28
Fig. 6 Coeficiente de potencia.....	30
Fig. 7 Modelo de cuatro masas para el sistema mecánico	31
Fig. 8 Generador de inducción en el sistema de coordenadas ABC.....	33
Fig. 9 Generador de inducción en el sistema de coordenadas dq0.....	36
Fig. 10 Diagrama fasorial del control por orientación del flujo del estator.....	40
Fig. 11 Control por orientación del flujo del estator a partir de reguladores PI	48
Fig. 12 Control de la velocidad mecánica a partir de un regulador PI.....	49
Fig. 13 Diagrama de bloques de un regulador LQG. a) Regulador de potencia. b) Regulador de Velocidad.....	52
Fig. 14 Diagrama de bloques del modelo dinámico de una turbina eólica	55
Fig. 15 Respuesta transitoria de la velocidad para una entrada escalón con un regulador PI. a) Velocidad mecánica del generador. b) Ángulo de paso	58
Fig. 16 Control por ángulo de paso - Velocidad del viento variable	60
Fig. 17 Control por ángulo de paso - Velocidad del viento nominal de la turbina.....	61
Fig. 18 Modos de operación de un generador DFIG. a) Modo sub-síncrono. b) Modo sobre-síncrono.....	62
Fig. 19 Respuesta transitoria de la corriente ante una entrada escalón con un regulador PI. a) Corriente del rotor Idr. b) Voltaje del rotor Vdr.	63
Fig. 20 Inestabilidad del generador DFIG.....	64
Fig. 21 Modo sub-síncrono y sobre-síncrono. a) Velocidad del viento. b) Velocidad mecánica. c) Potencia activa. d) Factor de potencia	66
Fig. 22 Modo sobre-síncrono. a) Velocidad mecánica b) Potencia activa c) Factor de potencia.....	68

Fig. 23 Respuesta transitoria de la corriente ante una entrada escalón con un regulador Hinf. a) Corriente del rotor I_{dr} . b) Voltaje del rotor V_{dr} 70

Fig. 24 Respuesta transitoria de la velocidad para una entrada escalón con un regulador robusto Hinf. a) Velocidad mecánica del generador. b) Ángulo de paso 72

Fig. 25 Estructura anti-windup para un controlador robusto Hinf. a) Regulador de la corriente del rotor. b) Regulador de la velocidad mecánica..... 73

Fig. 26 Control PI y Control Robusto. a) Velocidad del viento. b) Velocidad mecánica. c) Potencia activa. d) Factor de potencia 75

Fig. 27 Control de la potencia activa para una velocidad media del viento de 11 m/s 76

Fig. 28 Respuesta transitoria de la corriente ante una entrada escalón con un regulador LQR. a) Corriente del rotor I_{dr} . b) Voltaje del rotor V_{dr} 79

Fig. 29 Respuesta transitoria de la velocidad para una entrada escalón con un regulador LQR. a) Velocidad mecánica del generador. b) Ángulo de paso 80

Fig. 30 Control LQG y Control Robusto. a) Velocidad del viento. b) Velocidad mecánica. c) Potencia activa. d) Factor de potencia 83

Fig. 31 Error del estimador de Kalman..... 84

Fig. 32 Inversor AC/AC – Modo sub-síncrono y sobre-síncrono. a) Flujo de potencia. b) Tensión del rotor..... 84

Fig. 33 Inversor AC/AC – Modo sobre-síncrono. a) Flujo de potencia. b) Tensión del rotor 85

Fig. 34 Diagrama de bloques del lazo de control para la corriente I_{dr} 111

Fig. 35 Función de aptitud para el diseño del regulador PI 117

Fig. 36 Diagrama de bloques del lazo de control para la velocidad mecánica del generador 117

Fig. 37 Función de aptitud para el diseño del regulador robusto 122

Fig. 38 Diagrama de bloques del lazo de control LQR para la velocidad mecánica del generador 124

Fig. 39 Función de aptitud para el diseño del LQR 127

Fig. 40 Diagrama de bloques del lazo de control LQR para la corriente del rotor I_{dr} 128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador PI – Velocidad mecánica del generador 56

Tabla 2 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador PI – Corriente del rotor Idr 59

Tabla 3 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador robusto Hinf – Corriente del rotor Idr 69

Tabla 4 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador robusto Hinf – Velocidad mecánica del generador 71

Tabla 5 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador LQR – Corriente del rotor Idr 77

Tabla 6 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador LQR – Velocidad mecánica del generador 77

Tabla 7 Estimador de Kalman 80

Tabla 8 Coeficientes de la función de transferencia para caracterizar el espectro de Kaimal 92

Tabla 9 Coeficientes de la función de transferencia para caracterizar el fenómeno de muestreo rotacional 93

Tabla 10 Coeficiente de torque para una turbina de 2 MW 98

Tabla 11 Especificaciones técnicas de la turbina NM 2000/82 99

Tabla 11 Parámetros eléctricos de un Generador DFIG de 2 MW 99

Tabla 13 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador PI – Velocidad mecánica del generador 109

Tabla 14 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador robusto Hinf – Velocidad mecánica del generador 119

Tabla 15 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador LQR – Velocidad mecánica del generador 124

RESUMEN

TITULO.

MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO*

AUTOR.

Ing. HERNANDO GONZÁLEZ ACEVEDO**

PALABRAS CLAVES.

Turbina eólica, Modelo del viento, Sistema Mecánico, Generador DFIG, Control por orientación del flujo del estator, Control ángulo de paso

DESCRIPCIÓN.

La utilización del viento como medio para generar energía eléctrica con grandes aerogeneradores en la última década ha crecido en capacidad instalada, debido a que es una fuente inagotable, no contaminante y de libre acceso. Su integración con los sistemas de potencia se ha convertido, hoy en día, en tema de investigación, buscando en primer lugar determinar modelos dinámicos de cada uno de los subsistemas que hacen parte de una turbina eólica realizando a partir de ellos estudios del impacto en el sistema eléctrico. En segundo lugar, analizando y proponiendo nuevas técnicas de control que permitan regular la potencia activa y reactiva que entrega el generador de inducción.

El control de la velocidad mecánica de la turbina eólica se realiza mediante un ajuste continuo del ángulo de paso, definido como el ángulo que se forma entre la cuerda del perfil aerodinámico en la punta del aspa y el plano de rotación, una vez alcanzada la potencia nominal. Para regular la potencia activa y reactiva del bobinado del estator del generador de inducción, se utiliza la técnica de control por orientación del flujo del estator, que permite aproximar el comportamiento dinámico del generador a una máquina de corriente continua. Estas variables se regulan por medio de tres controladores diferentes, basados en controladores PI, Hinf y LQG. El diseño de cada uno se realizó a partir de algoritmos genéticos, definiendo la función de aptitud con base en los índices ISE e ITSE de la señal de error y la acción de control del modelo lineal de la turbina, ante una entrada escalón.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres.

SUMMARY

TITLE.

MODELLING, SIMULATION AND CONTROL OF A EOLIC GENERATION SYSTEM*

AUTHOR.

ING. HERNANDO GONZÁLEZ ACEVEDO**

KEY WORDS.

Wind turbine, Wind model, Mechanical systems, Generator DFIG, Stator flux oriented control, Pitch angle control.

DESCRIPTION.

The use of wind to generate electricity with large wind turbines in the last decade has grown rapidly in installed capacity, because it is an inexhaustible source, non-polluting and free access. Its integration with the systems of power is research topic nowadays, searching in first place to determine dynamic models of each one of the subsystems that are part of a wind turbine allowing to study its impact on the electrical system. Secondly, analyzing and proposing new control techniques to regulate the active and reactive power provided by the induction generator.

The mechanical speed control of a wind turbine is performed using a continuous adjustment of pitch angle, defined as the angle formed between the cord of aerodynamic profile on the top of the blade and the plane of rotation, once it reached the nominal power. To regulate the active and reactive power of stator winding of induction generator, it used the technique control stator flux oriented, it allows approximate the dynamic of generator to a machine direct flow. These variables are regulated through three controllers independent based on the PI, Hinf and LQG. The design of each was made with genetics algorithms, defining the function of fitness on the indexes ITSE and ISE of error and action of control signals of linear model of the turbine, with an step signal.

* Degree work

** Physical Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunication Engineering School. Industrial University of Santander. Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización del viento como medio para generar energía con grandes aerogeneradores en la última década ha crecido en capacidad instalada, debido a que es una fuente inagotable, no contaminante y de libre acceso. El avance técnico acompañado por una disminución en los costos de inversión y de generación por KWh, ha transformado ésta forma de generar energía en una alternativa empleada por varios países, siendo Europa quién encabeza las estadísticas.

Su integración con los sistemas de potencia ha sido tema de investigación, buscando en primer lugar determinar modelos dinámicos de cada uno de los subsistemas que hacen parte de una turbina eólica (modelo dinámico del viento, modelo aerodinámico, modelo mecánico y modelo eléctrico) realizando a partir de ellos estudios del impacto en el sistema eléctrico. En segundo lugar, analizando y proponiendo nuevas técnicas de control que permitan regular la potencia activa y reactiva que entrega el generador de inducción a la línea de transmisión.

Estos dos enfoques son tratados en los diferentes capítulos de la tesis, realizando primero una recopilación bibliográfica para establecer el modelo dinámico de una turbina eólica conectada a una línea de transmisión y posteriormente analizando tres estrategias de control diferentes, reguladores PI, reguladores robustos basados en la técnica de Hinf y reguladores LQG, fundamentados en la teoría del control por orientación del campo del estator y el control por el ángulo de paso del aspa, que garanticen la estabilidad de las variables potencia activa, factor de potencia y velocidad mecánica del generador ante variaciones de la velocidad del viento.

Cada uno de los modelos matemáticos es implementado en el software **Matlab Simulink®**, brindando a la comunidad académica una herramienta de simulación que le permite determinar la calidad de onda de tensión y corriente generada por una turbina eólica, dada una condición de viento. De otro lado con la herramienta para el diseño de reguladores, a partir de algoritmos genéticos, la selección de los parámetros para cada uno de los reguladores se realice de forma óptima.

2. ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica convierte directamente la energía cinética del viento en electricidad, a través de aerogeneradores. Es la alternativa energética que más rápido está creciendo, ofreciendo entre otras, las siguientes ventajas y oportunidades:

- Es una fuente de energía inagotable que cada vez gana mayor competitividad en el sector eléctrico para la producción de energía a gran escala, ampliando de esta forma las alternativas de suministro y optimización de la canasta energética de un país o región.
- La energía eólica es limpia y compatible con el ambiente, no contamina y puede frenar parcialmente el uso y agotamiento de combustibles fósiles, contribuyendo a evitar el cambio climático, ya que generar energía eléctrica sin que exista un proceso de combustión conlleva a una reducción de emisiones de gases.
- La distribución espacial de aerogeneradores se adapta fácilmente a las condiciones, restricciones y usos del terreno, no ocupa grandes espacios y es compatible con otros usos del suelo como agricultura, ganadería y pastoreo.
- En comparación con proyectos energéticos convencionales, la planificación y construcción de instalaciones eólicas requieren períodos de gestación muy cortos.
- La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad no presenta incidencias sobre las características fisicoquímicas del suelo o su erosionabilidad, porque no se produce ningún contaminante, ni requiere de grandes movimientos de tierra.
- Los proyectos de energía eólica responden con mayor flexibilidad al incremento de la demanda energética. Un parque eólico existente puede ampliarse fácilmente con la incorporación de nuevas turbinas.
- Al finalizar la vida útil de la instalación, el desmantelamiento no deja huellas.
- Es una tecnología de aprovechamiento madura, que ha resuelto muchos de sus inconvenientes asociados con costos e impactos ambientales, ofreciendo grandes posibilidades de desarrollo para mejorar.

Entre las desventajas principales de esta tecnología se destacan:

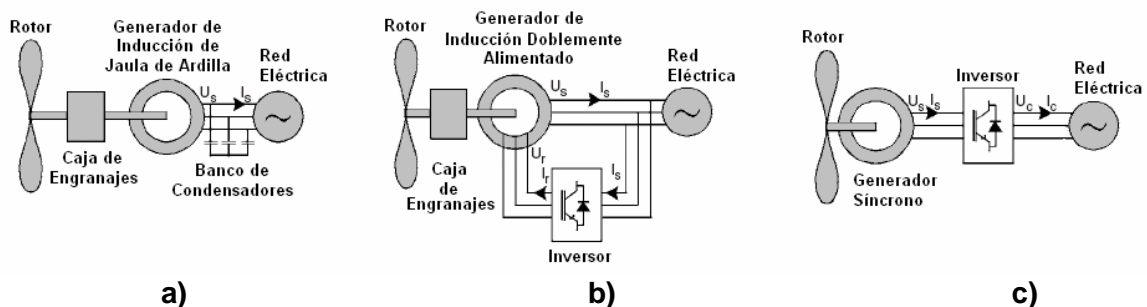
- La energía eólica no es almacenable y varía constantemente con el tiempo por la intermitencia del viento. En consecuencia, por sí sola no está en condiciones de atender una demanda continua en forma confiable, restringiendo su uso a una participación limitada dentro de un sistema de generación que incluya otras fuentes energéticas.
- El aire, por ser un fluido de pequeño peso específico, exige fabricar máquinas grandes y en consecuencia de elevado precio. Desde el punto de vista estético, el tamaño de estos generadores produce un impacto visual inevitable, con la consecuente alteración sobre el paisaje.
- Aunque se habla del ruido como impacto ambiental, los aerogeneradores modernos han reducido considerablemente sus emisiones, llegando a niveles casi imperceptibles para el hombre a distancias del orden de 100 m.
- La muerte de aves en accidentes contra las palas de los aerogeneradores ha sido uno de los temas más polémicos sobre la compatibilidad ambiental de esta tecnología. Por lo cual es importante adelantar estudios sobre la presencia de hábitats para la localización de parques eólicos. Es de anotar que este impacto es cada vez menor debido a la baja velocidad de rotación de las grandes máquinas modernas.

La mayoría de turbinas eólicas instaladas actualmente, se ajustan a uno de los tres modelos más frecuentes para el sistema de conversión. En el primer prototipo, un generador de inducción de jaula de ardilla convierte energía mecánica en energía eléctrica. Debido a la diferencia de velocidades de operación entre el rotor de la turbina y la velocidad eléctrica del generador, es necesaria una caja de engranajes con el fin de igualarlas. El factor de deslizamiento varía levemente con la carga, las variaciones en la velocidad no superan el 1%, por esta razón a esta clase de turbina se le denomina de *velocidad fija*. El diseño, hoy día, de estos sistemas se ha combinado con controles por diseño aerodinámico o control del ángulo de ataque del aspa.

En la segunda forma, un generador de inducción doblemente alimentado (rotor devanado), conectado a través de un sistema de engranajes, se utiliza en lugar del

generador de jaula de ardilla, donde el bobinado del estator se encuentra conectado a la red de frecuencia constante en forma directa y en el bobinado del rotor se inyectan corrientes trifásicas de amplitud, fase y frecuencia variable, lo cual permite independizar la frecuencia mecánica de la frecuencia eléctrica, debido a que el sistema de alimentación del rotor compensa las diferencias entre ellas. El diseño más utilizado se basa en el esquema Sherbius, en el cual la inyección de corriente en el rotor se realiza mediante un inversor electrónico conectado entre el rotor y la red. Esta conexión permite que la velocidad de la turbina sea variable, facilitando por un lado, reducir la fatiga de componentes mecánicos y las fluctuaciones de tensión, y por otro lado aprovechar mejor la energía del viento a velocidades bajas, manteniendo la velocidad de giro próxima al punto de máxima absorción de energía.

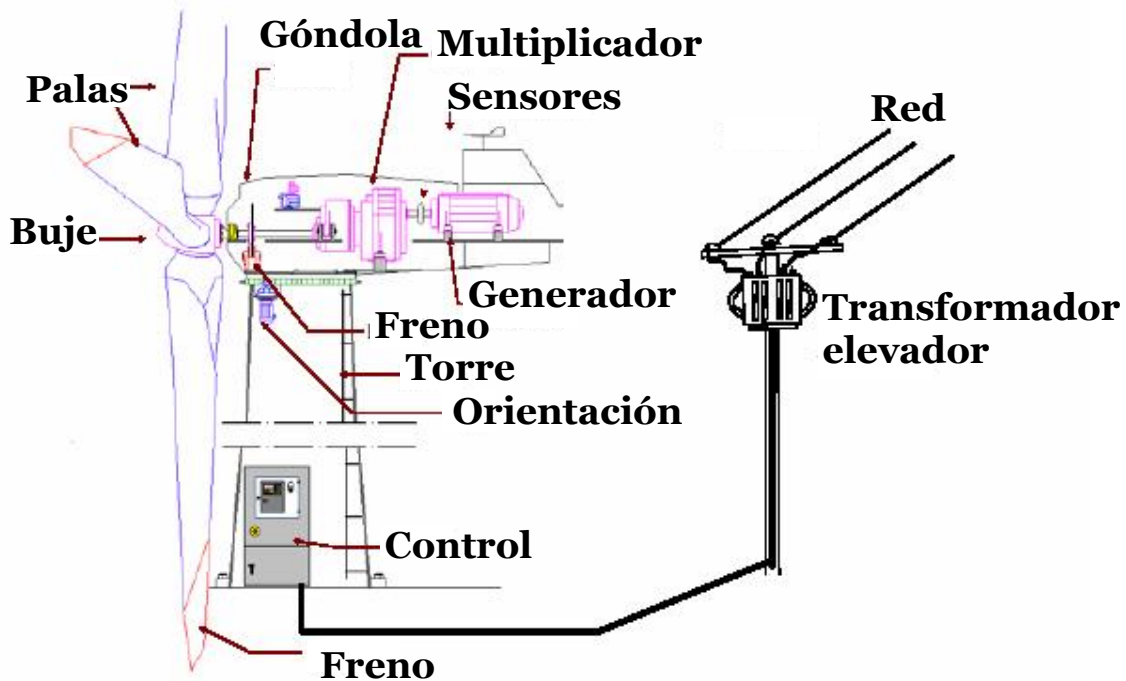
En tercer lugar, se encuentran las denominadas turbinas eólicas de acople directo, su nombre se debe a que no presentan una caja multiplicadora. Una máquina síncrona multipolo de velocidad muy cercana a la velocidad del rotor de la turbina, se emplea para convertir energía eléctrica en mecánica. El generador puede ser de rotor devanado o de imán permanente. El estator se encuentra conectado a un inversor de tensión, el cual permite que el sistema opere a diferentes velocidades. Las tres principales clases de turbinas se esbozan en la figura 1.



Fuente: Florin Iov. Contributions to Modelling, Analysis and Simulation of Ac Drive System

Fig. 1 Generadores eólicos. a) Turbina de velocidad fija. b) Turbina de velocidad variable. c) Turbina de velocidad variable con generador síncrono multipolo

En la figura 2 se puede observar los componentes que hacen parte de una turbina eólica: las palas, el buje, la góndola, el multiplicador, los sensores, el generador, el freno y el sistema de orientación y control.



Fuente: Pedro André Carvalho Rosas. *Dynamic Influences of Wind Power on the Power System*

Fig. 2 Componentes de un aerogenerador eólico

2.1 CONTROL DE UN AEROGENERADOR.

Los principales objetivos de los sistemas de control para los aerogeneradores son:

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

En la actualidad, la contribución a la estabilidad transitoria del sistema eléctrico no es un objetivo de los sistemas de control. En caso de situación anormal, los aerogeneradores simplemente son desconectados.

Existen dos métodos principales de control de los sistemas de velocidad fija:

- *Control por entrada en pérdida.* El par mecánico disminuye a partir de una determinada velocidad del viento, llamada velocidad de referencia, mediante un diseño apropiado del perfil de la pala.
- *Control por variación del paso de pala.* El par mecánico entrante se controla mediante la variación del ángulo de ataque de las palas. Este control es deliberadamente lento con el fin de reducir esfuerzos y evitar fatigas en el mecanismo.

Los sistemas de velocidad variable permiten extraer más energía del viento por unidad de área, al acercarse la velocidad de las aspas al punto de máxima transferencia de potencia. El control de velocidad puede seguir dos esquemas principales:

- *Control de par.* A partir de la velocidad de giro del rotor de la turbina, se obtiene el par correspondiente en la curva característica par-velocidad, tomando directamente este valor como par de referencia en el sistema de control.
- *Control de velocidad.* A partir de la velocidad del viento medida por un anemómetro, se obtiene la velocidad de referencia del rotor de la turbina, controlando esta variable mediante un regulador PI en un bucle externo al control de par.

La rapidez del control no es un requerimiento del sistema, ya que la elevada inercia de la turbina impide el seguimiento de las fluctuaciones del viento. Por el contrario, el amortiguamiento de las oscilaciones de baja frecuencia es importante. La frecuencia natural del acoplamiento mecánico puede ser excitada por fluctuaciones del viento o por las oscilaciones del par a frecuencias múltiplos de $n_p \omega_p$, donde ω_p es la velocidad mecánica del rotor de la turbina y n_p el número de palas.

2.2 POTENCIAL EÓLICO EN COLOMBIA

Son pocos los estudios que se han realizado sobre el potencial eólico del país. Uno de los primeros trabajos en tal sentido fue adelantado por el Ingeniero Álvaro Enrique Pinilla Sepúlveda en 1997, mediante un mapa de vientos para una parte del territorio nacional [18]. La Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, en unión con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, adelantan actividades de recolección y procesamiento de datos en tal sentido [19]. A escala macro, la región más atractiva es la Costa Atlántica Colombiana, donde los vientos aumentan en dirección a la península de La Guajira. Se han identificado otras regiones de interés como el departamento del Arauca y algunas zonas de los altiplanos en las cordilleras.

Jepírachi, *“vientos que vienen del nordeste en dirección del Cabo de la Vela”* en Wayuunaiki, la lengua nativa Wayuu, es el único parque para la generación de energía eólica implementado en Colombia. Está conformado por 15 aerogeneradores Nordex N60/250 – 1300 kW, para una capacidad instalada total de 19,5 MW de potencia nominal. La zona que ocupan las turbinas comprende un área rectangular de aproximadamente un kilómetro de ancho (en dirección paralela a la costa) por 1,2 Km de largo, al norte de la ranchería Kasiwolín y al occidente de la ranchería Arütkejüi. Los aerogeneradores están interconectados entre sí por una red subterránea a una tensión de 13,8 kV, la cual conduce la energía hacia la subestación eléctrica localizada en el centro del perímetro sur del área ocupada por el parque. Dicha subestación dispone de un transformador que eleva el voltaje a una tensión de 110 kV, y es el punto de partida de la línea de 800 m de longitud, con la que se conecta el parque a la torre 20 de la línea Cuestecitas - Puerto Bolívar, de propiedad de Carbones del Cerrejón, que suministra la energía para el puerto.

2.3 PUBLICACIONES RELACIONADAS CON EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.

Las publicaciones científicas y técnicas referentes a sistemas de generación de energía eólica son frecuentes actualmente debido al crecimiento exponencial de turbinas instaladas en la última década en el mundo. Este proceso ha sido especialmente significativo en Europa, pero también se puede observar en Estados Unidos y en

numerosos países en vía de desarrollo, como en Suramérica. Entre los países europeos se destaca Alemania, España y Dinamarca, este último, es el país con el mayor porcentaje de generación eólica que aumenta significativamente en periodos de poca carga y mucho viento.

El modelo matemático de una turbina eólica, con sus diferentes subsistemas, ha sido tema de estudio en algunas tesis doctorales [1], [2], [3], [4]. Cada uno representa con distinto grado de detalle todos o algunos de los fenómenos involucrados en la transformación de la energía eólica (electromagnéticos, mecánicos y aerodinámicos). Por el contrario, en la literatura apenas se presentan algunos estudios sobre el control de generadores doblemente alimentados (DFIG) debido a que la tecnología del generador de inducción de jaula de ardilla y el generador DFIG son muy distintas, fundamentalmente por la existencia de inversores en el segundo. El inversor conectado tiene como objetivo regular la potencia activa y reactiva suministrada por la máquina, para lo cual, una alternativa común es el control por orientación de campo. La principal ventaja de esta técnica es el desacople de la dinámica del generador DFIG, con lo cual se puede implementar dos reguladores independientes para estas variables, a través de un lazo de control para la corriente del rotor. Varios esquemas se han propuesto, algunos autores aplican un control por orientación del flujo del estator [5], [6], [7], [8], o la orientación del flujo del entrehierro [9], [10]. Si la resistencia del estator se considera pequeña, la orientación del flujo del estator es similar a la orientación del flujo de la red eléctrica [11].

Dado que los parámetros de los elementos que conforman una turbina eólica pueden cambiar con el tiempo se han propuesto lógicas basadas en técnicas avanzadas como control LQG [12], control robusto basado en la técnica de Hinf [13], control adaptativo [14], entre otros, permitiendo que el sistema se adapte o insensibilice ante estas modificaciones.

La investigación en Colombia referente al tema es nueva. Se destaca el grupo de investigación en *Conversión de Energía*, de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes. Algunos de sus trabajos se han enfocado al análisis y diseño de turbinas eólicas, como la tesis de maestría *Herramientas Computacionales para el Análisis y Diseño de Turbinas Eólicas* [15], en la cual proponen una serie de herramientas

teóricas y computacionales para predecir el comportamiento y desempeño del rotor y la torre de cualquier turbina bajo condiciones semejantes a las de una operación real. En la tesis *Simulación del viento atmosférico y aplicación experimental* [16] realizan un modelado del comportamiento del viento atmosférico a partir del conocimiento de sus variables básicas: velocidad media, intensidad de turbulencia, escala integral de tiempo y escala integral de longitud, las cuales deber ser obtenidas de series de velocidad del viento con frecuencias de muestreo del orden de los 40 hz, además proponen que la intensidad de turbulencia puede ser representada a partir de un modelo adecuado de la función de densidad espectral de potencia, PSD. La referencia [17] presenta el modelo matemático de un parque eólico y realizan un control por voltaje para el sistema de generación conectado a la red eléctrica, concluyendo que, aunque la lógica de control es eficiente se tiene la desventaja que no se ejerce un control directo sobre la corriente que se le entrega a la red.

2.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en Colombia, las investigaciones que se han realizado en el campo de la energía eólica son estudios de viabilidad económica, modelos matemáticos de los sistemas mecánicos y pruebas en campo, realizadas en el parque Jepírachi, que buscan medir la eficiencia de este tipo de sistemas. El interés que ha suscitado esta alternativa de generación de energía en Colombia, ha permitido formular a su vez una serie de preguntas:

- ¿Cómo es el comportamiento dinámico de la potencia y la frecuencia del sistema eólico si se encuentra acoplado a la red eléctrica?
- ¿Cuál es el comportamiento de la velocidad mecánica y la potencia producida por el generador de inducción ante variaciones en la velocidad media del viento?
- ¿Cuál es la máxima energía que se puede aprovechar del sistema de generación eólico, aplicando diversas estrategias de control?

Con el desarrollo de este trabajo de investigación se propone dar respuesta a estos interrogantes, para lo cual se trazaron los siguientes objetivos.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta CACSD (Computer Aided Control Systems Design) para turbinas eólicas de eje horizontal.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar los diferentes modelos dinámicos para una turbina eólica de velocidad variable.
- Diseñar controladores para los diferentes modelos dinámicos de una turbina eólica de velocidad variable, basado en las teorías de control H^∞ , LQR y LQG.
- Desarrollar en una plataforma de software la herramienta CACSD propuesta con el fin de analizar el comportamiento dinámico del sistema.
- Establecer las especificaciones técnicas relativo a la parte eléctrica del sistema de generación propuesto.

3. MODELO MATEMÁTICO DE UNA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDAD VARIABLE

El modelo dinámico de un sistema de generación eólico incluye los siguientes subsistemas: modelo de la velocidad del viento, modelo aerodinámico de la turbina, modelo de la caja multiplicadora y el modelo del generador de inducción, los cuales se acoplan al modelo de la red de transporte y demás elementos del sistema eléctrico para realizar estudios de estabilidad.

3.1 MODELO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

La velocidad del viento, en un marco de referencia estacionario, se puede calcular como la suma de dos componentes: la primera corresponde a un perfil de velocidad media que incide sobre el área del rotor y la segunda, denominada turbulencia, corresponde a las variaciones que presenta esta señal. La primera se asume constante en periodos de corta duración. Si el periodo de análisis es mayor a diez minutos [1], cambios meteorológicos generan leves variaciones de esta componente.

El fenómeno de turbulencia se puede describir con base en algunos indicadores como la intensidad, que se define como la relación entre la desviación estándar y la velocidad media del viento, ecuación (3.1), y la densidad espectral de potencia (PSD). El espectro de Kaimal, ecuación (3.2), se ha convertido en una buena alternativa para representar este fenómeno, porque se aproxima a datos empíricos obtenidos de las observaciones atmosféricas.

$$\sigma = IV_o \quad (3.1)$$

$$S_t(f) = \frac{\sigma^2 L}{2 V_o} \frac{1}{\left(1 + \frac{3}{2} \frac{L}{V_o} f\right)^{5/3}} \quad (3.2)$$

$$L = \begin{cases} 20z & \text{para } z < 20 \text{ mt} \\ 600 \text{ mt} & \text{para } z > 20 \text{ mt} \end{cases} \quad (3.3)$$

donde:

- f Frecuencia
- L Longitud de escala de la turbulencia
- z Altura de la torre
- σ Desviación estándar de la velocidad del viento
- I Intensidad de turbulencia
- V_0 Velocidad media del viento

Para emular las fluctuaciones del viento en el dominio del tiempo, en un punto sobre el área de barrido de las aspas, se emplea un generador de ruido blanco seguido de un filtro análogo, cuyo PSD se aproxima al de Kaimal [2]. El filtro se puede caracterizar por una función de transferencia de primero, segundo o tercer orden. En el anexo A se encuentran los coeficientes para cada caso y en la ecuación 3.4 se presenta la función de transferencia para un sistema de segundo orden. Dado un $\sigma = 0.1$, $L = 600$ y una velocidad media del viento de 15 m/sg y al evaluar la expresión (3.2) y la magnitud al cuadrado de la expresión (3.4), correspondiente al PSD de $H(s)$, se observa que la aproximación matemática es válida para un rango amplio de frecuencias, figura 3.

$$H(s) = \sigma \sqrt{\frac{L}{V_0}} \frac{0,0182c^2s^2 + 1,3653cs + 0,9846}{1,3463c^2s^2 + 3,7593cs + 1} \quad (3.4)$$

$$c = \frac{L}{2\pi V_0} \quad (3.5)$$

Para calcular la influencia de la turbulencia sobre el torque mecánico generado, se considera que la velocidad del viento no es constante sobre el área que barre el aspa, por lo tanto se describe por un vector que depende de la posición angular y el tiempo, $v(r, \theta, t)$. Para un análisis detallado es necesario aplicar técnicas de iteración las cuales requieren un alto costo computacional. *Riso-members*, en [20] y [21], presentan un método cuya idea principal es representar la turbulencia por una velocidad del viento

equivalente, v_{equ} , que genere el mismo torque global. El par generado por cada aspa está dado por la ecuación (3.6), donde:

- M_{tb} Momento del aspa b
- r_o Radio interior del aspa
- R Radio exterior del aspa
- $\psi(r)$ Coeficiente aerodinámico
- θ_b Ángulo del aspa

$$M_{tb}(\theta_b, t) = \int_{r_o}^R \psi(r)v(r, \theta_b, t)dr \quad (3.6)$$

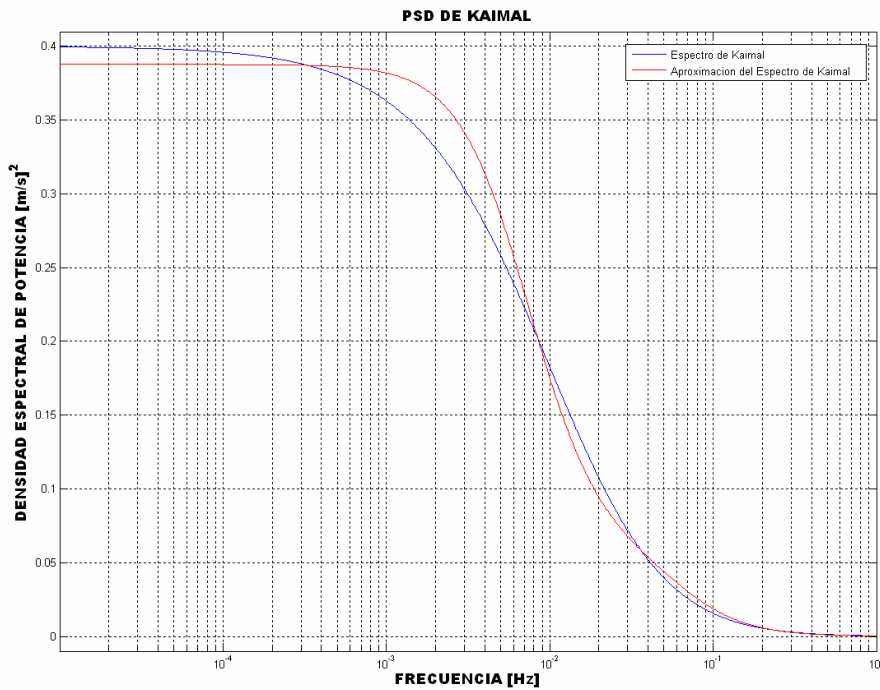


Fig. 3 Espectro de Kaimal

Los laboratorio *Risoe* definen el par producido por cada aspa, ecuación (3.7), como el producto de la velocidad equivalente, v_{equ} , la cual es independiente de la posición que recorre el rotor de la turbina y el tiempo, por la integral del coeficiente aerodinámico.

$$M_{tb}(\theta_b, t) = v_{equ}(\theta_b, t) \int_{r_0}^R \psi(r) dr \quad (3.7)$$

Combinando la ecuación (3.6) y (3.7) se obtiene la expresión para la velocidad equivalente del viento, dada por la ecuación (3.8).

$$V_{equ}(\theta_b, t) = \frac{\int_{r_0}^R \psi(r) v(r, \theta_b, t) dr}{\int_{r_0}^R \psi(r) dr} \quad (3.8)$$

La ecuación (3.8) puede quedar independiente del diseño de la turbina si se asume que el coeficiente aerodinámico depende linealmente del radio del aspa, $\psi(r) = K_{aer} r$, obteniendo la expresión (3.9)

$$V_{equ}(\theta_b, t) = \frac{\int_{r_0}^R r v(r, \theta_b, t) dr}{\int_{r_0}^R r dr} \quad (3.9)$$

La velocidad equivalente total del viento en una turbina de tres aspas, ecuación (3.10), corresponde al promedio de la velocidad equivalente de cada una, donde θ es la posición angular de la primera pala.

$$V_{tequ} = \frac{1}{3} \left(v_{equ}(\theta, t) + v_{equ}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}, t\right) + v_{equ}\left(\theta - \frac{4\pi}{3}, t\right) \right) \quad (3.10)$$

La ecuación (3.10) al descomponerla en series de Fourier se obtiene la expresión (3.11), donde W_{eqk} es el k -ésimo coeficiente de la expansión compleja.

$$V_{tequ} = \sum_{K=-\infty}^{k=\infty} W_{equ}(k, t) e^{jk\theta} \quad (3.11)$$

Sólo los coeficientes de tercer orden aparecen en la sumatoria, para una turbina de tres aspas perfectamente espaciadas. Mediciones experimentales han demostrado que estas componentes generan fluctuación en la señal de par, con una frecuencia fundamental igual a la velocidad de giro el rotor, este fenómeno se denomina “*muestreo rotacional de turbulencia*” [1]. La expansión en series de Fourier para la velocidad equivalente total, al tener en cuenta esta característica, se observa en la ecuación (3.12).

$$V_{tequ} = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} W_{equ}(3k, t) e^{j3k\theta} \quad (3.12)$$

El PSD de cada uno de los coeficientes de Fourier de la expresión (3.12) se pueden evaluar como un producto de la magnitud al cuadrado de una función de admitancia, $H(3k, f)$, por el PSD de Kaimal, $S_i(f)$.

$$S_{equ}(3k, f) = H(3k, f)H^*(3k, f)S_i(f) \quad (3.13)$$

En [2] se presentan una aproximación para $H(3k, f)$, determinada por Poul Sorencen, a partir de funciones racionales de primero, segundo y tercer orden (Anexo A). En los análisis de estabilidad solo se considera tanto la componente de continua, ecuación (3.14), y el tercer armónico, ecuación (3.15), porque son los armónicos de mayor amplitud.

$$H(0, f) = \frac{4,7869ds + 0,9904}{7,6823d^2s^2 + 7,3518ds + 1} \quad (3.14)$$

$$H(3, f) = \frac{0,2766ds + 0,0307}{0,3691d^2s^2 + 1,7722ds + 1} \quad (3.15)$$

$d = R/V_0$ es un parámetro de normalización, R es el radio del aspa de la turbina y V_0 la velocidad media del viento. La estructura general del diagrama de bloques que simula el comportamiento del viento que incide sobre las aspas de una turbina eólica se observa en la figura 4, donde θ corresponde al desplazamiento angular del eje de la turbina. En la

figura 5 se visualiza el PSD de una serie en el dominio del tiempo de 4000 s con un periodo de muestreo de 0.01 s, un radio del aspa de 40 m, una velocidad promedio de 20 m/s, longitud de escala de 600 m, una intensidad de turbulencia de 20% y una velocidad del rotor de 1,885 rad/s.

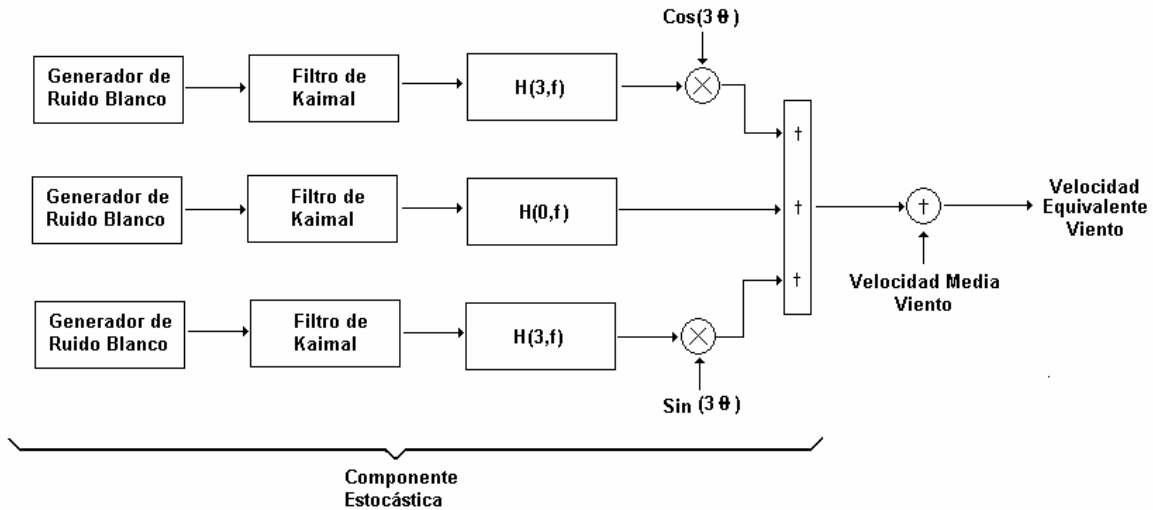


Fig. 4 Diagrama de bloques del modelo dinámico de la velocidad del viento

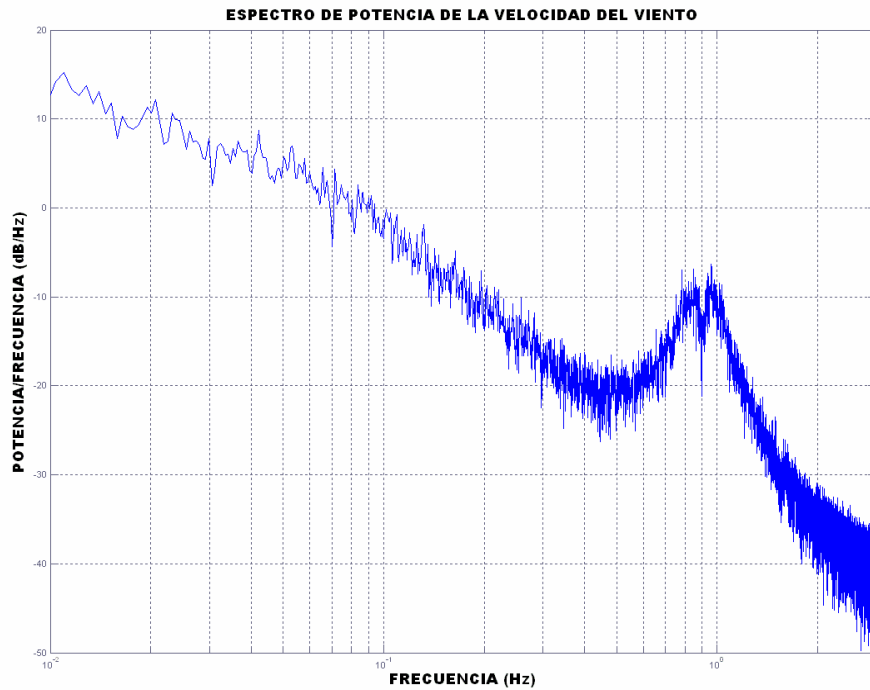


Fig. 5 PSD para una secuencia de datos de la velocidad del viento

3.2 MODELO AERODINÁMICO DE LA TURBINA.

La potencia desarrollada por una turbina eólica está dada por la ecuación (3.16), donde ρ es la densidad del aire, A es la superficie barrida por las aspas, V_{tequ} es la velocidad equivalente del viento, C_p es el coeficiente de potencia, β es el ángulo de ataque de las aspas, ω_{Rot} es la velocidad mecánica de la turbina y R el radio del aspa.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{tequ}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.16)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{Rot} R}{V_{tequ}} \quad (3.17)$$

El máximo valor teórico de C_p es de 0,593, denominado límite de Betz. Este coeficiente depende del diseño aerodinámico de la turbina y es bastante inferior al máximo debido a imperfecciones en el diseño y pérdidas por carga aerodinámica. Aunque este coeficiente depende del diseño aerodinámico de la turbina, algunos autores, [22] y [23], han aproximado el coeficiente de potencia a la forma de la expresión (3.18). En la figura 6 se observa la representación gráfica de C_p en función del ángulo de paso del aspa β y de λ .

$$C_p = 0,5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-2/\lambda_i} + 0,0068\lambda \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (3.19)$$

El par aerodinámico se obtiene dividiendo la potencia producida por el viento, P , entre la velocidad del rotor de la turbina, ω_{Rot} , ecuación (3.20).

$$T_{Aer} = \frac{P}{\omega_{Rot}} \quad (3.20)$$

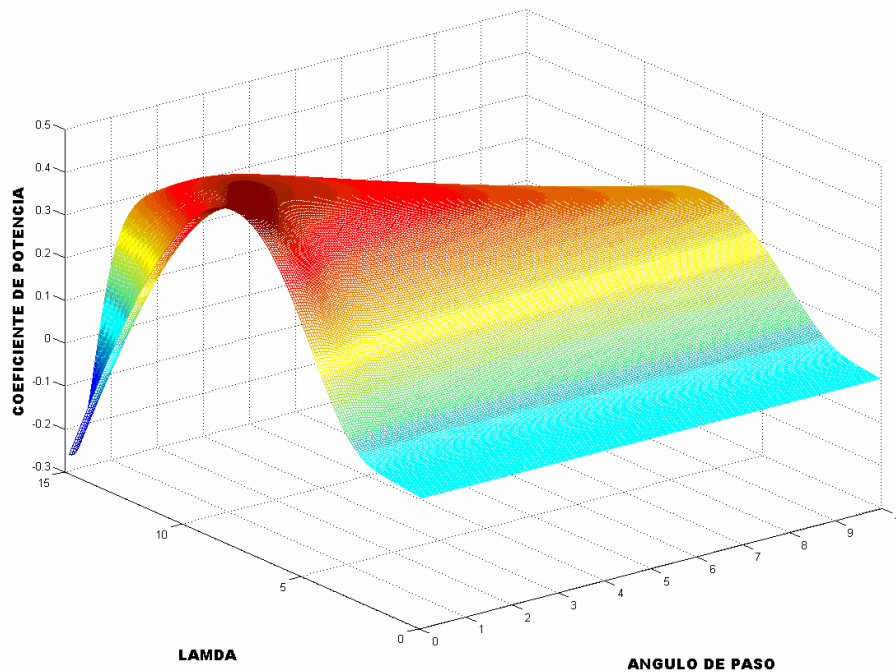


Fig. 6 Coeficiente de potencia

3.3 MODELO DEL SISTEMA MECÁNICO.

Existen componentes mecánicos presentes en una turbina eólica que pueden transmitir oscilaciones a la red, como son las aspas, el eje de baja velocidad, la caja multiplicadora y el eje de alta velocidad. Una aproximación común para caracterizar esta dinámica es utilizar el modelo dinámico de un sistema de cuatro masas (fig. 7), considerando que la unión entre las aspas y el buje está fuertemente amortiguada. Las ecuaciones que describen la dinámica del sistema se presentan de la ecuación (3.21) a la ecuación (3.27).

$$T_{Aer} - D_{Rot} (\omega_{Rot} - \omega_1) - Q_{Rot} = J_{Rot} \frac{d}{dt} \omega_{Rot} \quad (3.21)$$

$$D_{Rot} (\omega_{Rot} - \omega_1) + Q_{Rot} - T_1 = J_{Eng1} \frac{d}{dt} \omega_1 \quad (3.22)$$

$$T_2 - D_{Gen} (\omega_2 - \omega_{Gen}) - Q_{Gen} = J_{Eng2} \frac{d}{dt} \omega_2 \quad (3.23)$$

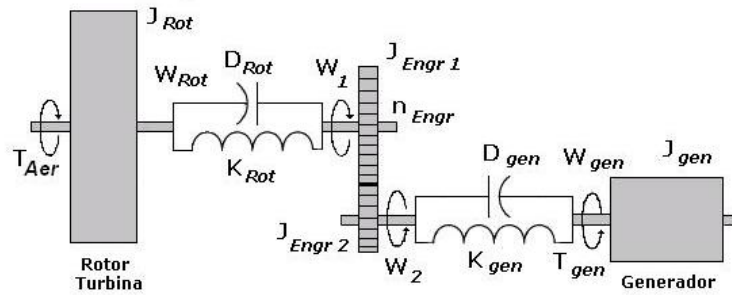


Fig. 7 Modelo de cuatro masas para el sistema mecánico

$$D_{Gen} (\omega_2 - \omega_{Gen}) + Q_{Gen} - T_e = J_{Gen} \frac{d}{dt} \omega_{Gen} \quad (3.24)$$

$$Q_{Rot} = K_{Rot} \int (\omega_{Rot} - \omega_1) dt \quad (3.25)$$

$$Q_{Gen} = K_{Gen} \int (\omega_2 - \omega_{Gen}) dt \quad (3.26)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = n_{Eng} \quad (3.27)$$

donde:

- T_{Aer} Par aerodinámico
- T_e Par electromagnético producido por el generador de inducción
- ω_{Rot} Velocidad mecánica de la turbina
- ω_1, ω_2 Velocidad mecánica de los engranes de la caja multiplicadora
- ω_{Gen} Velocidad mecánica del generador de inducción
- Q_{Rot} Par de reacción debido a la rigidez del eje de baja velocidad
- Q_{gen} Par de reacción debido a la rigidez del eje de alta velocidad
- J_{Rot} Momento de inercia de las aspas y el buje
- K_{Rot} Coeficiente de rigidez del eje de baja velocidad
- D_{Rot} Coeficiente de amortiguamiento del eje de baja velocidad
- $J_{Eng1} J_{Eng2}$ Momentos de inercia de los engranes de la caja multiplicadora
- n_{Eng} Relación de engranes de la caja multiplicadora

K_{Gen} Coeficiente de rigidez del eje de alta velocidad
 J_{Gen} Momento de inercia del generador de inducción

3.4 MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO (DFIG)

Las ecuaciones que representan la dinámica de una máquina de inducción se pueden presentar en el marco de referencia natural ABC/abc o en el sistema $dq0$. El primer caso es válido cuando se desea estudiar sistemas desbalanceados, tanto en circuitos del estator como del rotor, el segundo permite simplificar el modelo matemático, basado en la teoría propuesta por R. H. Park.

3.4.1 Sistema de ecuaciones en el marco de referencia natural.

Las ecuaciones de este modelo se derivan suponiendo que la máquina tiene una geometría simétrica, el flujo del entrehierro de la máquina es sinusoidal y se desprecia la saturación al igual que las pérdidas en el núcleo. La dinámica del generador se obtiene al establecer las ecuaciones eléctricas del circuito de la figura 8, que se describen en la expresión (3.28), donde:

V_A, \dots, V_c Tensión de fase del bobinado del estator y el rotor.
 I_A, \dots, I_c Corrientes en el bobinado del estator y el rotor.
 Ψ_A, \dots, Ψ_c Flujo magnético presentes en el bobinado del estator y el rotor.

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[\Psi] \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix}$$

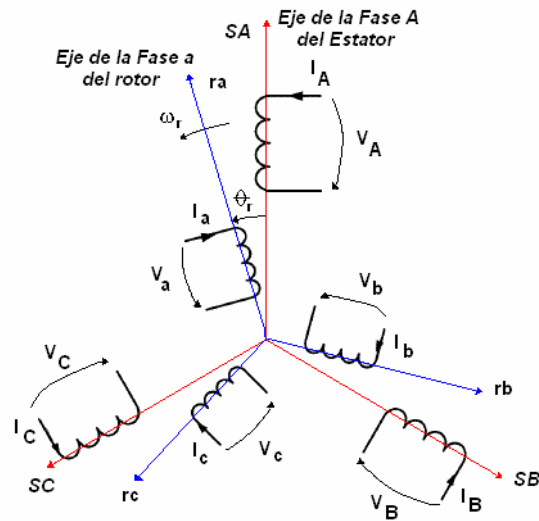


Fig. 8 Generador de inducción en el sistema de coordenadas ABC

La relación entre el flujo y la corriente, a través de cada bobina, está dada por la ecuación (3.29), donde:

L_s Inductancia del bobinado del estator

L_r Inductancia del bobinado del rotor

L_m Inductancia mutua

$$[\Psi] = [L][I] \quad (3.29)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & 0 & \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_3 \\ 0 & L_{ss} & 0 & \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_2 \\ 0 & 0 & L_{ss} & \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_1 \\ \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_2 & L_{rr} & 0 & 0 \\ \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_3 & 0 & L_{rr} & 0 \\ \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_1 & 0 & 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$L_{ss} = L_s + L_m \quad (3.31)$$

$$L_{rr} = L_r + L_m \quad (3.32)$$

$$f_1 = \cos(\theta_r), f_2 = \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}), f_3 = \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.33)$$

Para representar el modelo dinámico, en función de las corrientes del estator y el rotor, como variables de estado, se sigue la ecuación (3.34), donde:

ω_r Velocidad eléctrica del rotor del DFIG

$[L]^{-1}$ Inversa de la matriz de inductancias L definida por la ecuación (3.35)

$\frac{d}{d\theta_r}[L]$ Razón de cambio de la inductancia con relación al desplazamiento angular, definido por la ecuación (3.36)

$$\frac{d}{dt}[I] = -[L]^{-1} \left\{ [R] + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}[L] \right\} [I] + [L]^{-1}[V] \quad (3.34)$$

$$[L]^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$b_{11} = b_{22} = b_{33} = \frac{4L_{ss}L_{rr} - 3L_{aA}^2}{L_{ss}(4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2)}$$

$$b_{44} = b_{55} = b_{66} = \frac{4L_{ss}L_{rr} - 3L_{aA}^2}{L_{rr}(4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2)}$$

$$b_{12} = b_{13} = b_{21} = b_{23} = b_{31} = b_{32} = \frac{-3L_{aA}^2}{L_{ss}(4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2)}$$

$$b_{45} = b_{46} = b_{54} = b_{56} = b_{64} = b_{65} = \frac{-3L_{aA}^2}{L_{rr}(4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2)}$$

$$b_{14} = b_{25} = b_{36} = b_{41} = b_{52} = b_{63} = \frac{-4L_{aA}f_1}{4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2}$$

$$b_{15} = b_{26} = b_{34} = b_{43} = b_{51} = b_{62} = \frac{-4L_{aA}f_2}{4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2}$$

$$b_{16} = b_{24} = b_{35} = b_{42} = b_{53} = b_{61} = \frac{-4L_{aA}f_3}{4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2}$$

$$L_{aA} = \frac{2}{3}L_m$$

$$\frac{d}{d\theta_r}[L] = -\frac{2}{3}L_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & g_1 & g_2 & g_3 \\ 0 & 0 & 0 & g_3 & g_1 & g_2 \\ 0 & 0 & 0 & g_2 & g_3 & g_1 \\ g_1 & g_3 & g_2 & 0 & 0 & 0 \\ g_2 & g_1 & g_3 & 0 & 0 & 0 \\ g_3 & g_2 & g_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$g_1 = \sin(\theta_r), \quad g_2 = \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right), \quad g_3 = \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right)$$

El par electromagnético, en función de la corriente del estator y el rotor, se define por la ecuación (3.37), donde P_f es el número de par de polos.

$$T_e = -\frac{2}{3}P_f L_m \left\{ \begin{aligned} & (I_A I_a + I_B I_b + I_C I_c) \sin(\theta_r) + (I_A I_b + I_B I_c + I_C I_a) \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \dots \\ & + (I_A I_c + I_B I_a + I_C I_b) \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

3.4.2 Sistema de ecuaciones en el marco $dq0$.

La matriz de inductancias, ecuación (3.30), se encuentra en función de la velocidad del rotor, por lo tanto los coeficientes de la ecuación de estados varían en el tiempo, excepto cuando la máquina alcanza su condición de reposo. Con el fin de obtener un sistema invariante en el tiempo, se realiza una transformación de variables a un marco de referencia, el cual rota a una velocidad angular arbitraria. Para una máquina de inducción se prefiere un sistema de coordenadas que rote a la velocidad de sincronismo, ω_s , conocida como la transformación de Park. Se seleccionan dos ejes, el directo d y el de cuadratura q , como se observa en la figura 7. El eje q se asume noventa grados adelantados con respecto al eje d en la dirección de rotación.

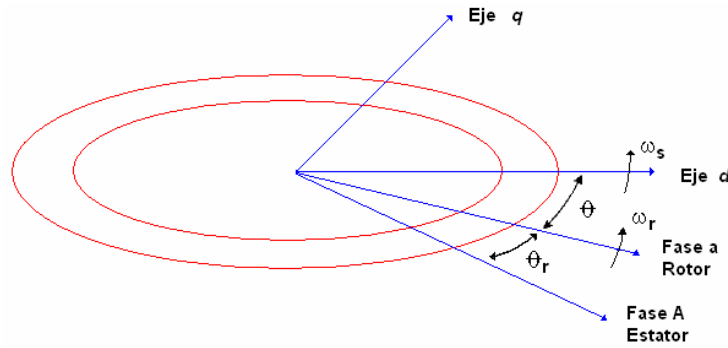


Fig. 9 Generador de inducción en el sistema de coordenadas $dq0$

La matriz de transformación de las corrientes del estator a los ejes d y q se obtiene con la ecuación (3.38).

$$\begin{aligned} I_{ds} &= \frac{2}{3} \left[I_A \cos(\omega_s t) + I_B \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_C \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ I_{qs} &= -\frac{2}{3} \left[I_A \sin(\omega_s t) + I_B \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_C \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \quad (3.38)$$

La transformación inversa viene dada por la ecuación (3.39)

$$\begin{aligned} I_A &= I_{ds} \cos(\omega_s t) - I_{qs} \sin(\omega_s t) \\ I_B &= I_{ds} \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qs} \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_C &= I_{ds} \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qs} \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.39)$$

La transformación para la corriente del rotor está dada por la ecuación (3.40), donde θ es el ángulo por el cual el eje d adelanta al eje de la fase a del rotor (Fig. 9), definido por la ecuación (3.41).

$$\begin{aligned} I_{dr} &= \frac{2}{3} \left[I_a \cos(\theta) + I_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ I_{qr} &= -\frac{2}{3} \left[I_a \sin(\theta) + I_b \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned}\theta &= \omega_s t - \theta_r \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_s - \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r\end{aligned}\quad (3.41)$$

θ_r se define como el ángulo por el cual el eje de la fase *a* del rotor adelanta al eje de la fase *A* del estator. La transformación inversa está dada por la ecuación (3.42).

$$\begin{aligned}I_a &= I_{dr} \cos(\theta) - I_{qr} \sin(\theta) \\ I_b &= I_{dr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qr} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_c &= I_{dr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qr} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\quad (3.42)$$

Las ecuaciones para la tensión del bobinado del estator y el rotor, al aplicar la transformación de Park, está dada por la ecuación (3.43).

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[\Psi] + [\Omega][\Psi] \quad (3.43)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(\omega_s - \omega_r) \\ 0 & 0 & (\omega_s - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix}$$

La relación entre el flujo magnético y la corriente está dada por la ecuación (3.44). Si las corrientes se seleccionan como variables de estado, la ecuación que representa la dinámica de la máquina de inducción está dada por la ecuación (3.45) y (3.46). El par electromagnético y la potencia que suministra la máquina, en el bobinado del estator, en función de estas variables de estado se encuentran definidos por la ecuación (3.47) y (3.48), respectivamente.

$$[\Psi] = [L][I]$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{rr} & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$L_{ss} = L_s + L_m$$

$$L_{rr} = L_r + L_m$$

$$\frac{d}{dt}[I] = -\left([L]^{-1}[R] + [L]^{-1}[\Omega][L]\right)[I] + [L]^{-1}[V] \quad (3.45)$$

$$[L]^{-1} = \frac{1}{L_{rr}L_{ss} - L_m^2} \begin{bmatrix} L_{rr} & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_{rr} & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_{ss} & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_f L_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (3.47)$$

$$S = P_{act} + jQ_{reac} = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) + j \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \quad (3.48)$$

3.5 CONTROL POR ORIENTACIÓN DEL FLUJO DEL ESTATOR

Para regular la potencia activa y reactiva del bobinado del estator de un generador de inducción doblemente alimentado conectado a la red eléctrica, una de las técnicas que se utiliza es la de control por orientación del flujo del estator [26]. El objetivo es aproximar el comportamiento dinámico del generador a una máquina de corriente continua, para lo cual se debe tener en cuenta las siguientes aproximaciones:

- Despreciar la resistencia del bobinado del estator, R_s , usualmente justificado en máquinas con una potencia mayor a 10 kW.
- El fasor de corriente de magnetización, $\overrightarrow{I_{ms}}$, se supone constante.
- La frecuencia de la red eléctrica a la cual se encuentra conectado el bobinado del estator se considera constante.

Asumiendo el marco de referencia de la figura 10 para el flujo del estator y retomando la ecuación (3.44), las siguientes simplificaciones se pueden realizar a las expresiones que representan al flujo magnético al interior de la máquina:

- La componente de flujo del estator en el eje d , se considera constante, ecuación (3.49), donde $\overrightarrow{I_{ms}}$ es la magnitud del fasor de la corriente de magnetización.
- La componente de flujo del estator en el eje q , se considera cero, ecuación (3.50).

$$\Psi_{ds} = L_m \overrightarrow{I_{ms}} = L_{ss} I_{ds} + L_m I_{dr} \quad (3.49)$$

$$\Psi_{qs} = 0 = L_{ss} I_{qs} + L_m I_{qr} \quad (3.50)$$

La corriente del estator, en los ejes d y q , se pueden expresar por la ecuación (3.51) y (3.52), respectivamente. Las ecuaciones para el flujo del rotor, con base de las ecuaciones (3.51) y (3.52) vienen dadas por la ecuación (3.53) y la ecuación (3.54).

$$I_{ds} = \frac{L_m}{L_{ss}} \left(\overrightarrow{I_{ms}} - I_{dr} \right) \quad (3.51)$$

$$I_{qs} = -\frac{L_m}{L_{ss}} I_{qr} \quad (3.52)$$

$$\Psi_{dr} = \frac{L_m^2}{L_{ss}} \overrightarrow{I_{ms}} + \sigma L_{rr} I_{dr} \quad (3.53)$$

$$\Psi_{qr} = \sigma L_{rr} I_{qr} \quad (3.54)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_{ss}L_{rr}} \quad (3.55)$$

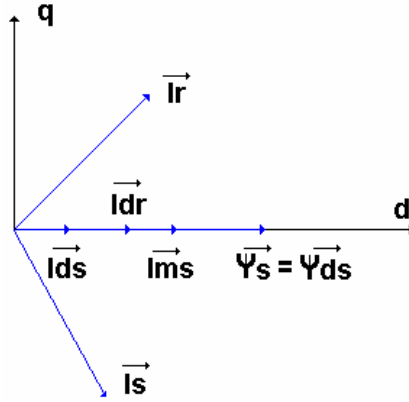


Fig. 10 Diagrama fasorial del control por orientación del flujo del estator

La componente V_{ds} de la tensión del estator se puede aproximar a cero al despreciar el valor de la resistencia del estator y al considerar que existe flujo magnético únicamente en la componente d y es constante. La ecuación (3.56) y (3.57) representan la tensión del bobinado del estator en los ejes d y q .

$$V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_o \Psi_{qs} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} \approx 0 \quad (3.56)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_o \Psi_{ds} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} \approx \omega_o \Psi_{ds} = \left| \overline{V}_s \right| \quad (3.57)$$

Las ecuaciones para el voltaje del rotor, V_{dr} y V_{qr} , en el nuevo sistema de referencia están dadas por la ecuación (3.58) y (3.59).

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \sigma L_{rr} \frac{dI_{dr}}{dt} - (\omega_o - \omega_r) \sigma L_{rr} I_{qr} \quad (3.58)$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \sigma L_{rr} \frac{dI_{qr}}{dt} + (\omega_o - \omega_r) \sigma L_{rr} I_{dr} \quad (3.59)$$

$$V_A = V_{qr} - \frac{(\omega_o - \omega_r) L_m^2 |\overline{I_{ms}}|}{L_{ss}} \quad (3.60)$$

Redefiniendo la ecuación (3.48) para la potencia activa y reactiva al aplicar la transformación, se observa que cada variable se pueden regular de forma independiente a partir de las dos componentes de la corriente del rotor, I_{qr} y I_{dr} , como se observa en la expresión (3.61) y (3.62). $|\overline{V_s}|$ corresponde al fasor de la tensión del estator, que es igual a V_{qs} , al despreciar la resistencia del estator.

$$P_{act} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_{ss}} |\overline{V_s}| I_{qr} \quad (3.61)$$

$$Q_{react} = \frac{3}{2} |\overline{V_s}| \frac{L_m}{L_{ss}} (|\overline{I_{ms}}| - I_{dr}) \quad (3.62)$$

3.6 CONTROL DE LA VELOCIDAD MECÁNICA DE LA TURBINA

En la actualidad existen dos sistemas para controlar la velocidad mecánica de la turbina y por lo tanto la potencia mecánica, estos sistemas son: control por entrada en pérdida aerodinámica (stall control) y control por variación del ángulo de paso (pitch control).

3.6.1 Control por entrada en pérdida aerodinámica.

Es el sistema de control más sencillo y económico generalmente utilizado en turbinas de mediana y baja potencia. Este control aprovecha el fenómeno de los perfiles aerodinámicos, conocido como entrada en pérdida, el cual ocurre cuando la velocidad de la corriente de viento sobrepasa un cierto valor, produciendo desprendimiento de flujo en la superficie del perfil, esto ocasiona una disminución en la fuerza de sustentación y un aumento en la fuerza de arrastre. Si el rotor de una turbina gira a velocidad constante y la velocidad del viento sobrepasa cierto valor empieza el desprendimiento, después de este valor la turbina entra en pérdida aerodinámica limitando así la potencia mecánica. Las principales desventajas de este tipo de control es su baja eficiencia a bajas velocidades

del viento y altas fluctuaciones en la potencia, que se transforman en altas vibraciones a elevadas velocidades de viento, acompañadas de grandes momentos flectores y esfuerzos causando daños por fatiga. La curva potencia contra velocidad del viento esta determinada por las características aerodinámicas de las palas, en especial el comportamiento después que entra en pérdida.

Para un funcionamiento adecuado de este tipo de turbinas es aconsejable analizar los siguientes factores:

- Realizar un diseño óptimo de las palas para lograr que la entrada en pérdida se presente a la velocidad de viento deseada
- Diseñar la estructura apropiada para que soporte las fuertes vibraciones y esfuerzos característicos de las turbinas controladas por entrada en pérdida
- Garantizar que la velocidad angular del rotor sea más o menos constante permitiendo margen de error máximo del 10%*, para lograrlo se deben usar generadores asíncronos conectados directamente a la red.
- Utilizar un mecanismo de parada, ya sea un freno aerodinámico y/o mecánico para cuando ocurran desconexiones de la red o fallas eléctricas, evitar que la turbina se desboque en velocidad y ponga en peligro los componentes de la turbina.

3.6.2 Control por variación del ángulo de paso.

Este método empleado para controlar la velocidad y la potencia mecánica, realiza un ajuste continuo del ángulo de paso, definido como el ángulo que se forma entre la cuerda del perfil aerodinámico en la punta de la pala y el plano de rotación, una vez alcanzado el valor nominal. Resulta evidente que, para una geometría dada de pala, si mecánicamente se cambia el ángulo de paso se estará cambiando el ángulo de ataque de todos los elementos de pala, modificando a su vez las fuerzas sobre ella (fuerza de sustentación y arrastre) haciendo posible regular la velocidad y la potencia. El ángulo de paso puede tener valores entre cero y noventa grados. Para cero grados la turbina tiene rendimiento

* MA, Xin. Adaptive Extremum Control and Wind Turbine Control. 1997.

máximo y para noventa grados es mínimo[†]. Existen otros factores como el grado de deflexión de la pala y la inercia del rotor. La desalineación del rotor y suciedad que se adhiere afectan la respuesta dinámica del rotor en turbinas controladas por variación del ángulo de paso.

Mecánicamente el cambio del ángulo de paso de las palas consiste en hacerlas girar simultáneamente sobre su eje radial. Los mecanismos que actúan sobre la raíz de las palas se encuentran ubicados dentro del cubo del rotor y pueden ser hidráulicos o eléctricos. Los actuadores eléctricos pueden ser sistemas individuales que operan de forma sincronizada, este tipo de sistema está formado por un motor-reductor en el cubo acoplado a una corona en la base de la pala, este sistema es empleado en turbinas de baja potencia. Los segundos tienen una unidad hidráulica y un servomotor que mueve una barra actuadora que pasa a través del interior del eje principal hasta el cubo del rotor.

El cambio del ángulo de paso debe hacerse lo más rápido posible para limitar las fluctuaciones de potencia ocasionados por la turbulencia del viento. Los sistemas modernos alcanzan una razón de cambio de hasta 10 grados/s, sin incurrir en grandes esfuerzos por fatiga. Por debajo de la velocidad nominal del viento, la turbina simplemente tratará de extraer la máxima energía posible y para esto no es necesario variar el ángulo de paso. Cuando la velocidad del viento está por encima de la nominal el ángulo de paso aumenta para mantener constante el torque y el empuje sobre el rotor decrece, disminuyendo también los esfuerzos sobre la torre, permitiendo regular la potencia mecánica.

3.7 LINEALIZACIÓN

El par aerodinámico producido por la turbina eólica esta dada por la ecuación (3.63), donde $C_p(\lambda, \beta)$ sigue la forma de la ecuación (3.18). El sistema de ecuaciones que representa la dinámica de la turbina eólica es no lineal al considerar esta variable y la dinámica del generador DFIG, por lo tanto se linealiza el sistema aplicando la expansión

[†] BURTON, Tony. Wind energy handbook. 2001.

de Taylor alrededor de un punto de operación. Normalmente se selecciona la velocidad de viento que permite que la turbina alcance la potencia nominal, como punto de referencia.

$$T_{Aer} = \frac{1}{2} \rho AR \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} V_{requ}^2 \quad (3.63)$$

En el anexo D se presenta el procedimiento desarrollado, dada las ecuaciones diferenciales que describen la aerodinámica de la turbina, el sistema mecánico y el generador de inducción. Se realiza un desacople del sistema eléctrico del sistema mecánico en la turbina eólica, esta aproximación es válida porque la dinámica del generador DFIG presenta un tiempo de establecimiento del orden de los milisegundos comparado con la dinámica de la caja multiplicadora que se encuentra en el orden de los segundos.

En la ecuación (3.64) a la ecuación (3.66) aparecen, respectivamente, las funciones de transferencia $G_1(s) = I_{dr}/V_{dr}$, $G_2(s) = I_{qr}/V_A$ y $G_3(s) = \omega_{gen}/\beta$, obtenidas del modelo lineal de la turbina eólica (Anexo D), correspondientes a las tres variables que se desean regular, corriente del rotor I_{dr} e I_{qr} , además de la velocidad mecánica del generador, cada una evaluada para una velocidad media del viento de 11 m/s, velocidad en la cual la turbina NM 2000/82 fabricada por Neg Micon, alcanza la potencia nominal de 2 MW.

$$G_1(s) = \frac{I_{dr}}{V_{dr}} = \frac{6738s + 59030}{s^2 + 17,52s + 86,33} \quad (3.64)$$

$$G_2(s) = \frac{I_{qr}}{V_A} = \frac{6738s + 59030}{s^2 + 17,52s + 86,33} \quad (3.65)$$

$$G_3(s) = \frac{\omega_{gen}}{\beta} = \frac{-1,455 * 10^{-11} s^4 + 5,427 * 10^{-8} s^3 - 1,229 * 10^5 s^2 - 3,083 * 10^7 s - 1,854 * 10^9}{s^5 + 1,108 * 10^5 s^4 + 1,182 * 10^7 s^3 + 4,597 * 10^7 s^2 + 2,747 * 10^9 s + 6,841 * 10^7} \quad (3.66)$$

4. DISEÑO DE CONTROLADORES UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

John Holland introdujo los algoritmos genéticos en 1970, su finalidad es imitar los procesos adaptables de los sistemas naturales para estar en capacidad de diseñar sistemas artificiales que retengan los mecanismos de evolución. Como concepto básico de los algoritmos genéticos se tiene la población inicial de individuos, donde cada uno representa una solución factible a un problema. Luego, se representa la evolución de los individuos, donde cada uno se evalúa para medir su calidad con respecto al problema, asignándole un valor o puntuación que equivale a la efectividad de un organismo para competir. La selección es el siguiente proceso que se lleva a cabo, donde solo los mejores sobreviven. Al tener seleccionados los individuos con mejor adaptación al medio, se procede con la reproducción, donde se produce una nueva población de posibles soluciones de individuos generados mediante operadores genéticos: cruce y mutación.

4.1 ÍNDICES DE DESEMPEÑO

Un índice de desempeño es una medida cuantitativa del rendimiento de un sistema y se escoge según el énfasis dado a las especificaciones más importantes del mismo. Una medida cuantitativa del desempeño es necesaria para la operación de sistema de control moderno. Las aplicaciones en este aspecto son: los sistemas de control adaptables, la optimización automática de parámetros de un sistema de control y el diseño de sistemas óptimos. Un índice de desempeño apropiado es la integral al cuadrado del error, ISE, el cual está dado por la ecuación (4.1), donde el límite superior T es un tiempo finito escogido arbitrariamente de tal forma que la integral se acerque a un valor en estado estable. Este criterio penaliza grandes errores y discrimina entre respuestas excesivamente sobreamortiguadas y excesivamente subamortiguadas, el mínimo valor de la integral ocurre para un valor crítico de amortiguamiento.

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

Otro índice de desempeño es la integral del valor absoluto de la magnitud del error, IAE, definido por la ecuación (4.2). Este índice es particularmente útil para estudios con simulaciones en computador, es una función más sensible al error que el índice ISE, debido a esta característica el IAE tiende a dar tiempos largos de establecimiento y sobrepicos más altos.

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (4.2)$$

Para reducir la contribución del gran error inicial sobre el valor de la integral de desempeño, así como los errores que pueden ocurrir después en la respuesta, se propone el índice de desempeño denominado integral del tiempo multiplicado por el valor absoluto del error, ITAE, el cual está dado por la ecuación (4.3). Otro índice similar, ITSE, es la integral del tiempo multiplicado por el cuadrado del error, el cual se define por la ecuación (4.4).

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (4.3)$$

$$ITSE = \int_0^T t e(t)^2 dt \quad (4.4)$$

4.2 CONTROLADOR PI

El control de la potencia activa y reactiva suministrado por el generador DFIG se logra implementando el diagrama de bloques de la figura 11. La corriente de referencia del eje d del bobinado del rotor, $I_{dr \text{ ref}}$, para el lazo de control que regula la potencia reactiva se obtiene de la ecuación (3.62) al despejar la variable I_{dr} , como se observa en la ecuación (4.5).

$$I_{dr \text{ ref}} = \left| \overline{I_{ms}} \right| - \frac{2}{3} \frac{L_{ss}}{\left| \overline{V_s} \right|} \frac{L_m}{L_m} Q_{\text{reac}} \quad (4.5)$$

Al asumir que la componente de tensión del eje d del estator tiende a cero al despreciar la resistencia del estator, ecuación (3.56), la tensión $|\overline{V}_s|$ es igual a V_{qs} . La corriente de magnetización está dada por la ecuación (4.6), la cual se obtiene de la expresión (3.51).

$$|\overline{I}_{ms}| = \frac{L_m}{L_{ss}} I_{ds} + I_{dr} \quad (4.6)$$

La corriente de referencia del eje q , ecuación (4.7), para el lazo de control que regula la potencia activa se obtiene de la ecuación (3.61).

$$I_{qr \text{ ref}} = -\frac{2}{3} \frac{L_{ss}}{|\overline{V}_s|} \frac{P_{act}}{L_m} \quad (4.7)$$

Para el diseño del regulador PI para el lazo de control de la corriente del rotor I_{qr} , se toma como planta la función de transferencia $G(s) = \frac{I_{qr}}{V_A}$, por lo tanto la tensión que genera el regulador va ser V_A , la cual se relaciona con V_{qr} por medio de la expresión (4.8). El regulador PI del lazo de control para la corriente del rotor I_{dr} entrega de forma directa la tensión V_{dr} .

$$V_{qr} = V_A + \frac{(\omega_o - \omega_r) L_m^2 |\overline{I}_{ms}|}{L_{ss}} \quad (4.8)$$

Dado que la función de transferencia que relaciona la corriente I_{dr} con la tensión V_{dr} es la misma que la función de transferencia que relaciona I_{qr} con la tensión V_A , se asume el mismo regulador PI para los dos lazos de control. La determinación de las constantes K_p y K_i se realiza mediante algoritmos genéticos, los cuales permiten realizar una búsqueda óptima en el espacio de parámetros. La función objetivo está basada plenamente en características de la respuesta transitoria del sistema en lazo cerrado ante una entrada

escalón. La ecuación (4.9) calcula la suma ponderada de los índices de desempeño ISE de la señal de error, $e(t)$, y de la acción de control, $u(t)$, dado un número de puntos N en los cuales se evalúa la respuesta transitoria. Las constantes que acompañan a la ecuación se determinaron de forma que ambos parámetros realizaran igual aporte a la función de aptitud. Se considera que el algoritmo genético ha obtenido un resultado óptimo cuando la función f tiende a un valor cercano a cien, caso en el cual la energía del error y de la acción de control son mínimas.

$$f = 100 - \left(0,05 \sum_{i=0}^N e(i)^2 + 9 \sum_{i=0}^N u(i)^2 \right) \quad (4.9)$$

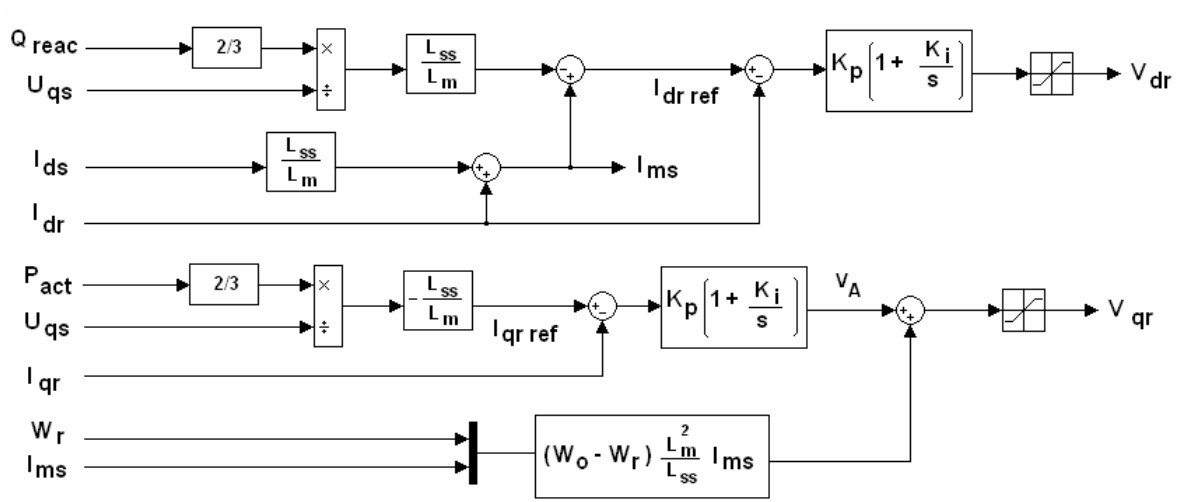


Fig. 11 Control por orientación del flujo del estator a partir de reguladores PI

El control de la velocidad mecánica del generador de inducción se realiza modificando el ángulo de paso del aspa de la turbina, a través de un regulador PI con una estructura anti windup (figura 12), garantizando que la máxima acción de control no supere los 30° y la razón de cambio no sea superior a $10^\circ/s$. La selección de las constantes K_p y K_i se realiza a través de un algoritmo genético, definiendo como función de aptitud la ecuación (4.10), la cual se basa en la respuesta transitoria de la velocidad ante una entrada escalón. Se seleccionó el índice ITSE para la señal de error y de la acción de control, dado que el sistema era de comportamiento lento y los índices ISE no generaban resultados óptimos.

$$f = 100 - \left(0,002 \sum_{i=0}^N t(i) * e(i)^2 + 0,012 \sum_{i=0}^N t(i) * u(i)^2 \right) \quad (4.10)$$

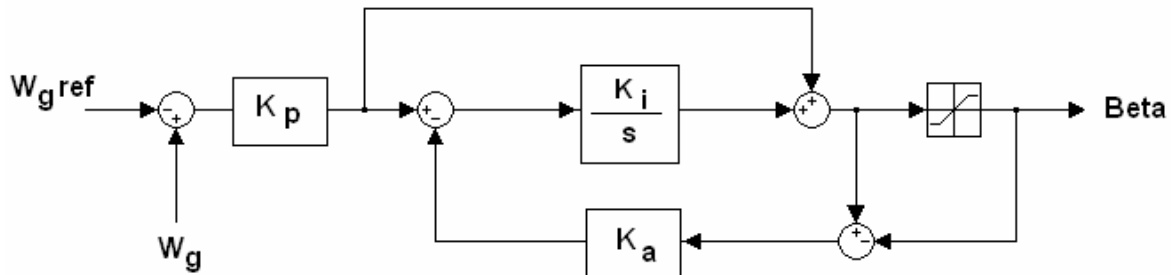


Fig. 12 Control de la velocidad mecánica a partir de un regulador PI

En el anexo E se presenta un ejemplo numérico, con los resultados obtenidos en cada uno de los pasos desarrollados, del procedimiento implementado en la determinación de las constantes K_p y K_i del regulador para la corriente del rotor I_{dr} . El mismo procedimiento se aplica para evaluar el regulador de la velocidad mecánica del generador DFIG.

4.3 CONTROLADOR ROBUSTO HINF

Los tres controladores PI que regulan la corriente del rotor I_{dr} y I_{qr} , además de la velocidad mecánica del generador se sustituyen por tres controladores robustos basados en la técnica de *Hinf*. La función de transferencia de cada uno de los reguladores se obtiene utilizando el comando *hinftopt* de la toolbox de control robusto de Matlab, la cual utiliza la técnica de *Loop shaping*. Para la selección de las funciones de transferencia de la señal de sensibilidad, la acción de control y la respuesta del sistema, se puede asumir el siguiente comportamiento en frecuencia:

- *Minimización de la Sensibilidad (W_1)*. Es importante tener una sensibilidad pequeña a bajas frecuencias pero a altas es necesario soportar el hecho de que $\sigma^+\{S(j\omega)\} \approx 1$ si se desea atenuar el ruido de medición. Esto da la tónica para seleccionar $W_1(s)$, debe ser grande a bajas frecuencias y pequeña a altas frecuencias.

- *Acción de control (W_2)*. Es importante imponer restricciones en el ancho de banda de la señal actuadora, dado que un valor alto implica un desgaste acelerado de los actuadores., por lo tanto se recomienda que siga el comportamiento de un filtro pasa altos.
- *Respuesta del sistema (W_3)*. Mediante la selección de $W_3(s)$ se puede seleccionar el grado de atenuación del ruido de medición y la pendiente con la que disminuye con respecto a la frecuencia, por lo tanto debe seguir el comportamiento de un filtro pasa altos.

Para la selección de las constantes k_i , a_i y b_i , de la función de transferencia $W_1(s)$, $W_2(s)$ y $W_3(s)$, ecuación (4.11), que definen la respuesta en frecuencia del controlador robusto, se utilizó un algoritmo genético, La función de transferencia que penaliza el error, $W_1(s)$, presenta un integrador con el fin de eliminar el offset inherente ante la entrada escalón.

$$W_1(s) = \frac{k_1 \left(\frac{s}{a_1} + 1 \right)}{s \left(\frac{s}{b_1} + 1 \right)} \quad W_2(s) = \frac{k_2 \left(\frac{s}{a_2} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{b_2} + 1 \right)} \quad W_3(s) = \frac{k_3 \left(\frac{s}{a_3} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{b_3} + 1 \right)} \quad (4.11)$$

La función de aptitud que se definió para determinar el controlador para la corriente del rotor I_{dr} y I_{qr} , esta dada por la ecuación (4.12), en la cual se asume el índice ITAE del error y el índice ISE de la acción de control como parámetros que caractericen la respuesta transitoria del sistema.

$$f = 100 - \left(0,5 \sum_{i=0}^N t(i) * e(i)^2 + 6,5 \sum_{i=0}^N u(i)^2 \right) \quad (4.12)$$

Para el regulador de la velocidad mecánica la función de aptitud está dada por la ecuación (4.13), definiendo como parámetros a optimizar el índice ITSE del error y el índice ISE de la acción de control. En el anexo F se presenta un ejemplo numérico del procedimiento implementado para determinar las funciones de transferencia $W_1(s)$, $W_2(s)$ y $W_3(s)$, para el

diseño del controlador robusto. El procedimiento es el mismo para el diseño de los reguladores para la corriente del rotor.

$$f = 100 - \left(0,05 \sum_{i=0}^N t(i) * e(i)^2 + 0,01 \sum_{i=0}^N u(i)^2 \right) \quad (4.13)$$

4.4 CONTROLADOR LQG

El objetivo del regulador LQR es encontrar la matriz de ganancias, K , que minimice la ecuación (4.14), donde Q y R son matrices simétricas definidas positivas.

$$J = \int_0^{\infty} (x' Q x + u' R u) dt \quad (4.14)$$

Un criterio para seleccionar el valor de cada elemento de la matriz está dado por la regla de Bryson, ecuación (4.15), asumiendo Q y R como matrices diagonales, donde cada elemento es igual al inverso del máximo valor de la variable de estado al cuadrado. En algunas situaciones no se tiene acceso a todas las variables de estado, por lo tanto es necesario implementar un filtro de *Kalman* que minimice la covarianza del error en el proceso de estimación. La combinación del regulador LQR con el filtro de *Kalman* se le conoce como un control LQG.

$$Q_{ii} = \frac{1}{\text{Máximo valor aceptable de } x_i^2} \quad i \in \{1, 2, \dots, l\}$$

$$R_{jj} = \frac{1}{\text{Máximo valor aceptable de } u_j^2} \quad j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (4.15)$$

Para el control de la corriente del rotor I_{dr} y I_{qr} , que a su vez regulan la potencia activa y reactiva que suministra el generador DFIG, se implementa el diagrama de bloques de la figura 13.a, en la cual la función de transferencia de la planta corresponde a la ecuación (3.64) y el modelo del estimador se basa en la representación en variables de estado de la dinámica de la máquina (Anexo D). Las ganancias K_i y K se determina a través de la función *lqr* de la toolbox de control robusto de Matlab, una vez definida las matrices Q y R .

La selección de los elementos de la diagonal de las matrices, a_i y b_i , ecuación (4.16), se realiza mediante un algoritmo genético. La función de aptitud está dada por la ecuación (4.16), donde Y_{ss} corresponde al valor en estado estable que alcanza la corriente del rotor ante una entrada escalón. El objetivo de incluir este parámetro es minimizar el error en estado estable, porque al no tener integrador el sistema, no se puede garantizar que el error sea igual a cero. Se asume los índices ISE del error y de la acción control como parámetros para caracterizar la respuesta transitoria del sistema.

$$Q = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \end{bmatrix} \quad R = [b_1] \quad (4.16)$$

$$f = 100 - \left(0.005 \sum_{i=0}^N e(i)^2 + 2.5 \sum_{i=0}^N u(i)^2 + 5 * Y_{ss} \right) \quad (4.17)$$

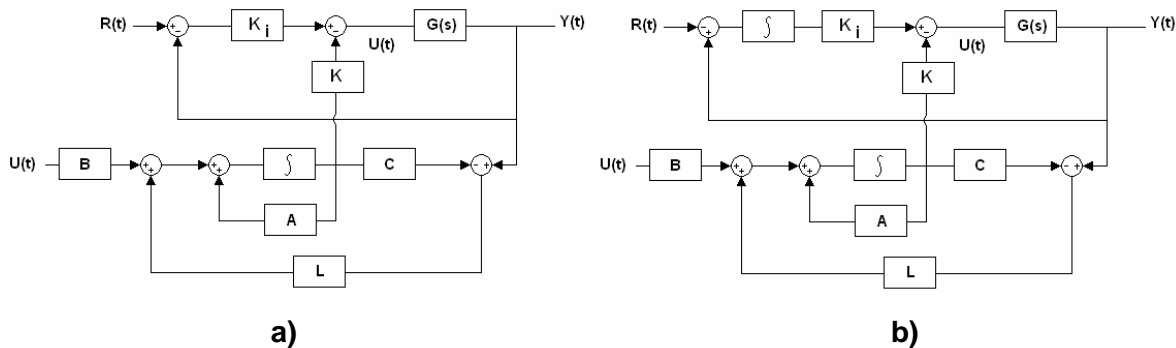


Fig. 13 Diagrama de bloques de un regulador LQG. a) Regulador de potencia. b) Regulador de Velocidad

Para el control de la velocidad mecánica del generador DFIG se implementa un regulador LQG, siguiendo el diagrama de bloques de la figura 13.b, agregando un integrador en la trayectoria directa con el fin de garantizar que el sistema alcance el punto de referencia. Para determinar las ganancias K_f y K_v se utiliza el comando *lqr* de la toolbox de control robusto de Matlab, definiendo previamente las matrices Q y R . Dado que se agrega un integrador al sistema, para evaluar estas dos matrices es necesario definir una nueva matriz de estados, A_{new} y una nueva matriz de entrada, B_{new} , dadas por la ecuación (4.18), donde A , B y C corresponde a la representación en el espacio de estado de la dinámica de la turbina eólica (Anexo D).

$$A_{new} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{new} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$
(4.18)

El modelo dinámico de la turbina incluye siete estados, el octavo elemento de la matriz Q, ecuación (4.19), corresponde a la ganancia del integrador agregado en la trayectoria directa. La selección de los elementos de las diagonales para las matrices, Q y R, utilizadas para el diseño del regulador LQR, se realiza mediante algoritmos genéticos. La función de aptitud está definida por la ecuación (4.20) en la cual se utiliza los índices ITSE del error y de la acción de control para caracterizar la respuesta transitoria del sistema ante una entrada escalón. En el anexo G se presenta un ejemplo numérico del algoritmo genético implementado para la selección de las constantes de las matrices Q y R para el lazo de control de la velocidad. El procedimiento es similar para el diseño del regulador de la corriente del rotor.

$$Q = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_8 \end{bmatrix} \quad R = [b_1]$$
(4.19)

$$f = 100 - \left(0.0008 \sum_{i=0}^N t(i) * e(i)^2 + 0.005 \sum_{i=0}^N t(i) * u(i)^2 \right)$$
(4.20)

La matriz de retroalimentación de estados, L, correspondiente al filtro de Kalman, se determina por medio del comando *kalman* de la toolbox de control robusto de Matlab, especificando previamente las matrices QN y RN, definidas por la ecuación (4.21), donde:

- $E(\omega\omega^T)$ corresponde a la esperanza matemática del ruido blanco agregado al proceso.
- $E(vv^T)$ es la esperanza matemática del ruido blanco captado por los sensores.

$$\begin{aligned} E(\omega\omega^T) &= QN \\ E(vv^T) &= RN \end{aligned} \tag{4.18}$$

5. CONTROL DE LA POTENCIA Y LA VELOCIDAD MECÁNICA DE UN GENERADOR DFIG

Cada uno de los modelos dinámicos de los subsistemas que hacen parte de una turbina eólica se implementaron en el software **Matlab Simulink®**. Los bloques principales se observan en la figura 14.

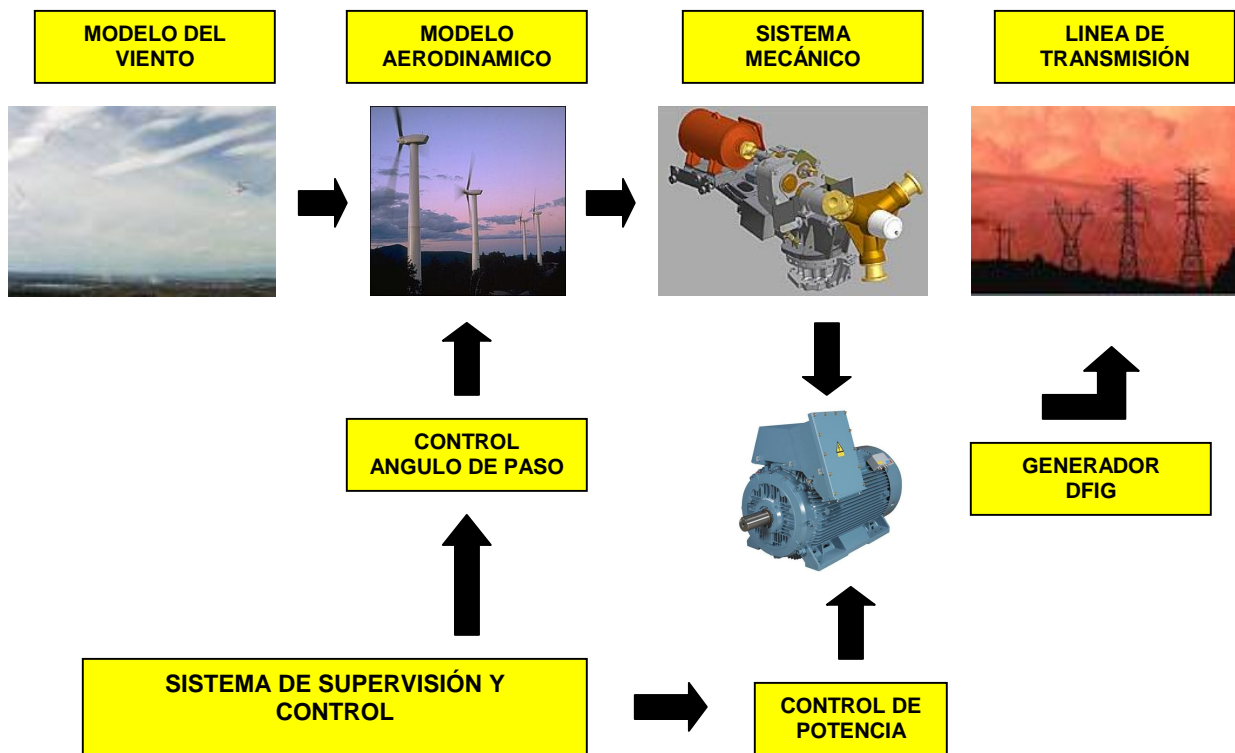


Fig. 14 Diagrama de bloques del modelo dinámico de una turbina eólica

- *Modelo del viento.* Incluye las ecuaciones que generan una secuencia de datos que emulan el comportamiento del viento que incide sobre las aspas de la turbina, incluyendo el fenómeno de muestreo rotacional.
- *Modelo aerodinámico.* El bloque contiene los datos experimentales de la curva coeficiente de torque $\left(c_p/\lambda\right)$ versus torque aerodinámico, para una turbina eólica de velocidad variable, facilitados por el Laboratorio Nacional RISO de Dinamarca (anexo B).

- *Modelo del sistema mecánico.* Describe las ecuaciones de un sistema mecánico de cuatro masas.
- *Modelo del generador DFIG.* Describe las ecuaciones dinámicas de un generador de inducción doblemente alimentado en el sistema de referencia $dq0$.
- *Línea de transmisión.* Modelo de una barra infinita acoplada a un circuito RL .
- *Sistema de supervisión y control.* El sistema de supervisión monitorea la corriente y tensión del generador DFIG, tanto del lado del rotor como del estator, además de la velocidad mecánica. A partir de esta información se generan las acciones de control: variación del ángulo de ataque y de la tensión del rotor V_{dr} y V_{qr} . Los valores de referencia se definen de forma que se pueda obtener la máxima transferencia de potencia del viento.

5.1 CONTROL DE LA VELOCIDAD MECÁNICA DE UN GENERADOR DFIG.

El control de la velocidad mecánica del generador DFIG se realizó, en primer lugar, con un regulador PI. Para la selección de las constantes K_p y K_i se programó un algoritmo genético con los valores de la tabla 1, dada la función de transferencia $\frac{\omega_{Gen}}{\beta}$, ecuación (5.1), correspondiente al modelo lineal de una turbina NM 2000/82, con el generador directamente conectado a la red de distribución (Anexo D).

$$G(s) = \frac{\omega_{Gen}}{\beta} = \frac{-1,455 * 10^{-11} s^4 + 5,427 * 10^{-8} s^3 - 1,229 * 10^5 s^2 - 3,083 * 10^7 s - 1,854 * 10^9}{s^5 + 1,108 * 10^5 s^4 + 1,182 * 10^7 s^3 + 4,597 * 10^7 s^2 + 2,747 * 10^9 s + 6841 * 10^7} \quad (5.1)$$

PARÁMETRO	VALOR
Tiempo de simulación	10 [s]
Límite de K_p	$0 < K_p < 10$
Límite de K_i	$0,1 < K_i < 10$
Resolución	40 bits
Número de individuos	20
Número de generaciones	200
Porcentaje de cruce	80 %
Porcentaje de mutación	0,5 %
Exponente	3

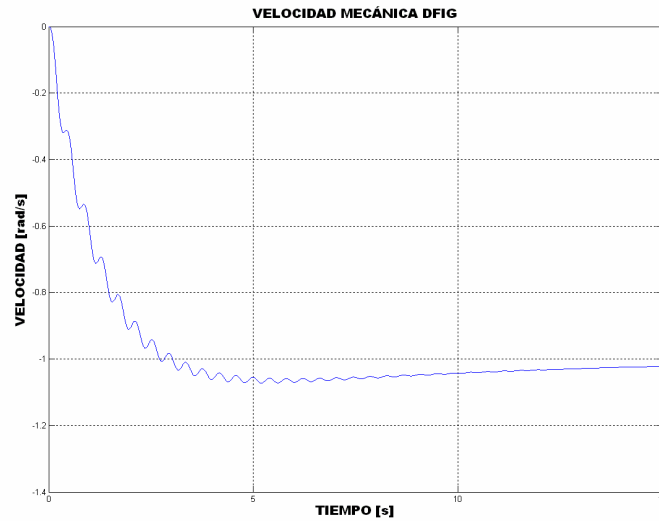
Tabla 1 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador PI – Velocidad mecánica del generador

En la expresión (5.2) se presenta el controlador obtenido del algoritmo genético, siguiendo el mismo procedimiento descrito en el anexo E, y en la figura 15 la respuesta transitoria de la velocidad mecánica ante una entrada escalón. El tiempo de establecimiento se encuentra alrededor de los 10 s con una acción de control inicial de 1,4 grados. Se observa que la acción de control no tiene un comportamiento suave, presentando una oscilación que no es adecuada para el actuator encargado de mover el aspa de la turbina.

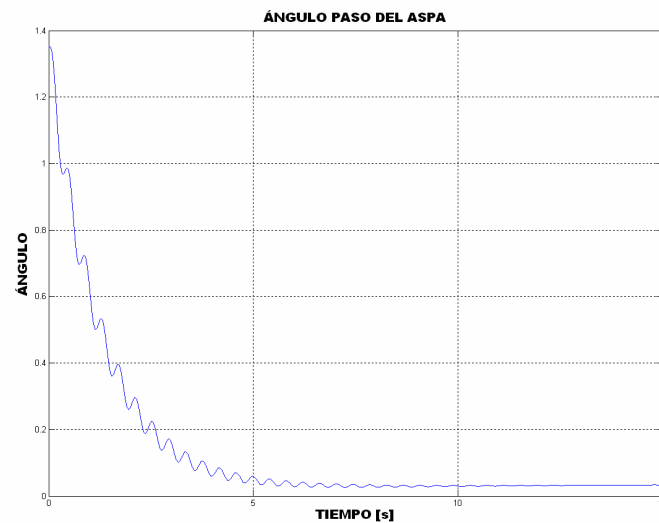
$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s} \right) = 1,349 \left(1 + \frac{0,1196}{s} \right) \quad (5.2)$$

Para evaluar el desempeño del regulador se implementó el modelo matemático de la turbina eólica en simulink. En la figura 16 se observa la respuesta transitoria de la velocidad del generador para un perfil de viento que varía desde 6 m/s hasta alcanzar un pico de 24 m/s, y posteriormente desciende nuevamente a 6 m/s, durante 2000 s. La velocidad nominal del generador DFIG es de 1515 rpm y la potencia nominal de 2 MW, según especificaciones técnicas (Anexo C). Se fija una tensión en bornes del rotor de cero, la ganancia anti-windup del regulador de velocidad es igual a 2 y el máximo valor del ángulo de paso es de 30°. El control actúa cuando la velocidad del viento es superior a la nominal, manteniendo la velocidad mecánica del generador cercana a las 1515 rpm, pero la potencia activa suministrada es superior a los 2 MW, alcanzando un pico de 2,34 MW. La causa de este aumento se fundamenta en la máxima razón de cambio que presenta el actuator encargado de mover el aspa, que debe ser inferior a 10°/s, con lo cual no se puede seguir las variaciones del viento.

En la figura 17 se presenta la respuesta del sistema operando la turbina a una velocidad media del viento de 11 m/s, con una intensidad de turbulencia del 40%. El control del ángulo de paso mantiene nuevamente la velocidad, pero al ser un actuator de respuesta lenta la potencia activa presenta grandes oscilaciones que van desde 1 MW a 2.4 MW, lo cual conduce a la implementación de un segundo lazo de control que regule esta variable, además de la potencia reactiva.



a)



b)

Fig. 15 Respuesta transitoria de la velocidad para una entrada escalón con un regulador PI. a) Velocidad mecánica del generador. b) Ángulo de paso

5.2 CONTROL DE LA POTENCIA ACTIVA Y EL FACTOR DE POTENCIA DE UN GENERADOR DFIG.

El generador DFIG presenta dos modos de operación los cuales dependen de la magnitud y fase de la tensión del rotor con relación al deslizamiento. Si el voltaje del rotor se encuentra en contrafase con el voltaje inducido y su magnitud es menor, se denomina

modo sub-síncrono. El segundo modo, denominado sobre-síncrono se presenta cuando el voltaje del rotor está en fase con el voltaje inducido y su magnitud es mayor. En la figura 18 se observa el flujo de potencia en el generador DFIG para los dos modos de operación.

Dado el modelo lineal del generador DFIG, ecuación (5.3), y los parámetros del algoritmo genético de la tabla 2, se obtiene las constantes del controlador PI, ecuación (5.4), que regulan la corriente del rotor del eje d y q , siguiendo el mismo procedimiento descrito en el anexo E, las cuales a su vez mantienen constante la potencia activa y reactiva, como se describió en el diagrama de bloques de la figura 11. El valor de referencia de la potencia reactiva se realiza estableciendo como punto de consigna el factor de potencia, es decir, dado este valor y el de potencia activa, se calcula la potencia reactiva. En la figura 19 se visualiza la respuesta transitoria de la corriente I_{dr} ante una entrada escalón, alcanzando un tiempo de establecimiento de 10 ms, valor muy inferior al tiempo de respuesta del sistema mecánico, característica que permite realizar el desacoplo de la dinámica correspondiente a la parte eléctrica de la mecánica en la turbina eólica.

$$G(s) = \frac{V_{dr}}{I_{dr}} = \frac{6738s + 59030}{s^2 + 17,52s + 86,33} \quad (5.3)$$

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s} \right) = 0,0768 \left(1 + \frac{0,08}{s} \right) \quad (5.4)$$

PARÁMETRO	VALOR
Tiempo de simulación	20 [ms]
Límite de K_p	$0 < K_p < 0,1$
Límite de K_i	$0 < K_i < 0,1$
Resolución	40 bits
Número de individuos	20
Número de generaciones	200
Porcentaje de cruce	60 %
Porcentaje de mutación	2 %
Exponente	7

Tabla 2 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador PI – Corriente del rotor I_{dr}

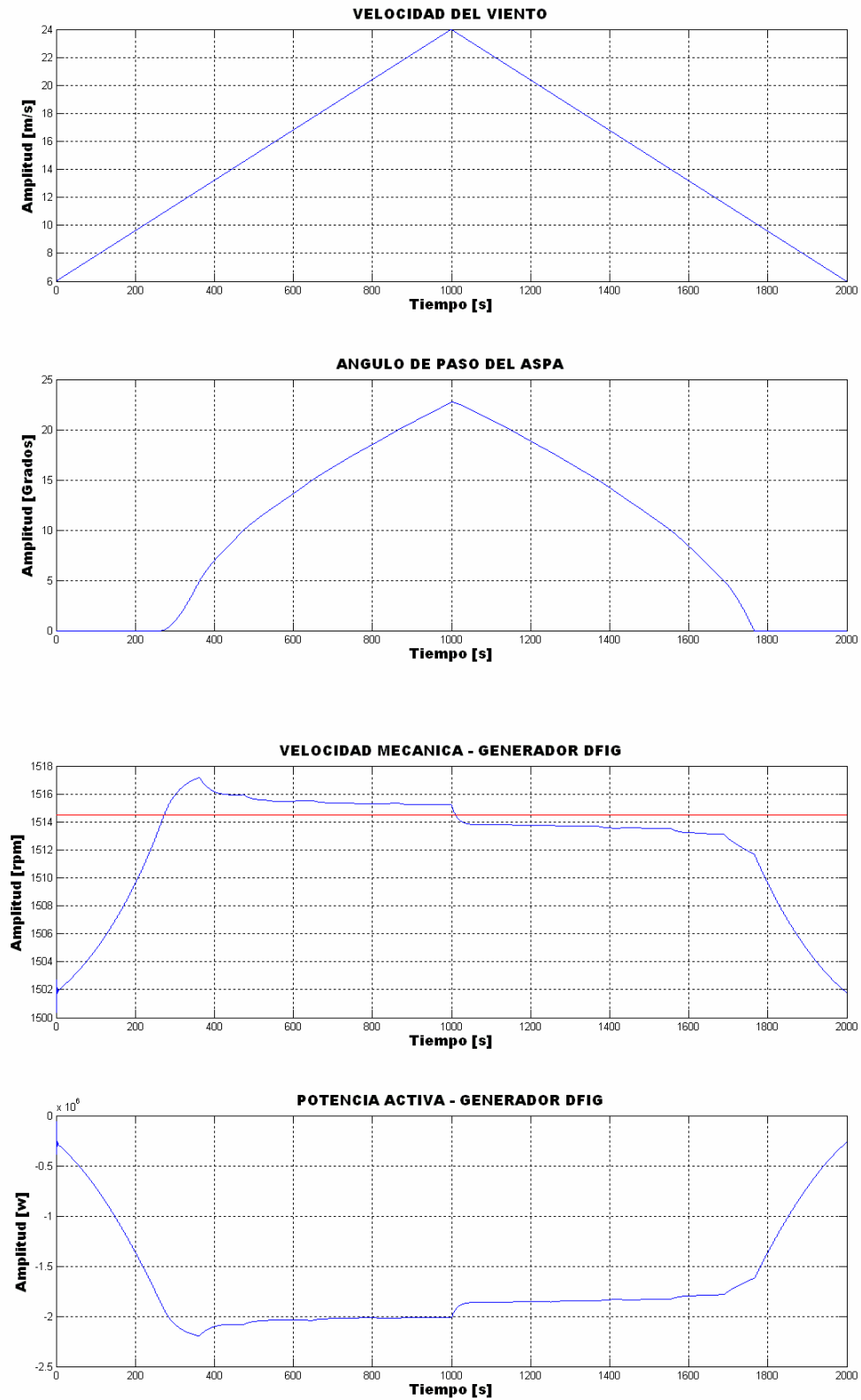


Fig. 16 Control por ángulo de paso - Velocidad del viento variable

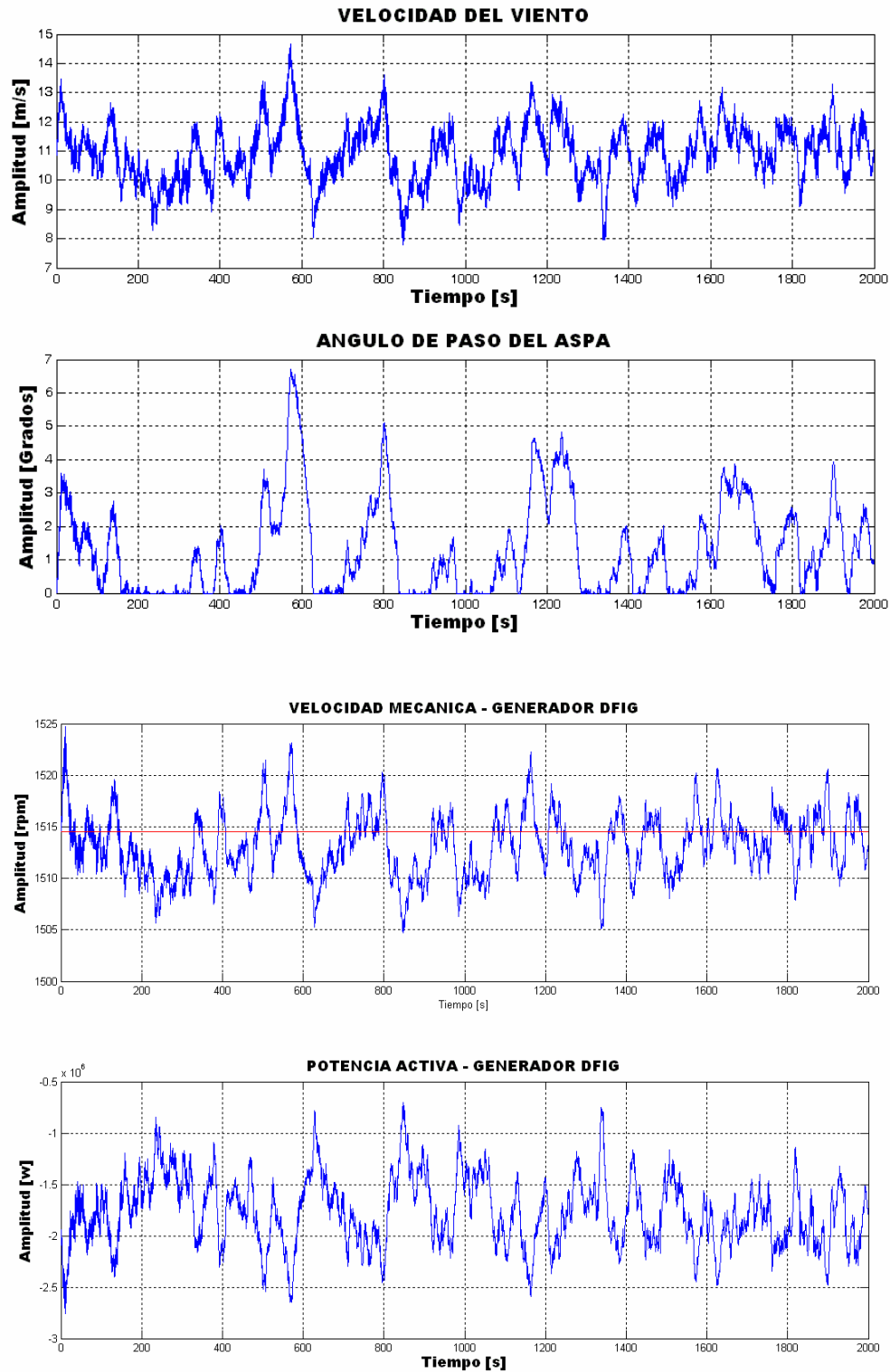


Fig. 17 Control por ángulo de paso - Velocidad del viento nominal de la turbina

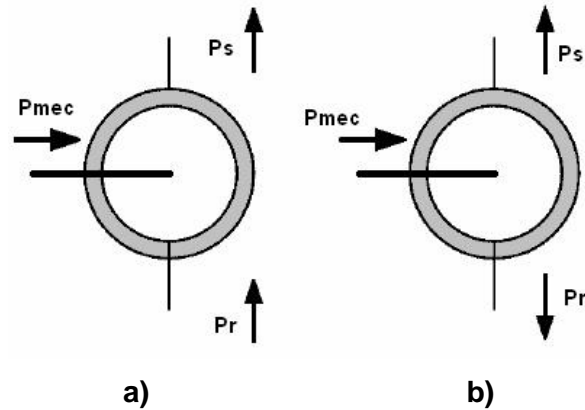
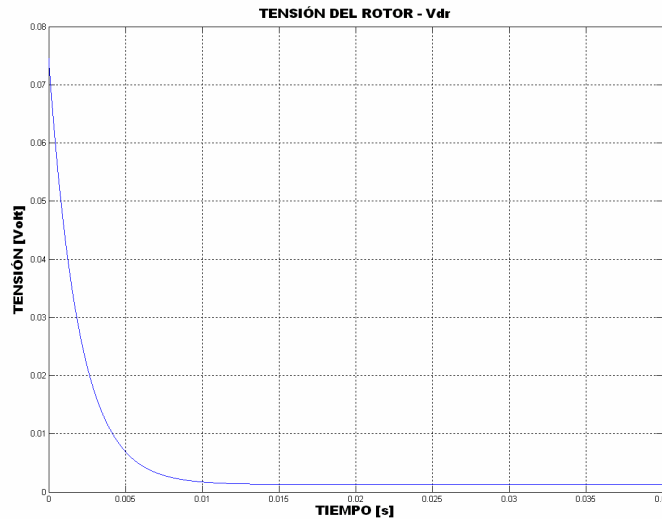


Fig. 18 Modos de operación de un generador DFIG. a) Modo sub-síncrono. b) Modo sobre-síncrono

Para evaluar el desempeño de los tres lazos de control (velocidad mecánica, potencia activa y factor de potencia), operando de forma simultánea, se fija una potencia activa de -2 MW, un factor de potencia de -0.95 y una velocidad mecánica de 1515 rpm. La velocidad media del viento es de 11 m/s con una intensidad de turbulencia de 40% . En la figura 20 se observa el comportamiento en el tiempo de la velocidad mecánica, la tensión V_{dr} y la tensión V_{qr} . Al disminuir la velocidad del viento, la potencia activa disminuye y por lo tanto se debe inyectar por el rotor la tensión suficiente para mantener el valor de referencia, esto lleva a que la velocidad disminuya hasta el punto que frena la máquina. El ángulo de paso del aspa vale cero grados en esos momentos.



a)



b)

Fig. 19 Respuesta transitoria de la corriente ante una entrada escalón con un regulador PI. a) Corriente del rotor I_{dr} . b) Voltaje del rotor V_{dr} .

Para evitar esta inestabilidad existen dos alternativas:

- Implementa un regulador PI anti-windup para el control de la potencia activa, como el de la figura 12, con lo cual se limita la tensión que genera la acción integral.
- Limitar la tensión del rotor a los cuadrantes $0 \leq V_{dr} \leq \infty$ y $-\infty \leq V_{qr} \leq 0$, lo cual garantiza que el generador opere únicamente en el modo sobre-síncrono. Si no se limita la tensión el generador puede operar en los dos modos.

En la figura 21 se observa la respuesta transitoria de la potencia activa, el factor de potencia y la velocidad mecánica del generador DFIG, al implementar un controlador anti-windup en el lazo de potencia activa, con una ganancia $Ka = 1$, un límite de la acción integral de +/- 6 voltios y sin limitador en la tensión del rotor. Los valores de referencia son -2 MW de potencia activa, un factor de potencia de -0.95 y una velocidad mecánica de 1515 rpm, la velocidad media del viento es de 11 m/s y la intensidad de turbulencia de 40%. En la figura 22 se visualiza la respuesta transitoria de las mismas variables, manteniendo los valores de referencia y el mismo comportamiento para la velocidad del viento, pero garantizando únicamente el modo de operación sobre-síncrono.

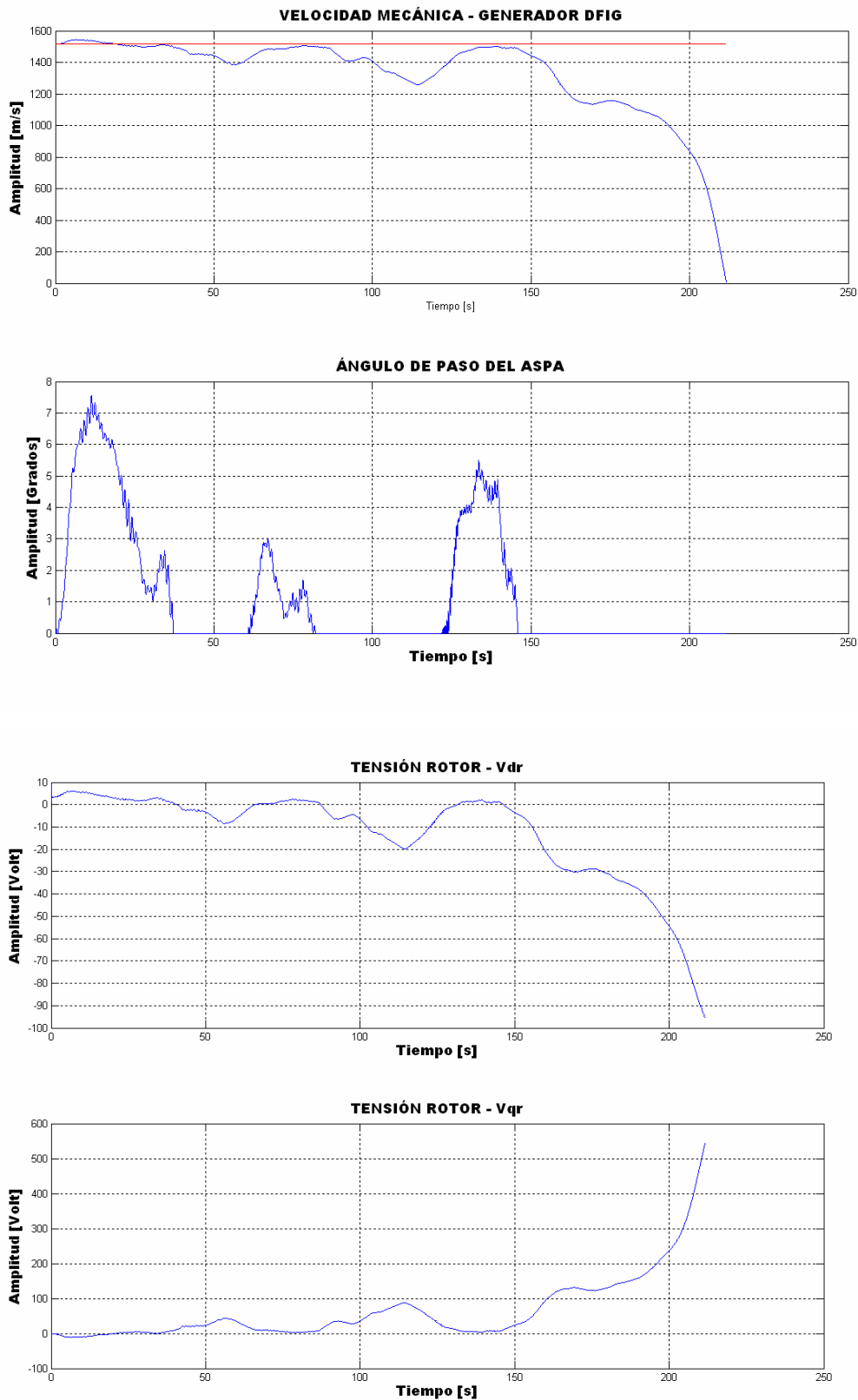
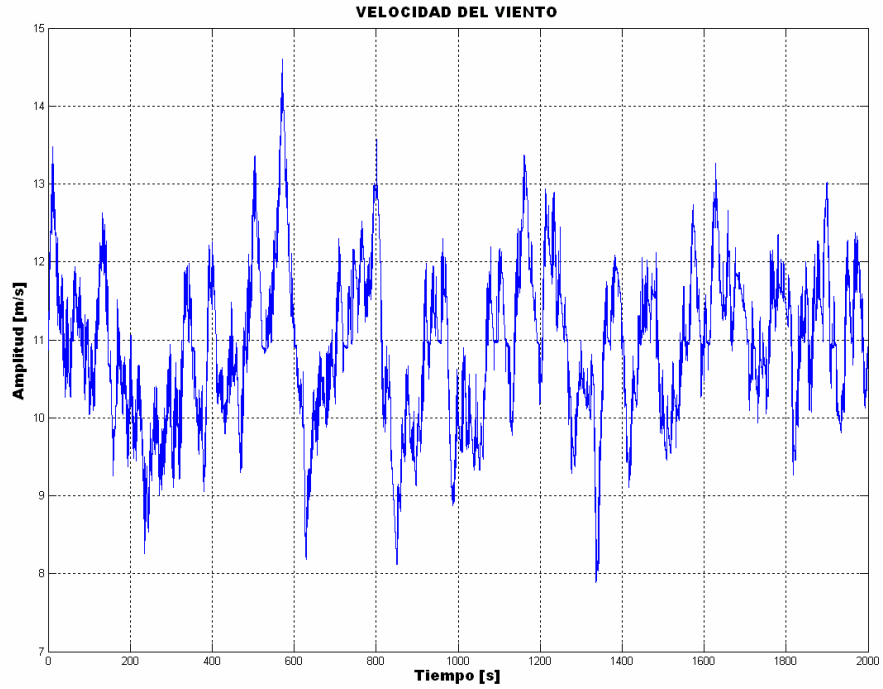
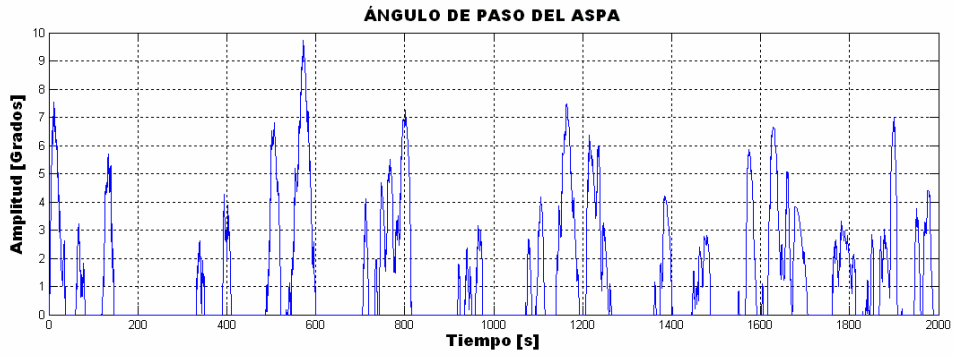
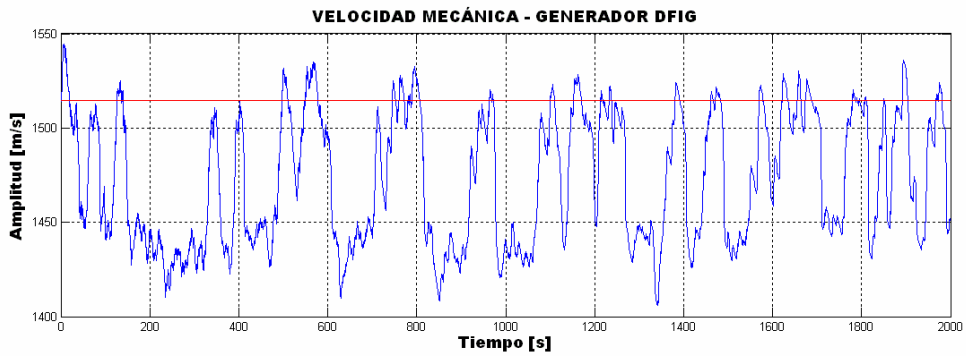


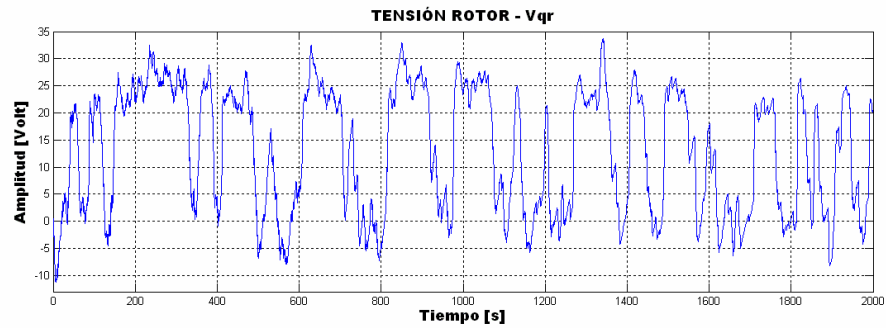
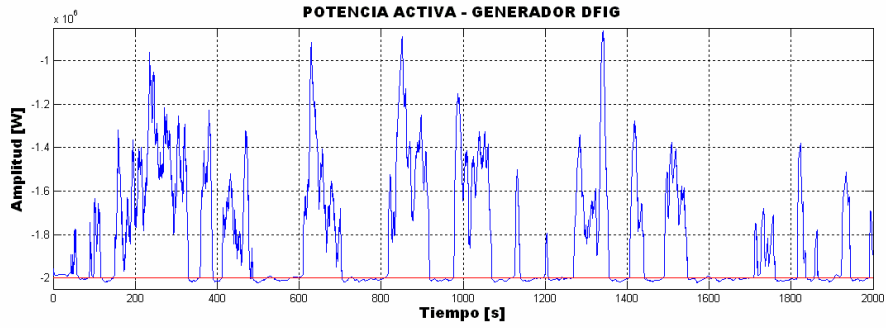
Fig. 20 Inestabilidad del generador DFIG



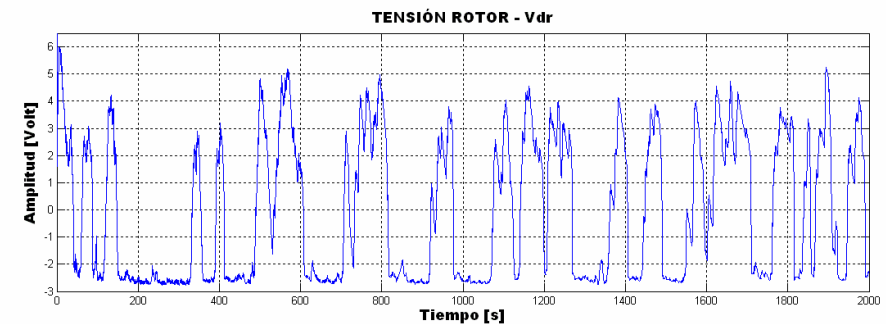
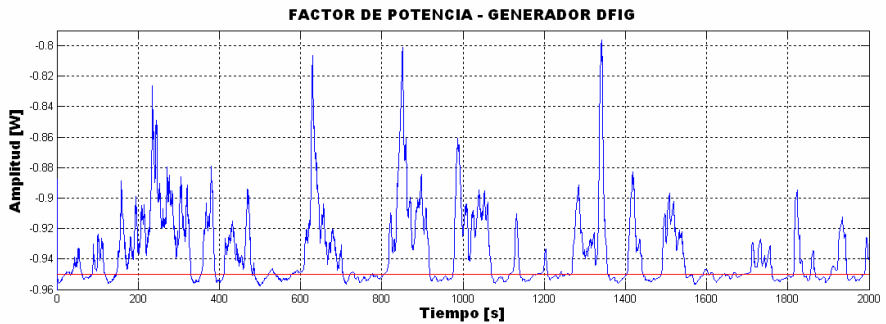
a)



b)

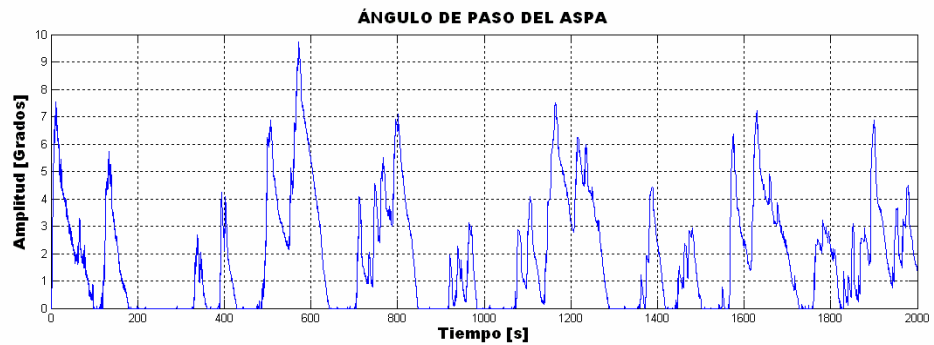
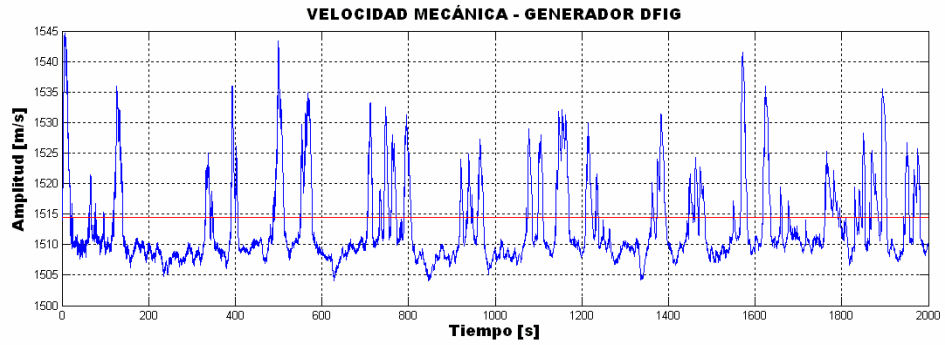


c)

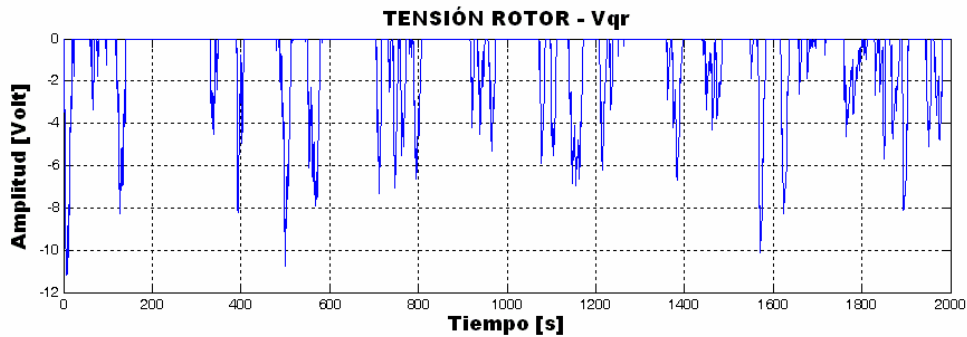
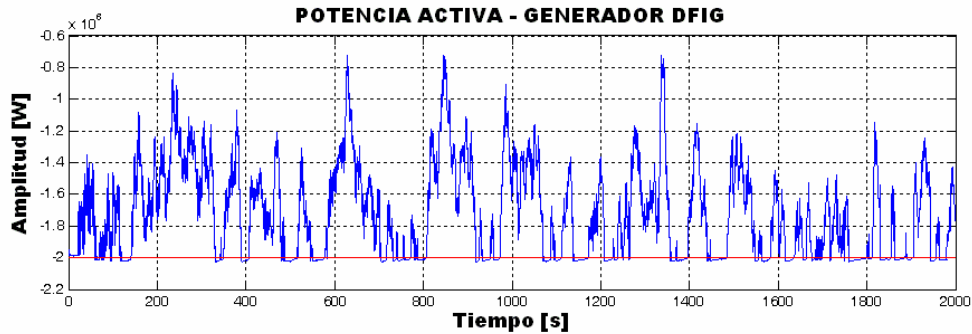


d)

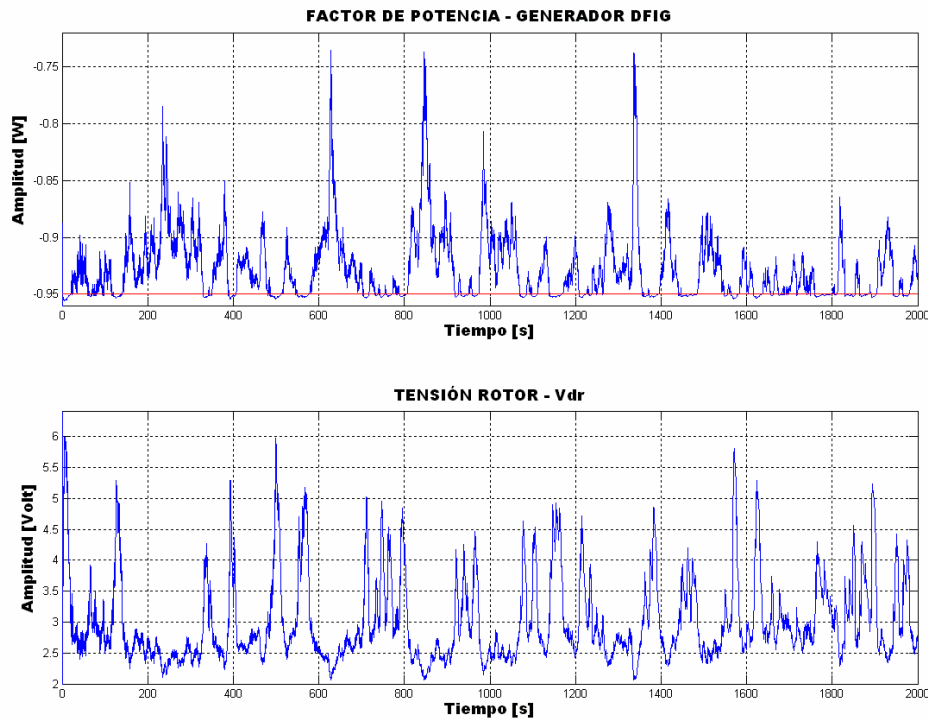
Fig. 21 Modo sub-síncrono y sobre-síncrono. a) Velocidad del viento. b) Velocidad mecánica. c) Potencia activa. d) Factor de potencia



a)



b)



c)

Fig. 22 Modo sobre-síncrono. a) Velocidad mecánica b) Potencia activa c) Factor de potencia

De los resultados anteriores se puede obtener las siguientes conclusiones:

- Durante el modo de operación sub-síncrono, se regula la potencia del generador a bajas velocidades del viento, en ese instante el inversor AC/AC conectado al rotor debe suministrarle a la máquina la potencia suficiente para garantizar que se mantenga el nivel de referencia. Durante el modo sobre-síncrono se regula la potencia a velocidades del viento superior a la nominal, absorbiendo la potencia extra el inversor AC/AC. Este análisis concuerda con el diagrama del flujo de potencia de la figura 18.
- La tensión durante el modo de operación sub-síncrono es mayor a la tensión para el modo de operación sobre-síncrono llevando a que la máquina opere como motor a bajas velocidad del viento.
- Los lazos de control para la corriente del rotor I_{dr} y I_{qr} , con ayuda del control del ángulo de paso del aspa, mantienen la potencia activa y el factor de potencia constantes para velocidades del viento mayor a la nominal de la turbina.

5.3 CONTROL DE UN GENERADOR DFIG CON UN REGULADOR ROBUSTO HINF.

Para el diseño del controlador de potencia se asumió la misma función de peso para las dos variables a regular del generador DFIG, I_{dr} e I_{qr} . Los parámetros del algoritmo genético para la selección de las constantes de las funciones de transferencia $W_1(s)$, $W_2(s)$ y $W_3(s)$ se presentan en la tabla 3. El procedimiento para evaluar estas funciones de transferencia es el mismo descrito en el anexo F. Los valores obtenidos después de 200 iteraciones del algoritmo genético están dados en la expresión (5.5). Utilizando el comando *hinftopt* de la toolbox de control robusto de Matlab, se evalúa la función de transferencia del controlador robusto, ecuación (5.6), dada las funciones de peso $W_1(s)$, $W_2(s)$ y $W_3(s)$.

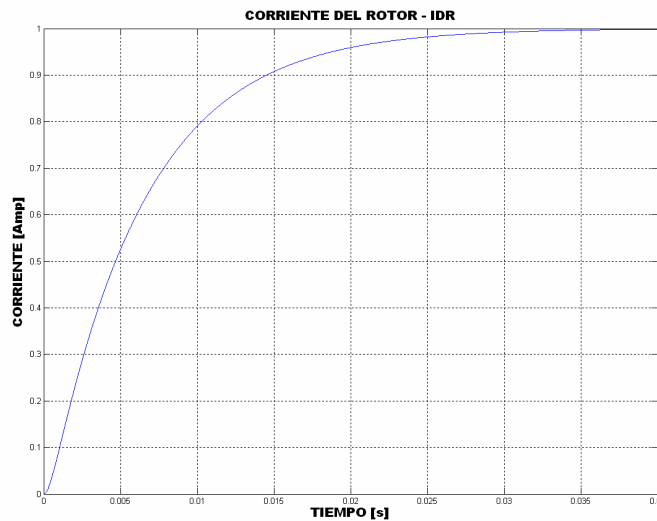
$$W_1(s) = \frac{83,7418s + 326486,958}{0,000112452s^2 + s} \quad W_2(s) = \frac{0,946672s + 7645,2216}{0,001150304s + 1} \quad W_3(s) = \frac{18,12559s + 41801,9902}{0,0001319174s + 1} \quad (5.5)$$

$$G_c(s) = \frac{4985s^5 + 8,653 \cdot 10^7 s^4 + 4,089 \cdot 10^{11} s^3 + 2,992 \cdot 10^{14} s^2 + 5,153 \cdot 10^{15} s + 2,522 \cdot 10^{16}}{s^6 + 1,137 \cdot 10^6 s^5 + 1,37 \cdot 10^{10} s^4 + 3,492 \cdot 10^{13} s^3 + 2,096 \cdot 10^{16} s^2 + 1,809 \cdot 10^{17} s} \quad (5.6)$$

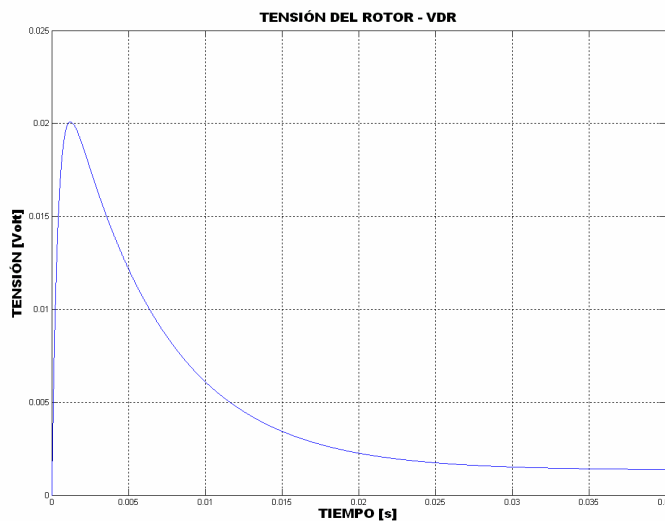
PARÁMETRO		VALOR
Tiempo de simulación		20 [ms]
Función $W_1(s)$	Límite de K_1	$1000 < K_1 < 1000000$
	Límite de a_1	$100 < a_1 < 100000$
	Límite de b_1	$100 < b_1 < 100000$
Función $W_2(s)$	Límite de K_2	$1000 < K_2 < 1000000$
	Límite de a_2	$100 < a_2 < 100000$
	Límite de b_2	$1000 < b_2 < 1000000$
Función $W_3(s)$	Límite de K_3	$100 < K_3 < 500000$
	Límite de a_3	$100 < a_3 < 100000$
	Límite de b_3	$100 < b_3 < 100000$
Resolución		40 bits
Número de individuos		20
Número de generaciones		200
Porcentaje de cruce		70 %
Porcentaje de mutación		0,5 %
Exponente		4

Tabla 3 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador robusto Hinf – Corriente del rotor I_{dr}

En la figura 23 se observa la respuesta transitoria de la corriente I_{dr} ante una entrada escalón. Al compararla con la obtenida a partir del regulador PI, se observa que la acción de control es de menor amplitud presentando un incremento desde cero hasta alcanzar su máximo, caso contrario al controlador PI, que aplica la máxima tensión en el tiempo cero. Además, el sistema presenta un tiempo de respuesta rápido, aproximadamente 20 ms.



a)



b)

Fig. 23 Respuesta transitoria de la corriente ante una entrada escalón con un regulador Hinf. a) Corriente del rotor I_{dr} . b) Voltaje del rotor V_{dr} .

Los parámetros del algoritmo genético que se configuraron para el diseño del regulador robusto que controla la velocidad mecánica del generador DFIG, se observan en la tabla 4. La ecuación (5.7) corresponde a las funciones de transferencia $W_1(s)$, $W_2(s)$ y $W_3(s)$ que se obtienen como resultado del algoritmo, y la ecuación (5.8) es la función de transferencia del controlador robusto evaluado con el comando *hinftopt*. La respuesta transitoria de la velocidad ante una entrada escalón presenta menor oscilación con relación a la respuesta obtenida con el regulador PI con un tiempo de establecimiento menor, pero el punto de consigna no logra alcanzarlo.

PARÁMETRO		VALOR
Tiempo de simulación		6 [s]
Función $W_1(s)$	Límite de K_1	$10 < K_1 < 1000000$
	Límite de a_1	$1 < a_1 < 10000$
	Límite de b_1	$1 < b_1 < 10000$
Función $W_2(s)$	Límite de K_2	$1 < K_2 < 50000$
	Límite de a_2	$1 < a_2 < 10000$
	Límite de b_2	$0 < b_2 < 1000$
Función $W_3(s)$	Límite de K_3	$1 < K_3 < 50000$
	Límite de a_3	$1 < a_3 < 10000$
	Límite de b_3	$1 < b_3 < 10000$
Resolución		40 bits
Número de individuos		20
Número de generaciones		200
Porcentaje de cruce		60 %
Porcentaje de mutación		0.5 %
Exponente		6

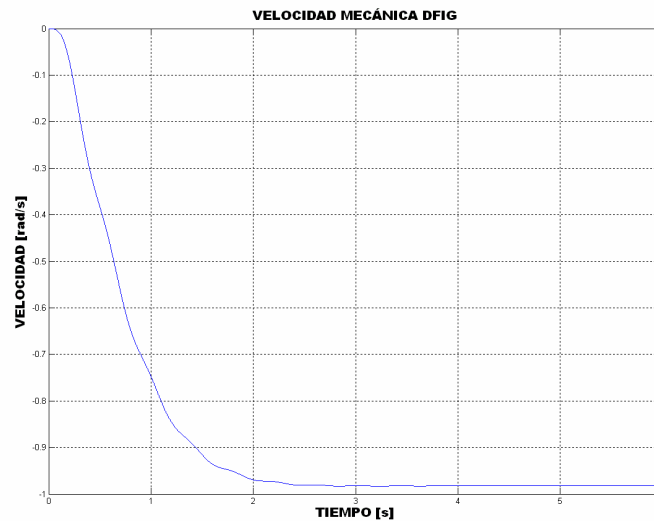
Tabla 4 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador robusto Hinf – Velocidad mecánica del generador

$$W_1(s) = \frac{43,6218s + 204478,784}{0,000102207s^2 + s} \quad W_2(s) = \frac{3,28253s + 32196,8131}{0,0376248s + 1} \quad W_3(s) = \frac{0,326458s + 2608,3912}{0,000111341s + 1} \quad (5.7)$$

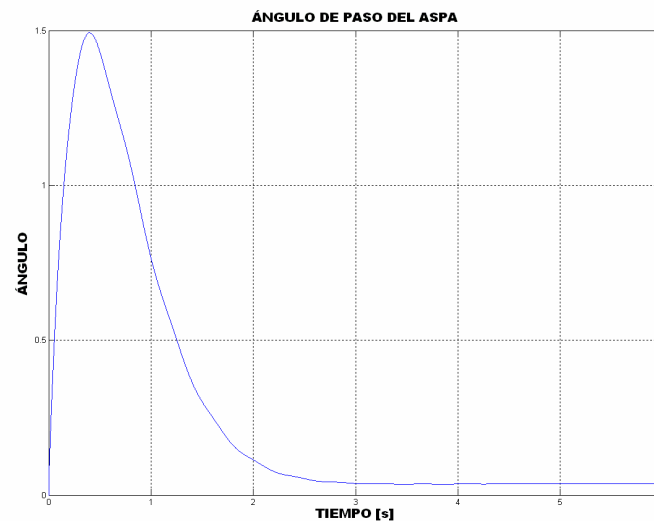
$$G_c(s) = \frac{249,8s^3 + 6,681 \cdot 10^4 s^2 + 1,704 \cdot 10^5 s + 1,557 \cdot 10^7}{s^4 + 9813s^3 + 4,748 \cdot 10^4 s^2 + 2,411 \cdot 10^6 s + 7,157 \cdot 10^6} \quad (5.8)$$

Dado que los controladores que regulan la corriente del rotor y la velocidad mecánica del generador DFIG, ecuación (5.6) y (5.8) respectivamente, presentan un polo cercano al origen, la acción de control incrementará con el tiempo cuando el error sea constante, ocasionando que el generador se frene bruscamente. Con el objetivo de garantizar la

estabilidad se adapta una estructura anti-windup para estos dos lazos, como se observa en la figura 25, con una ganancia K_a de 200 y 1, respectivamente. Los limitadores se fijaron a ± 6 voltios para el lazo de la figura 25.a y de 0 a 30 para el lazo de la figura 25.b.



a)



b)

Fig. 24 Respuesta transitoria de la velocidad para una entrada escalón con un regulador robusto Hinf. a) Velocidad mecánica del generador. b) Ángulo de paso

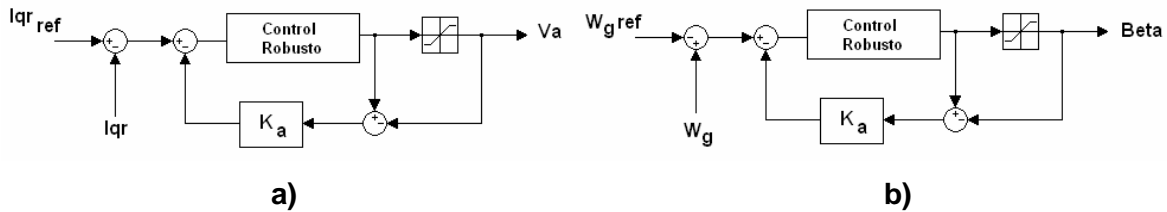
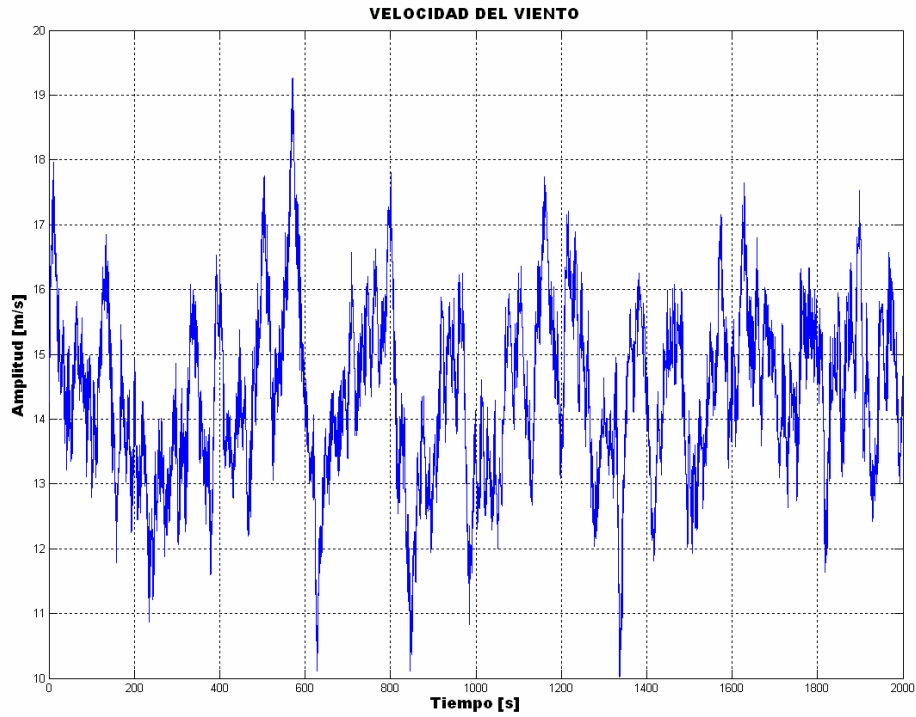


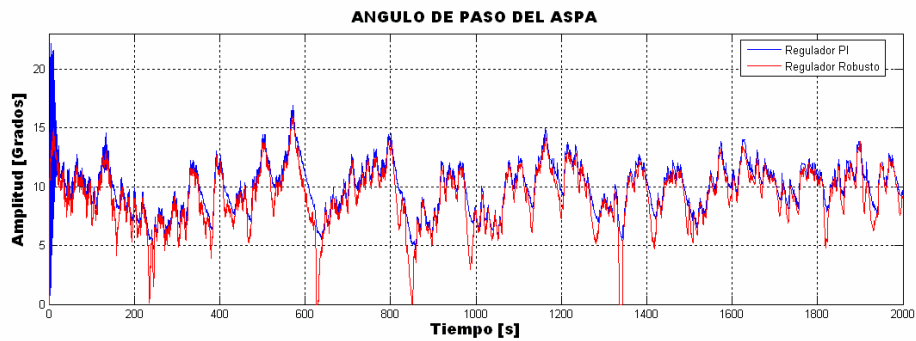
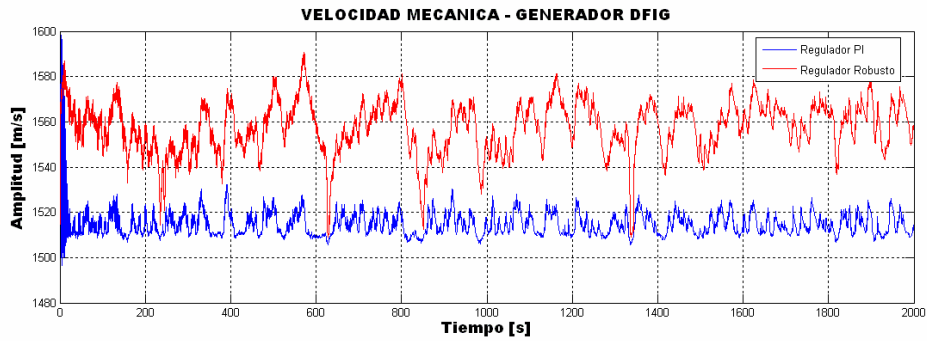
Fig. 25 Estructura anti-windup para un controlador robusto Hinf. a) Regulador de la corriente del rotor. b) Regulador de la velocidad mecánica.

En la figura 26 se realiza una comparación entre un regulador PI y el control robusto diseñado en base de la técnica de Hinf para una velocidad media del viento de 14.5 m/s con una intensidad de turbulencia del 40 %. Los valores de referencia son: una potencia activa de -2 MW, un factor de potencia de -0.95 y una velocidad mecánica de 1515 rpm. Para ambos controladores se garantiza el modo de operación sobre-síncrono, para lo cual se limito la tensión del rotor a $0 \leq V_{dr} \leq \infty$ y $-\infty \leq V_{qr} \leq 0$. Las condiciones iniciales de la turbina eólica se determinaron para una velocidad del viento de 11 m/s. Del comportamiento transitorio de la velocidad mecánica, la potencia activa, el factor de potencia y las respectivas señales de acción de control, se puede concluir lo siguiente:

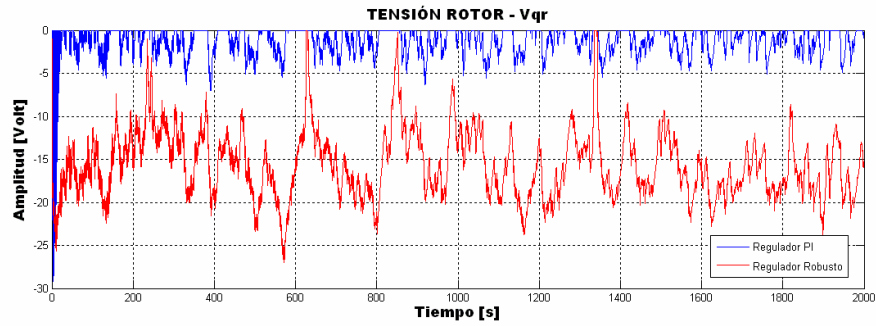
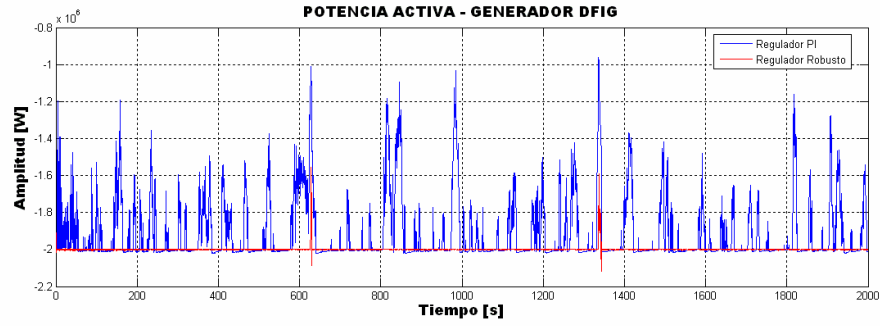
- Al presentarse un cambio abrupto en la velocidad del viento, al pasar de 11 m/s a 14.5 m/s, el transitorio de la acción de control del ángulo de paso, de la tensión V_{dr} y la tensión V_{qr} es de magnitud mayor en el regulador PI con relación al control robusto, lo cual concuerda cuando se realizó la comparación de los lazos de control para la velocidad mecánica y la corriente del rotor del modelo lineal ante una entrada escalón.
- Aunque la acción de control del regulador robusto es similar a la del regulador PI en el lazo de la velocidad mecánica, el generador en el primer caso alcanza una velocidad mayor a la nominal, con un máximo de 1580 rpm, aproximadamente, caso contrario al control PI que la mantiene cercana a los 1515 rpm.
- Las tensiones de control V_{dr} y V_{qr} son de mayor amplitud en el controlador robusto con relación al regulador PI, pero logra mantener el generador operando en los valores deseados, lo cual demuestra que el regulador PI es mas sensible a las variaciones de la velocidad del viento. Si la turbina opera a una velocidad del viento, alrededor de los 11 m/s, el comportamiento de las tres variables es muy similar, como se observa en la figura 27 para la potencia activa, por lo tanto es recomendable utilizar el controlador robusto cuando la velocidad del viento es mayor a la nominal.



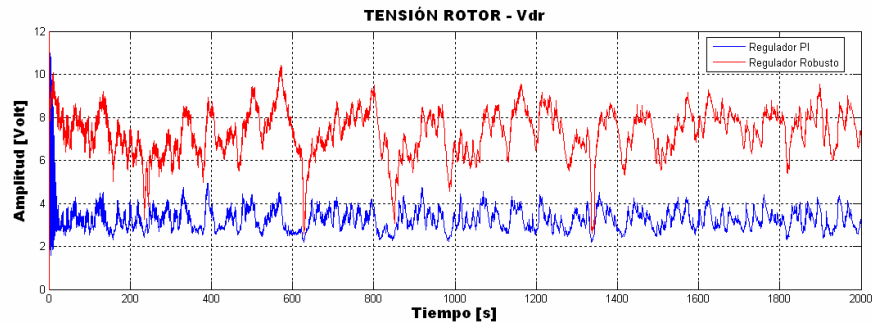
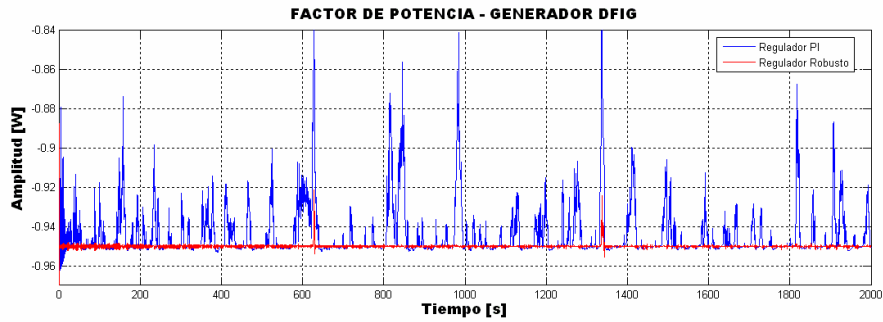
a)



b)



c)



d)

Fig. 26 Control PI y Control Robusto. a) Velocidad del viento. b) Velocidad mecánica. c) Potencia activa. d) Factor de potencia

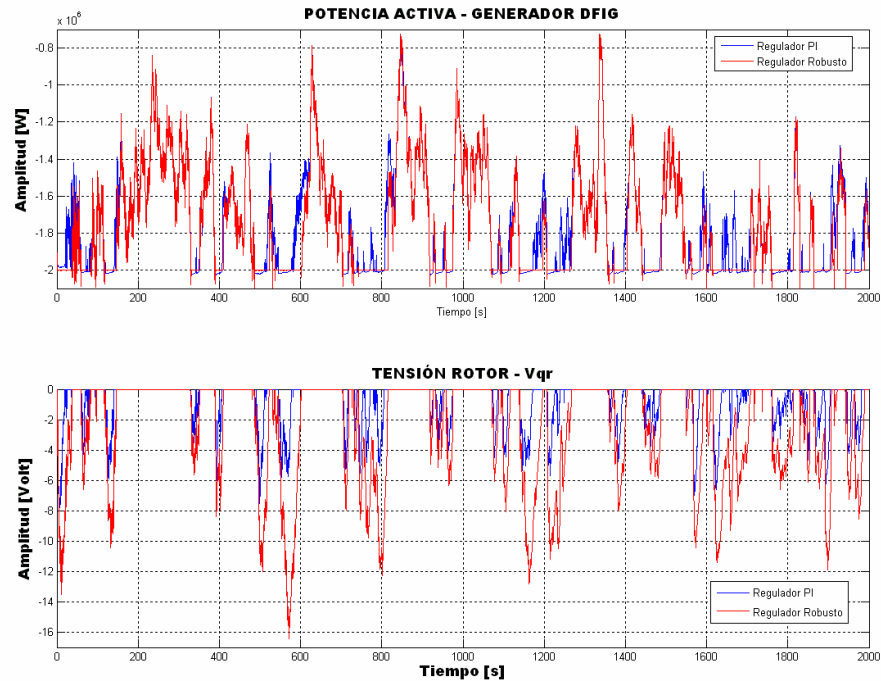


Fig. 27 Control de la potencia activa para una velocidad media del viento de 11 m/s

5.4 CONTROL DE UN GENERADOR DFIG CON UN REGULADOR LQG.

Para el control de la corriente del rotor, I_{dr} y I_{qr} , las cuales a su vez controlan la potencia activa y reactiva del generador DFIG, se asumió la estructura de la figura 13.a. La ganancia K_i y K se determinan utilizando el comando lqr de la toolbox de control robusto de Matlab, para lo cual se debe determinar previamente las matrices Q y R que penalizan los diferentes estados del sistema y la acción de control, respectivamente. Los parámetros que se configuraron para el algoritmo genético, para tal fin, se observan en la tabla 5. El procedimiento para evaluar estas matrices es el mismo descrito en el anexo G. Los elementos de las matrices Q y R obtenidos del algoritmo genético se presentan en la expresión (5.9), al igual que las respectivas ganancias K_i y K ,

$$Q = \begin{bmatrix} 9,28209 & 0 \\ 0 & 5,26021 \end{bmatrix} \quad R = [4,48833] \quad K_i = 0,0593 \quad K = 0,00678 \quad (5.9)$$

PARÁMETRO		VALOR
Tiempo de simulación		20 [ms]
Matriz Q	Límite de a_1	$0 < a_1 < 10$
	Límite de a_2	$0 < a_2 < 10$
Matriz R	Límite de b_1	$0 < b_1 < 10$
Resolución		40 bits
Número de individuos		20
Número de generaciones		200
Porcentaje de cruce		60 %
Porcentaje de mutación		1 %
Exponente		8

Tabla 5 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador LQR – Corriente del rotor I_{dr}

El lazo de control para la velocidad mecánica del generador se fundamenta en la estructura de la figura 13.b, en la cual se agrega un integrador en la trayectoria directa con el fin de eliminar el error en estado estable. Los elementos de las matrices Q y R, que se utilizan para determinar los valores de las constantes K_i y K por medio del comando lqr , se determinan a partir de un algoritmo genético, definiendo los parámetros de la tabla 6. La expresión (5.10) corresponde a los resultados obtenidos para la matriz Q y R, y el valor de las constantes K_i y K .

PARÁMETRO		VALOR
Tiempo de simulación		8 [s]
Matriz Q	Límite de a_1	$10^5 < a_1 < 10^8$
	Límite de a_2	$10^4 < a_2 < 10^7$
	Límite de a_3	$10^3 < a_3 < 10^6$
	Límite de a_4	$10^3 < a_4 < 10^6$
	Límite de a_5	$10^3 < a_5 < 10^6$
	Límite de a_6	$0 < a_6 < 10^2$
	Límite de a_7	$0 < a_7 < 10^3$
	Penalización del integrador	$10^4 < a_8 < 10^7$
Matriz R	Límite de b_1	$10^3 < b_1 < 10^7$
Resolución		40 bits
Número de individuos		20
Número de generaciones		200
Porcentaje de cruce		60 %
Porcentaje de mutación		4 %
Exponente		10

Tabla 6 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador LQR – Velocidad mecánica del generador

$$Q = 10^7 * \begin{bmatrix} 3,288 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,981 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,035 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,08 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,099 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4,17*10^{-9} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,5*10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,968 \end{bmatrix}$$

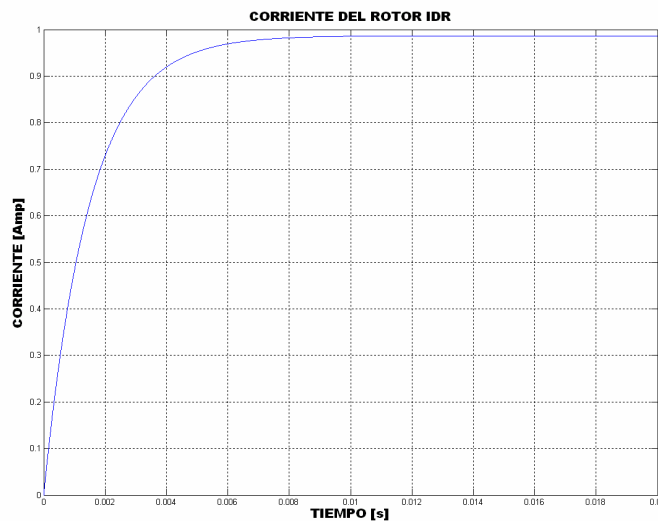
$$R = [4,48833]$$

(5.10)

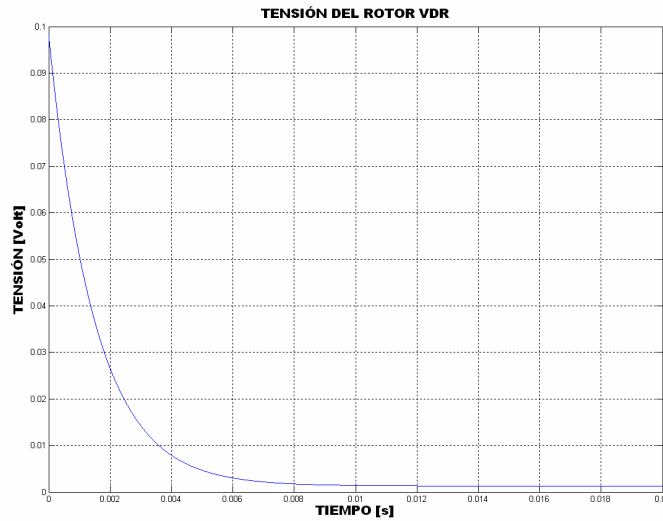
$$K_i = 2,251$$

$$K = [-8,181*10^{-2} \quad -6,83*10^{-2} \quad -1138,01 \quad 1,317*10^{-3} \quad 5,175 \quad -6,239*10^{-5} \quad -9,632*10^{-4}]$$

La respuesta transitoria ante una entrada escalón para la señal de corriente del rotor y la velocidad mecánica del generador se observan en la figuras 28 y 29, respectivamente. Dado a que el lazo de control para la corriente del rotor no tiene un integrador, la corriente no alcanza el punto de consigna, presentándose un error de 0.05 amperios. La acción de control es similar a la obtenida para el regulador PI. De otro lado, la respuesta transitoria del control de velocidad sigue un comportamiento sin variaciones bruscas, con una baja acción de control, comparada con el regulador PI y Hinf.



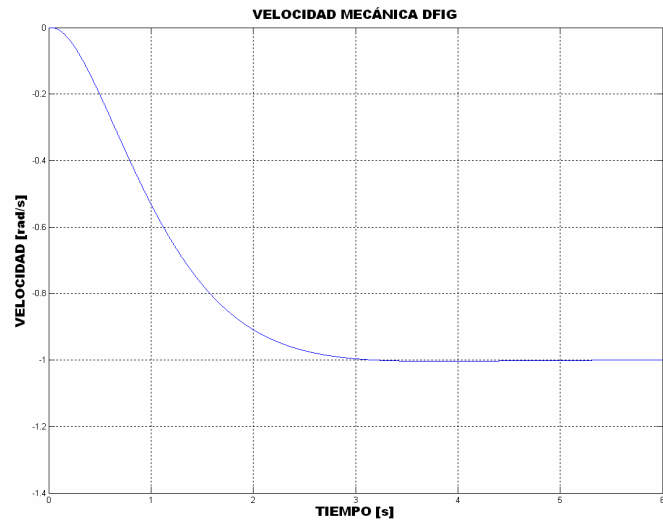
a)



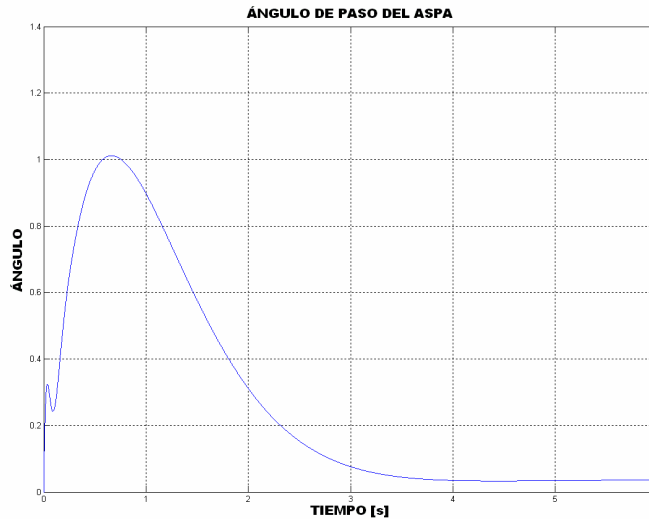
b)

Fig. 28 Respuesta transitoria de la corriente ante una entrada escalón con un regulador LQR. a) Corriente del rotor I_{dr} . b) Voltaje del rotor V_{dr} .

Los parámetros del estimador de kalman para el lazo de control de la corriente del rotor y de velocidad mecánica, se observan en la tabla 7, los cuales se obtienen con el comando *kalman* de la toolbox de control robusto de Matlab.



a)



b)

Fig. 29 Respuesta transitoria de la velocidad para una entrada escalón con un regulador LQR. a) Velocidad mecánica del generador. b) Ángulo de paso

REGULADOR	PARÁMETROS	GANANCIA
Corriente del rotor I_{dr} y I_{qr}	$Q_n = 0,1$	$L = [0 \ 0 \ 0,007651 \ 0,7603 \ 1,5596 \ 2749,315 \ 39,3078]$
	$R_n = 0,1$	
Velocidad mecánica DFIG	$Q_n = 0,1$	$L = [0,9974 \ 0,000148]$
	$R_n = 0,1$	

Tabla 7 Estimador de Kalman

En la figura 30 se realiza una comparación entre un regulador LQG y el control robusto diseñado en base de la técnica de Hinfi para las mismas condiciones establecidas para la comparación realizada con el regulador PI y el controlador robusto, es decir, una velocidad media del viento de 14.5 m/s con una intensidad de turbulencia del 40 %, una potencia activa de -2 MW, un factor de potencia de -0.95 y una velocidad mecánica de 1515 rpm. Para ambos controladores se garantiza el modo de operación sobre-sincrono. De los resultados se puede concluir:

- La acción de control del ángulo de paso, la tensión V_{dr} y la tensión V_{qr} son elevadas cuando ocurre el cambio de una velocidad de 11 m/s a 14 m/s. La razón se puede obtener de la figura 31, la cual relaciona el error del estimador para cada una de las tres variables. El filtro de *kalman* no predice de forma rápida el valor de cada uno de

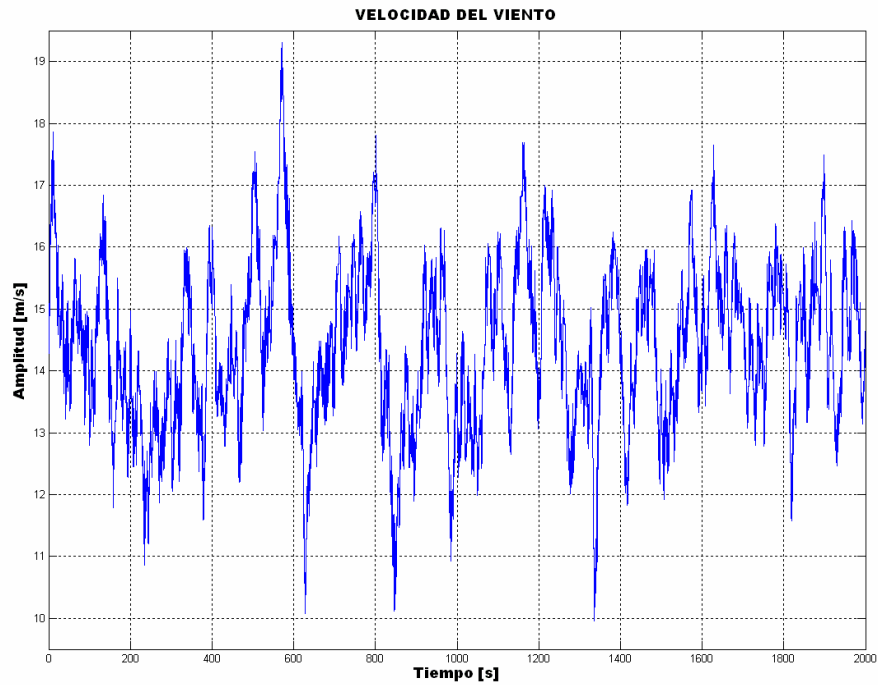
los estados del modelo dinámico de la turbina eólica, ocasionando acciones de control de magnitud alta.

- El controlador LQG mantiene la velocidad mecánica de la turbina cercana al valor de referencia, de igual forma como lo hizo el regulador PI.
- El regulador LQG presenta un comportamiento análogo al obtenido con el regulador PI en el control de la potencia activa y el factor de potencia del generador, a pesar que no se hubiera incluido un integrador en la trayectoria directa.
- Los errores de los estimadores para las tres variables no superan el diez por ciento del valor medio en estado estable que alcanzan la corriente del rotor y la velocidad mecánica del generador, que son de: $I_{dr} = -1445 \text{ Amp}$, $I_{qr} = -3000 \text{ Amp}$ y $\omega_{Gen} = 1515 \text{ rpm}$.

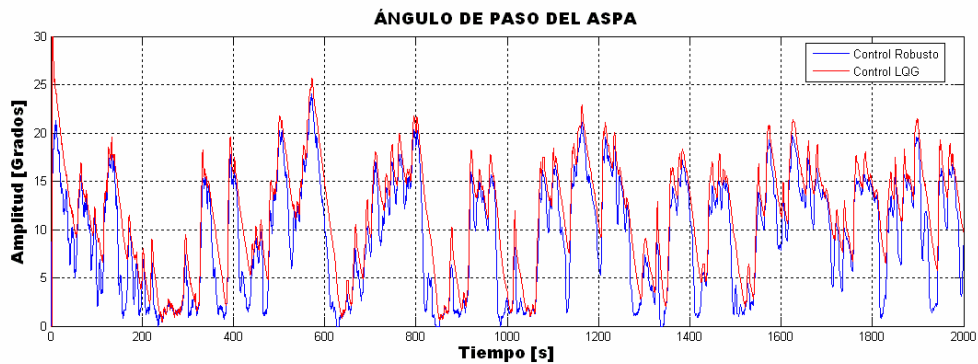
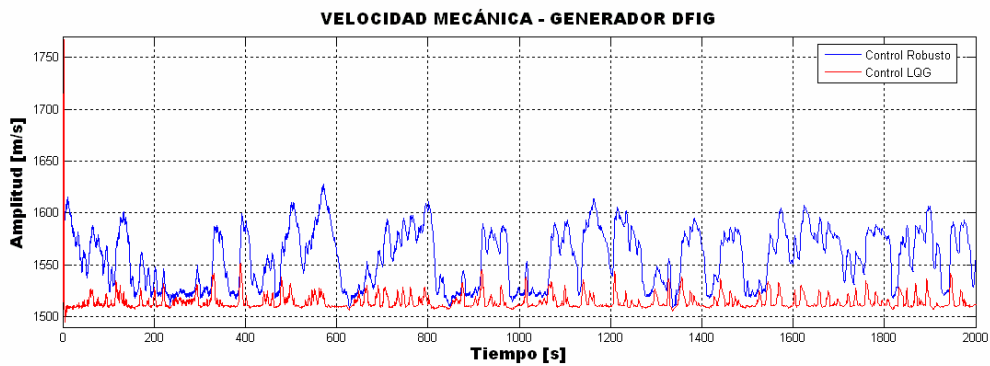
5.5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA DE CONTROL

Las especificaciones eléctricas del inversor AC/AC conectado al generador DFIG se determinan analizando el comportamiento de la tensión y el flujo de potencia del bobinado del rotor, para los dos modos de operación del generador: sub-síncrono y sobre-síncrono. La potencia activa, el factor de potencia y la velocidad mecánica son reguladas por medio de los tres controles robustos diseñados bajo la técnica de Hinf.

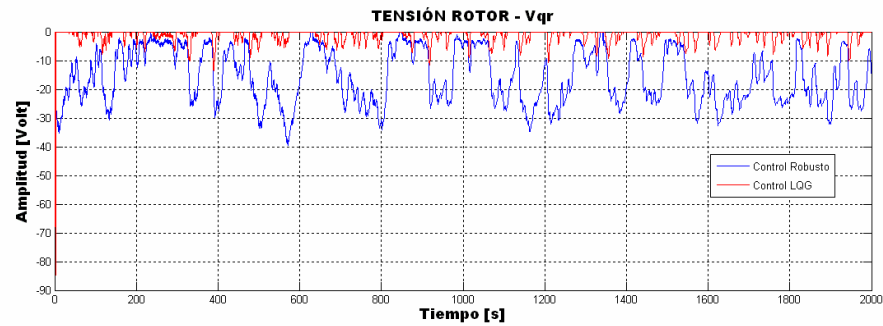
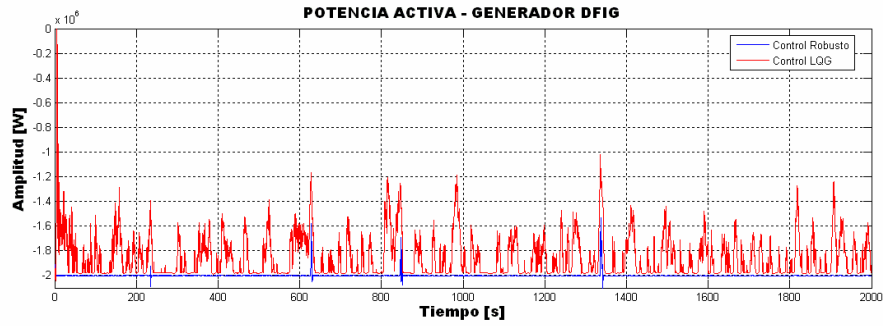
En la figura 32 se observa el comportamiento en el tiempo de la potencia y tensión trifásica del rotor sin implementar el limitador para la tensión V_{dr} y V_{qr} . En el modo sub-síncrono la tensión pico que se aplica al rotor es aproximadamente cuatro veces mayor con relación al pico de tensión durante el modo sobre-síncrono, dado que el inversor debe proporcionar la potencia suficiente para mantener la del estator fija para bajas velocidades del viento. La frecuencia del sistema trifásico oscila entre 0.1 Hz a 5 Hz, aumentando en el modo sub-síncrono. En la figura 33 se observa nuevamente el comportamiento transitorio de estas dos variables, para un perfil de viento que varía desde 11 m/s hasta alcanzar un máximo de 24 m/s en 50 s y luego desciende a 11 m/s. Se ajusta los limitadores para garantizar que el generador opere en modo sobre-síncrono dada una potencia activa de referencia de -2 Mw .



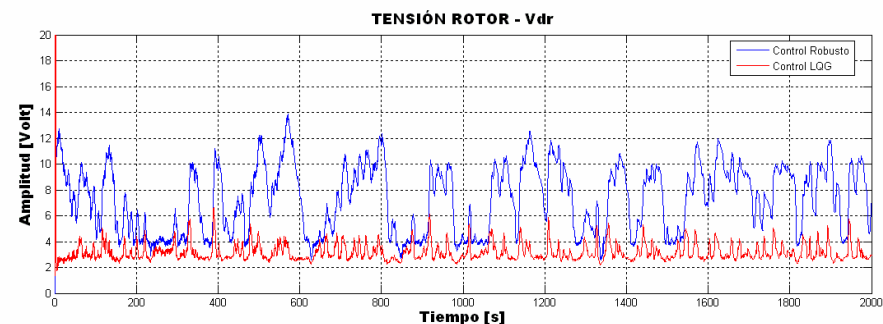
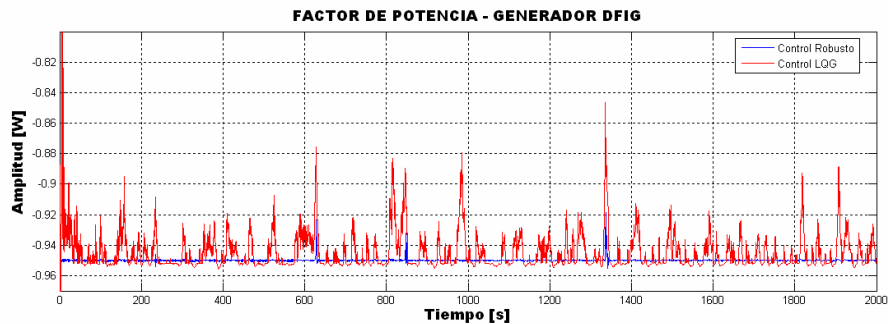
a)



b)



c)



d)

Fig. 30 Control LQG y Control Robusto. a) Velocidad del viento. b) Velocidad mecánica. c) Potencia activa. d) Factor de potencia

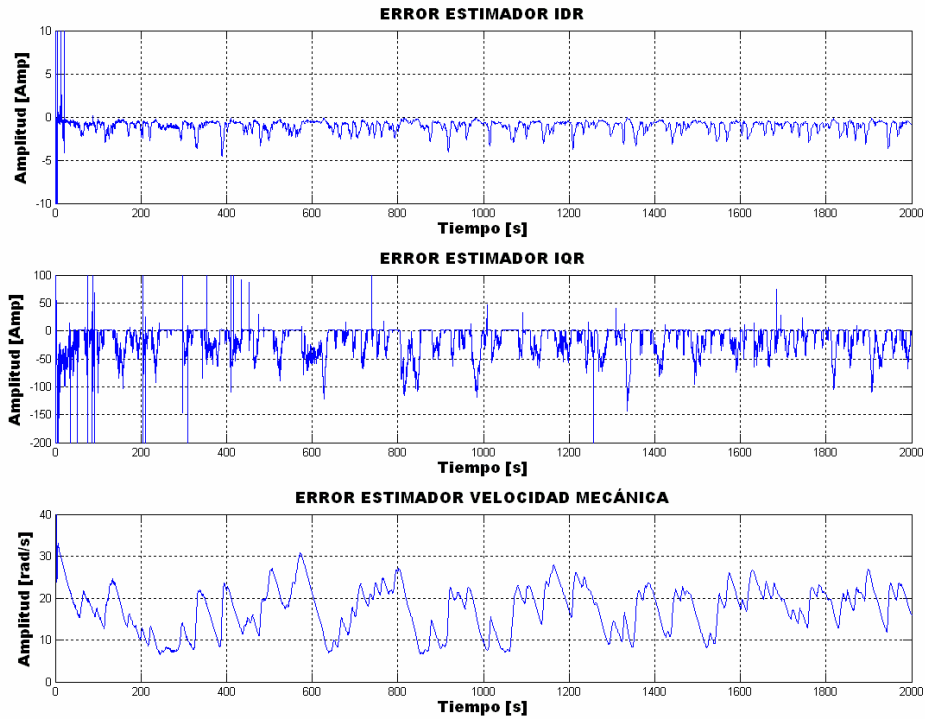


Fig. 31 Error del estimador de Kalman

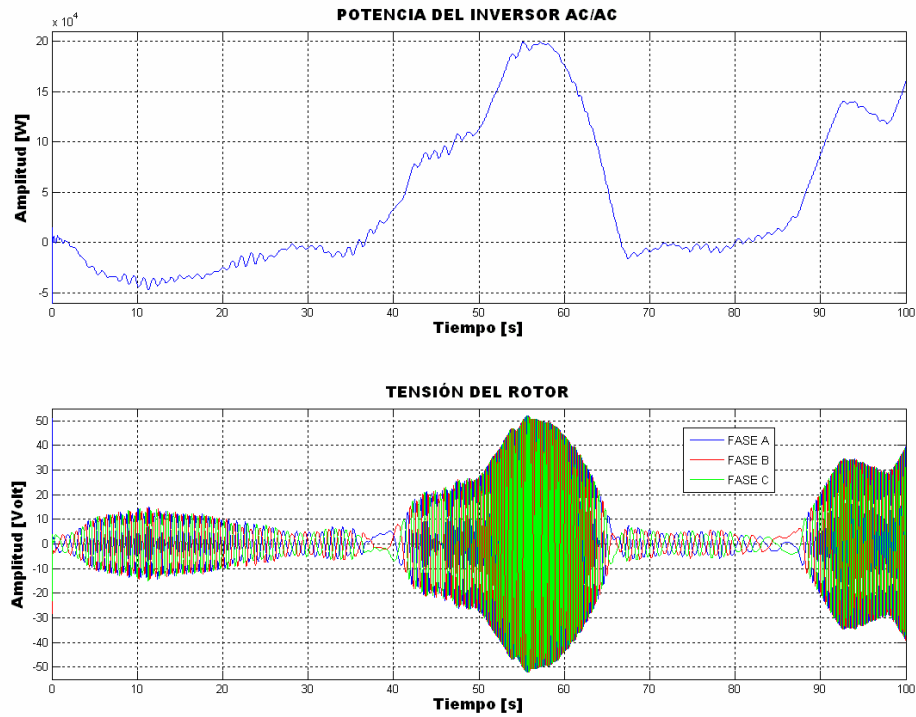


Fig. 32 Inversor AC/AC – Modo sub-síncrono y sobre-síncrono. a) Flujo de potencia. b) Tensión del rotor

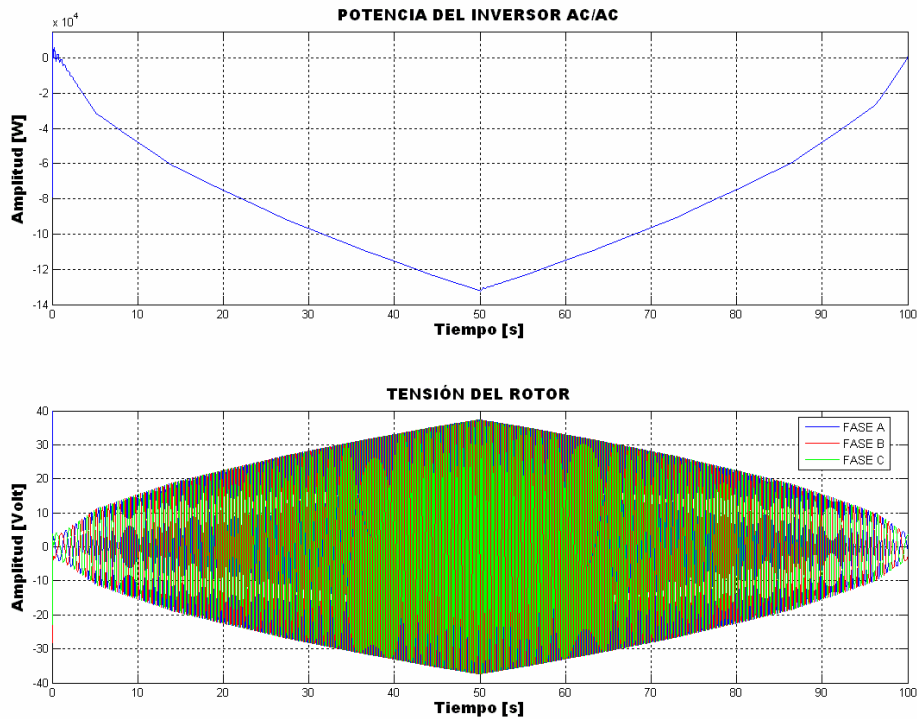


Fig. 33 Inversor AC/AC – Modo sobre-síncrono. a) Flujo de potencia. b) Tensión del rotor

De la figura 33 se puede determinar las especificaciones eléctricas para el inversor AC/AC que se conecta al rotor del generador DFIG, tomando como referencia una velocidad media del viento de 24 m/s:

- Tensión de fase de 0 a 35 voltios pico.
- Potencia máxima de 130 KW.
- Frecuencia de operación de 0 Hz a 5 Hz.

6. CONCLUSIONES

- ❖ El modelo matemático de cada uno de los subsistemas que conforman una turbina eólica y su respectiva implementación en el software **Matlab Simulink®** abre un camino en el campo de la investigación sobre energía eólica en el país, tema que se ha investigado a profundidad en Europa debido a la necesidad de encontrar sistemas alternativos para la generación de energía eléctrica.
- ❖ La combinación del control por orientación del flujo del estator y el control de la velocidad por el ángulo de paso del aspa permiten regular de forma efectiva la potencia activa suministrada por el generador de inducción a altas velocidades del viento.
- ❖ Las variaciones del fasor de tensión que regula la potencia activa y el factor de potencia, hace que el generador DFIG este alternando entre un modo sub-síncrono a sobre-síncrono, con el fin de mantener la potencia constante de acuerdo a la condición del viento, lo cual representa que el inversor AC/AC conectado al rotor esté diseñado para soportar cambios bruscos en tensión, fase y frecuencia. Para garantizar únicamente el modo de operación sobre-síncrono se debe limitar la tensión del rotor a $0 \leq V_{dr} \leq \infty$ y $-\infty \leq V_{qr} \leq 0$, con lo cual se obtiene una mayor estabilidad en el sistema.
- ❖ El controlador Hinf es más robusto ante variaciones de la velocidad del viento en comparación con un regulador PI y LQG, manteniendo la potencia activa y el factor de potencia en los valores de referencia, para velocidades del viento superiores a la nominal de la turbina eólica.
- ❖ El regulador PI, con una estructura antiwindup, es el adecuado para realizar un control de la velocidad mecánica del generador de inducción cuando se utiliza turbinas eólicas de velocidad fija.
- ❖ Los índices de desempeño ISE e ITSE son una buena alternativa para determinar la función de aptitud para el diseño de reguladores PI, Hinf y LQG, permitiendo obtener un controlador óptimo para cada una de las tres variables desacopladas del modelo dinámico

de la turbina: corriente del rotor I_{dr} , corriente I_{qr} , que regulan respectivamente la potencia activa y reactiva, además la velocidad mecánica del generador DFIG.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carvalho Rosas, Pedro André. *Dynamic Influences Of Wind Power On The Power System*. PhD Thesis. Technical University of Denmark and Risoe National Laboratory. March 2003. ISBN 87 – 91184 -16 -9.
- [2] W. Langreder. *Models For Variable Speed Wind Turbines*”. M. Sc Theses, CREST Loughborough University and Risoe National Laboratory. 1996.
- [3] Iov, Florin. *Contributions to Modelling, Analysis and Simulation of Ac Drive Systems. Application to Large Wind Turbines*. Ph.D. Thesis. Dunarea de Jos University- Galati. 2003.
- [4] P. Ledesma. *Análisis dinámico de sistemas eléctricos con generación eólica*. Ph.D. Thesis. Universidad Carlos III de Madrid. 2001
- [5] B. Hopfensperger, D. Atkinson, R.A. Lakin. *Stator flux oriented control of a cascades doubly fed induccion machine*. IEEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 146, Noviembre 1999
- [6] Paul Etienne Vidal, Maria Pietrzak David, Bernard De Fornel. *Stator flux oriented control of a doubly fed Induction machine*. Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, Unité mixte de recherche INPT-ENSEEIH/CNRS. 2003
- [7] F. Poitiers, M. Machmoum, R. Le Doeuff, M.E. Zaim. *Control of a doubly fed induction generator for wind energy conversion systems*. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Saint Nazaire, France.
- [8] Jeong-Ik Jang, Young Sin Kim, Dong Choon Lee. *Active and reactive power control of DFIG for energy conversion under unbalanced grid voltage*. Dept. Of Electrical, Eng. Yeungnam Univ. Daedong, Gyeongsan, Gyeongbuck, Korea. IEEE 2006.
- [9] S. Wang, Y. Ding. *Stability analysis of field oriented doubly fed induction machine drive based on computer simulation*. Electric Machines and power systems, Vol. 21, 1993.

[10] L. Xu, F. Liang, T.A. Lipo, *Transient modelo f a doubly excited reluctance motor*. IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 6 Marzo 1991.

[11] L. Morel, H. Godfroid, A. Mirzaian, J. Kauffmann. *Double fed induction machine: converter optimisation and fiel oriented control without position sensor*. IEEE Proc. Electr. Power Appl. Vol. 145, julio de 1998.

[12] Lars Nielsen. *Modelling and control of variable speed HAWT utilizing hybrid Control*. Aalborg University. Septiembre 2004.

[13] Rocha, Ronilson. Martins Filho, Luis Siqueira. *A multivariable H^∞ control for wind energy conversión system*. Departente of control and Automation. Depatment of Computation Campus Morro do Cruzeiro. IEEE 2003.

[14] Kathryn E. Johnson, Lucy Y. Pao, Mark J. Balas, Lee J. Fingersh. *Control of variable speed wind turbines, standard and adaptive techniques for maximizing energy capture*. IEEE Control Systems Magazine. 2006

[15] Benavidez Morán, Aldo German. *Herramientas para el Análisis y Diseño de Turbinas Eólicas*". Proyecto de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes. 2003.

[16] Gómez Rivera, William. *Simulación del Viento Atmosférico y Aplicación Experimental*. Proyecto de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes. 2004.

[17] Calderón Cely, Margarita María. *Modelo de un Sistema de Conversión para Parques Eólicos*". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniera Electrónica. Universidad de los Andes. 2006.

[18] Rodríguez M., Humberto. *Generación de Energía Eléctrica en la Costa Atlántica con Aerogeneradores*. Universidad Nacional de Colombia – Departamento de Física.

[19] Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. *Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia*. <http://www.upme.gov.co>

[20] P. Soerensen, A. D. Hansen, L. Janosi, J. Bech y B. Bakjensen. *Simulation Of Interaction Between Wind Farm And Power System*. Technical Report. Risoe-R-128(EN). 2001. <http://www.risoe.dk/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1281.pdf>

[21] P. Soerensen, A. D. Hansen, Pedro André Carvalho Rosas. *Wind Models For Prediction Of Power Fluctuations Of Wind Faros*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. No 90, pg 1381-1402. 2002.

[22] J. Soens, J. Driesen, R. Belmans. *A comprehensive model of a doubly fed induction generator for dynamic simulations and power system studies*. Department of Electrical Engineering. ESAT/ELECTA, K.U. Leuven.

[23] A. Perdana, O. Carlson, J. Persson. *Dynamic Response of gris connected wind turbina with doubly fed induction generador during disturbances*. Nordic workshop on power and industrial electronics. Trondheim 2004.

[24] P. Kundur. *Power System Stability and Control*. EPRI Power Engineering Series. McGraw Hill, 1993.

[25] Burton, Tony. Sharpe, David. Jenkins, Nick. Bossanyi, Ervin. *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd. 2001

[26] Vas, Peter. *Vector Control of AC Machines*. Clarendon Press OXFORD. 1994

8. ANEXOS

ANEXO A

La función de transferencia que representa la componente de turbulencia de la velocidad del viento, con base en el espectro de *Kaimal*, que obtuvo J.C Kaimal en 1972 en su trabajo *Spectral Characteristics of Surface Layer Turbulence* está dada por la ecuación (7.1), donde:

- L Longitud de escala de la turbulencia
- z Altura de la torre
- σ Desviación estándar de la velocidad del viento
- V_o Velocidad media del viento

$$H(s) = \sigma \sqrt{\frac{L}{V_o} \frac{a_0 + a_1 * cs + a_2 * c^2 s^2 + a_3 * c^3 s^3}{b_0 + b_1 * cs + b_2 * c^2 s^2 + b_3 * c^3 s^3}} \quad (7.1)$$

$$c = \frac{L}{2\pi V_o} \quad (7.2)$$

$$L = \begin{cases} 20z & \text{para } z < 20 \text{ mt} \\ 600 \text{ mt} & \text{para } z > 20 \text{ mt} \end{cases} \quad (7.3)$$

La función de transferencia que emula el espectro de *Kaimal* se puede representar por un polinomio de primero, segundo o tercer orden. Los coeficientes respectivos del numerador y el denominador se encuentran tabulados en la tabla 10.

ORDEN	1	2	3
a₀	0,9800	0,9846	0,9802
a₁	0,0351	1,3653	1,4510
a₂		0,0182	2,4316
a₃			0,4714
b₀	1	1	1
b₁	1,7041	3,7593	0,7145
b₂		1,3463	-0,919
b₃			3,4684

Tabla 8 Coeficientes de la función de transferencia para caracterizar el espectro de Kaimal

Para modelar el fenómeno “muestreo rotacional de turbulencia” [1], Poul Sørensen estableció las funciones de transferencia para la componente de continua y el tercer armónico, que permiten evaluar el viento equivalente que incidiría en las tres aspas de la turbina. La aproximación para los dos armónicos está dada por la ecuación (7.4).

$$H(s) = \frac{a_0 + a_1 * ds + a_2 * d^2 s^2 + a_3 * d^3 s^3}{b_0 + b_1 * ds + b_2 * d^2 s^2 + b_3 * d^3 s^3 + b_4 * d^4 s^4} \quad (7.4)$$

$d = \frac{R}{V_0}$ corresponde a un parámetro de normalización, R es el radio del aspa de la turbina y V_0 la velocidad media del viento. Los coeficientes para la ecuación (7.4) se encuentran tabulados en la tabla 9 para los dos armónicos.

Orden	ARMÓNICO 0				ARMÓNICO 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4
a₀	0,9623	0,9904	1	0,9971	-0,9370	0,0307	-0,0174	0,0280
a₁	-0,2212	4,7869	23,3731	-35,6477		0,2766	-0,6686	0,2795
a₂			62,5533	101,0760			-1,5606	-0,2814
a₃				85,9565				0,9130
b₀	1	1	1,0032	1	1	1	1	1
b₁	2,0011	7,3518	20,2942	29,933	8,7311	1,7722	8,2563	0,5833
b₂		7,6823	-112,0844	-135,2734		0,3691	6,0005	1,0953
b₃			94,6828	-164,5170			-2,1537	5,2569
b₄				118,6530				1,2310

Tabla 9 Coeficientes de la función de transferencia para caracterizar el fenómeno de muestreo rotacional

ANEXO B

La tabla 10, suministrada por el Laboratorio Nacional Risø en Dinamarca, pionero en estudios e investigaciones en el área de las energías renovables, contiene los valores del coeficiente de torque en función de la velocidad específica, λ , y del ángulo de paso para una turbina de 2MW de potencia. La tabla contiene un arreglo matricial de 182x102 de tamaño, con un rango para la velocidad específica de 0 a 20 y para un ángulo de paso de -90 a 90 grados.

COEFICIENTE DE TORQUE Cq								
λ Velocidad Específica	Angulo de paso							
	-90	-85	-80	-75	-70	-65	-60	-55
0	-0.0066	-0.0139	-0.0179	-0.0179	-0.0179	-0.0177	-0.0171	-0.0159
1	-0.0305	-0.0307	-0.0307	-0.0307	-0.0305	-0.0298	-0.0287	-0.0273
2	-0.064	-0.0647	-0.0647	-0.0643	-0.0633	-0.0615	-0.0588	-0.0552
3	-0.1198	-0.1208	-0.1213	-0.12	-0.1172	-0.1124	-0.1062	-0.0988
4	-0.1984	-0.201	-0.2006	-0.1975	-0.1908	-0.1821	-0.1713	-0.1593
5	-0.3011	-0.3045	-0.3021	-0.2958	-0.2847	-0.2709	-0.2549	-0.2366
6	-0.4285	-0.43	-0.4265	-0.4147	-0.3993	-0.3791	-0.3572	-0.3307
7	-0.5793	-0.5784	-0.5727	-0.555	-0.534	-0.507	-0.4771	-0.4418
8	-0.7518	-0.7499	-0.74	-0.7171	-0.6888	-0.6551	-0.6145	-0.5704
9	-0.9466	-0.9452	-0.9285	-0.9014	-0.8639	-0.8234	-0.7699	-0.7137
10	-11.641	-11.641	-11.393	-11.078	-10.598	-10.084	-9.428	-8.688
11	-14.051	-14.067	-13.726	-13.336	-12.762	-12.093	-11.316	-10.399
12	-16.693	-1.671	-16.283	-15.792	-1.512	-14.278	-13.371	-12.289
13	-19.569	-19.545	-19.064	-18.445	-17.652	-16.668	-1.561	-14.357
14	-22.681	-22.607	-22.065	-21.288	-20.387	-1.926	-18.041	-16.599
15	-26.027	-25.896	-25.273	-24.347	-23.331	-22.058	-20.653	-19.008
16	-29.608	-2.941	-28.674	-27.632	-26.484	-25.055	-2.345	-21.591
17	-33.422	-33.137	-32.297	-3.114	-29.848	-28.248	-26.436	-24.346
18	-3.747	-37.072	-36.144	-34.868	-3.342	-31.641	-29.606	-27.272
19	-41.753	-4.123	-40.206	-38.814	-37.198	-35.231	-32.961	-30.368
20	-46.263	-45.616	-44.503	-42.979	-41.186	-3.902	-3.65	-33.633

COEFICIENTE DE TORQUE Cq

λ Velocidad Específica	Angulo de paso							
	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15
0	-0.0148	-0.0136	-0.0124	-0.0111	-0.0094	-0.0073	-0.0052	-0.003
1	-0.0256	-0.0235	-0.0211	-0.0182	-0.0151	-0.0117	-0.0083	-0.0047
2	-0.0508	-0.0458	-0.0404	-0.0346	-0.0284	-0.022	-0.0153	-0.0083
3	-0.0905	-0.0814	-0.0716	-0.061	-0.0498	-0.0378	-0.0253	-0.0124
4	-0.1456	-0.1309	-0.1145	-0.0973	-0.0782	-0.0584	-0.038	-0.0165
5	-0.2163	-0.1937	-0.1694	-0.1424	-0.1136	-0.084	-0.0536	-0.0179
6	-0.3025	-0.2699	-0.2355	-0.1961	-0.1559	-0.1145	-0.0691	-0.0165
7	-0.403	-0.3598	-0.3111	-0.2584	-0.2043	-0.1495	-0.0819	-0.0134
8	-0.5176	-0.4628	-0.3955	-0.3279	-0.2581	-0.1812	-0.0935	-0.0171
9	-0.6462	-0.5716	-0.4884	-0.4031	-0.3178	-0.2144	-0.1089	-0.0283
10	-0.7878	-0.6913	-0.5909	-0.488	-0.3815	-0.2547	-0.132	-0.0422
11	-0.9421	-0.8255	-0.7057	-0.5837	-0.4529	-0.301	-0.1602	-0.0598
12	-11.122	-0.974	-0.8328	-0.6896	-0.5315	-0.3524	-0.1924	-0.0798
13	-12.976	-11.365	-0.9717	-0.8049	-0.6176	-0.4099	-0.2283	-0.1024
14	-14.983	-13.123	-11.223	-0.9298	-0.7113	-0.4724	-0.2671	-0.1263
15	-17.143	-15.019	-12.847	-10.645	-0.8122	-0.5399	-0.3088	-0.1515
16	-19.458	-1.705	-14.587	-12.087	-0.9206	-0.6128	-0.3535	-0.1792
17	-21.927	-19.216	-16.442	-1.362	-10.365	-0.6909	-0.4012	-0.2075
18	-24.549	-21.516	-18.413	-1.525	-1.159	-0.7736	-0.4519	-0.2378
19	-27.325	-23.953	-20.497	-16.971	-12.895	-0.8613	-0.5052	-0.2696
20	-30.258	-26.515	-22.698	-18.792	-14.266	-0.9538	-0.5615	-0.303

COEFICIENTE DE TORQUE Cq

λ Velocidad Específica	Angulo de paso						
	-10	-5	0	5	10	15	20
0	-0.0006	0.0019	0.0044	0.0069	0.0094	0.0118	0.0141
1	-0.0011	0.0026	0.0063	0.0099	0.0135	0.0172	0.021
2	-0.0011	0.0062	0.014	0.0223	0.0307	0.0372	0.0383
3	0.0011	0.0163	0.0319	0.0443	0.0485	0.0426	0.0298
4	0.0082	0.0333	0.0524	0.058	0.0498	0.0323	0.009
5	0.0199	0.0507	0.0654	0.0601	0.0426	0.0164	-0.0146
6	0.0314	0.0624	0.0685	0.0567	0.0323	-0.0006	-0.0402
7	0.0378	0.062	0.0653	0.0509	0.0216	-0.0185	-0.0681
8	0.032	0.0521	0.0589	0.0449	0.0106	-0.0376	-0.099
9	0.0181	0.0405	0.0523	0.0388	-0.0006	-0.0577	-0.1341
10	0.0025	0.0289	0.0457	0.0331	-0.0119	-0.0794	-0.1733
11	-0.0126	0.0189	0.0395	0.0276	-0.0246	-0.1027	-0.2169
12	-0.0279	0.0096	0.0338	0.0222	-0.0372	-0.1274	-0.2649
13	-0.0432	0.0004	0.0284	0.0163	-0.0505	-0.1538	-0.3172
14	-0.0583	-0.0084	0.0228	0.011	-0.0645	-0.1819	-0.3733
15	-0.075	-0.0165	0.0178	0.0055	-0.0794	-0.2116	-0.4333
16	-0.0919	-0.025	0.0127	0	-0.095	-0.2431	-0.4969
17	-0.1094	-0.0336	0.0079	-0.0059	-0.1109	-0.2766	-0.5655
18	-0.1274	-0.0424	0.0028	-0.0117	-0.128	-0.312	-0.6382
19	-0.1467	-0.0518	-0.0018	-0.0189	-0.1461	-0.3492	-0.715
20	-0.1669	-0.0608	-0.0067	-0.0257	-0.1648	-0.3882	-0.7959

COEFICIENTE DE TORQUE Cq

λ Velocidad Especifica	Angulo de paso						
	25	30	35	40	45	50	55
0	0.0163	0.0184	0.0203	0.022	0.0233	0.0245	0.0257
1	0.0248	0.0286	0.0311	0.0305	0.0258	0.0179	0.0072
2	0.0334	0.0238	0.0108	-0.0046	-0.0198	-0.0331	-0.0438
3	0.0121	-0.0086	-0.0302	-0.0502	-0.0667	-0.081	-0.0926
4	-0.0175	-0.0467	-0.0746	-0.0986	-0.1205	-0.1386	-0.1526
5	-0.0505	-0.0897	-0.1244	-0.1567	-0.1861	-0.2088	-0.2282
6	-0.0882	-0.1377	-0.183	-0.2257	-0.2638	-0.2931	-0.3203
7	-0.1309	-0.1928	-0.2507	-0.3073	-0.3538	-0.3922	-0.4298
8	-0.1793	-0.2551	-0.3287	-0.4012	-0.4572	-0.5069	-0.5566
9	-0.2332	-0.3248	-0.4172	-0.5065	-0.5737	-0.6371	-0.7006
10	-0.2925	-0.4029	-0.5159	-0.623	-0.704	-0.783	-0.8617
11	-0.3575	-0.4892	-0.6251	-0.751	-0.8481	-0.9441	-10.402
12	-0.4284	-0.5839	-0.7448	-0.8909	-1.006	-11.207	-12.359
13	-0.5046	-0.6868	-0.875	-10.426	-11.778	-13.129	-14.488
14	-0.5867	-0.7978	-10.157	-12.058	-13.631	-15.205	-1.679
15	-0.6748	-0.9171	-11.669	-13.812	-15.623	-17.437	-19.264
16	-0.7694	-10.448	-13.287	-15.687	-17.751	-19.823	-2.191
17	-0.8696	-1.181	-15.012	-17.682	-20.018	-22.364	-24.728
18	-0.9756	-13.254	-16.844	-19.798	-22.422	-25.061	-27.717
19	-10.881	-14.776	-18.775	-22.036	-24.966	-27.912	-30.879
20	-12.067	-1.639	-20.809	-24.393	-27.647	-30.921	-34.213

COEFICIENTE DE TORQUE Cq							
λ Velocidad Específica	Angulo de paso						
	60	65	70	75	80	85	90
0	0.0267	0.0275	0.0281	0.0273	0.0217	0.0104	-0.0018
1	-0.0047	-0.0157	-0.0245	-0.0308	-0.0353	-0.0376	-0.0386
2	-0.0525	-0.059	-0.0634	-0.0668	-0.0695	-0.0717	-0.0736
3	-0.1011	-0.1085	-0.1148	-0.1208	-0.1267	-0.1299	-0.1305
4	-0.1649	-0.1764	-0.1878	-0.199	-0.206	-0.208	-0.2085
5	-0.2466	-0.2651	-0.2834	-0.2994	-0.3049	-0.3074	-0.309
6	-0.3475	-0.3746	-0.4016	-0.419	-0.4249	-0.4288	-0.433
7	-0.4674	-0.5049	-0.542	-0.5587	-0.566	-0.573	-0.5802
8	-0.6062	-0.656	-0.703	-0.7188	-0.7291	-0.7397	-0.7507
9	-0.7641	-0.828	-0.8828	-0.8996	-0.9143	-0.929	-0.9447
10	-0.941	-10.207	-10.822	-11.019	-11.211	-1.141	-1.162
11	-11.369	-12.342	-13.014	-13.255	-1.35	-13.756	-14.027
12	-13.519	-14.684	-15.404	-15.703	-16.008	-16.329	-16.668
13	-15.858	-17.233	-1.8	-18.363	-18.736	-19.128	-19.542
14	-18.386	-19.989	-20.804	-21.236	-21.683	-22.153	-22.649
15	-21.103	-22.949	-23.814	-24.321	-24.849	-25.405	-2.599
16	-24.011	-26.115	-27.032	-2.762	-28.235	-28.882	-29.566
17	-27.108	-29.487	-30.456	-31.131	-31.839	-32.584	-33.374
18	-30.394	-33.067	-34.085	-34.855	-35.663	-36.513	-37.416
19	-33.869	-36.848	-37.921	-38.792	-39.707	-40.669	-41.692
20	-37.534	-40.834	-41.963	-42.941	-43.968	-45.049	-46.201

Tabla 10 Coeficiente de torque para una turbina de 2 MW

ANEXO C

Las especificaciones técnicas para una turbina eólica de velocidad variable controlada por variación del ángulo de paso, NM 2000/82, fabricada por Neg Micon, se observan en la tabla 11. Los parámetros eléctricos para el generador DFIG de 2 MW utilizado en el desarrollo de la tesis, se asumieron los de la tesis *Contributions to Modelling, Analysis and Simulation of Ac Drive Systems. Application to Large Wind Turbine* [3], de Florin Iov, los cuales se observan en la tabla 12.

ROTOR	
Número de palas	3
Velocidad nominal	19 [rpm]
Diámetro	82 [m]
Regulación de potencia	Pitch
Velocidad del viento de arranque	4 [m/s]
Velocidad del viento de paro	25 [m/s]
Velocidad del viento para la potencia nominal	Aprox 11 [m/s]
Momento de inercia	$50 \cdot 10^5$ [Kg*m ²]
CAJA MULTIPLICADORA	
Tipo	Planetario
Relación	85
GENERADOR	
Tipo	DFIG
Velocidad	750 - 1800 [rpm]
TRANSMISIÓN MECÁNICA	
Rigidez del eje de baja velocidad	$114 \cdot 10^6$ [Nm/rad]
Amortiguamiento del eje de baja velocidad	$756 \cdot 10^6$ [Nm*seg/rad]
Rigidez del eje de alta velocidad	$1 \cdot 10^5$ [Nm/rad]
Amortiguamiento del eje de alta velocidad	$1 \cdot 10^3$ [Nm*seg/rad]
Inercia del tren de engranes de baja y alta velocidad	0.01 [Kg*m ²]

Tabla 11 Especificaciones técnicas de la turbina NM 2000/82

PARÁMETRO		VALOR
Resistencia del bobinado del estator	R_s	0.001 [Ω]
Inductancia del bobinado del estator	L_s	0.07 [mH]
Resistencia del bobinado del rotor	R_r	0.0013 [Ω]
Inductancia del bobinado del rotor	L_r	0.08 [mH]
Inductancia Mutua	L_m	3 [mH]
Inercia del generador	J_{Gen}	65 [Kg*m ²]
Número de par de polos	P_f	2

Tabla 12 Parámetros eléctricos de un Generador DFIG de 2 MW

ANEXO D

Un sistema no lineal se puede representar mediante ecuaciones de estado en forma matricial, para lo cual se debe definir primero cada ecuación diferencial siguiendo la estructura de la expresión (7.5), donde $x(t)$ corresponde a un vector de estado de $n \times 1$, $r(t)$ es el vector de entrada de $p \times 1$ y $f[x(t), r(t)]$ denota un vector función de $n \times 1$. El procedimiento se fundamenta en la expansión de las ecuaciones de estado no lineales en una serie de Taylor alrededor de un punto o trayectoria de operación nominal.

$$\frac{dx(t)}{dt} = f[x(t), r(t)] \quad (7.5)$$

La trayectoria de operación nominal se denota por $x_o(t)$, la cual corresponde a la entrada nominal $r_o(t)$ y algunos estados iniciales fijos. Al expandir la ecuación de estado no lineal de la ecuación (7.5) en una serie de Taylor alrededor de $x(t) = x_o(t)$ y descartando los términos de orden superior se obtiene la expresión (7.6), donde $i = 1, 2, \dots, n$.

$$\dot{x}_i(t) = f_i(x_o, r_o) + \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial x_j} \right|_{x_o, r_o} (x_j - x_{oj}) + \sum_{j=1}^p \left. \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial r_j} \right|_{x_o, r_o} (r_j - r_{oj}) \quad (7.6)$$

Si definimos

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= x_i - x_{oi} \\ \Delta r_i &= r_i - r_{oi} \end{aligned} \quad (7.7)$$

entonces

$$\Delta \dot{x}_i = \dot{x}_i - f_i(x_o, r_o) \quad (7.8)$$

La ecuación (7.6) se escribe como:

$$\Delta \dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial x_j} \right|_{x_0, r_0} \Delta x_j + \sum_{j=1}^p \left. \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial r_j} \right|_{x_0, r_0} \Delta r_j \quad (7.9)$$

La ecuación (7.9) se puede escribir en la forma matricial obteniendo la expresión (7.10).

$$\Delta \dot{x} = A^* \Delta x + B^* \Delta r \quad (7.10)$$

$$A^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad B^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r_1} & \frac{\partial f_1}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial r_p} \\ \frac{\partial f_2}{\partial r_1} & \frac{\partial f_2}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial r_p} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial r_1} & \frac{\partial f_n}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial r_p} \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

Para obtener el modelo lineal de una turbina eólica se sigue el procedimiento descrito anteriormente, definiendo en primer lugar las ecuaciones diferenciales que caracterizan la respuesta dinámica, expresándolas en la forma de la ecuación (7.5).

$$f_1 = \frac{d\omega_{Rot}}{dt} = \frac{1}{J_{Rot}} (T_{Aer} - D_{Rot} (\omega_{Rot} - \omega_1) - Q_{Rot}) \quad (7.12)$$

$$f_2 = \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_{Eng1}} (D_{Rot} (\omega_{Rot} - \omega_1) + Q_{Rot} - T_1) \quad (7.13)$$

$$f_3 = \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_{Eng2}} (T_2 - D_{Gen} (\omega_2 - \omega_{Gen}) - Q_{Gen}) \quad (7.14)$$

$$f_4 = \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_{Gen} P_f} (D_{Gen} (\omega_2 - \omega_{Gen}) + Q_{Gen} + T_e) \quad (7.15)$$

$$f_5 = \frac{dQ_{Rot}}{dt} = f_5 = K_{Rot} (\omega_{Rot} - \omega_1) \quad (7.16)$$

$$f_6 = \frac{dQ_{Gen}}{d} = K_{Gen} \left(\omega_2 - \frac{\omega_r}{P_f} \right) \quad (7.17)$$

$$f_7 = \frac{dI_{dr}}{dt} = -\frac{R_r}{\sigma L_{rr}} I_{dr} + (\omega_o - \omega_r) I_{qr} + \frac{1}{\sigma L_{rr}} V_{dr} \quad (7.18)$$

$$f_8 = \frac{dI_{qr}}{dt} = -(\omega_o - \omega_r) I_{dr} - \frac{R_r}{\sigma L_{rr}} I_{qr} - \frac{1}{\sigma L_{rr}} V_A \quad (7.19)$$

Definiendo

$$T_{Aer} = \frac{1}{2} \rho A R \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} V_{tequ}^2 \quad (7.20)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{Rot} R}{V_{tequ}} \quad (7.21)$$

$$C_p = 0,5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-2/\lambda_i} + 0,0068\lambda \quad (7.22)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (7.23)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = n_{Eng} \quad (7.24)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_f L_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (7.25)$$

$$\begin{aligned} L_{ss} &= L_s + L_m \\ L_{rr} &= L_r + L_m \end{aligned} \quad (7.26)$$

donde:

T_{Aer}	Par aerodinámico
T_e	Par electromagnético producido por el generador de inducción
V_{tequ}	Velocidad equivalente del viento
β	Ángulo de ataque del aspa
ω_{Rot}	Velocidad mecánica de la turbina
$\omega_1 \ \omega_2$	Velocidad mecánica de los engranes de la caja multiplicadora
ω_r	Velocidad eléctrica del rotor del DFIG

Q_{Rot}	Par de reacción debido a la rigidez del eje de baja velocidad
Q_{gen}	Par de reacción debido a la rigidez del eje de alta velocidad
V_{dr}	Tensión del rotor en el sistema $dq0$ – eje d
V_A	Tensión proporcional al eje q del rotor en el sistema $dq0$
I_{ds}	Corriente del estator en el sistema $dq0$ – eje d
I_{qs}	Corriente del estator en el sistema $dq0$ – eje q
I_{dr}	Corriente del rotor en el sistema $dq0$ – eje d
I_{qr}	Corriente del rotor en el sistema $dq0$ – eje q
J_{Rot}	Momento de inercia de las aspas y el buje
K_{Rot}	Coefficiente de rigidez del eje de baja velocidad
D_{Rot}	Coefficiente de amortiguamiento del eje de baja velocidad
J_{Eng1} J_{Eng2}	Momentos de inercia de los engranes de la caja multiplicadora
n_{Eng}	Relación de engranes de la caja multiplicadora
K_{Gen}	Coefficiente de rigidez del eje de alta velocidad
J_{Gen}	Momento de inercia del generador de inducción
L_s	Inductancia de dispersión del bobinado del estator
L_r	Inductancia de dispersión del bobinado del rotor
L_m	Inductancia mutua
ω_0	Frecuencia eléctrica de la tensión de la línea de transmisión
P_f	Número de par de polos del DFIG

La representación del sistema en variables de estado, ecuación (7.10), se determina evaluando la derivada parcial de cada una de las funciones f_i con relación a las siguientes variables de estado:

ω_{Rot}	Velocidad Mecánica del rotor de la turbina eólica
ω_2	Velocidad mecánica del eje de alta velocidad de la caja multiplicadora
ω_r	Velocidad eléctrica del generador de inducción DFIG

- Q_{Rot} Par de reacción debido a la rigidez del eje de baja velocidad
- Q_{gen} Par de reacción debido a la rigidez del eje de alta velocidad
- I_{dr} Corriente del rotor – Componente del eje directo
- I_{qr} Corriente del rotor- Componente del eje de cuadratura

Las variables de entrada, r_j , para el sistema dinámico linealizado de la turbina eólica son:

- V_{dr} Componente en directa de la tensión del rotor
- V_A Componente en cuadratura de la tensión del rotor
- β Ángulo de paso
- V_{tequ} Velocidad del viento

La representación de la dinámica en variables de estado de la turbina eólica está dada por la ecuación (7.27), en la cual se asume que el deslizamiento es constante en el generador DFIG, para efectos de la linealización del sistema.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{Rot} \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{\omega}_r \\ \dot{Q}_{Rot} \\ \dot{Q}_{gen} \\ \dot{I}_{dr} \\ \dot{I}_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & 0 & a_3 & 0 & 0 & 0 \\ a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & 0 & 0 \\ 0 & a_9 & a_{10} & 0 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{14} & a_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{16} & a_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{18} & a_{19} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{20} & a_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Rot} \\ \omega_2 \\ \omega_r \\ Q_{Rot} \\ Q_{gen} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & b_1 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sigma L_{rr}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_{rr}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_A \\ \beta \\ V \end{bmatrix} \quad (7.27)$$

donde:

$$a_1 = \frac{\partial T_{aer}}{\partial \omega_{Rot}}$$

$$a_2 = \frac{D_{Rot}}{J_{Rot} n_{Eng}}$$

$$a_3 = -\frac{1}{J_{Rot}}$$

$$a_4 = \frac{D_{Rot} n_{Eng}}{J_{Eng1} + n_{Eng}^2 J_{Eng2}}$$

$$a_5 = -\frac{(D_{Rot} + D_{gen}n_{Eng}^2)}{(J_{Eng1} + n_{Eng}^2 J_{Eng2})} \quad a_6 = \frac{D_{gen}n_{Eng}^2}{P_f (J_{Eng1} + n_{Eng}^2 J_{Eng2})}$$

$$a_7 = \frac{n_{Eng}}{(J_{Eng1} + n_{Eng}^2 J_{Eng2})} \quad a_8 = -\frac{n_{Eng}^2}{(J_{Eng1} + n_{Eng}^2 J_{Eng2})}$$

$$a_9 = \frac{D_{gen}P_f}{J_{gen}} \quad a_{10} = -\frac{D_{gen}}{J_{gen}}$$

$$a_{11} = \frac{P_f}{J_{gen}} \quad a_{12} = \frac{\left(\frac{3}{2}P_f^2 L_m I_{qs}\right)}{J_{gen}}$$

$$a_{13} = -\frac{\left(\frac{3}{2}P_f^2 L_m I_{ds}\right)}{J_{gen}} \quad a_{14} = K_{Rot}$$

$$a_{15} = -\frac{K_{Rot}}{n_{Eng}} \quad a_{16} = K_{gen}$$

$$a_{17} = -\frac{K_{gen}}{P_f} \quad a_{18} = -\frac{R_r}{\sigma L_{rr}}$$

$$a_{19} = \omega_o - \omega_r \quad a_{20} = -(\omega_o - \omega_r)$$

$$a_{21} = -\frac{R_r}{\sigma L_{rr}} \quad b_1 = \frac{\partial T_{Aer}}{\partial \beta}$$

$$b_2 = \frac{\partial T_{Aer}}{\partial V_{tequ}}$$

El modelo lineal de la turbina eólica NM 2000/82, fabricada por Neg Micon, se evalúa para una velocidad media del viento de 11 m/s, un ángulo de ataque de cero grados, con el bobinado del estator del generador conectado directamente a una línea de transmisión, la cual se representa como una barra infinita de tensión pico de 450 voltios y frecuencia de la red de 50 Hz y el bobinado del rotor en cortocircuito. Los valores de los parámetros del sistema de transmisión y el generador se asumen los del anexo C, obteniendo las siguientes condiciones iniciales para los estados $x_i(t)$:

$$I_{dr} = -1065,22 \quad [\text{Amp}] \quad I_{qr} = 2980,44 \quad [\text{Amp}] \quad Q_{Gen} = 12611,46 \quad [\text{N-m}]$$

$$\omega_2 = 158,63 \quad [\text{rad/sg}] \quad \omega_r = 317,26 \quad [\text{rad/sg}] \quad Q_{Rot} = 1053056,74 \quad [\text{N-m}]$$

$$\omega_{Rot} = 1,9 \quad [\text{rad/sg}]$$

Para el diseño de los controladores que regulan las variables corriente del rotor I_{dr} y I_{qr} , además de la velocidad del generador, se realiza un desacoplo de la dinámica del sistema mecánico del sistema eléctrico, evaluando de la ecuación (7.27) las funciones de transferencia I_{dr}/V_{dr} , I_{qr}/V_A y ω_{Gen}/β , donde $\omega_{Gen} = \omega_r/P_f$.

En la ecuación (7.28) y (7.29) se encuentra la representación en variables de estado y la función de transferencia del modelo dinámico del generados DFIG evaluada para un deslizamiento de -0,98 %, valor correspondiente a una potencia activa de 2 MW.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{dr} \\ \dot{I}_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -8,7598 & -3,0979 \\ 3,0979 & -8,7598 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 6738,366 & 0 \\ 0 & 6738,366 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_A \end{bmatrix} \quad (7.28)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

$$\frac{I_{dr}}{V_{dr}} = \frac{I_{qr}}{V_A} = \frac{6738s + 59030}{s^2 + 17,52s + 86,33} \quad (7.29)$$

En la ecuación (7.30) y (7.31) se encuentra, respectivamente, la representación en variables de estado y la función de transferencia para la velocidad mecánica en función del ángulo de ataque del aspa.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A^* x + B^* \beta \\ \omega_{Gen} &= C^* x \end{aligned} \quad (7.30)$$

$$A^* = \begin{bmatrix} -0,1798 & 0,001828 & 0 & -2,02*10^{-7} & 0 & 0 & 0 \\ 904849,86 & -110822,18 & 49992,829 & 1,1974 & -99,9856 & 0 & 0 \\ 0 & 30,7692 & -15,3846 & 0 & 0,030769 & -0,8061 & -0,4183 \\ 114000000 & -1365269,46 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100000 & -50000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -8,7598 & -3,0979 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3,0979 & -8,7598 \end{bmatrix}$$

$$B^* = \begin{bmatrix} 0,008827 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C^* = [0 \ 0 \ 0.5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\frac{\omega_{gen}}{\beta} = \frac{-1,455 * 10^{-11} s^4 + 5,427 * 10^{-8} s^3 - 1,229 * 10^5 s^2 - 3,083 * 10^7 s - 1,854 * 10^9}{s^5 + 1,108 * 10^5 s^4 + 1,182 * 10^7 s^3 + 4,597 * 10^7 s^2 + 2,747 * 10^9 s + 6,841 * 10^7} \quad (7.31)$$

ANEXO E

En el presente anexo se realiza una descripción del algoritmo genético utilizado para la determinación de las constantes del controlador PI que regula la corriente I_{dr} y I_{qr} del rotor, las cuales a su vez mantienen fija la potencia activa y el factor de potencia del generador DFIG ante variaciones de la velocidad del viento. Previamente se debe determinar los siguientes parámetros:

- *Tiempo de simulación.* Corresponde al tiempo sobre el cual se va a evaluar la respuesta transitoria ante una entrada escalón del sistema en lazo cerrado.
- *Límites de las constantes.* Para optimizar la búsqueda de las constantes del regulador PI se determina previamente un rango de valores en los cuales se pueda encontrar la solución.
- *Resolución.* Corresponde a la cantidad de bits con los cuales se va a representar cada constante del regulador PI. La estructura está dada por la ecuación (7.32).

$$G_c = K_p (1 + K_i/s) \quad (7.32)$$

- *Número de individuos.* Es el número de individuos que conforman la población inicial para el algoritmo genético.
- *Número de generaciones.* Es el número máximo de iteraciones que realiza el algoritmo genético.
- *Porcentaje de cruce.* El cruce es el proceso en el cual se elige aleatoriamente un conjunto de individuos para que intercambien segmentos de su código, produciendo una nueva generación resultado de la combinación de los padres. El porcentaje corresponde a la cantidad de individuos seleccionados de la población para realizar el cruce.
- *Porcentaje de mutación.* La mutación es la operación en la cual se cambia aleatoriamente un bit de la cadena que representa el código binario de una constante. El porcentaje está relacionado con la cantidad de bits que cambian en una población.

Para el ejemplo que se desarrollará a continuación se configura el algoritmo genético con los valores de tabla 12. La función de transferencia $\frac{I_{dr}}{V_{dr}}$, ecuación (7.33), corresponde al modelo lineal del generador DFIG, para un deslizamiento constante, que se explicó en el anexo D.

$$\frac{I_{dr}}{V_{dr}} = \frac{6738s + 59030}{s^2 + 17,52s + 86,33} \quad (7.33)$$

PARÁMETRO	VALOR
Tiempo de simulación	20 [ms]
Límite de K_p	$0 < K_p < 0,1$
Límite de K_i	$0 < K_i < 0,1$
Resolución	5 bits
Número de individuos	10
Número de generaciones	100
Porcentaje de cruce	60 %
Porcentaje de mutación	2 %
Exponente	7

Tabla 13 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador PI – Velocidad mecánica del generador

a) *Población Inicial.* La población inicial se obtiene generando una cadena de bits aleatorios, en la cual cada cromosoma, correspondiente a las constantes K_p y K_i , tiene una longitud igual a la resolución. La relación entre el número real y el código binario está dada por la ecuación (7.34).

$$K(i) = (\max - \min) \frac{\sum_{i=0}^{\text{Resolucion}-1} \text{rand}(i) * 2^i}{2^{\text{Resolucion}} - 1} + \min \quad (7.34)$$

La expresión (7.35) corresponde a un ejemplo de una población inicial con diez individuos, donde los primeros cinco bits corresponden al valor binario de K_p y los siguientes cinco bits a K_i . Se considera el bit menos significativo la primera columna de la matriz *Pobla* para la constante K_p y la sexta columna para la constante K_i . Al aplicar la relación (7.34) se obtiene la constante real correspondiente a cada cromosoma que conforma al individuo.

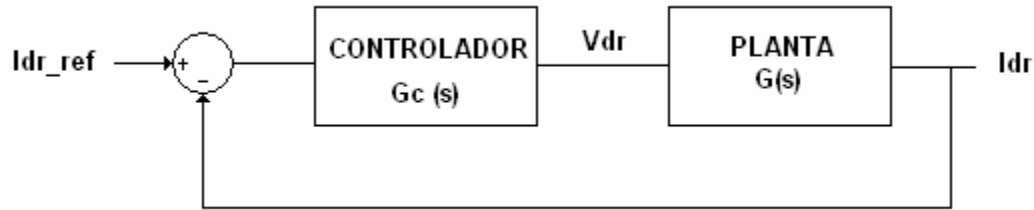


Fig. 34 Diagrama de bloques del lazo de control para la corriente I_{dr}

$$\frac{e(s)}{I_{dr_ref}(s)} = \frac{1}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (7.37)$$

$$\frac{u(s)}{I_{dr_ref}(s)} = \frac{V_{dr}(s)}{I_{dr_ref}(s)} = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s)G(s)}$$

$$\left[\begin{array}{c|c|c} \sum_{i=0}^N e(i)^2 & \sum_{i=0}^N u(i)^2 & f \end{array} \right] = \begin{bmatrix} 2,5753 & 0,0190 & 48,7749 \\ 1088,2 & 1,3703 & 33,2584 \\ 1088,1 & 1,3703 & 33,2598 \\ 2394 & 0,6232 & -25,3062 \\ 469,7118 & 3,0558 & 49,0125 \\ 469,6866 & 3,0559 & 49,0128 \\ 10000 & 0 & -400 \\ 390,3683 & 3,656 & 47,5773 \\ 511,2969 & 2,8155 & 49,0493 \\ 2933,8 & 0,4888 & -51,087 \end{bmatrix} \quad (7.38)$$

c) *Optimización.* El valor de la función objetivo para cada uno de los 10 individuos, f , es ponderada de acuerdo a la ecuación (7.39). El objetivo de esta ponderación es permitir que el individuo con la mejor función objetivo sobresalga con relación a los demás, obteniendo una mayor posibilidad de ser seleccionado en la siguiente etapa.

$$s(i) = 1, 2^{w(i)} * g(i) + 1, 2^{w(i)} * h(i) + 1, 2^{w(i)} * k(i) + \exp^{w(i)} * l(i) \quad (7.39)$$

$$w(i) = \frac{f(i) - \min(f)}{\max(f) - \min(f)}$$

$g(i)$, $h(i)$, $k(i)$ y $l(i)$ asumen el valor de uno si $w(i)$ se encuentra en el rango correspondiente, de lo contrario asume el valor de cero.. La variable exp es un número real opcional.

$$\begin{aligned} g(i) & 0 < w(i) \leq 0,4 \\ h(i) & 0,4 < w(i) \leq 0,6 \\ k(i) & 0,6 < w(i) \leq 0,9 \\ l(i) & 0,9 < w(i) \leq 1 \end{aligned}$$

Como se observa en los resultados de la evaluación de la ecuación (7.40) los individuos que presentan una función de aptitud alta se resaltan con relación a los demás. La ponderación depende en gran medida del coeficiente exp , se recomienda no fijar un valor demasiado alto porque puede ocasionar que el algoritmo oscile alrededor de un mínimo sin llegar a él.

$$[f \mid w \mid s] = \begin{bmatrix} 48,7749 & 0,9993 & 6,9903 \\ 33,2584 & 0,9647 & 6,5358 \\ 33,2598 & 0,9647 & 6,5358 \\ -25,3062 & 0,8343 & 1,1643 \\ 49,0125 & 0,9998 & 6,9975 \\ 49,0128 & 0,9998 & 6,9975 \\ -400,00 & 0,000 & 1,0000 \\ 47,5773 & 0,9966 & 6,9541 \\ 49,0493 & 1,000 & 7,0000 \\ -51,087 & 0,7769 & 1,1522 \end{bmatrix} \quad (7.40)$$

d) *Selección.* Para el proceso de selección se utilizó el método de la ruleta. Los pasos que se realizan para la selección de un grupo de individuos, inician con una normalización del vector s , obtenido del proceso de optimización, dado por la ecuación (7.41). Los resultados se almacena en el vector m . Una vez determinado este vector, se realiza una suma acumulativa de sus elementos y se almacena en el vector n . Posteriormente se genera un vector de números aleatorios, g , de longitud igual al número de individuos, y se determinar en cual posición ese número queda consecutivo entre dos

valores del vector n , es decir, $n(j) < g(i) \leq n(j+1)$. Si cumple la relación, el individuo es seleccionado para el proceso de *cruce*.

$$m(i) = \frac{s(i)}{\sum_{j=0}^{Num_Individuos} s(i)} \quad (7.41)$$

En la expresión (7.42) se puede observar los diferentes vectores generados en esta etapa, la primera columna es el vector m , la segunda columna el vector n y la tercera columna el número aleatorio g . La cuarta columna corresponde a las posiciones de los individuos seleccionados para la etapa de cruce. Se observa que el primer individuo seleccionado, el 2, se obtiene de la condición establecida previamente, es decir, el número aleatorio 0,1662 únicamente se puede ubicar entre los números 0,1362 y 0,2635 del vector n ; de igual forma se obtiene el segundo individuo, 8, el número aleatorio solo se puede ubicar entre $0,7057 < 0,8332 < 0,8412$.

$$[m \mid n \mid g \mid p] = \begin{bmatrix} 0,1362 & 0,0000 & 0,1662 & 2 \\ 0,1273 & 0,1362 & 0,8332 & 8 \\ 0,1273 & 0,2635 & 0,8386 & 8 \\ 0,0227 & 0,3908 & 0,4516 & 5 \\ 0,1363 & 0,4135 & 0,9566 & 9 \\ 0,1363 & 0,5498 & 0,1472 & 2 \\ 0,0194 & 0,6862 & 0,8699 & 9 \\ 0,1355 & 0,7057 & 0,7694 & 8 \\ 0,1364 & 0,8412 & 0,4441 & 5 \\ 0,0224 & 0,9776 & 0,6206 & 6 \end{bmatrix} \quad (7.42)$$

La expresión (7.43) contiene la información genética de los individuos seleccionados para la etapa de cruce. Se observa que los individuos que presentaron menor valor de la función de aptitud, s , no se tienen en cuenta para la etapa de cruce, como sucedió para los individuos 4, 7 y 10. El número que aparece al lado derecho de la matriz corresponde a la posición de los individuos seleccionados.

$$Pobl_cruce = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0355 & 0,0097 & 2 \\ 0,0968 & 0,0097 & 8 \\ 0,0968 & 0,0097 & 8 \\ 0,0806 & 0,0645 & 5 \\ 0,0742 & 0,0710 & 9 \\ 0,0355 & 0,0097 & 2 \\ 0,0742 & 0,0710 & 9 \\ 0,0968 & 0,0097 & 8 \\ 0,0806 & 0,0645 & 5 \\ 0,0806 & 0,0839 & 6 \end{bmatrix} \quad (7.43)$$

e) *Cruce*. El primer paso a seguir en esta etapa es generar un vector aleatorio, r , de igual longitud al número de individuos. Se compara término a término con el porcentaje de cruce y se determina aquellas posiciones en las cuales este número es inferior a este valor. Los individuos de la matriz *Pobl_cruce* que cumplen con la condición, se agrupan para conformar una nueva población, denominado *new_pobla*. Si el número de elementos seleccionados es impar, se genera un número aleatorio para seleccionar otro individuo con el fin de completar un número par. Posteriormente se realiza un intercambio de genes de *new_pobla*, siendo aleatoria la posición de la fila y columna que se modifican. Este nuevo conjunto, denominado *new_cruce*, reemplaza a los genes de la población inicial en las posiciones que cumplen con el porcentaje de cruce.

Dado un porcentaje de cruce de 60%, se observa en la expresión (7.44) que los individuos 1, 2 y 9 presentan un número mayor a 0,6, quedando siete individuos seleccionados. Al ser un número impar, se genera un dato aleatorio que corresponde a la posición del octavo individuo. La expresión (7.45) corresponde a la matriz *Pobl_cruce* y la matriz *new_pobla*.

$$[r \mid r < Por_cruce] = \begin{bmatrix} 0.9517 & | & 0 \\ 0.6400 & | & 0 \\ 0.2473 & | & 1 \\ 0.3527 & | & 1 \\ 0.1878 & | & 1 \\ 0.4906 & | & 1 \\ 0.4092 & | & 1 \\ 0.4635 & | & 1 \\ 0.6109 & | & 0 \\ 0.0711 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (7.44)$$

$$Pobla_cruce = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & | & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & | & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & | & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & | & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & | & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & | & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & | & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow new_pobla = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & | & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & | & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & | & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & | & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & | & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & | & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.45)$$

El proceso de cruce se realiza entre dos filas de la matriz *new_pobla* seleccionadas de forma aleatoria y el intercambio entre columnas se realiza en un intervalo de bits determinado, desde una posición x_1 , dada aleatoriamente, hasta la mitad de bits correspondiente a la información genética del individuo. Otro intervalo comprende desde una posición x_2 , dada aleatoriamente, hasta la longitud de la cadena genética. Se debe garantizar que $1 \leq x_1 \leq b/2$ y $b/2 \leq x_2 \leq b$, donde b es la longitud, en bits, de la representación del individuo. En la expresión (746) se observa un ejemplo de cruce entre la fila 4 y 8 de la matriz *new_pobla*, para las columnas $3 \leq x_1 \leq 5$ y $9 \leq x_2 \leq 10$,

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & | & 0 & 1 & 1 & | & 0 & 0 & 1 & | & 0 & 0 \\ & & & \Downarrow & & & \Downarrow & & & & & & \\ 1 & 0 & | & 1 & 0 & 1 & | & 0 & 1 & 1 & | & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & | & 1 & 0 & 1 & | & 0 & 0 & 1 & | & 0 & 1 \\ 1 & 0 & | & 0 & 1 & 1 & | & 0 & 1 & 1 & | & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.46)$$

f) *Mutación*. El porcentaje de genes que mutan es igual $a*b*por_mut$, donde a y b corresponden al tamaño de la matriz que contiene la información genética de la población y por_mut corresponde al porcentaje de mutación que se defina. Para el ejemplo que manejamos la cantidad de bits que se modifican serían dos. Las posiciones se determinan aleatoriamente.

El proceso se repite cíclicamente hasta que se alcance el número de generaciones especificadas o la desviación estándar de los datos que conforman el vector de la función aptitud sea inferior a 0,1. En la figura 35 se observa el comportamiento de los 10 individuos a medida que transcurre cada iteración. El algoritmo se detiene en la iteración número 13 debido a que el valor de la función de aptitud de cada individuo tiende al mismo mínimo. El valor de las constantes K_p y K_i del regulador PI están dadas en la expresión (7.47)

$$G_c = K_p (1 + K_i/s) = 0,0742(1 + 0,0226/s) \quad (7.47)$$

Para el diseño del regulador PI para la velocidad mecánica del generador DFIG se basa en el diagrama de bloques de la figura 36. Las funciones de transferencia del error y de la acción de control están dadas por la ecuación (7.48).

$$\frac{e(s)}{\omega_{Gen_ref}(s)} = \frac{-1}{1 - G_c(s)G(s)} \quad (7.48)$$

$$\frac{u(s)}{\omega_{Gen_ref}(s)} = \frac{\beta(s)}{\omega_{Gen_ref}(s)} = \frac{-G_c(s)}{1 - G_c(s)G(s)}$$

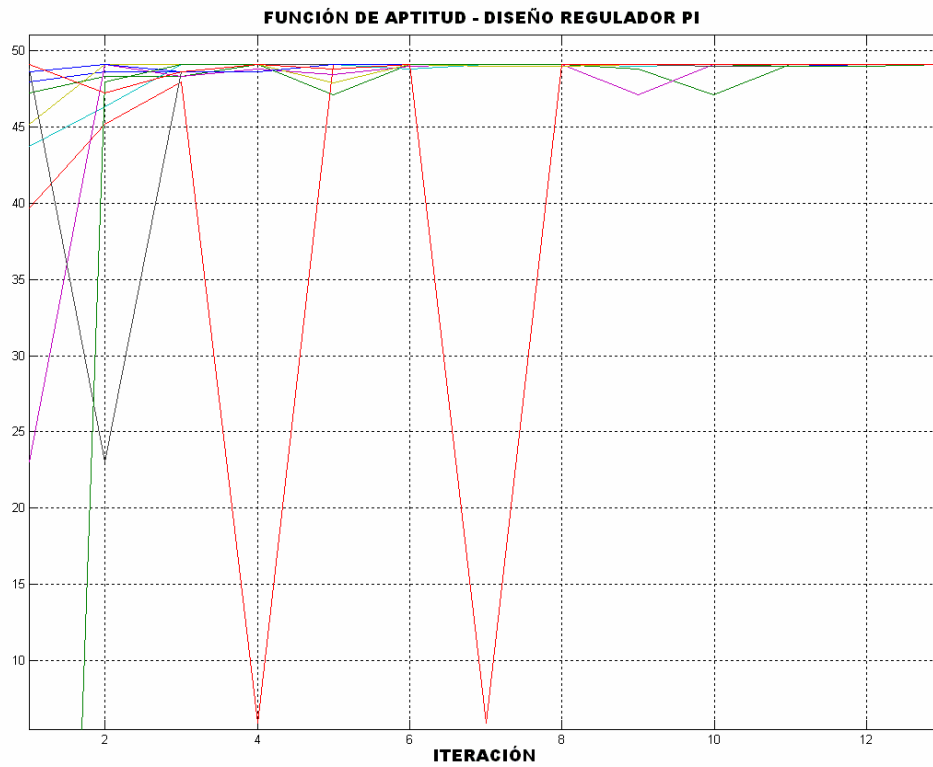


Fig. 35 Función de aptitud para el diseño del regulador PI

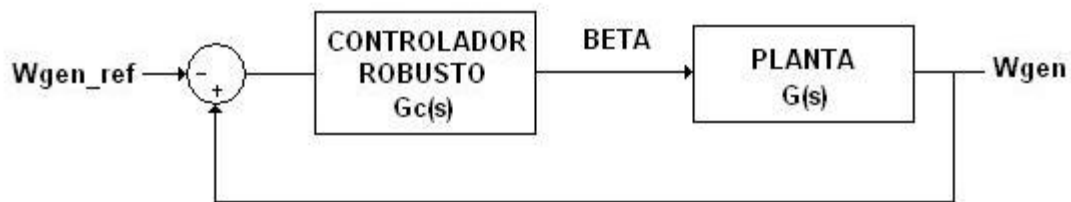


Fig. 36 Diagrama de bloques del lazo de control para la velocidad mecánica del generador

ANEXO F

El diseño de un regulador robusto basado en la técnica de Hinf, utilizando algoritmos genéticos, sigue el mismo procedimiento al descrito en el anexo E. Los únicos aspectos en los cuales cambia son:

- *Población.* La información de cada individuo está conformada con el código binario de las constantes a_i , b_i y k_i que definen las funciones de transferencia $W_1(s)$, $W_2(s)$ y $W_3(s)$, ecuación (7.49), las cuales caracterizan el comportamiento en frecuencia de la sensibilidad, la acción de control y nivel de ruido del sensor, respectivamente.

$$W_1(s) = \frac{k_1 \left(\frac{s}{a_1} + 1 \right)}{s \left(\frac{s}{b_1} + 1 \right)} \quad W_2(s) = \frac{k_2 \left(\frac{s}{a_2} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{b_2} + 1 \right)} \quad W_3(s) = \frac{k_3 \left(\frac{s}{a_3} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{b_3} + 1 \right)} \quad (7.49)$$

La expresión (7.50) y (7.51) presentan un ejemplo de la representación en números binarios de un individuo, y el valor de la constante real correspondiente dada por la ecuación (7.34), de la población inicial que se genera aleatoriamente en el diseño del controlador robusto para la velocidad mecánica del generador DFIG. Los parámetros de configuración del algoritmo genético se encuentran en la tabla 14

- *Función de optimización.* La expresión (7.52) corresponde a la función de optimización, la cual se basa en las características de la respuesta transitoria de la velocidad mecánica del generador ante una entrada escalón. Las constantes que multiplican a los índices ITSE del error e ISE de la acción de control tienen como objetivo no permitir que ninguno de los dos factores sea predominante en la función de aptitud. Para evaluar f se determina previamente el controlador utilizando el comando *hinfopt* de la toolbox de control robusto de Matlab, dada las funciones de transferencia $W_1(s)$, $W_2(s)$ y $W_3(s)$. Las funciones de transferencia de la señal de error y la acción de control están dadas por la ecuación (7.48). En la expresión (7.53) se observan los

resultados de $\sum_{i=0}^N t(i)^2 * e(i)^2$, $\sum_{i=0}^N u(i)^2$ y f para la primera iteración, evaluados en un intervalo de tiempo 0 a 6 s, para 10000 puntos.

PARÁMETRO		VALOR
Tiempo de simulación		6 [s]
Función $W_1(s)$	Límite de K_1	$10 < K_1 < 1000000$
	Límite de a_1	$1 < a_1 < 10000$
	Límite de b_1	$1 < b_1 < 10000$
Función $W_2(s)$	Límite de K_2	$1 < K_2 < 50000$
	Límite de a_2	$1 < a_2 < 10000$
	Límite de b_2	$0 < b_2 < 1000$
Función $W_3(s)$	Límite de K_3	$1 < K_3 < 50000$
	Límite de a_3	$1 < a_3 < 10000$
	Límite de b_3	$1 < b_3 < 10000$
Resolución		5 bits
Número de individuos		10
Número de generaciones		200
Porcentaje de cruce		60 %
Porcentaje de mutación		0.5 %
Exponente		6

Tabla 14 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador robusto Hinf – Velocidad mecánica del generador

Las etapas de optimización, selección, cruce y mutación se realiza de la misma forma como se describió para el diseño del regulador PI. En la figura 37 se observa el comportamiento de los diez individuos durante las 200 iteraciones y en la ecuación (7.54) las funciones de transferencia $W_1(s)$, $W_2(s)$ y $W_3(s)$ obtenidas. El procedimiento es el mismo para el regulador de potencia activa, teniendo en cuenta el diagrama de bloques de la figura 34 y las funciones de transferencia del error y la acción de control correspondientes.

$$Pobl_a = \begin{array}{c|ccc|ccc|ccc}
 & k_1 & & & a_1 & & & b_1 & & & & & & \\
 \hline
 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c|ccc|ccc|ccc}
 & k_2 & & & a_2 & & & b_2 & & & & & & \\
 \hline
 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c|ccc|ccc|ccc}
 & k_3 & & & a_3 & & & b_3 & & & & & & \\
 \hline
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0
 \end{array}$$

(7.50)

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{c}
 k_1 \qquad a_1 \qquad b_1 \qquad k_2 \qquad a_2 \\
 \left[\begin{array}{c|c|c|c|c}
 6,7742*10^5 & 0,0290*10^5 & 0,0484*10^5 & 0,3548*10^5 & 0,0129*10^5 \\
 9,6783*10^4 & 0,3226*10^4 & 0,9355*10^4 & 4,8387*10^4 & 0,5484*10^4 \\
 1,2904*10^5 & 0,0548*10^5 & 0,0161*10^5 & 0,4839*10^5 & 0,0387*10^5 \\
 5,8065*10^5 & 0,0419*10^5 & 0,0710*10^5 & 0,0000 & 0,0581*10^5 \\
 3,8710*10^5 & 0,0839*10^5 & 0,0516*10^5 & 0,2903*10^5 & 0,0000 \\
 3,2268*10^4 & 0,3226*10^4 & 0,2581*10^4 & 4,5161*10^4 & 0,8065*10^4 \\
 6,1291*10^5 & 0,0806*10^5 & 0,0226*10^5 & 0,2419*10^5 & 0,0581*10^5 \\
 8,7097*10^5 & 0,0677*10^5 & 0,0323*10^5 & 0,3871*10^5 & 0,0968*10^5 \\
 2,2581*10^5 & 0,0387*10^5 & 0,0419*10^5 & 0,1129*10^5 & 0,0516*10^5 \\
 5,1613*10^5 & 0,0806*10^5 & 0,0677*10^5 & 0,4032*10^5 & 0,0032*10^5
 \end{array} \right. \\
 \\
 \begin{array}{c}
 b_2 \qquad k_3 \qquad a_3 \qquad b_3 \\
 \left[\begin{array}{c|c|c|c}
 0,0013*10^5 & 0,1613*10^5 & 0,0710*10^5 & 0,0677*10^5 \\
 0,0419*10^4 & 4,3549*10^4 & 0,4839*10^4 & 0,8065*10^4 \\
 0,0035*10^5 & 0,3226*10^5 & 0,0226*10^5 & 0,0839*10^5 \\
 0,0055*10^5 & 0,4516*10^5 & 0,0000 & 0,0742*10^5 \\
 0,0055*10^5 & 0,1452*10^5 & 0,0484*10^5 & 0,0839*10^5 \\
 0,0774*10^4 & 4,3549*10^4 & 0,4517*10^4 & 0,3549*10^4 \\
 0,0048*10^5 & 0,1613*10^5 & 0,1000*10^5 & 0,0710*10^5 \\
 0,0081*10^5 & 0,0000 & 0,0613*10^5 & 0,0452*10^5 \\
 0,0065*10^5 & 0,3548*10^5 & 0,0032*10^5 & 0,0387*10^5 \\
 0,0090*10^5 & 0,4677*10^5 & 0,0968*10^5 & 0,0258*10^5
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \end{array}
 \tag{7.51}$$

$$f = 100 - \left(0,05 \sum_{i=0}^N t(i) * e(i)^2 + 0,01 \sum_{i=0}^N u(i)^2 \right) \tag{7.52}$$

$$\left[\begin{array}{c|c|c}
 \sum_{i=0}^N t(i) * e(i)^2 & \sum_{i=0}^N u(i)^2 & f
 \end{array} \right] = \begin{array}{c|c|c}
 \left[\begin{array}{c}
 2,7698 \\
 1,9422 \\
 19,5295 \\
 10,8961 \\
 134,8017 \\
 11,5998 \\
 3,8686 \\
 7,5244 \\
 9,0671 \\
 3,5777
 \end{array} \right. & \left[\begin{array}{c}
 55,6946 \\
 156,6351 \\
 29,6704 \\
 94,1915 \\
 17,9287 \\
 30,5108 \\
 50,1143 \\
 37,5008 \\
 85,4805 \\
 128,8989
 \end{array} \right. & \left[\begin{array}{c}
 41,5356 \\
 -58,5773 \\
 50,8001 \\
 -5,0876 \\
 -52,7305 \\
 57,8895 \\
 46,0170 \\
 54,9748 \\
 5,4524 \\
 -32,4766
 \end{array} \right.
 \end{array} \tag{7.53}$$

$$\begin{aligned}
 W_1(s) &= \frac{k_1 \left(\frac{s}{a_1} + 1 \right)}{s \left(\frac{s}{b_1} + 1 \right)} = \frac{43147 \left(\frac{s}{22361} + 1 \right)}{s \left(\frac{s}{334} + 1 \right)} \\
 W_2(s) &= \frac{k_2 \left(\frac{s}{a_2} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{b_2} + 1 \right)} = \frac{3334,3 \left(\frac{s}{471,54} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{917,64} + 1 \right)} \\
 W_3(s) &= \frac{k_3 \left(\frac{s}{a_3} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{b_3} + 1 \right)} = \frac{25099 \left(\frac{s}{6588,6} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{6235,7} + 1 \right)}
 \end{aligned}
 \tag{7.54}$$

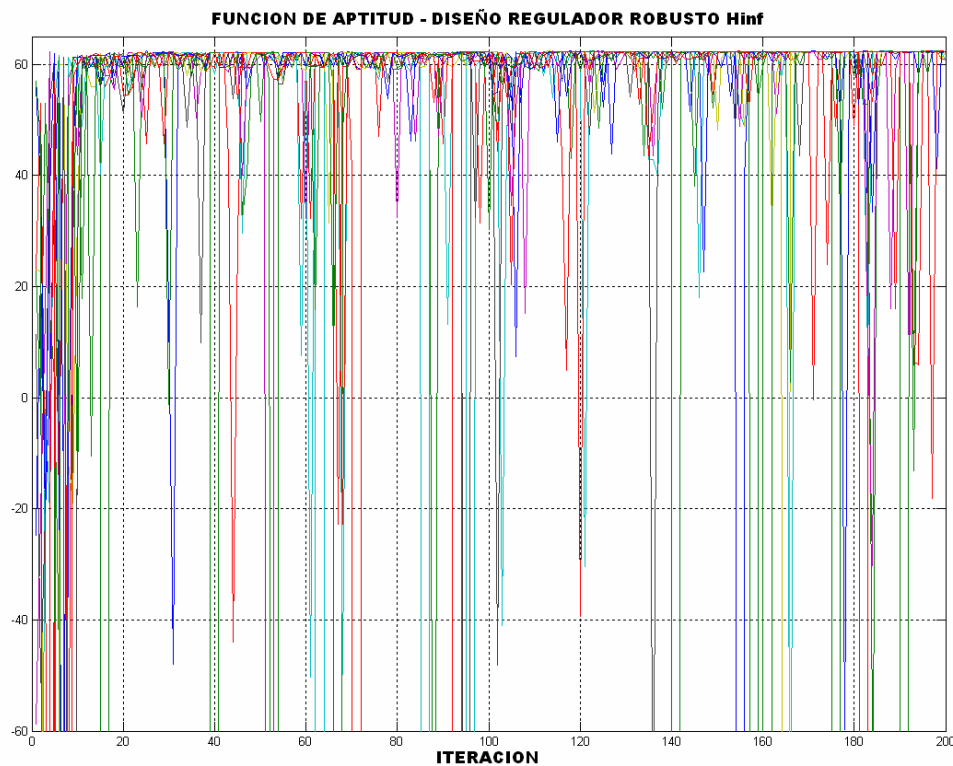


Fig. 37 Función de aptitud para el diseño del regulador robusto

ANEXO G

El diseño de un regulador LQR, utilizando algoritmos genéticos, sigue el mismo procedimiento al descrito en el anexo E. Los únicos aspectos en los cuales cambia son:

- *Población.* La información de cada individuo está conformada con el código binario de las constantes a_i y b_i que definen los elementos de la diagonal de la matriz Q y R , ecuación (7.55), las cuales ponderan las variables de estado del modelo dinámico de la turbina eólica y la acción de control, respectivamente.

La expresión (7.56) y (7.57) corresponde a un ejemplo de la representación en números binarios de un individuo, y el valor de la constante real, dada por la ecuación (7.34), de la población inicial que se genera aleatoriamente en el diseño de un controlador LQR para la velocidad mecánica del generador DFIG. Los parámetros de configuración del algoritmo genético se encuentran en la tabla 15.

- *Función de optimización.* La expresión (7.58) corresponde a la función de optimización, la cual se basa en las características de la respuesta transitoria de la velocidad mecánica ante una entrada escalón. Las constantes que multiplican a los índices ITSE del error y de la acción de control tienen como objetivo no permitir que ninguno de los dos factores sea predominante en la función de aptitud. Para evaluar f se determina previamente la matriz de ganancia, K y K_i , utilizando el comando *lqr* de la toolbox de control robusto de Matlab, dada las matrices Q y R . La representación en variables de estado de la señal de error y la acción de control, dado el diagrama de bloques de la figura 37, están dadas en la ecuación (7.59), donde A , B y C corresponden a la representación en variables de estado de la función de transferencia $\frac{\omega_{Gen}}{\beta}$ obtenida del modelo lineal de la turbina eólica. En la expresión (7.60) se observan los resultados de $\sum_{i=0}^N t(i) * e(i)^2$, $\sum_{i=0}^N t(i) * u(i)^2$ y f para la primera iteración, evaluados en un intervalo de tiempo 0 a 8 s, para 10000 puntos.

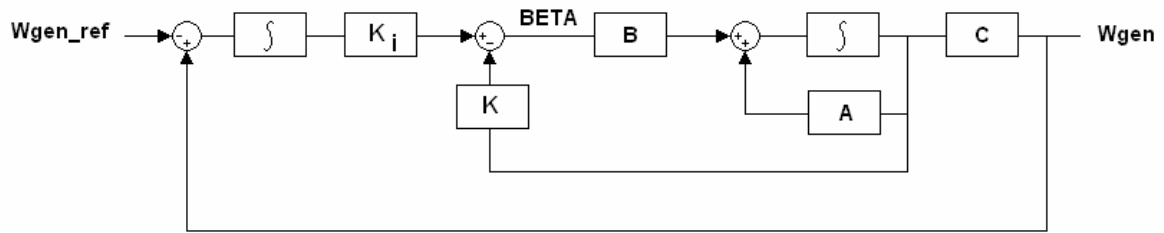


Fig. 38 Diagrama de bloques del lazo de control LQR para la velocidad mecánica del generador

PARÁMETRO		VALOR
Tiempo de simulación		8 [s]
Matriz Q	Límite de a_1	$10^5 < a_1 < 10^8$
	Límite de a_2	$10^4 < a_2 < 10^7$
	Límite de a_3	$10^3 < a_3 < 10^6$
	Límite de a_4	$10^3 < a_4 < 10^6$
	Límite de a_5	$10^3 < a_5 < 10^6$
	Límite de a_6	$0 < a_6 < 10^2$
	Límite de a_7	$0 < a_7 < 10^3$
	Penalización del integrador	$10^4 < a_8 < 10^7$
Matriz R	Límite de b_1	$10^3 < b_1 < 10^7$
Resolución		40 bits
Número de individuos		20
Número de generaciones		200
Porcentaje de cruce		60 %
Porcentaje de mutación		4 %
Exponente		10

Tabla 15 Parámetros del algoritmo genético para el diseño del regulador LQR – Velocidad mecánica del generador

$$Q = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_8 \end{bmatrix} \quad R = [b_1] \quad (7.55)$$

$$\text{Pobla} = \begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc}
 & a_1 & & a_2 & & a_3 \\
 \left[\begin{array}{cccc|cccc|cccc}
 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 & a_4 & & a_5 & & a_6 \\
 \left[\begin{array}{cccc|cccc|cccc}
 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 & a_7 & & a_8 & & b_1 \\
 \left[\begin{array}{cccc|cccc|cccc}
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

(7.56)

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccc}
 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 \\
 Pobla = & \left[\begin{array}{c}
 9,0332*10^7 \\
 8,7110*10^7 \\
 6,1329*10^7 \\
 6,1329*10^7 \\
 9,0332*10^7 \\
 2,2658*10^7 \\
 3,5548*10^7 \\
 6,4552*10^7 \\
 4,5216*10^7 \\
 1,9435*10^7
 \end{array} \right. & \left. \begin{array}{c}
 0,9678*10^7 \\
 0,3233*10^7 \\
 0,1944*10^7 \\
 0,9033*10^7 \\
 0,5166*10^7 \\
 0,1621*10^7 \\
 0,4844*10^7 \\
 0,2588*10^7 \\
 0,3877*10^7 \\
 0,7100*10^7
 \end{array} \right. & \left. \begin{array}{c}
 0,0807*10^7 \\
 0,0742*10^7 \\
 0,0581*10^7 \\
 0,0839*10^7 \\
 0,0646*10^7 \\
 0,0355*10^7 \\
 0,0484*10^7 \\
 0,0001*10^7 \\
 0,0227*10^7 \\
 0,0839*10^7
 \end{array} \right. & \left. \begin{array}{c}
 0,0291*10^7 \\
 0,0903*10^7 \\
 0,0678*10^7 \\
 0,0710*10^7 \\
 0,0710*10^7 \\
 0,0130*10^7 \\
 0,0613*10^7 \\
 0,0807*10^7 \\
 0,0098*10^7 \\
 0,0807*10^7
 \end{array} \right. & \left. \begin{array}{c}
 0,0936*10^7 \\
 0,0774*10^7 \\
 0,0484*10^7 \\
 0,0968*10^7 \\
 0,0517*10^7 \\
 0,0162*10^7 \\
 0,0678*10^7 \\
 0,0388*10^7 \\
 0,0742*10^7 \\
 0,0227*10^7
 \end{array} \right.
 \end{array} \\
 \\
 \begin{array}{cccc}
 & a_6 & a_7 & a_8 & b_1 \\
 & \left[\begin{array}{c}
 25,8065 \\
 48,3871 \\
 32,2581 \\
 100,00 \\
 12,9032 \\
 25,8065 \\
 12,9032 \\
 19,3548 \\
 80,6452 \\
 22,5806
 \end{array} \right. & \left. \begin{array}{c}
 96,7742 \\
 645,1613 \\
 774,1935 \\
 870,9677 \\
 322,5806 \\
 967,7419 \\
 225,8065 \\
 548,3871 \\
 96,7742 \\
 612,9032
 \end{array} \right. & \left. \begin{array}{c}
 0,9355*10^7 \\
 1,0000*10^7 \\
 0,5488*10^7 \\
 0,9678*10^7 \\
 0,4199*10^7 \\
 0,4844*10^7 \\
 0,2910*10^7 \\
 0,0655*10^7 \\
 0,8389*10^7 \\
 0,0655*10^7
 \end{array} \right. & \left. \begin{array}{c}
 0,2904*10^7 \\
 0,4517*10^7 \\
 0,9032*10^7 \\
 0,7097*10^7 \\
 0,5162*10^7 \\
 0,9032*10^7 \\
 0,5162*10^7 \\
 0,4194*10^7 \\
 0,6452*10^7 \\
 0,2259*10^7
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \end{array} \tag{7.57}$$

$$f = 100 - \left(0.0008 \sum_{i=0}^N t(i) * e(i)^2 + 0.005 \sum_{i=0}^N t(i) * u(i)^2 \right) \tag{7.58}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \begin{bmatrix} A - BK & BK_i \\ C & 0 \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega_{Gen_ref} \\
 e &= Cx - r \\
 u &= \beta = [K_i \quad K]
 \end{aligned} \tag{7.59}$$

Las etapas de optimización, selección, cruce y mutación se realiza de la misma forma como se describió para el diseño del regulador PI. En la figura 39 se observa el comportamiento de los diez individuos durante las 200 iteraciones y en la ecuación (7.61) los elementos de las diagonales de las matrices Q y R obtenidos.

$$\left[\begin{array}{c|c|c} \sum_{i=0}^N t(i)*e(i)^2 & \sum_{i=0}^N t(i)*u(i)^2 & f \end{array} \right] = \begin{array}{c|c|c} 0.5883*10^5 & 0.0577*10^5 & 24.0720 \\ 0.1575*10^5 & 0.0584*10^5 & 58.1996 \\ 0.6446*10^5 & 0.0559*10^5 & 20.4939 \\ 0.5338*10^5 & 0.0595*10^5 & 27.5399 \\ 0.5266*10^5 & 0.0595*10^5 & 28.1031 \\ 0.3940*10^5 & 0.0632*10^5 & 36.8993 \\ 0.6165*10^5 & 0.0557*10^5 & 22.8082 \\ 0.4257*10^5 & 0.0624*10^5 & 34.7367 \\ 1.0992*10^5 & 0.0380*10^5 & -6.9314 \\ 1.7992*10^5 & 0.0155*10^5 & -51.6899 \end{array} \quad (7.60)$$

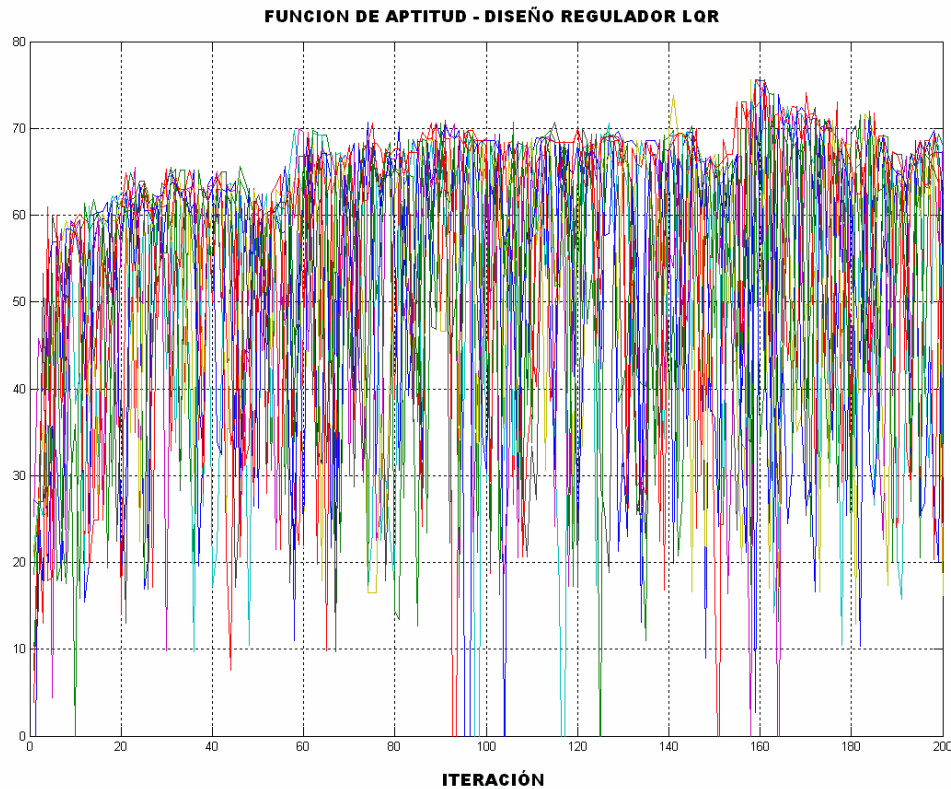


Fig. 39 Función de aptitud para el diseño del LQR

Los pasos descritos anteriormente son válidos para determinar las ganancias del controlador LQR para regular la corriente del rotor, pero en este caso la matriz Q tiene un tamaño de 2x2. El diagrama de bloques correspondiente se observa en la figura 40 y las

ecuaciones en variables de estado de la señal de error y la acción de control en la ecuación (7.62), donde A , B y C corresponden a la representación en variables de estado de la función de transferencia I_{dr}/V_{dr} obtenida del modelo lineal del generador DFIG.

$$Q = \begin{bmatrix} 1,1461 \cdot 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0676 \cdot 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0538 \cdot 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0518 \cdot 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0495 \cdot 10^7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6,2745 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 94,1176 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6748 \cdot 10^7 \end{bmatrix} \quad (7.61)$$

$$R = [0,0119 \cdot 10^7]$$

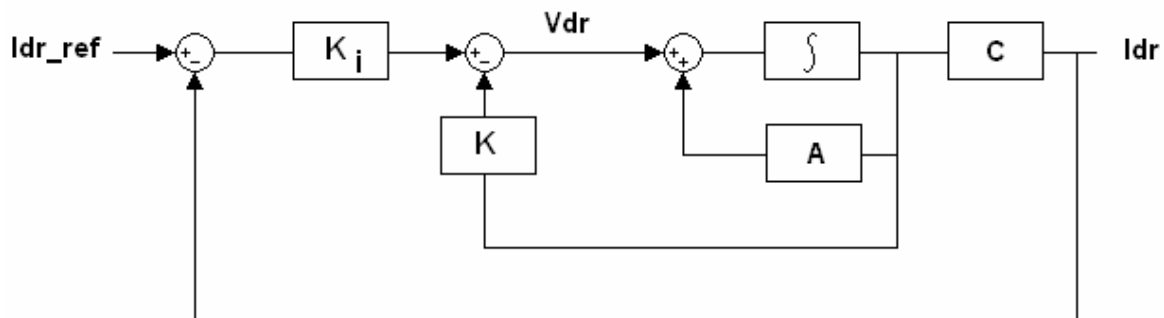


Fig. 40 Diagrama de bloques del lazo de control LQR para la corriente del rotor I_{dr}

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [A \quad -B(CK_i + k)]x - BK_i I_{dr_ref} \\ e &= -Cx + r \\ u = V_{dr} &= -[CK_i + k] \end{aligned} \quad (7.62)$$