

Facultad de
Ingenierías
Físico
Mecánicas



Escuela de Ingenierías
Eléctrica, Electrónica y
Telecomunicaciones



Trabajo de Grado

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE DISEÑO AUTOMÁTICO DE
REGULADORES LQG PARA TURBINAS EÓLICAS DE VELOCIDAD
VARIABLE.**

Autores:

**GERSON RAMIREZ MORENO
ALONSO CASTELLANOS LAMUS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2008**

Facultad de
Ingenierías
Físico
Mecánicas



Escuela de Ingenierías
Eléctrica, Electrónica y
Telecomunicaciones



Trabajo de Grado

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE DISEÑO AUTOMÁTICO DE
REGULADORES LQG PARA TURBINAS EÓLICAS DE VELOCIDAD
VARIABLE.**

Autores:

**GERSON RAMIREZ MORENO
ALONSO CASTELLANOS LAMUS**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Director:

INGENIERO RODOLFO VILLAMIZAR MEJIA Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2008

DEDICATORIAS

Te agradezco Dios Todopoderoso por haber alcanzado una nueva Meta, en estos momentos de mi vida.
A mis Padres Lucía Lamus y Alirio Castellanos por su apoyo y paciencia en cada una de las etapas de este proceso.
A mis hermanos Néstor y Jeferson Castellanos, con quienes he compartido momentos de mi vida.
A todos mis amigos y personas allegadas, pues han contribuido de muchas formas a la culminación de esta etapa en mi vida.
A dos personas muy especiales que hoy no están con nosotros, que me ayudaron y me ofrecieron ese apoyo incondicional durante este proceso, se que están en un lugar muy especial al lado del Todopoderoso, Gracias Ligia Villabona y Tulia Alarcón.

ALONSO

Al maestro de maestros, en cuyo infinito amor palpitan todos y cada uno de los triunfos de sus hijos y en cuya misericordia divina se cobijan todos los sueños logrados con el anhelo de ser dignos de su eterna gloria.
Este título se lo dedico a mis padres, Alfonso Ramirez Calderón y Gloria maría Moreno Gomez, quienes son los mayores artífices de este nuevo logro en mi vida, a ellos le debo la fuerza más grande que me permitió luchar incansablemente hasta el final, su infinito amor de padres.
A mi hermana Solangel Ramirez Moreno, por su confianza, su amor y apoyo desde que me vió nacer.
A mi consentida hermosa Lina Fernanda Muñoz Cuervo, por ayudarme a levantar en los momentos más difíciles y por creer en mí hasta el final, entregando su amor incondicional, que gracias a Dios y su voluntad es mi fortaleza de vida.

GERSON

AGRADECIMIENTOS

En la gratitud el hombre demuestra verdaderamente su condición, su educación y sobretodo su corazón lleno de humildad y vocación de servir. Por este motivo queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos:

A **Rodolfo Villamizar Mejía**, Doctor en Tecnologías de la Información, director de este trabajo de grado, cuyos aportes, interés y calidad humana contribuyeron al desarrollo satisfactorio del mismo.

A **Hernando González**, Magíster en Potencia Eléctrica, por su orientación oportuna, sus invaluable aportes durante el desarrollo de este proyecto.

A todos nuestros amigos que están y ya pasaron por la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, a Jesús Acero, Sonia Milena Castillo, Aura Milena Carvajal, Ever Frauter Bueno, Edgar Fabianny Ramirez, Edgar Torres Juan Carlos Niño, Carlos Araque, Laura Martínez Freddy Rojas, René Alexander Barrera, Edwin Cañon, Ender Ardila, a Yolandita la del centro de estudios y a los demás que pertenecieron a esta Universidad, a Juan Pablo Ballesteros, Ángel Fernando Gómez, José Sierra Bueno, y a muchos mas que se me pasan, por su sinceridad, su respeto y apoyo incondicional durante nuestro proceso de formación.

RESUMEN

TÍTULO:

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE DISEÑO AUTOMÁTICO DE REGULADORES LQG PARA TURBINAS EÓLICAS DE VELOCIDAD VARIABLE. *

AUTORES:

Gerson Ramírez Moreno - Alonso Castellanos Lamus. **

PALABRAS CLAVES:

Turbina eólica de velocidad variable, Modelo del viento, Sistema de transmisión mecánico, Generador doblemente alimentado DFIG, Control lineal cuadrático gaussiano LQG, Algoritmos genéticos, Herramienta gráfica, Matlab Simulink.

DESCRIPCIÓN:

Una fuente de energía renovable ampliamente utilizada en los países más desarrollados y que hasta ahora ha sido muy poco aprovechado en nuestro medio es el viento, que gracias a sus bondades ambientales y de conservación de los recursos constituye una alternativa viable para superar los problemas energéticos que afronta Colombia. Con este trabajo de grado se busca aportar al desarrollo investigativo y al necesario crecimiento de la energía eólica en el país. El desarrollo de herramientas de simulación es importante para definir estrategias de operación, elaborar diseños de control óptimos o usarla como herramienta pedagógica.

El objetivo es contribuir al desarrollo e investigación de este tipo de generación de energía, utilizando una técnica de diseño de sistemas de control multivariable, junto a una herramienta computacional de simulación para el diseño automático de los controladores. Se realiza una recopilación y selección de los modelos matemáticos que describen la dinámica de una turbina eólica de velocidad variable con generador doblemente alimentado DFIG, para obtener un modelo en variables de estado a partir de las ecuaciones que describen el sistema.

Partiendo del modelo general de la turbina eólica, se procede a diseñar el sistema de control multivariable aplicando la técnica de control LQG, la cual se complementa con algoritmos genéticos mediante el desarrollo de una herramienta gráfica de simulación basada en una metodología de diseño de controladores, estableciendo unos pasos determinados a partir de la experiencia adquirida en el desarrollo del proyecto.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Director: Dr. Rodolfo Villamizar Mejía.

SUMMARY

TITLE:

DEVELOPMENT OF A DESIGN AUTOMATIC TOOL OF REGULATORS LQG FOR VARIABLE SPEED WIND TURBINES.*

AUTHORS:

Gerson Ramírez Moreno - Alonso Castellanos Lamus.**

KEYWORDS:

Variable speed wind turbine, Wind model, Mechanical transmission system, Doubly fed induction generator DFIG, Linear Quadratic Gaussian control LQG, Genetic Algorithm, Graph tool, Matlab Simulink.

DESCRIPTION:

A source of broadly utilized renewable energy in the most developed countries and that up to now it has been very not very utilized in our means it is the wind, that thanks to their environmental kindness and of conservation of the resources it constitutes a viable alternative to overcome the energy problems that Colombia confronts. With this grade work it is looked for to contribute to the investigative development and the necessary growth of the eolic energy in the country. The development of simulation tools is important to define operation strategies, to elaborate good control designs or to use it as pedagogic tool.

The objective is to contribute to the development and investigation of this type of energy generation, using a technique of design of systems of control multivariable, next to a computational tool of simulation for the automatic design of the controllers. A summary and selection of the mathematical models that describe the dynamics of an eolic turbine of variable speed with doubly fed generator DFIG is made, to obtain a model in state variables starting from the equations that describe the system.

Leaving of the general pattern of the eolic turbine, you proceeds to design the system of control multivariable applying the control technique LQG, which is supplemented with genetic algorithms by means of the development of a graphic tool of simulation based on a methodology of design of controllers, establishing some certain steps starting from the experience acquired in the development of the project.

* Final Graduation work.

** Physical Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School. Industrial University of Santander. Director: Dr. Rodolfo Villamizar Mejía.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
1. INTRODUCCIÓN	9
2. DESCRIPCIÓN GENERAL	10
3. MARCO TEÓRICO.....	12
3.1. Turbinas eólicas de velocidad variable	12
3.2. Modelos dinámicos que constituyen la turbina eólica.....	13
3.2.1. Modelo del viento.....	14
3.2.2. Modelo aerodinámico de la turbina.....	16
3.2.3. Modelo del sistema mecánico de la turbina.....	19
3.2.4. Modelo del sistema eléctrico.....	21
3.3. Sistemas de control óptimo.....	21
3.3.1. Control lineal cuadrático gaussiano LQG.....	21
4. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA.....	24
5. PROPUESTA DE DISEÑO	25
5.1. Diseño de controladores LQG.....	25
5.1.1. Control multivariable LQG.....	25
5.1.2. Complemento de acción integral.....	27
5.2. Diseño automático del controlador LQG utilizando algoritmos genéticos y su implementación en MATLAB[®]	29
5.2.1. Estructura de los individuos de la población.....	31
5.2.2. Población.....	31
5.2.3. Función objetivo (Fitness).....	32
5.2.4. Etapa de selección (ruleta).....	32
5.2.5. Operación genética de cruce.....	33
5.2.6. Operación genética de mutación.....	34
6. VALIDACIÓN NUMÉRICA.....	35
6.1. Análisis de resultados	35
6.1.1. Caso 1.....	35
6.1.2. Caso 2.....	38

6.2. Pruebas y resultados obtenidos mediante la aplicación del algoritmo genético.....	40
6.2.1. Pruebas realizadas al algoritmo genético para sintonización de parámetros.....	41
6.2.2. Pruebas realizadas en el diseño del controlador LQG.....	42
6.2.3. Metodología de diseño de controladores LQG utilizando algoritmos genéticos.....	49
6.3. Simulación dinámica del sistema de control en SIMULINK®	51
7. CONCLUSIONES	55
8. BIBLIOGRAFÍA	56
9. ANEXOS	59
<i>Anexo A: Modelo de la componente estocástica del viento</i>	<i>59</i>
<i>Anexo B: Modelo aerodinámico del disco actuador (Rankine- Froude).....</i>	<i>64</i>
<i>Anexo C: Modelo de transmisión mecánica de la turbina.....</i>	<i>67</i>
<i>Anexo D: Modelo del sistema eléctrico basado en marcos de referencia natural y sincrónico dq0.....</i>	<i>70</i>
<i>Anexo E: Índices de desempeño</i>	<i>77</i>
<i>Anexo F: Modelo lineal de la turbina eólica de velocidad variable con DFIG mediante expansión en series de Taylor.....</i>	<i>79</i>
<i>Anexo G: Parámetros generales para una turbina eólica de 2 MW NM 2000/82</i>	<i>87</i>
<i>Anexo H: Manual de usuario herramienta gráfica (GUI) AGWIN v1.0.....</i>	<i>89</i>
<i>Anexo I: Resultados numéricos del diseño LQG.....</i>	<i>94</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Diagrama de bloques Desarrollo del proyecto.....	11
Figura 2. Modelo general de un sistema de generación eólico de eje horizontal.....	13
Figura 3. Diagrama de bloques que Simula el Comportamiento Dinámico del Viento	15
Figura 4. Simulación de la velocidad del viento.....	15
Figura 5. Curvas características C_p contra λ para diferentes valores de β	17
Figura 6. Superficie de nivel para el coeficiente de potencia C_p	18
Figura 7. Componentes del sistema de transmisión mecánica.....	20
Figura 8. Diagrama de bloques del control LQG	22
Figura 9. Diagrama general del Sistema de control LQG con seguimiento de Set point y acción integral	28
Figura 10. Diagrama de flujo del algoritmo genético	30
Figura 11. Distribución de las probabilidades en la selección Mediante Ruleta para una población de 10 individuos.....	33
Figura 12. Operación genética de cruce en dos puntos	33
Figura 13. Operación genética de Mutación.....	34
Figura 14. Gráficas de las Salidas: Potencia Activa, Potencia Reactiva, Velocidad Mecánica de la turbina.....	36
Figura 15. Gráficas de los Errores: Error (Potencia Activa), Error (Potencia Reactiva), Error (Velocidad Mecánica de la turbina)	37
Figura 16. Gráficas de los Actuadores: Voltaje V_{dr} , Voltaje V_{qr} , Ángulo de ataque de las aspas B	37
Figura 17. Gráficas de las Salidas aplicando Control LQG	38
Figura 18. Gráficas de los Errores aplicando Control LQG con acción integral	39

Figura 19. Gráficas de los Actuadores aplicando Control LQG con acción integral	40
Figura 20. Ventana de parámetros y resultados herramienta gráfica AGWIN	43
Figura 21. Ventana de parámetros y resultados gráficos herramienta gráfica AGWIN	43
Figura 22. Gráfica de la convergencia del algoritmo genético en la herramienta gráfica AGWIN	44
Figura 23. Gráfica de las matrices Q, R, Qn y Rn diseñadas en la herramienta gráfica AGWIN	44
Figura 24. Gráfica de la potencia activa simulada en la herramienta AGWIN	45
Figura 25. Gráfica de la potencia reactiva simulada en la herramienta AGWIN	45
Figura 26. Gráfica de la velocidad mecánica simulada en la herramienta AGWIN	46
Figura 27. Gráfica del error de la potencia activa simulado en la herramienta AGWIN	46
Figura 28. Gráfica del error de la potencia reactiva simulado en la herramienta AGWIN	47
Figura 29. Gráfica del error de la velocidad mecánica simulada en la herramienta AGWIN	47
Figura 30. Gráfica del voltaje Vdr simulado en la herramienta AGWIN	48
Figura 31. Gráfica del voltaje Vqr simulado en la herramienta AGWIN	48
Figura 32. Gráfica del ángulo de ataque <i>Beta</i> simulado en la herramienta AGWIN	49
Figura 33. Modelo en Variables de estado de la Turbina Eólica de velocidad Variable en Simulink®	52
Figura 34. Modelo del Sistema compacto en Variables de estado de la Turbina Eólica de velocidad Variable en Simulink®	52

Figura 35. Modelo del Sistema General Dinámico de la Turbina Eólica de Velocidad Variable en Simulink®	53
Figura 36. Modelo del Sistema Compacto Dinámico de la Turbina Eólica de Velocidad Variable en Simulink®	53
Figura 37. Espectro de Kaimal	60
Figura 38. Variación de la presión y velocidad del viento en el rotor.....	64
Figura 39. Modelo aerodinámico del disco actuador	65
Figura 40. Transmisión mecánica modelada en sistema de masas	68
Figura 41. Diagrama Equivalente del Bobinado de una Máquina de Inducción en el marco de referencia ABC/abc	71
Figura 42. Sistema de Referencia $dq0$	74
Figura 43. Ventana de inicio de la herramienta gráfica	90
Figura 44. Pasos para el inicio de la herramienta gráfica.....	90
Figura 45. Parámetros del algoritmo genético en la herramienta gráfica	91
Figura 46. Matrices desarrolladas por el algoritmo genético en la herramienta gráfica	92
Figura 47. Ventana de visualización del criterio de parada	92
Figura 48. Ventana gráfica para evaluación del control LQG	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores típicos de un sistema de transmisión mecánica.....	20
Tabla 2. Variación de Parámetros del Algoritmo genético para el diseño del control LQG.....	41
Tabla 3. Parámetros de Simulación del algoritmo genéticoHerramienta gráfica AGWIN	42
Tabla 4. Parámetros y especificaciones técnicas para una turbina Eólica de Velocidad variable con DFIG (NM 2000/82).....	88
Tabla 5. Resultados numéricos rendimiento del diseño LQG	94

1. INTRODUCCIÓN

Una fuente de energía renovable ampliamente utilizada en los países más desarrollados y que hasta ahora ha sido muy poco aprovechado en nuestro medio es el viento, que gracias a sus bondades ambientales y de conservación de los recursos constituye una alternativa viable para superar los problemas energéticos que afronta Colombia. Con este proyecto de grado se busca aportar al desarrollo investigativo y al necesario crecimiento de la energía eólica en el país. El desarrollo de herramientas de simulación es importante para definir estrategias de operación, elaborar diseños de control óptimos o usarla como herramienta pedagógica. Evitando poner en riesgo el funcionamiento real de la máquina o incurrir en grandes costos y ahorrándose la realización de pruebas para el análisis del comportamiento de la máquina. El objetivo es contribuir al desarrollo e investigación de este tipo de generación de energía, utilizando una técnica de diseño de sistemas de control, junto a una herramienta computacional de simulación para el diseño automático de los controladores.

En este texto el lector va a encontrar una descripción general del proyecto para estar familiarizado con el desarrollo del mismo. Se presenta una base teórica muy breve de los temas necesarios para la comprensión de los procesos realizados durante la investigación. A partir de los desarrollos llevados a cabo, se realiza un análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de simulación que se van a ejecutar. El desarrollo de una aplicación por medio de un sistema de interfaz gráfica computacional, orientada al usuario final, junto con el análisis de las características que conforman el algoritmo, y su incidencia en las respuestas del diseño final del control son entonces los objetivos primordiales de este trabajo de grado.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL

En este proyecto, se realiza una recopilación y selección de los modelos matemáticos que describen la dinámica de una turbina eólica de velocidad variable con generador doblemente alimentado DFIG, (por sus siglas en inglés: Double Feed Induction Generator) para obtener un modelo en variables de estado a partir de las ecuaciones que describen el sistema. Luego, se implementa un modelo computacional en SIMULINK[®].

Se realiza un análisis de la técnica de algoritmos genéticos y posteriormente una revisión bibliográfica sobre su aplicación en el control de sistemas dinámicos, para poder escoger criterios de evolución del algoritmo como selección, evaluación y reproducción. Utilizando el software MATLAB[®] y SIMULINK[®] se realiza el diseño de un controlador para el modelo computacional implementado. Una vez implementado el controlador, se evalúa el comportamiento del sistema con respecto a una función objetivo (Fitness).

El desarrollo del proyecto se suma a la investigación conjunta de otros proyectos de pregrado [14] y maestría de la UIS [13], el cual se fundamenta en el diseño óptimo de controladores por realimentación en variables de estados y estimadores de estados, conocidos como controladores LQG (por sus siglas en inglés: Linear Quadratic Gaussian) cuya matriz 'K' define la matriz de realimentación, con una estimación previa de los estados utilizando el filtro de Kalman. La población inicial del algoritmo es una familia de matrices 'Q' y 'R' que definen la matriz 'K' mediante funciones de costo cuadrático, las cuales producen respuestas distintas al actuar sobre la planta. Luego el algoritmo se encargará de escoger el mejor controlador según una función de desempeño.

Por último, se procede a diseñar una herramienta gráfica de simulación basada en una metodología de diseño de controladores, estableciendo unos pasos determinados a partir de la experiencia adquirida en el desarrollo del proyecto.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo del desarrollo del proyecto.

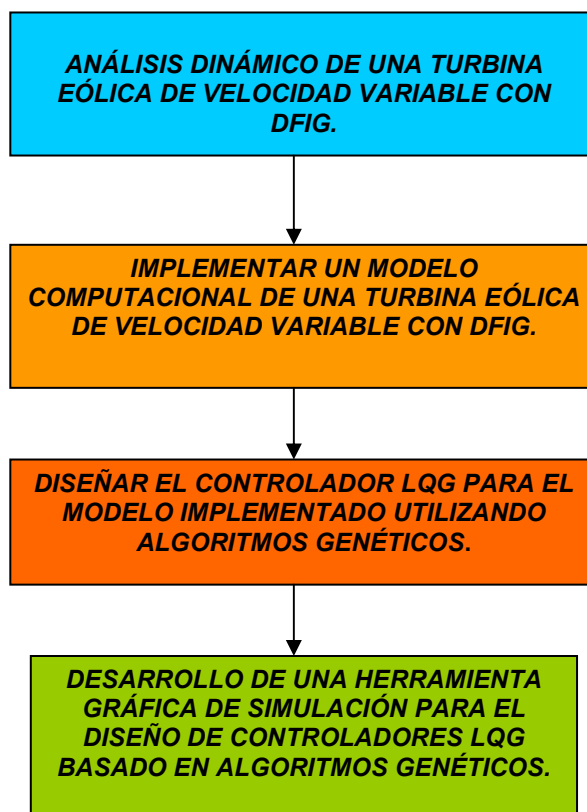


Figura 1. Diagrama de bloques Desarrollo del proyecto

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Turbinas eólicas de velocidad variable

El aerogenerador de uso más extendido es el de eje horizontal con dos o tres aspas, cuyas secciones rectas son perfiles aerodinámicos. Se pueden clasificar en turbinas de velocidad fija y turbinas de velocidad variable. Las turbinas de velocidad fija utilizan generadores de inducción que trabajan en un rango de velocidad angular limitada y generalmente se conectan directamente a la red, por lo que la velocidad angular del rotor no depende de la velocidad del viento, sino de la frecuencia de la red eléctrica a la que está conectada, cuando el generador de la turbina no ha superado la velocidad de sincronismo, el generador trabaja como motor produciendo una pérdida.

En las turbinas de velocidad variable el generador puede operar a diferentes velocidades gracias a los avances en la electrónica, generalmente son generadores de inducción doblemente alimentados DFIG que varían el deslizamiento del generador para poder operar en un rango amplio de velocidades. Este tipo de turbinas son más eficientes (a velocidades de viento bajas) que las de velocidad fija, ya que la velocidad angular del generador y la potencia producida dependen de la velocidad del viento incidente [1].

En el segundo tipo de turbina, se implementa el generador de inducción doblemente alimentado, conectado a través de un sistema de engranajes, en lugar del generador de jaula de ardilla utilizado en el primer tipo, el bobinado del estator de éste tipo de generador 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 controlar la potencia activa y reactiva, eliminando los compensadores requeridos en las turbinas de velocidad fija para controlar la potencia reactiva [2].

3.2. Modelos dinámicos que constituyen la turbina eólica

El modelo matemático completo de un sistema de generación eólico de eje horizontal incluye los siguientes subsistemas: modelo de la velocidad del viento, modelo aerodinámico de la turbina, modelo de transmisión mecánico y el modelo del generador de inducción, los cuales se acoplan al modelo del control diseñado y a la red de transporte [4].

Los modelos que conforman el sistema de generación eólico de eje horizontal, se muestran en la figura 2.

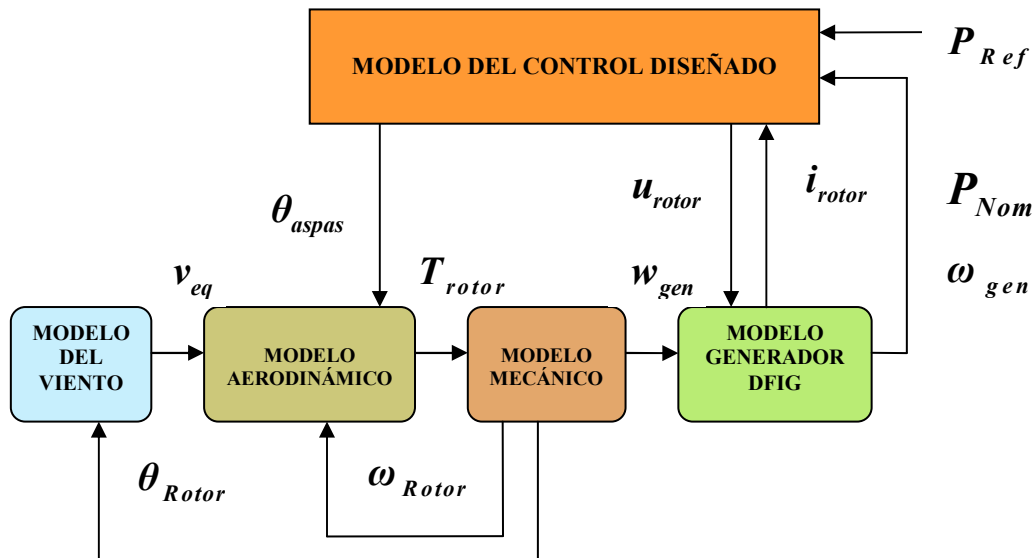


Figura 2. Modelo general de un sistema de generación eólico de eje horizontal (Fuente: Autores)

3.2.1. Modelo del viento.

El recurso eólico que es potencialmente aprovechable para la generación de electricidad, se suele encontrar concentrado en determinadas regiones o zonas relativamente pequeñas. Por lo tanto, el primer paso hacia su aprovechamiento, es su estudio. Para ello existen diferentes técnicas que van desde la información empírica, hasta las imágenes de satélite. La evaluación de la factibilidad técnico-económica de un proyecto eólico requiere un conocimiento detallado del comportamiento del viento y para ello, es necesario llevar a cabo mediciones anemométricas en el sitio exacto donde se desea construir un parque eólico. Lograr modelar el comportamiento del viento es vital para obtener una simulación que se asemeje en lo posible a la realidad.

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, generalmente de 10 minutos. Este periodo de 10 minutos es seleccionado por varias razones, la principal de ellas es que se evitan más variaciones cíclicas relacionadas a fenómenos meteorológicos (variaciones diurnas, etc.)[1].

La estructura general del bloque que simula el comportamiento del viento se observa en la figura 3, para más detalles sobre el desarrollo matemático de la componente estocástica del viento ver Anexo A.

En la figura 4 se muestra la simulación de la velocidad del viento en el dominio del tiempo de 600 seg con un periodo de muestreo de 0.01, un radio de 35 mt, una velocidad promedio de 8 m/sg, longitud de escala de 600 mt, una intensidad de turbulencia de 13.3% y una velocidad del rotor o velocidad mecánica de 0.3 rad/sg.

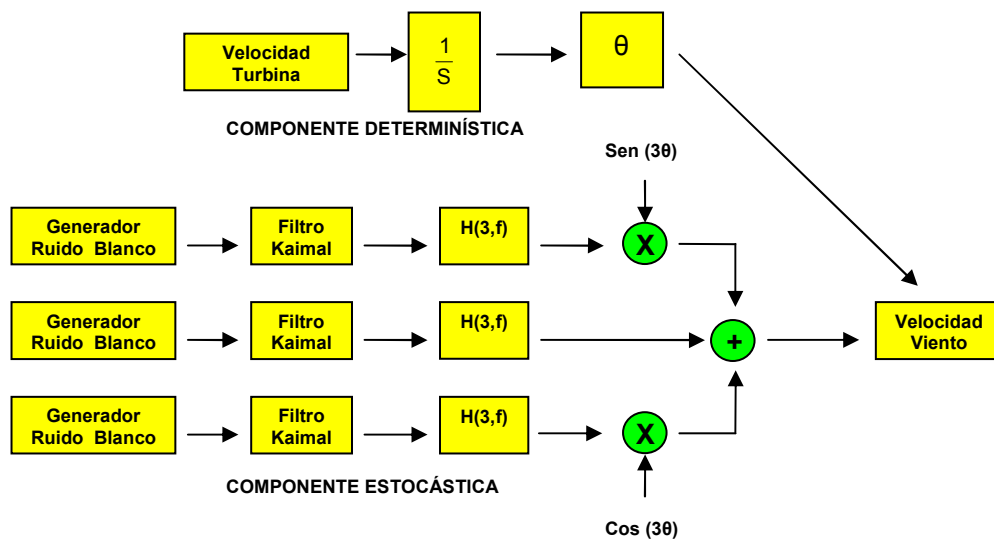


Figura 3. Diagrama de bloques que Simula el Comportamiento Dinámico del Viento (Fuente: Autores)

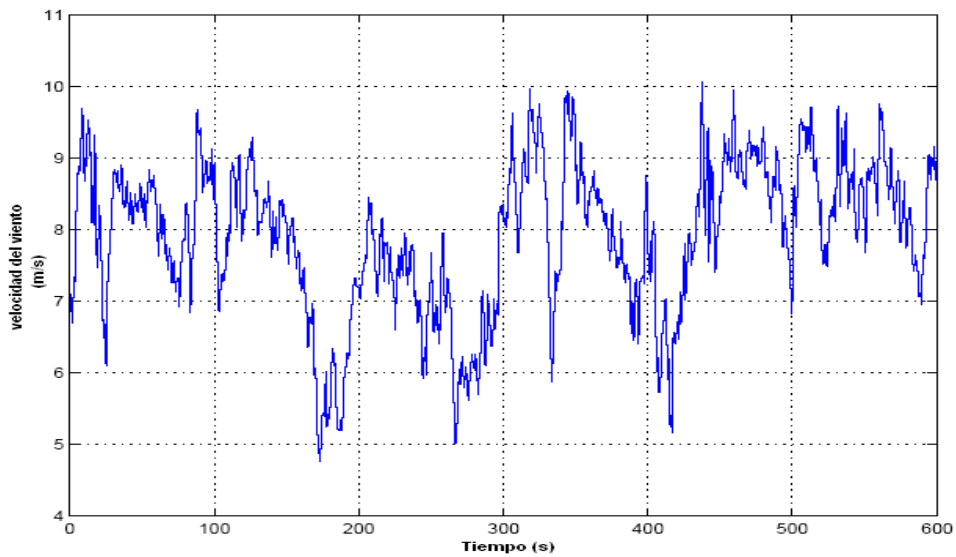


Figura 4. Simulación de la velocidad del viento (Fuente: Florin Iov)

3.2.2. Modelo aerodinámico de la turbina.

El modelo aerodinámico de la turbina se basa en el modelo del disco actuador de Rankine-Froude (ver Anexo B), donde la potencia aerodinámica desarrollada en una turbina eólica esta dada por la relación:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{Rot} R}{v} \quad (3.2)$$

Donde ρ es la densidad del aire, A es la superficie barrida por las aspas, V es la velocidad del viento, C_p es el coeficiente de potencia, β es el ángulo de ataque de las aspas, ω_{Rot} es la velocidad angular de la turbina y R el radio del aspa. El máximo valor teórico de C_p es de 0,593, denominado límite de Betz. El coeficiente C_p depende del diseño aerodinámico de la turbina y es bastante inferior al máximo, debido a imperfecciones en el diseño y pérdidas por carga aerodinámica.

El coeficiente de potencia para las turbinas de viento ha sido muy investigado, como esta teoría requiere tener conocimientos de aerodinámica y matemática un poco complejos, se han desarrollado varias aproximaciones numéricas, un ejemplo de ellas para turbinas con ángulo de paso variable es la propuesta por Ledesma [2] y Siegfried Heier [3]:

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-2/\lambda_i} + 0.0068\lambda \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.4)$$

Con estas aproximaciones se pueden graficar las curvas de C_p contra λ para diferentes valores de β , como se observa en la figura 5.

Como era de suponerse el valor de C_p no puede superar el límite de Betz ($16 / 27 \approx 0.59259$). También se observa en la figura 5 que el valor máximo de C_p es mucho menor que el límite de Betz debido a imperfecciones en el diseño de las aspas y a las pérdidas.

En la figura 6 se ha graficado la superficie de nivel para el coeficiente de potencia, allí se puede obtener el valor del coeficiente C_p para valores de λ y β dados. Los valores negativos se han remplazado por cero y la superficie C_p tiene un único valor máximo, el cual nos determina los valores óptimos de λ y β .

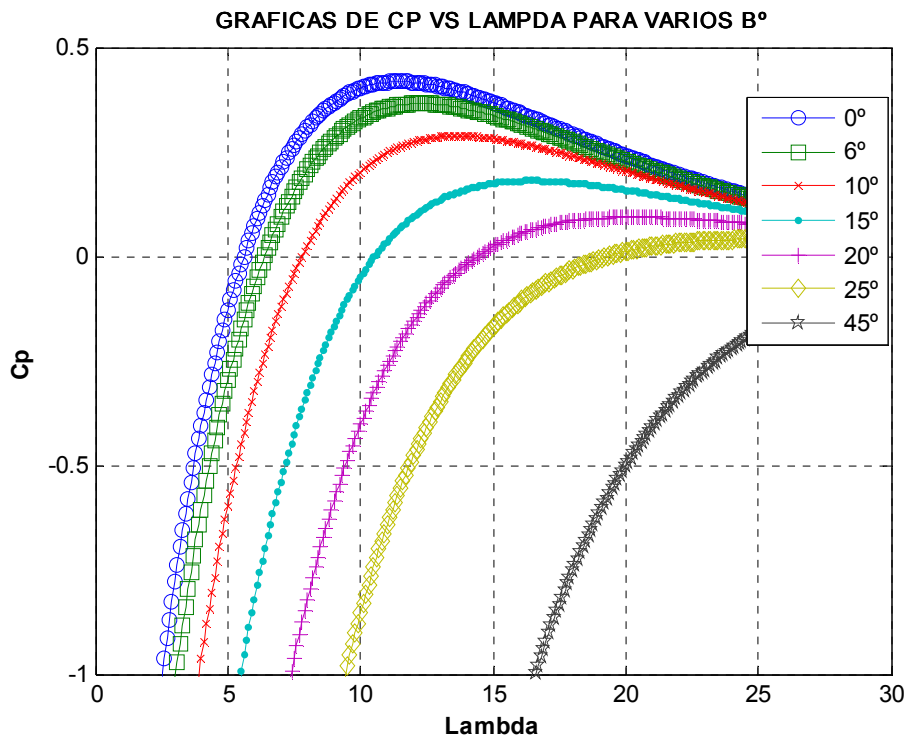


Figura 5 Curvas características C_p contra λ para diferentes valores de β (Fuente: SØRENSEN, Poul. y HANSEN Anca D)

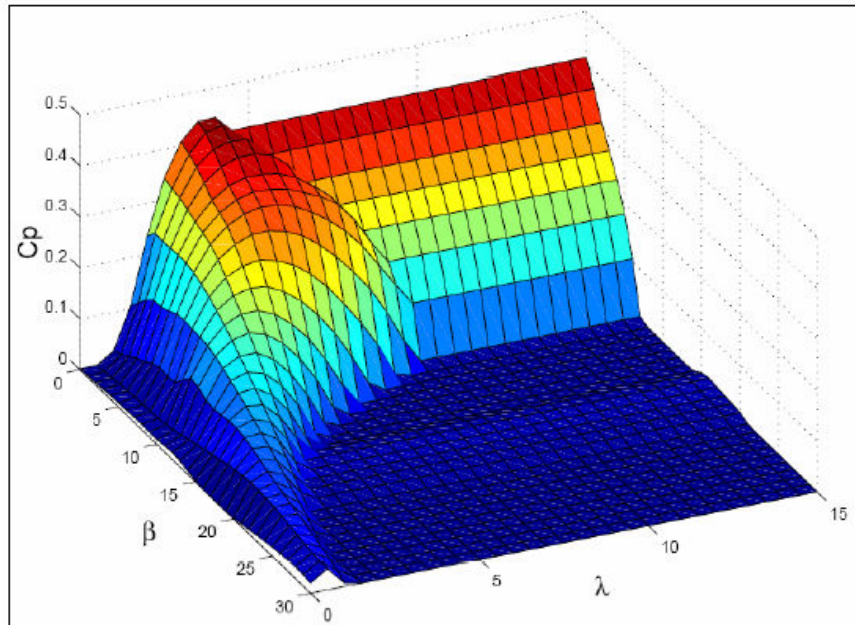


Figura 6 Superficie de nivel para el coeficiente de potencia C_p
(Fuente: SØRENSEN, Poul. y HANSEN Anca D [14])

El torque aerodinámico se calcula a través de la expresión:

$$T_{Aer} = \frac{P}{\omega_{Rot}} \quad (3.5).$$

Para poder simular el torque de salida es necesario utilizar la ecuación (3.5). Esta se puede reescribir:

$$T_{Aer} = \left(\frac{\pi}{2}\lambda\right)\rho R^3 V_{equ}^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.6)$$

O se puede utilizar el coeficiente de torque C_q definido como:

$$C_q(\lambda, \beta) = \left[\frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \right] \quad (3.7)$$

Entonces el Torque aerodinámico en función del coeficiente de torque es:

$$T_{Aer} = \left(\frac{1}{2}\right)\rho\pi R^3 V_{equ}^2 C_q(\lambda, \beta) \quad (3.8)$$

Donde ρ es la densidad del aire, V_{equ} es la velocidad equivalente del viento y C_p y C_q son los coeficientes de potencia y de torque respectivamente, que dependen del ángulo de paso β y de la velocidad específica λ definida en la ecuación (3.2).

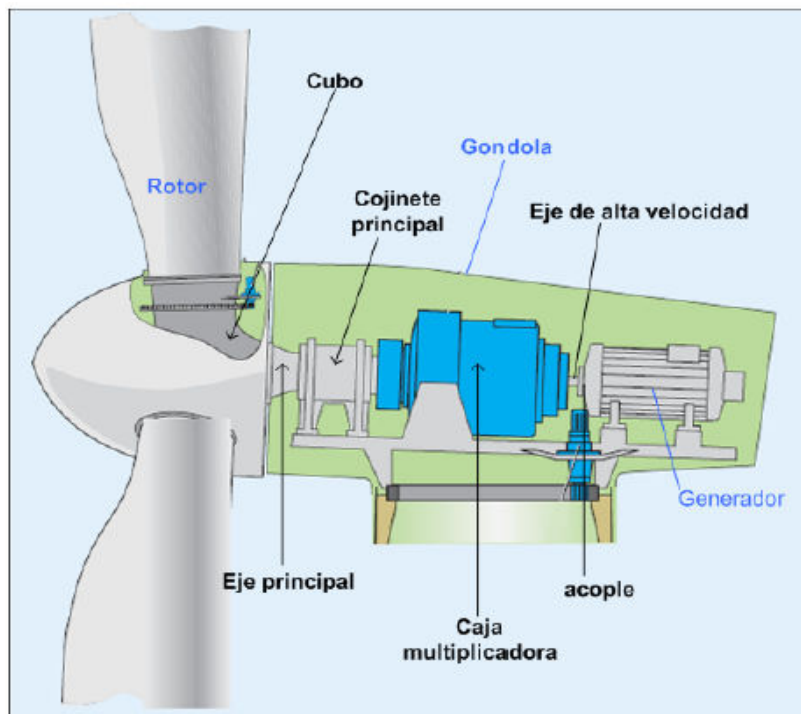
Los coeficientes de potencia torque C_p y C_q utilizados en las simulaciones para una turbina en particular pueden ser tabulados con datos experimentales o teniendo en cuenta las aproximaciones numéricas dadas por las ecuaciones (3.3) y (3.4). Ambas ecuaciones, (3.6) y (3.8) pueden ser usadas para expresar el torque, sin embargo el torque aerodinámico calculado con el coeficiente de torque en la ecuación (3.8) tiene la ventaja que puede utilizarse cuando la turbina esté parada es decir $\omega_{Rot} = 0$, porque si utilizamos la ecuación (3.6) el torque aerodinámico cuando la turbina esté parada resultaría infinito [4].

3.2.3. Modelo del sistema mecánico de la turbina.

El sistema de transmisión mecánico (Ver Anexo C) de una turbina de viento de eje horizontal comprende el conjunto de elementos que se encarga de conectar el rotor con el generador y por ende transmitir la energía mecánica desde el rotor hasta el generador. Este conjunto esta conformado por el cubo o buje, el eje principal o eje de baja velocidad conocido también como eje del rotor, la caja multiplicadora, el eje de alta velocidad o eje del generador, cojinetes y acoples. Todos ellos se encuentran alojados dentro de la góndola. En la figura 7, se muestran las partes principales del sistema de transmisión mecánica. Algunos valores típicos para una turbina de 2MW son [4]:

J_{Rot}	$50 \cdot 10^5 \text{ [Kg-m}^2\text{]}$
K_{Rot}	$1.5 \cdot 10^8 \text{ [Kg-m}^2\text{/sg}^2\text{]}$
K_{gen}	$10^5 \text{ [Kg-m}^2\text{/sg}^2\text{]}$
J_{gen}	$100 \text{ [Kg-m}^2\text{]}$
D_{Rot}, D_{gen}	$8 \cdot 10^5 \text{ [Kg-m}^2\text{/sg]}$

**Tabla 1. Valores típicos de un sistema de transmisión mecánica
(Fuente: Florin Iov)**



**Figura 7. Componentes del sistema de transmisión mecánica
(Fuente: Rexroth Innovate gearbox for wind turbines)**

3.2.4. Modelo del sistema eléctrico.

El modelo matemático del sistema eléctrico comprende el estudio dinámico de la máquina de inducción, conectada como generador doblemente alimentado; el cual se puede representar en un marco de referencia natural ABC/abc o en el sistema dqo . El primer caso es válido, cuando se desea estudiar sistemas desbalanceados, tanto en circuitos del estator o el rotor; el segundo permite simplificar el modelo matemático, basado en la teoría propuesta por R. H. Park.¹(Ver Anexo D)

3.3. Sistemas de control óptimo

El Control Óptimo [5] y [6], es una técnica que tiene como objetivo la maximización o la minimización de algún factor que tenga que ver con algún proceso. A diferencia del Control Clásico, el Control Óptimo es capaz de solucionar problemas con modelos que poseen múltiples entradas y salidas, además de condiciones iniciales diferentes de cero. Sin embargo se debe recalcar que la Teoría de Control Óptimo no es la más adecuada para solucionar problemas que tienen una sola entrada y una sola salida con estados iniciales iguales a cero [5]. Por otro lado, el objetivo primordial que tiene el Control Óptimo es determinar qué señales de control van a causar que el proceso satisfaga ciertas restricciones físicas y al mismo tiempo algún criterio de rendimiento.

3.3.1. Control lineal cuadrático gaussiano LQG.

El control lineal cuadrático gaussiano (LQG), es una técnica de control óptimo avanzado, que incluye dentro de su estudio el análisis de las perturbaciones modeladas como procesos estocásticos, para el caso de la turbina eólica la componente estocástica es producida por la acción del viento. El método de control LQG, se basa en el principio de separación de la estimación y la ley de control; se diseña un estimador de estados utilizando una ganancia de Kalman; aparte se diseña

¹ R. H. Park, "Two-reaction theory of synchronous machines-Part I," AIEE Trans., vol. 48, no. 2, pp. 716-730, 1929.

una retroalimentación de estados usando métodos de control LQR (lineal Quadratic Regulator) y finalmente se integran ambos sistemas en un controlador basado en el modelo de la planta (Figura 8).

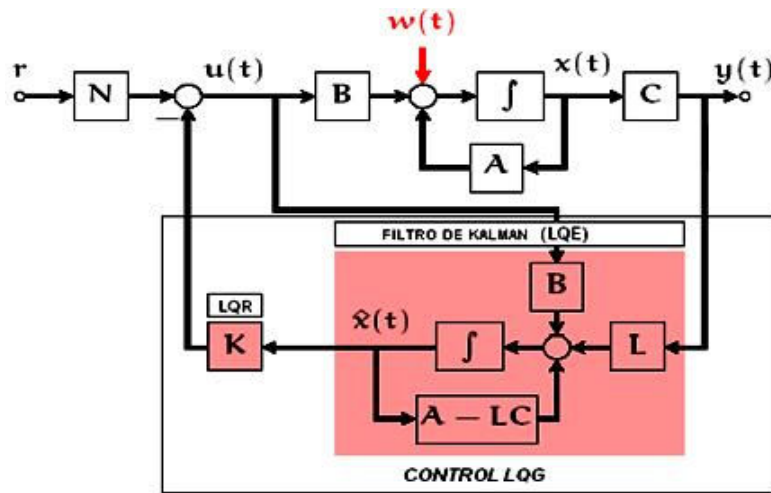


Figura 8. Diagrama de bloques del control LQG (Fuente: Autores)

Las bases matemáticas del método se estructuran de la siguiente forma [6]. Si se tiene una planta definida por:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (3.9)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.10)$$

Entonces para esta planta se diseña un filtro Kalman a partir de las ecuaciones:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + H\xi, \quad y = Cx + \Theta \quad (3.11)$$

Donde: ξ es el ruido de estado y Θ es el ruido de medición, y Cov es la covarianza del proceso estocástico.

Se desea con el filtro de Kalman estacionario minimizar el costo estocástico:

$$J_f = E \int_{-\infty}^{\infty} [(x - \hat{x})'(x - \hat{x})] dt \quad (3.12)$$

Donde x son los estados y \hat{x} son los estados estimados, la solución es un estimador de estados con ganancia de estimación o Kalman igual a:

$$L = P_f \cdot C \left(\frac{1}{\Theta} \right)$$

P_f Es la solución de la ecuación de Riccati.

Aparte se diseña una retroalimentación de estados usando el método LQR para minimizar el costo determinístico:

$$J = \int_0^{\infty} (x' \cdot Q \cdot x + u' \cdot R \cdot u) dt \quad (3.13)$$

La solución, esta dada por la ley de control:

$$u = -K \cdot x(t) \quad , \quad K = \left(\frac{1}{R} \right) \cdot B' \cdot P \quad (3.14)$$

Donde K es la ganancia de retroalimentación de estados y P es la solución de la ecuación de Riccati.

De esta forma se cumple con el principio de separación de la estimación de estados y el control basado en retroalimentación de estados, para lograr el cometido del método de control LQG.

4. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA

Los estudios que se han realizado en Colombia sobre energía eólica, además de ser pocos, se centran generalmente en áreas de la economía o ingeniería industrial. Realmente existe una necesidad apremiante de desarrollar investigación y conocimiento en todas las áreas que fundamentan este tipo de energía.

El campo de la ingeniería de control, es muy importante debido a que sobre él recae la responsabilidad de cumplir con los requerimientos de calidad de la energía que se pueda producir. Por lo tanto, desarrollar proyectos que estén enfocados al correcto modelado de la turbina y su posterior diseño de control, lograrán en un futuro contar con el material humano necesario, con capacidad de manejar e implementar proyectos de generación eólica a gran escala.

Dada la no linealidad del sistema de modelos que conforman la turbina eólica de velocidad variable, junto a la correcta selección de una técnica apropiada para el diseño del control, se hace necesario recurrir a la simplificación en el modelo del sistema mediante la linealización del mismo. De esta manera es posible utilizar estrategias de control propias de los sistemas lineales multivariables o buscar estrategias alternativas de control para sistemas no lineales.

Las preguntas que suscitan una propuesta general de diseño de control son entonces:

- ¿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 viento, utilizando la estrategia de control propuesta?
- ¿Cómo es el comportamiento dinámico del sistema general simulado bajo la acción incidente del viento?

5. PROPUESTA DE DISEÑO

5.1. Diseño de controladores LQG.

En la tesis de maestría de González H [17], se ataca el problema de control de la turbina eólica de velocidad variable mediante las técnicas H_{∞} (H infinito), LQG y control vectorial PI, desacoplando el sistema a un modelo SISO (una entrada, una salida). La propuesta de diseño de este proyecto de grado, comprende la aplicación de la técnica de control LQG multivariable, como medio para solucionar el problema de control y optimización relacionado con la planta. Como primera medida se linealiza la planta alrededor de un punto de operación. Generalmente se escoge un punto de operación adecuado para linealizar la planta alrededor del mismo, en el caso particular de la turbina eólica de velocidad variable con DFIG, se tiene en cuenta el punto de operación asociado a la velocidad del viento en función de la extracción de la potencia nominal del generador.

En el Anexo F se describe el procedimiento general para obtener la representación linealizada en variables de estado del sistema que conforma la turbina eólica. Tanto el modelo mecánico como el modelo eléctrico se realiza mediante la expansión en series de Taylor [8] alrededor del punto de operación elegido.

5.1.1. Control multivariable LQG.

Para el caso de la turbina eólica, se busca controlar tres variables que son: La potencia activa, la potencia reactiva y la velocidad mecánica de la turbina, por lo tanto es necesario asociar estas variables a la función de optimización en el diseño LQG².

² Para profundizar en la técnica ver: KIRK, DONALD E. Optimal Control, on Introduction, Prentice Hall, 1970. BOSGRA, Okko; KWAKERNAAK, Huibert and MEINSMA, Gjerrit. Design Methods for Control Systems, DISC-Dutch Institute of Systems and Control, Notes-course, 2002-2003. BAY, S. John. Fundamentals of Linear State Space Systems, WCB/McGraw-Hill, 1999

Quedando definida entonces como:

$$J = \int_0^{\infty} (y' \cdot Q \cdot y + u' \cdot R \cdot u) dt \quad (4.1)$$

Donde y son las salidas propias de la planta y u son las acciones de control asociadas a los voltajes Vdr , Vqr y al ángulo de ataque β respectivamente.

La tarea de diseño correspondiente, es determinar previamente las matrices Q y R que penalizan los tres estados asociados a las salidas del sistema y las acciones de control, de la siguiente forma:

$$Q = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

$$R = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Por lo tanto la ley de control $u = Kx$, realiza la realimentación completa de los nueve estados que conforman la turbina eólica como sigue:

$$U = Kx = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} & k_{17} & k_{18} & k_{19} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} & k_{27} & k_{28} & k_{29} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} & k_{37} & k_{38} & k_{39} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

5.1.2. Complemento de acción integral.

El problema de seguimiento (o del servomecanismo) se da cuando se pretende que la salida reproduzca asintóticamente (que tienda a) la referencia o Set point. Es común que la referencia sea un valor constante definido previamente según los requerimientos de diseño iniciales básicos.

En la figura 8, la ganancia de precompensación N juega un papel importante en el seguimiento, esta ganancia en el caso multivariable es una matriz que tiene en cuenta los estados asociados a cada una de las salidas, para el caso particular de la turbina, la realimentación de estados queda definida de la siguiente forma:

$$U = -Kx - Nr \quad (4.5)$$

Donde r es el Set point de la potencia activa, potencia reactiva y velocidad mecánica de la turbina respectivamente.

El control por realimentación de estados basado en la técnica LQG, tiene la deficiencia que no mejora el tipo del sistema [10]. Como resultado, el control LQG mediante la realimentación de estados con ganancia de realimentación constante sólo es útil para sistemas en los cuales no se sigue referencias.

En general, la mayoría de los sistemas de control debe seguir entradas, como es el caso de la turbina eólica de velocidad variable, la cual debe hacer un seguimiento de las potencias del generador y la velocidad mecánica. Una solución a este problema es introducir un control integral (también conocido como acción integral), tal como el controlador PI, junto a la realimentación de estado. El diagrama de bloques de un sistema general de control LQG con la acción integral se muestra en la figura 9.

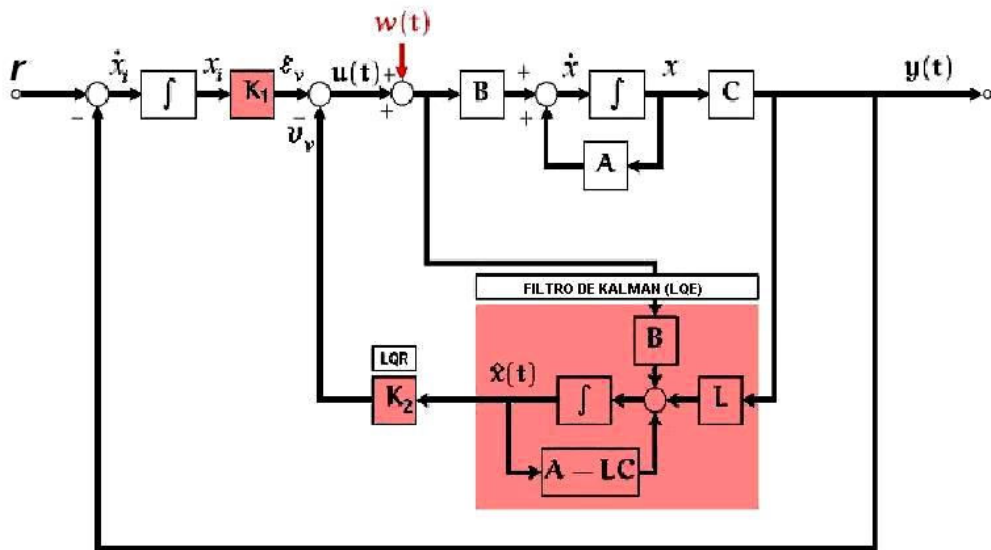


Figura 9. Diagrama general del Sistema de control LQG con seguimiento de Set point y acción integral (Fuente: Autores)

El sistema original con perturbación a la entrada de la planta es:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Bw \quad (4.6)$$

$$y = Cx \quad (4.7)$$

La realimentación de estados u es igual a:

$$u = -K_2 \hat{x} + K_1 x_i \quad (4.8)$$

Donde x_i es igual a:

$$x_i = r - y = r - Cx \quad (4.9)$$

De modo que el sistema completo con acción integral a lazo cerrado queda representado matricialmente de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{x}} \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -BK_2 & -BK_1 \\ LC & (A-LC-BK_2) & BK_1 \\ -C & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \hat{x} \\ x_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & 0 \\ B & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ S_p \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$y = [C \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x \\ \hat{x} \\ x_i \end{bmatrix} \quad (4.11).$$

Las ecuaciones (4.10 y 4.11) representan en variables estado el esquema final propuesto que combina de forma efectiva la retroalimentación completa de los estados, junto a una previa estimación de los mismos, complementado con la acción integral.

5.2. Diseño automático del controlador LQG utilizando algoritmos genéticos y su implementación en MATLAB[®]

Como elementos básicos de los algoritmos genéticos [11] se tiene la población aleatoria inicial de individuos, donde cada individuo representa un controlador LQG. Luego, se presenta la evaluación de los individuos mediante índices de rendimiento [7], donde cada uno es evaluado 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 mediante el criterio de la ruleta 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 mediante los operadores genéticos de cruce y mutación, donde se produce una nueva población de posibles soluciones de individuos generados mediante operadores genéticos. En la Figura 10 se observa un diagrama de flujo del algoritmo completo.

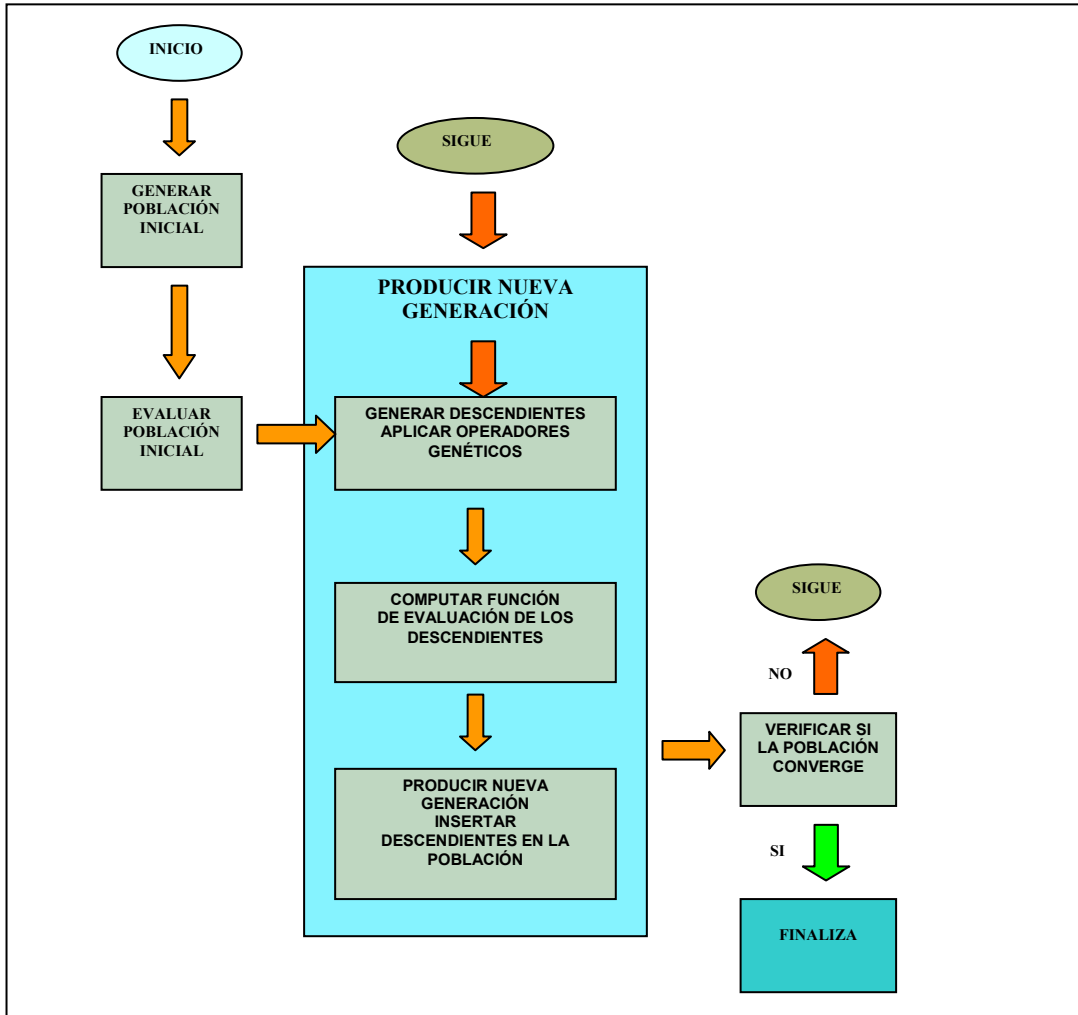


Figura 10. Diagrama de flujo del algoritmo genético (Fuente: Autores)

Cada individuo que actúa en el Algoritmo Genético está referido a un controlador que está conformado por doce cromosomas o características, con un determinado número de genes o resolución, que establece cuán preciso es el individuo en razón a su tamaño.

La implementación computacional del algoritmo genético se llevó a cabo en el software Matlab 7.0[®], teniendo en cuenta cada uno de sus componentes y su respectiva codificación en el lenguaje propio del programa.

5.2.3. Función objetivo (Fitness).

La función objetivo está basada plenamente en características de la respuesta del sistema a entrada escalón, específicamente los índices de desempeño ITAE, IAE, ITSE e ISE tanto del error de la potencia activa, reactiva y velocidad mecánica de la turbina, como de los actuadores V_{dr} , V_{qr} y B .

La función objetivo es entonces la suma de los índices de desempeño obtenidos de la simulación, normalizados y pesados para darle mayor restricción a determinados parámetros. La función objetivo está sujeta a variaciones en la configuración de los índices de desempeño escogidos, configuraciones que son evaluadas en las pruebas realizadas al algoritmo genético.

Como configuración inicial para la función objetivo se escogió la que utiliza el ITSE del error de las potencias y de la velocidad mecánica, el ITSE de los voltajes del generador V_{dr} , V_{qr} y el ángulo de ataque B , así:

$$F_{Fitness} = ITSE_{Pactiva} + ITSE_{Preactiva} + ITSE_{wt} + ITSE_{V_{dr}} + ITSE_{V_{qr}} + ITSE_{Beta} \quad (4.15)$$

La ecuación (4.15) se combina posteriormente con otros índices de rendimiento como el ISE, IAE e ITAE, pero mantiene la estructura básica de las sumas respectivas tanto de los errores en las salidas como de los actuadores. El algoritmo genético se encarga de encontrar el controlador que minimice la función objetivo (Fitness).

5.2.4. Etapa de selección (ruleta).

Para el proceso de selección se escogió un método bastante utilizado, en aplicaciones con algoritmo genético, conocido como ruleta o proporcional (figura 11). El método realiza la selección a partir de los individuos, previo a una etapa de evaluación donde los individuos seleccionados serán los padres en el proceso de reproducción [11].

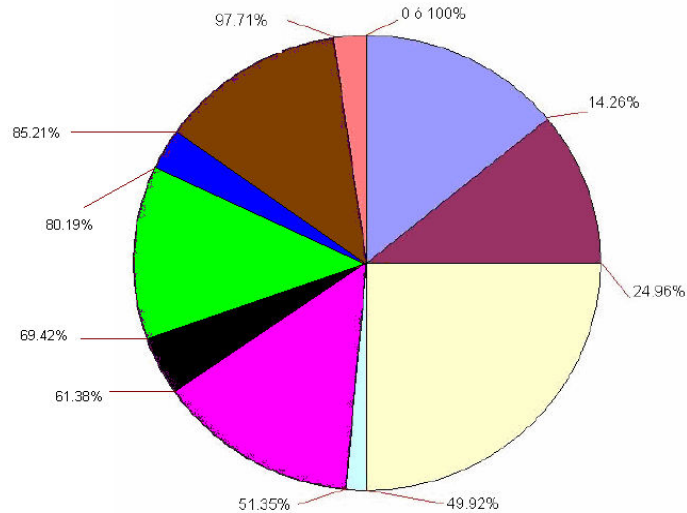


Figura 11. Distribución de las probabilidades en la selección Mediante Ruleta para una población de 10 individuos (Fuente: Autores)

5.2.5. Operación genética de cruce

Para el caso particular de la turbina eólica, se escogió el cruce en dos puntos (figura 12). El punto de cruce es la ubicación de cromosomas desde donde se intercambia el material genético. La forma de escoger este punto de cruce es totalmente aleatoria [11].

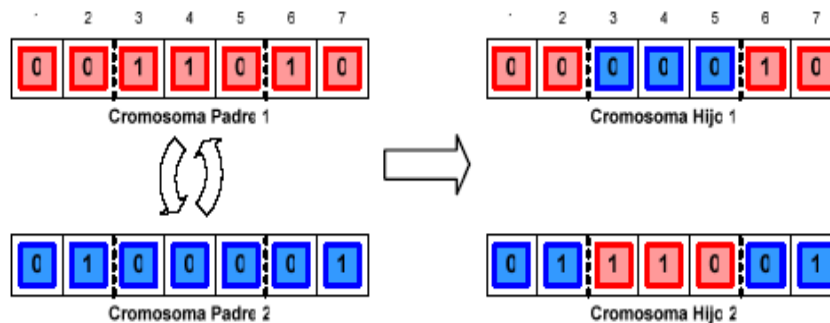


Figura 12. Operación genética de cruce en dos puntos (Fuente: Autores)

5.2.6. Operación genética de mutación

Una vez obtenidos los nuevos individuos se procede a la operación de mutación. Lo primero es asignar una variable global, cuyo valor se encuentre entre cero y uno, llamada tasa o porcentaje de mutación.

Esta tasa de mutación representa la cantidad probable de individuos que mutan; cuanto más alta más individuos mutarán [11].



Figura 13
Figura 13. Operación genética de Mutación
(Fuente: Autores)

En el proceso de mutación (figura 13) se le asigna un gen de mutación, de manera aleatoria, a cada individuo, luego este gen es cambiado por su complemento, es decir si el gen tenía un valor igual a 0 este mutará a un valor igual a 1 y viceversa, de esta forma se alteran las características del individuo dependiendo en cual gen ocurrirá la mutación, los resultados de estas mutaciones pueden generar individuos de peso impredecible.

6. VALIDACIÓN NUMÉRICA

6.1. Análisis de resultados

Mediante la implementación computacional en el software MATLAB[®], se simularon las respuestas del sistema (Planta – Controlador), para distintas configuraciones, tanto del control LQG y su respectivo complemento con acción integral; como para el diseño aplicando el algoritmo genético. Se realizaron las respectivas variaciones en los parámetros del mismo, evaluando el desempeño según la selección de una función objetivo basada en índices de rendimiento [7]. El análisis se subdividió en dos casos y un posterior diseño con algoritmos genéticos. El primero corresponde a la aplicación del control LQG básico sin agregado integral, mientras que el segundo caso complementa el primero con acción integral, para garantizar un buen seguimiento.

6.1.1. Caso 1.

En las siguientes gráficas se muestra la respuesta del sistema de control multivariable LQG, aplicado a la planta linealizada (ver Anexo F). El sistema de control se diseñó teniendo en cuenta las matrices Q , R , Q_n y R_n , identidad. Es decir, sin ninguna ponderación en cada variable asociada a ellas.

En las figuras 14 a 16, se puede observar el comportamiento de las salidas (potencia activa, potencia reactiva y velocidad mecánica de la turbina), junto con los errores en cada una de ellas y sus respectivos actuadores V_{dr} , V_{qr} y B , mostrando un comportamiento de seguimiento pobre respecto a las referencias o Set point fijados como entradas escalón.

$$\text{Set_Point} = \begin{bmatrix} \text{Potencia_Activa} & = & -2 & [\text{MW}] \\ \text{Potencia_Reactiva} & = & 0 & [\text{W}] \\ \text{Velocidad_Mecánica} & = & 2.05 & [\text{rad/seg}] \end{bmatrix}$$

Valores de Referencia para la turbina Eólica

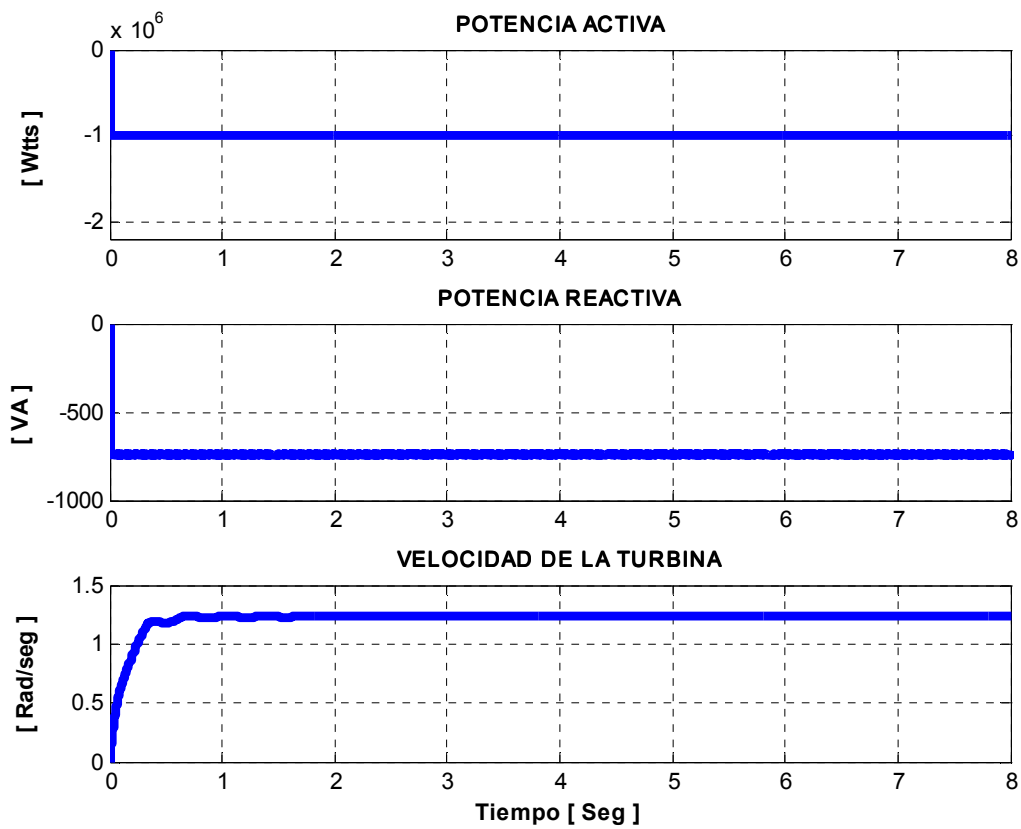


Figura 14. Gráficas de las Salidas: Potencia Activa, Potencia Reactiva, Velocidad Mecánica de la turbina (Fuente: Autores)

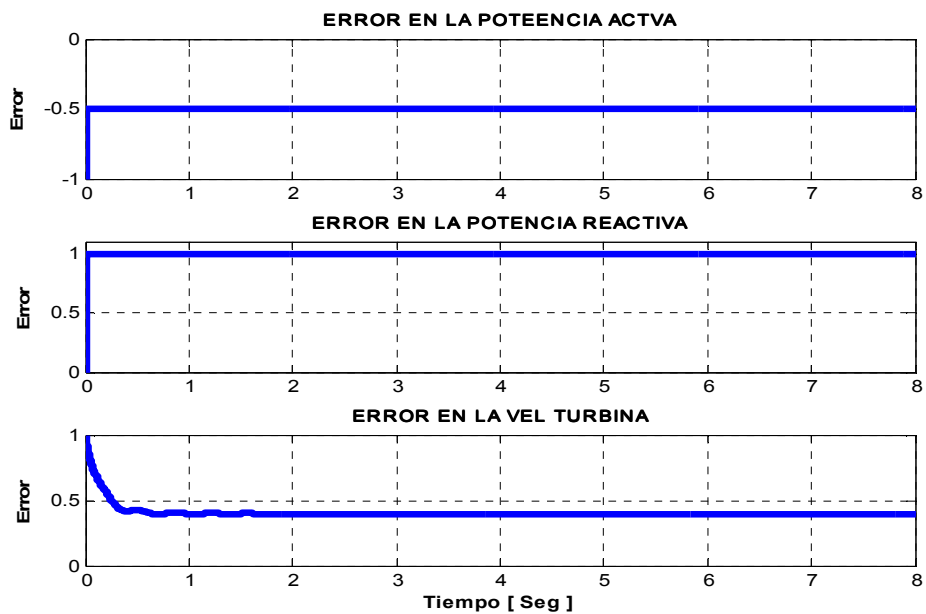


Figura 15. Gráficas de los Errores: Error (Potencia Activa), Error (Potencia Reactiva), Error (Velocidad Mecánica de la turbina) (Fuente: Autores)

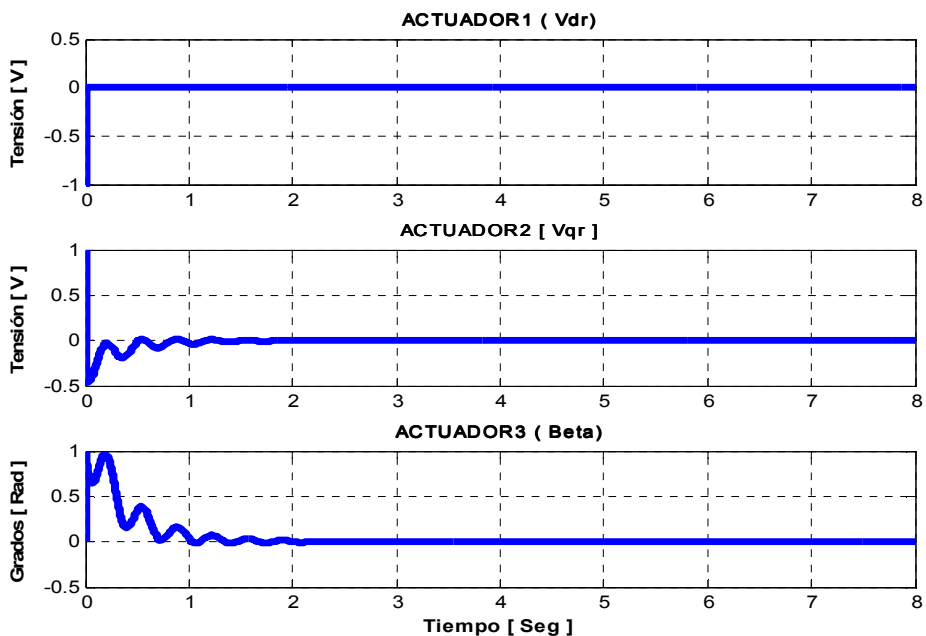


Figura 16. Gráficas de los Actuadores: Voltaje V_{dr} , Voltaje V_{qr} , Ángulo de ataque de las aspas B (Fuente: Autores)

El tiempo de simulación escogido fue de 4 segundos, se puede ver una marcada diferencia en los transitorios eléctrico y mecánico, con tiempos de asentamiento del orden de microsegundos para las potencias, mientras que la velocidad mecánica posee un tiempo de asentamiento cercano a un segundo.

6.1.2. Caso 2.

La respuesta del sistema (planta-control LQG), tiene un desempeño pobre en relación con la capacidad de seguimiento que se necesita en el caso particular de la turbina. Para compensar esa baja condición, se diseñó el sistema de control LQG con acción integral.

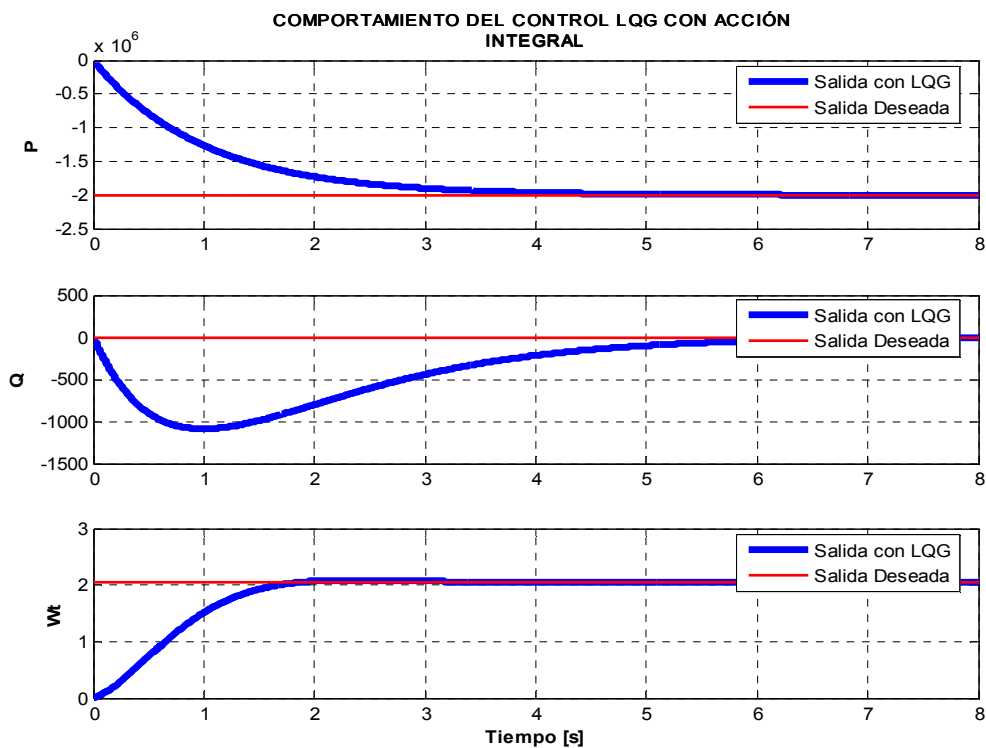


Figura 17. Gráficas de las Salidas aplicando Control LQG Con acción integral (Fuente: Autores)

Ya que la adición de los integradores en el sistema tiene un efecto directo sobre el error de seguimiento en cada una de las salidas, el complemento del control LQG con acción integral, me genera un sistema de control con un mejor desempeño, como se puede observar en las gráficas (Figuras 17 a 19).

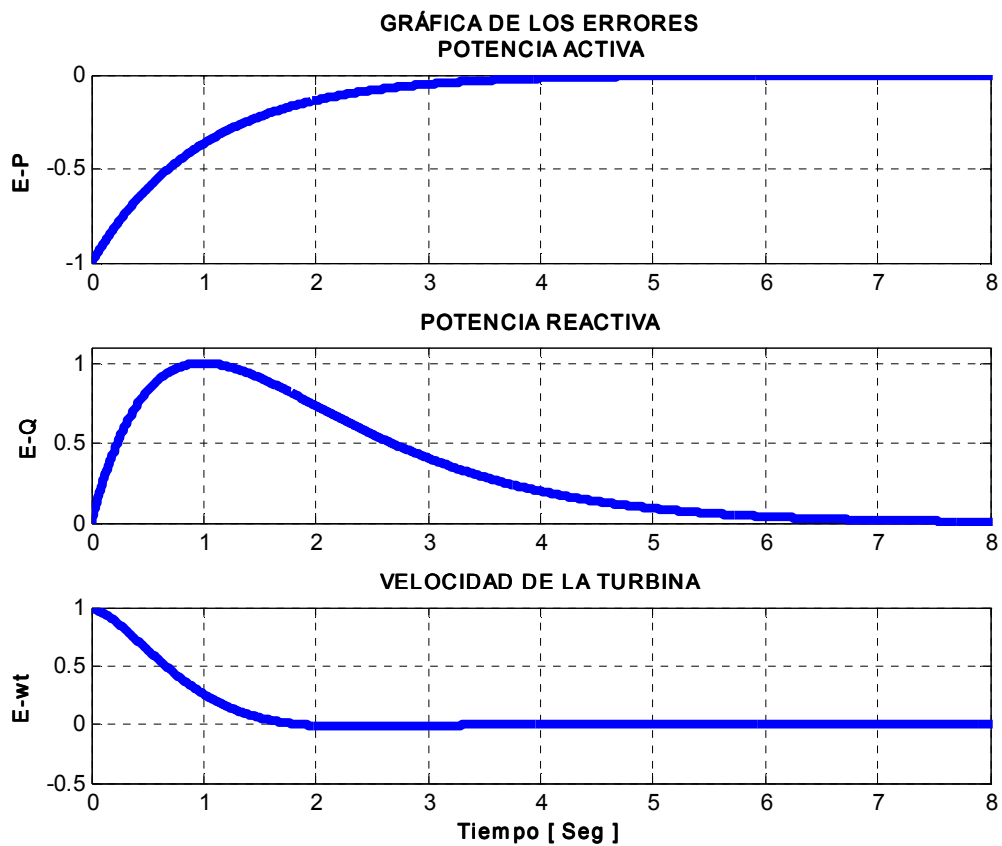
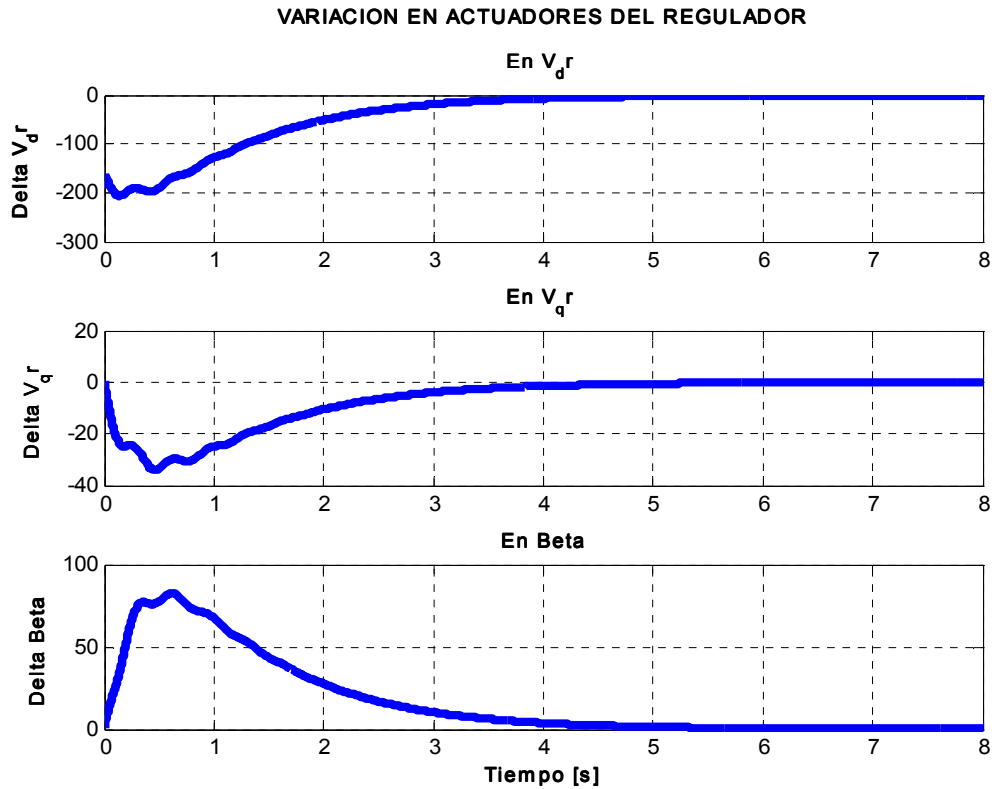


Figura 18. Gráficas de los Errores aplicando Control LQG con acción integral (Fuente: Autores)



**Figura 19. Gráficas de los Actuadores aplicando Control LQG con acción integral
(Fuente: Autores)**

6.2. Pruebas y resultados obtenidos mediante la aplicación del algoritmo genético

Una parte importante en el desarrollo del presente trabajo de grado es evaluar los diferentes tipos de configuraciones sobre las cuales se puede correr el algoritmo. El objetivo final de la evaluación es llegar a una configuración que proporcione la mejor respuesta sobre el sistema. El algoritmo genético desarrollado como complemento para el diseño del sistema de control, se presenta como una herramienta gráfica computacional. A continuación, se presentan una serie de pruebas que son la base para el análisis del algoritmo.

6.2.1. Pruebas realizadas al algoritmo genético para sintonización de parámetros.

Las pruebas que se realizaron en la herramienta gráfica computacional AGWIN, la cual se describe mediante una guía para el usuario en el Anexo H, permitieron hacer los ajustes de parámetros en el algoritmo genético, logrando de esta forma ver las variaciones existentes en la selección de los índices de rendimiento apropiados, los porcentajes de los operadores genéticos de cruce y mutación, la resolución más apropiada y el tamaño de la población, entre otros parámetros que puede modificar el usuario de la herramienta. La tabla 2 que se presenta a continuación describe la variación de cada parámetro en las pruebas realizadas al algoritmo genético.

PARÁMETRO	VALOR
Generaciones Máximas [Gen]	20, 50, 100, 1000
Individuos de la población [Indv]	5, 10, 15, 20
Resolución [bits]	16, 32, 64
Cruce [%]	1, 5, 10, 20
Mutación [%]	1, 2, 5, 10
Rango de las Variables	$0 a 10^2, 0 a 10^3, 0 a 10^4$
Tiempo de Simulación [seg]	2, 4, 8, 10
Velocidad media del viento [m/s]	10.4
Numero de puntos de Simulación	$5 \times 10^3, 5 \times 10^4, 5 \times 10^5$
Índice de Desempeño	ISE, IAE, ITSE, ITAE

**Tabla 2. Variación de Parámetros del Algoritmo genético para el diseño del control LQG
(Fuente: Autores)**

6.2.2. Pruebas realizadas en el diseño del controlador LQG.

Al realizar las pruebas de diseño utilizando la herramienta gráfica de simulación AGWIN, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación, para un caso particular de parámetros (Tabla 3):

Las ventanas correspondientes a los parámetros generales de la simulación y los resultados generados, se muestran en las figuras 20 a 23.

Las gráficas correspondientes a las salidas, los errores y los actuadores respectivamente, se muestran en las figuras 24 a 32. El valor fitness es de 4.2892, luego de 1000 generaciones y con un tiempo de simulación de la herramienta de 59 minutos.

PARÁMETRO	VALOR
Generaciones Máximas [Gen]	1000
Individuos de la población [Indv]	20
Resolución [bits]	16
Cruce [%]	15
Mutación [%]	5
Rango de las Variables	$0 a 10^4$
Tiempo de Simulación [seg]	8
Velocidad media del viento [m/s]	10.4
Numero de puntos de Simulación	5×10^3
Índice de Desempeño	ISE

**Tabla 3. Parámetros de Simulación del algoritmo genético Herramienta gráfica AGWIN
(Fuente: Autores)**



Figura 20. Ventana de parámetros y resultados herramienta gráfica AGWIN (Fuente: Autores)

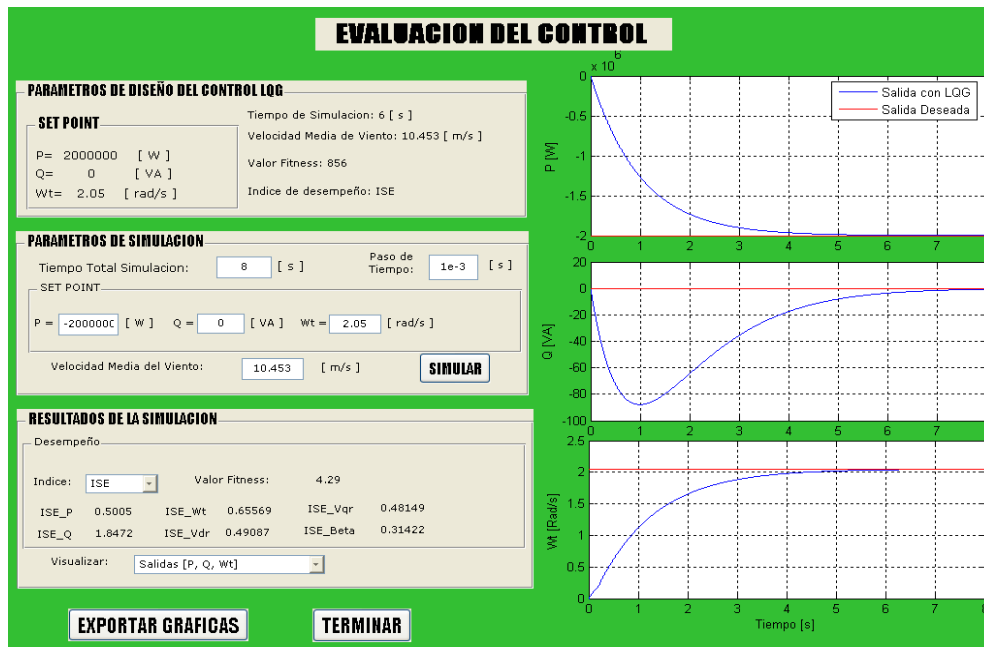


Figura 21. Ventana de parámetros y resultados gráficos herramienta gráfica AGWIN (Fuente: Autores)

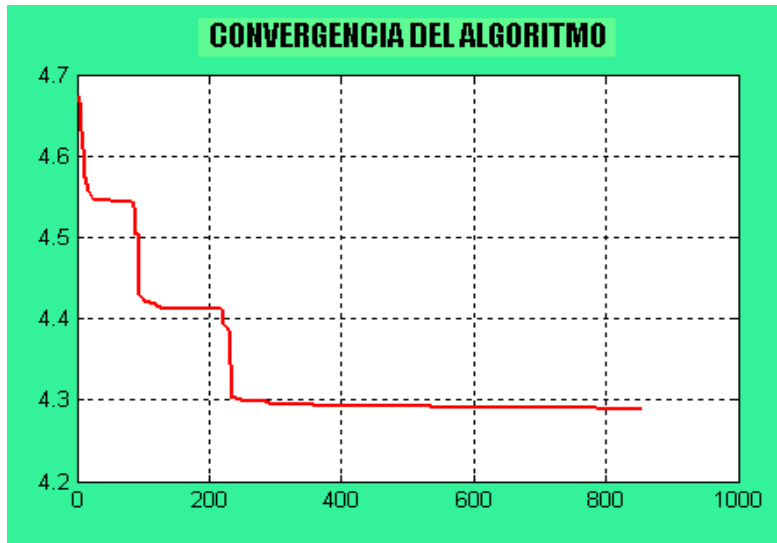


Figura 22. Gráfica de la convergencia del algoritmo genético en la herramienta gráfica AGWIN (Fuente: Autores)



Figura 23. Gráfica de las matrices Q, R, Qn y Rn diseñadas en la herramienta gráfica AGWIN (Fuente: Autores)

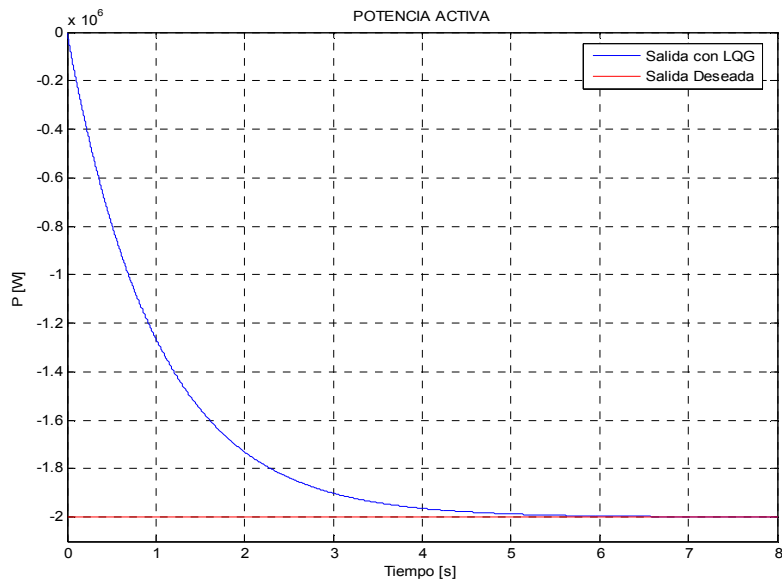


Figura 24. Gráfica de la potencia activa simulada en la herramienta AGWIN (Fuente: Autores)

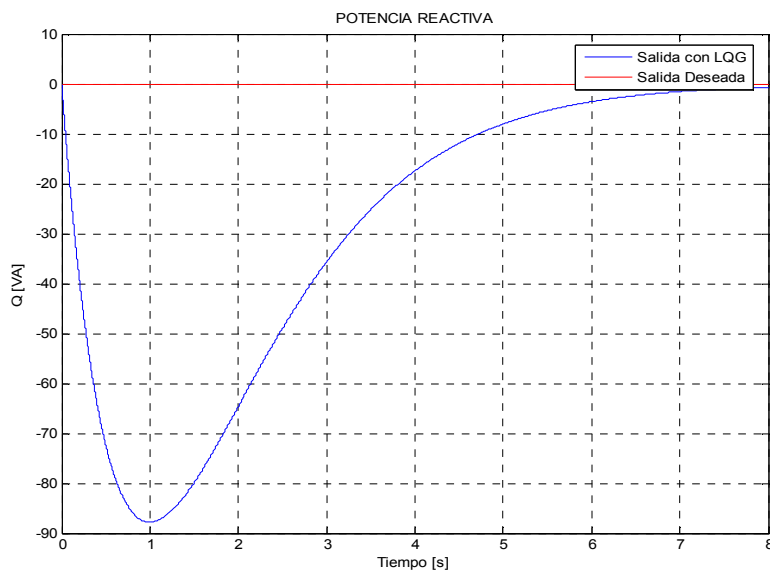


Figura 25. Gráfica de la potencia reactiva simulada en la herramienta AGWIN (Fuente: Autores)

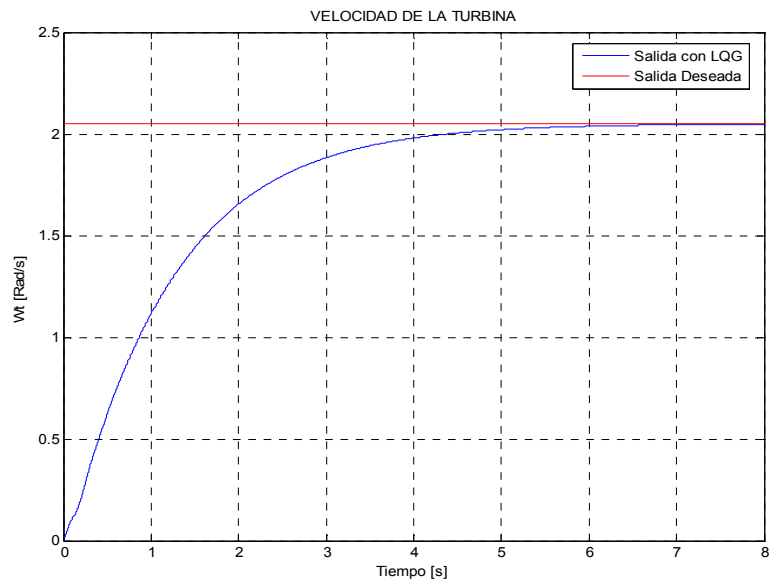


Figura 26. Gráfica de la velocidad mecánica simulada en la herramienta AGWIN (Fuente: Autores)

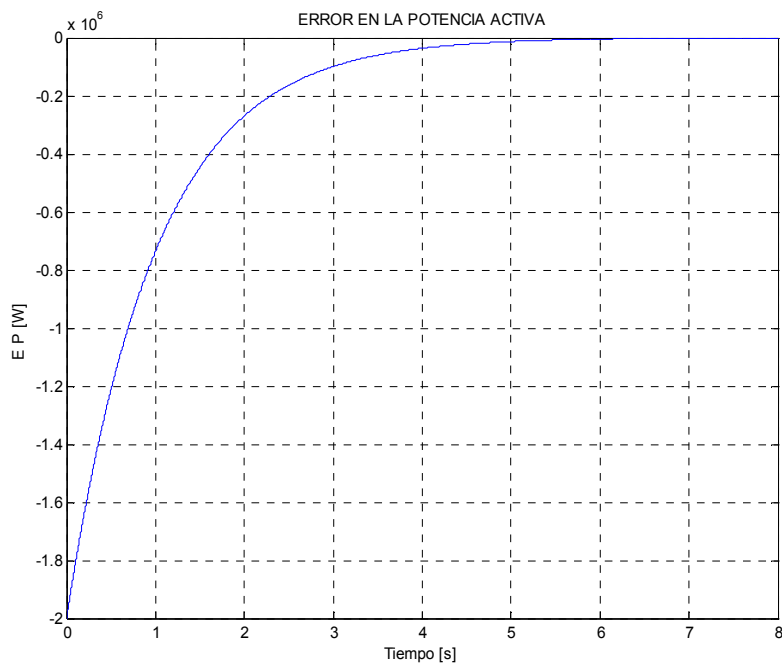


Figura 27. Gráfica del error de la potencia activa simulado en la herramienta AGWIN (Fuente: Autores)

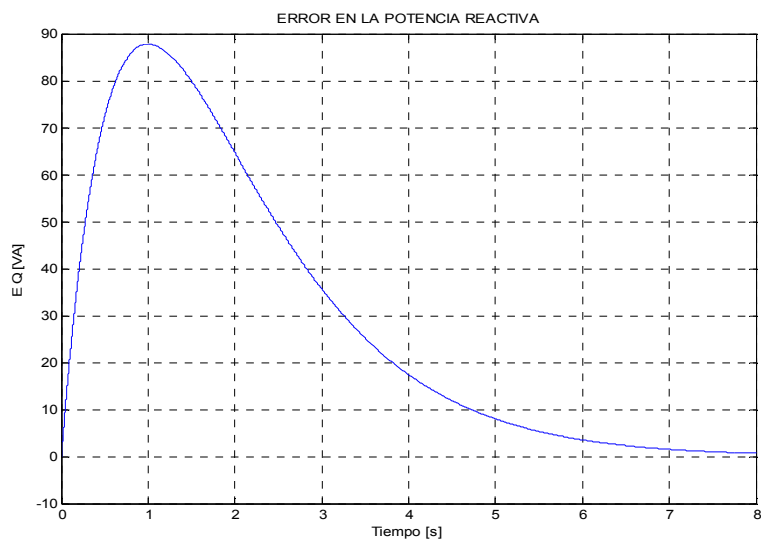


Figura 28. Gráfica del error de la potencia reactiva simulado en la herramienta AGWIN (Fuente: Autores)

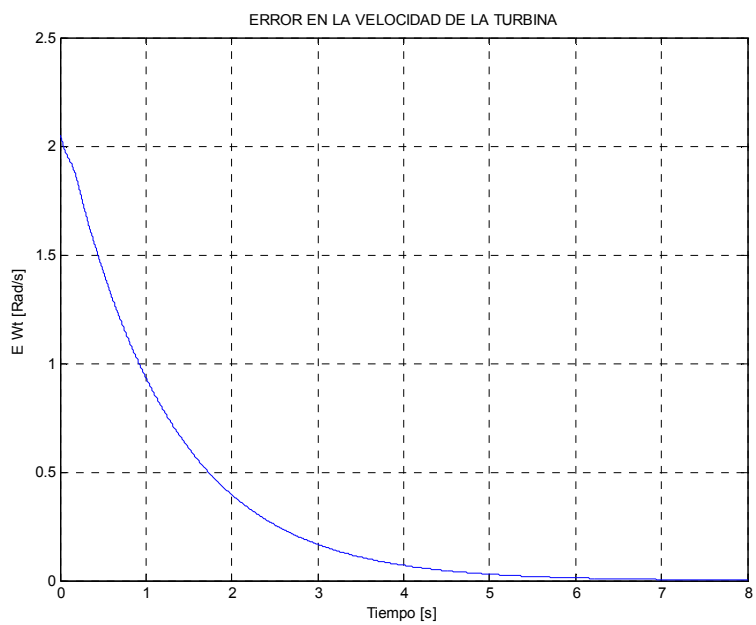


Figura 29. Gráfica del error de la velocidad mecánica simulada en la herramienta AGWIN (Fuente: Autores)

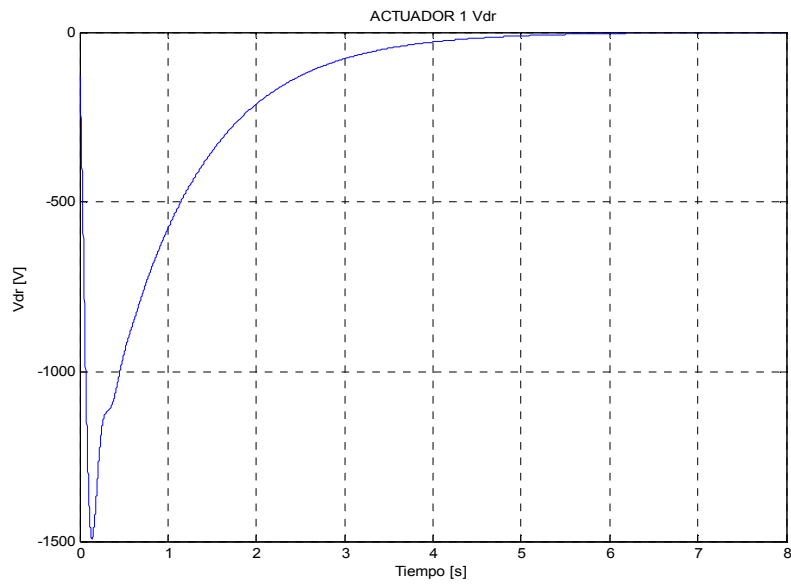


Figura 30. Gráfica del voltaje Vdr simulado en la herramienta AGWIN (Fuente: Autores)

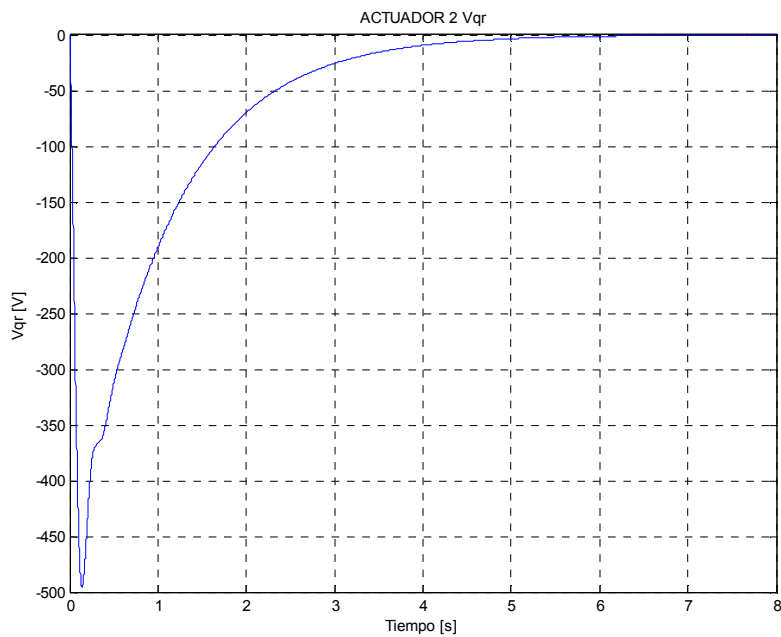


Figura 31. Gráfica del voltaje Vqr simulado en la herramienta AGWIN (Fuente: Autores)

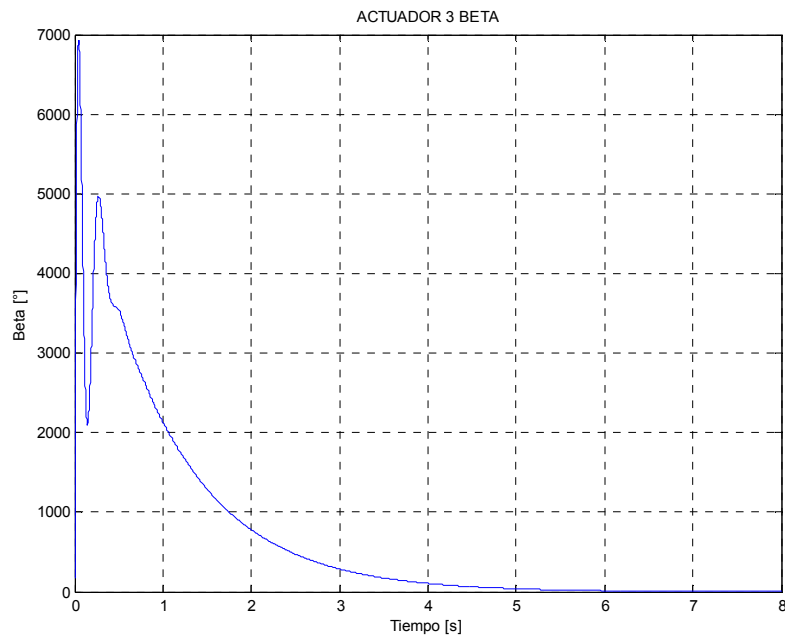


Figura 32. Gráfica del ángulo de ataque $Beta$ simulado en la herramienta AGWIN
(Fuente: Autores)

En la tabla 5 del Anexo I, se muestran los valores numéricos de los distintos índices de rendimiento, evaluados para los dos casos y al diseño con el algoritmo genético.

6.2.3. Metodología de diseño de controladores LQG utilizando algoritmos genéticos.

Se plantea una metodología de diseño de controladores para sistemas aerogeneradores dinámicos de una o más variables de entrada y salida, el método se describe a continuación:

1. Obtener un modelo matemático del sistema a controlar.

La conformación de un modelo general completo, depende de las ecuaciones que describen cada uno de los componentes o subsistemas de la turbina, estas pueden ser o no lineales, dependiendo de las aproximaciones que se hagan. Se sugiere utilizar los distintos marcos de referencia como aproximaciones válidas, por ejemplo la aproximación realizada en la máquina de inducción mediante la transformada de R. H. Park (ver Anexo D).

2. Escribir el modelo en variables de estado.

Expresar las ecuaciones diferenciales obtenidas en el numeral primero como variables de estado, si es un sistema no lineal se procede a linealizar el sistema mediante expansión por series de Taylor u otro método alternativo [12].

3. Implementar el modelo en Matlab[®] o Simulink[®].

Matlab[®]/Simulink[®] es un software que permite implementar ecuaciones matemáticas mediante archivos en código C++ o mediante bloques, como las ecuaciones diferenciales no lineales de los sistemas dinámicos, además permite simular su respuesta ante una o varias entradas específicas.

4. Implementar la estrategia de control LQG en Matlab[®] y/o Simulink[®].

Al igual que el modelo del sistema, el controlador LQG, también puede ser construido mediante bloques en Simulink[®] o por código creando archivos (*extensión.m*), en ellos deben estar las entradas que se van a utilizar en el sistema, como el viento y los Set point, al igual que las medidas de los parámetros de la respuesta del sistema para evaluar el desempeño del mismo.

5. Programar el algoritmo genético.

Utilizar Matlab[®] para programar el algoritmo genético que hallará el controlador LQG en variables de estados y las matrices de ponderación óptima Q, R, Qn y Rn.

6. Sintonizar el algoritmo con base en el resultado de las simulaciones de la respuesta del sistema.

Utilizando la respuesta del sistema del controlador óptimo, determinar si es necesario modificar los parámetros del algoritmo, los índices de desempeño, los métodos de selección, reproducción y mutación o el número de generaciones que debe tener el algoritmo.

7. Hacer las simulaciones correspondientes en los modelos completos en Simulink® :

Utilizando la solución generada por el algoritmo genético, se hacen las simulaciones pertinentes en los modelos completos de Simulink®, de esta forma se valida el procedimiento general de diseño evaluando el desempeño final y sacando las conclusiones del mismo.

6.3. Simulación dinámica del sistema de control en SIMULINK®

La implementación de los modelos en Simulink®, tiene como objetivo validar el diseño logrado con la implementación del algoritmo genético en función a su desempeño general. Los modelos implementados en bloques de Simulink® se muestran en las figuras 33 a 36.

En la figura 34 se muestran los bloques que conforman la turbina eólica de velocidad variable con DFIG, tanto la planta como el control multivariable LQG son implementados en variables de estado. El modelo permite simular el comportamiento del control con o sin acción integral, visualizando las respuestas a entrada escalón de las salidas, los errores y los actuadores, teniendo en cuenta la acción incidente del viento.

La figura 34 corresponde al modelo compacto en variables de estado del sistema planta – control LQG, con acción integral. Este modelo está sujeto a las ecuaciones (4.15) y (4.16), las cuales representan el esquema de control más completo para la turbina.

La figura 35 corresponde al modelo general dinámico, donde cada uno de los bloques representa los subsistemas que conforman la turbina eólica de velocidad variable con generador DFIG, ellos son: el modelo del viento, el modelo aerodinámico, el modelo mecánico y el modelo eléctrico, estos cinco subsistemas se complementan con el sistema de control LQG multivariable diseñado previamente con el algoritmo genético.

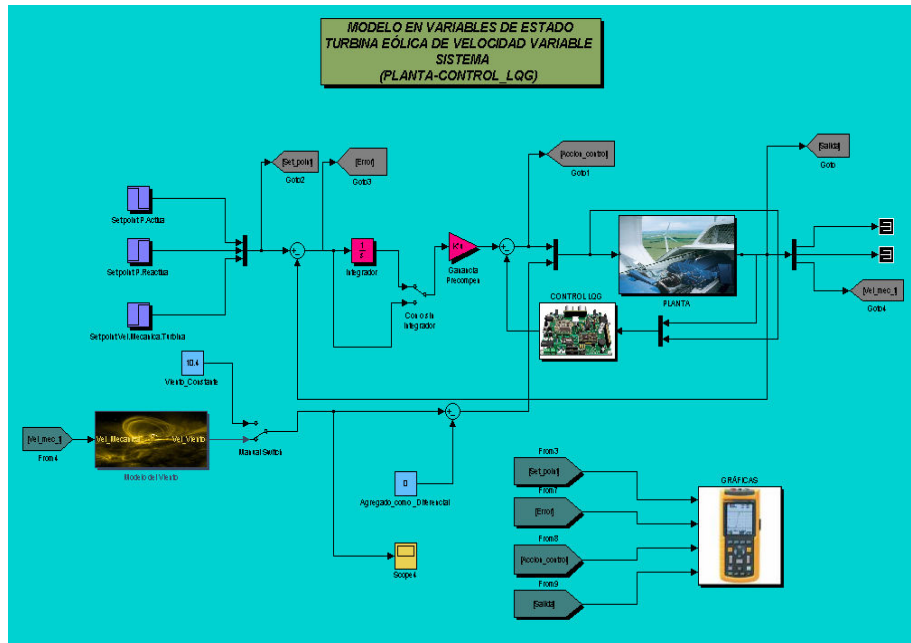


Figura 33. Modelo en Variables de estado de la Turbina Eólica de velocidad Variable en Simulink® (Fuente: Autores)

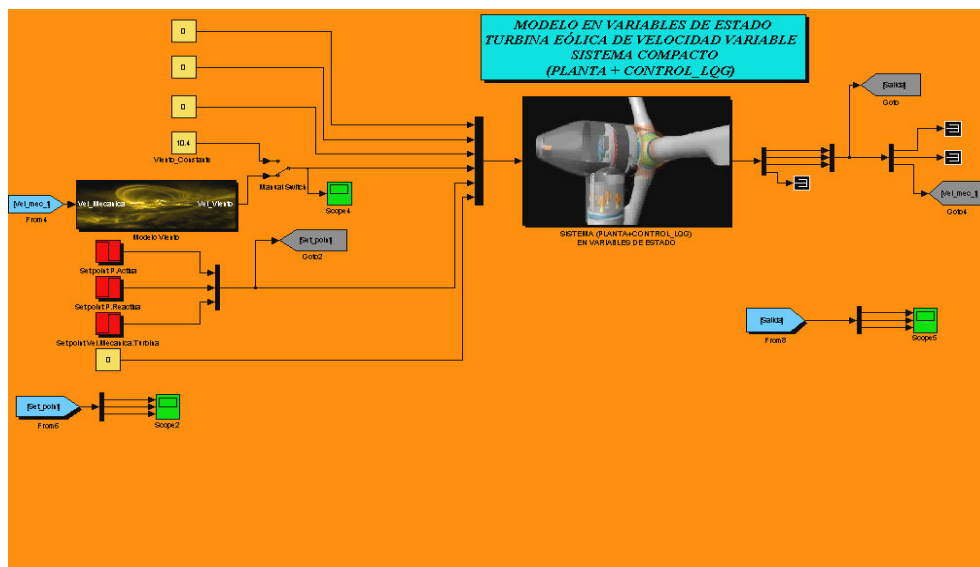


Figura 34. Modelo del Sistema compacto en Variables de estado de la Turbina Eólica de velocidad Variable en Simulink® (Fuente: Autores)

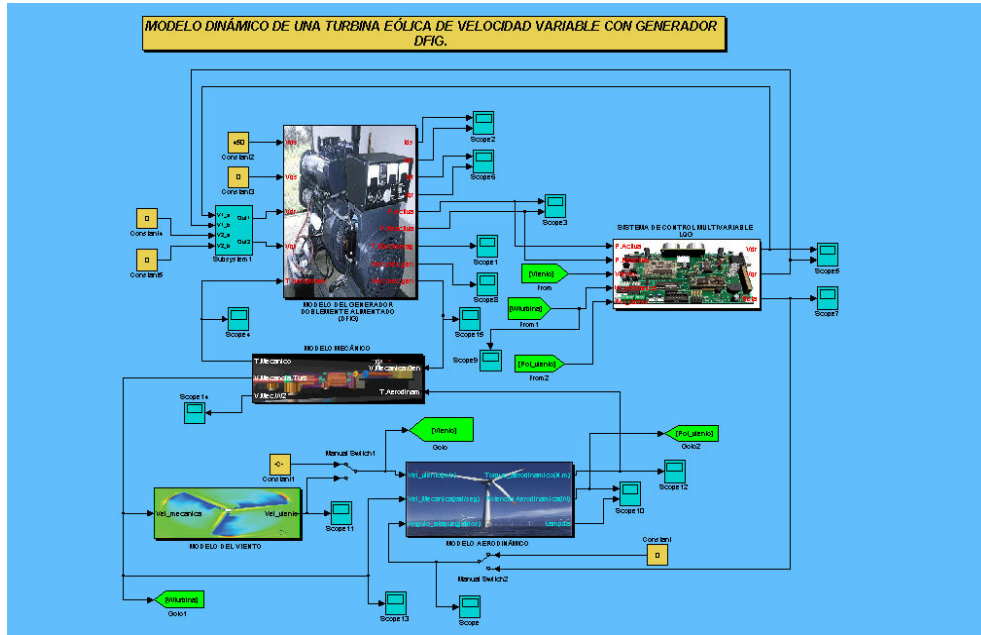


Figura 35. Modelo del Sistema General Dinámico de la Turbina Eólica de Velocidad Variable en Simulink®
(Fuente: Autores)

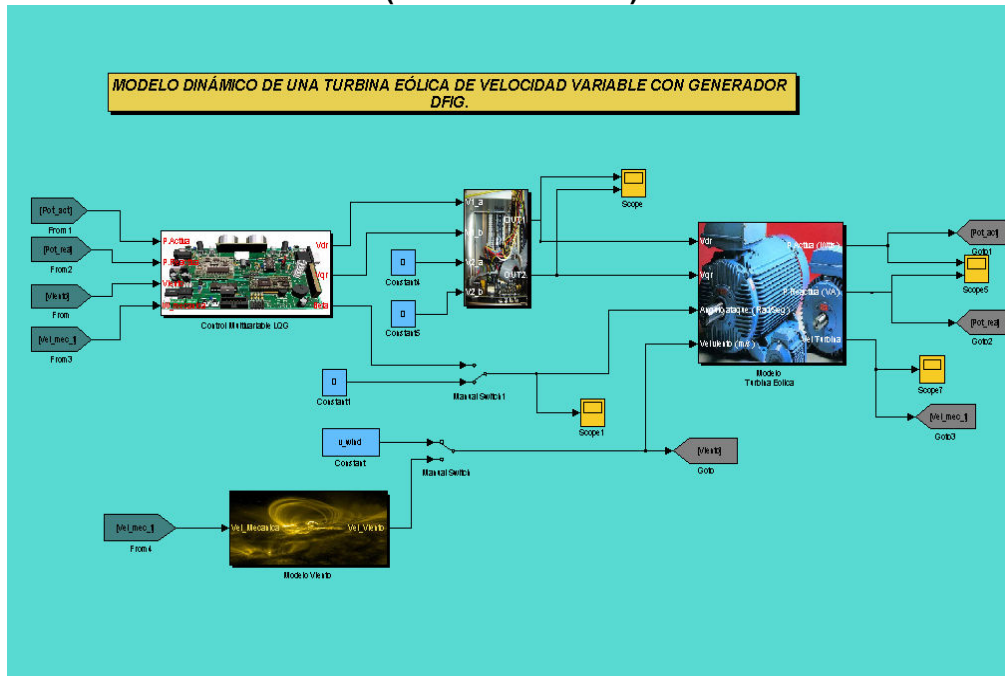


Figura 36. Modelo del Sistema Compacto Dinámico de la Turbina Eólica de Velocidad Variable en Simulink®
(Fuente: Autores)

El sistema referido a la figura 36, reúne en un solo bloque cada uno de los cinco subsistemas que conforman la turbina, reduciendo un poco el costo computacional de la simulación, el sistema está complementado a su vez con el control LQG multivariable diseñado previamente en la herramienta gráfica.

7. CONCLUSIONES

En el diseño del sistema de control mediante la técnica LQG, se hace necesario aplicar un complemento de acción integral, para que se logre un buen seguimiento, ya que sin integrador se observa que las salidas correspondientes a las potencias y la velocidad mecánica de la turbina no pueden alcanzar los objetivos de diseño deseados.

Una de las ventajas de la aplicación de técnicas de control óptimo en sistemas multivariables, es que se cuentan con criterios de optimización de las variables conjuntas, logrando en el espacio de estados una mejor solución en el diseño, algo que no es fácil de lograr con el control clásico.

La implementación de algoritmos genéticos es importante al complementar el diseño automático del control LQG, ya que de forma autónoma se escogen las matrices Q , R , Q_n y R_n , logrando reducir la dificultad de encontrarlas empíricamente.

Al desarrollar una herramienta de diseño gráfica computacional, se logra de manera sencilla, combinar los distintos índices de rendimiento, los parámetros del algoritmo genético y otros parámetros propios de la simulación, además se pueden visualizar la convergencia y las respuestas del sistema, facilitando en gran medida la labor de diseño del usuario.

8. 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] **LEDESMA, P.** *Análisis dinámico de sistemas eléctricos con generación eólica.* Ph.D. Thesis. Universidad Carlos III de Madrid. 2001.

- [3] **HEIER, Siegfried.** *Grid Integration Of Wind energy Conversion Systems.* John Wiley and Sons. 1999. ISBN 0-471-97143-X.(MOD_VIENTO)

- [4] **FLORIN, Iov.** *Contributions to Modeling, Analysis and Simulation of AC Drive Systems. Application to Large Wind Turbines.* Dinamarca: Faculty of Electrical Engineering and Computer Science “Dunarea de Jos” University –Galati. 2003. 146p.

- [5] **KIRK, DONALD E.** *Optimal Control, on Introduction,* Prentice Hall, 1970.

- [6] **BOSGRA, Okko; KWAKERNAAK, Huibert and MEINSMA, Gjerrit.** *Design Methods for Control Systems,* DISC-Dutch Institute of Systems and Control, Notes-course, 2002-2003.

- [7] **DORF, Richard C.** *Modern control systems,* 10th ed, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2001.

- [8] **OGATA, Katsuhiko.** *Ingeniería de Control Moderna,* Tercera edición, Pearson, Prentice Hall, 1998.

- [9] **BAY, S. John.** Fundamentals of Linear State Space Systems, WCB/McGraw-Hill, 1999.
- [10] **KUO, C. Benjamin,** Sistemas de control automático, Séptima edición, Prentice Hall, 1996.
- [11] **HOLLAND, John H.** Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, 1975.
- [12] **PRONZATO, L. and WALTER, E.** Identification of Parametric Models from Experimental Data, Ed. Springer-Verlag. London, UK, 1997.
- [13] **GONZÁLEZ A, Hernando.** Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Bucaramanga. 2008. 128. Tesis de Maestría. Universidad Industrial de Santander (UIS).Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
- [14] **USCÁTEGUI C, Omar y PRADA P, Dario.** Modelado y simulación del sistema mecánico de un generador eólico de eje horizontal con tres palas. 2007. 197. Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander (UIS).Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- [15] **LANGREDER, Wiebke.** Models for Variable Speed Wind Turbines. Reino Unido: CREST Loughborough University. 1996. 104 p.
- [16] **SØRENSEN, Poul et al.** Simulation of Interaction between Wind Farm and Power System. Dinamarca: Risø National Laboratory, Roskilde .2001.<http://www.risoe.dk/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1281.pdf>

- [17] **SØRENSEN, Poul. and HANSEN, Anca D.** Wind models for simulation of power fluctuations from wind farms. Dinamarca: Wind Energy Department, Risø National Laboratory-Department of Electrical Power Engineering, Technical University of Denmark. 2002.
- [18] **JONKMAN, J.M.** Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST_AD. Springfield US: National Renewable Energy Laboratory. 2003.(MOD_AERODINAMICO)

9. ANEXOS

Anexo A: Modelo de la componente estocástica del viento

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, la velocidad media y la densidad espectral de potencia (PSD). El espectro de Kaimal se ha convertido en una buena alternativa para representar la velocidad del viento, porque se aproxima a datos empíricos obtenidos de las observaciones atmosféricas.

$$S_t(f) = \frac{\sigma^2}{2} \frac{L}{V_{\omega 0}} \frac{1}{\left(1 + \frac{3}{2} \frac{L}{V_{\omega 0}} f\right)^{5/3}} \quad (8.1)$$

Los parámetros del espectro de Kaimal se definen como:

- σ Desviación estándar de la velocidad del viento.
- $V_{\omega 0}$ Velocidad media del viento
- L Longitud de escala de la turbulencia

$$L = \begin{cases} 20z & \text{para } z < 20 \text{ mt} \\ 600 \text{ mt} & \text{para } z > 20 \text{ mt} \end{cases} \quad (8.2)$$

z representa la altura de la torre.

Para simular las fluctuaciones del viento en el dominio del tiempo, en un punto del área de barrido del aspa, se emplea un generador de ruido blanco seguido de un filtro análogo, cuyo PSD se aproxime a la ecuación (8.1). J.C Kaimal en 1972 en su trabajo "Spectral Characteristics of Surface Layer Turbulence" obtuvo una función de transferencia con base en el espectro de Kaimal que representa el espectro de la turbulencia de la siguiente forma:

$$H(s) = \sigma \sqrt{\frac{L}{V_{\omega 0}}} \frac{0.0182c^2s^2 + 1.3653cs + 0.9846}{1.3463c^2s^2 + 3.7593cs + 1} \quad (8.3)$$

$$c = \frac{L}{2\pi V_{\omega 0}} \quad (8.4)$$

Esta función de transferencia también es conocida como Filtro Kaimal [15]. La salida de este Filtro Kaimal es el espectro de la turbulencia en un punto fijo.

En la figura 37 se representa gráficamente de forma simultánea la ecuación (8.1) y (8.3) para un $\sigma = 0.1$, $L = 600$ y una velocidad media del viento de 15 m/sg.

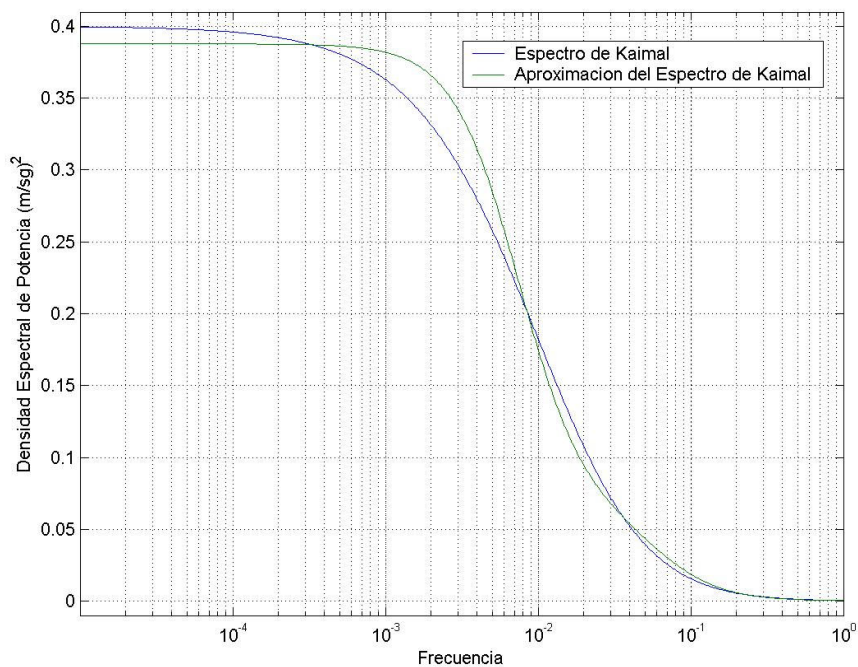


Figura 37. Espectro de Kaimal
(Fuente: GONZÁLEZ A, Hernando)

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 $v(r, \theta, t)$. Para un análisis detallado es

necesario aplicar técnicas de iteración, como las descritas en [3], pero requieren un alto costo computacional. Risoe-members en [17] y [18] presentan un método cuya idea es representar la turbulencia por una velocidad del viento equivalente que genere el mismo torque global.

El torque generado por cada aspa esta dado por:

$$M_{ib}(\theta_b, t) = \int_{r_o}^R \psi(r)v(r, \theta_b, t)dr \quad (8.5)$$

Donde:

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

La idea que se propone, debe cumplir con la siguiente ecuación:

$$M_{ib}(\theta_b, t) = v_{equ}(\theta_b, t) \int_{r_o}^R \psi(r)dr \quad (8.6)$$

Combinando la ecuación (8.5) y (8.6) se obtiene la velocidad equivalente:

$$V_{equ}(\theta_b, t) = \frac{\int_{r_o}^R \psi(r)v(r, \theta_b, t)dr}{\int_{r_o}^R \psi(r)dr} \quad (8.7)$$

La ecuación (8.7) puede quedar independiente del diseño de la turbina, del ángulo del aspa y la velocidad mecánica, si se asume que el coeficiente aerodinámico depende linealmente del radio $\psi(r) = K_{aer}r$.

$$V_{equ}(\theta_b, t) = \frac{\int_{r_o}^R rv(r, \theta_b, t) dr}{\int_{r_o}^R r dr} \quad (8.8)$$

La velocidad equivalente del viento, considerando las tres aspas, corresponde al promedio de la velocidad equivalente de cada una, lo cual se puede expresar como una función de la posición de la primera aspa:

$$V_{iequ} = \frac{1}{3} \left(v_{equ}(\theta_1, t) + v_{equ}\left(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}, t\right) + v_{equ}\left(\theta_1 - \frac{4\pi}{3}, t\right) \right) \quad (8.9)$$

La relación (8.9) se puede descomponer en series de Fourier con respecto a θ_1 .

$$V_{iequ} = \sum_{K=-\infty}^{k=\infty} W_{equ}(k, t) e^{jk\theta_1} \quad (8.10)$$

Donde W_{eqk} es el k -ésimo coeficiente de la expansión compleja. En una turbina de tres aspas perfectamente espaciadas, sólo los coeficientes de $3k$ aparecen en la sumatoria. Mediciones experimentales han demostrado que estas componentes generan unas fluctuaciones en la señal de torque, con una frecuencia fundamental igual a la velocidad que gira el rotor, este fenómeno se denomina “*muestreo rotacional de turbulencia*” [1].

$$V_{iequ} = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} W_{equ}(3k, t) e^{j3k\theta_1} \quad (8.11)$$

El PSD de los coeficientes de fourier $W_{equ}(3k, t)$ se puede calcular con:

$$S_{iequ} = H(3k, f) H^*(3k, f) S_t(f) \quad (8.12)$$

Donde $S_i(f)$ corresponde al espectro de Kaimal y $H(3k, f)$ son funciones de admitancia. En [1] se presentan algunas aproximaciones, a partir de funciones racionales, para H . En análisis de estabilidad solo se consideran la componente de continua y el tercer armónico, los cuales son los de mayor amplitud.

$$H_0 = \frac{4.7869d_{TF}^2s^2 + 0.9904}{7.6823d_{TF}^2s^2 + 7.3518d_{TF}s + 1} \quad (8.13)$$

$$H_3 = \frac{0.2766d_{TF}s + 0.0307}{0.3691d_{TF}^2s^2 + 1.7722d_{TF}s + 1} \quad (8.14)$$

Donde $d_{TF} = \frac{R}{V_{\omega 0}}$ es un parámetro de normalización, R es el radio total de la turbina y $V_{\omega 0}$ la velocidad media del viento.

Anexo B: Modelo aerodinámico del disco actuador (Rankine- Froude)

La turbina de viento es una máquina para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Las aspas del rotor de la turbina rotan atravesando un campo del viento muy complejo el cual varía con la posición en el plano del rotor y con el tiempo. Todas las turbinas de viento, cualquiera que sea su diseño, extraen la energía de presión del aire de la siguiente manera. El rotor de la turbina primero causa que el viento que se aproxima reduzca su velocidad gradualmente, lo que resulta en un aumento de la presión estática. A través del área barrida por el rotor hay una caída en la presión estática, lo que hace que la presión esté por debajo de la presión atmosférica. Como el viento continúa aguas abajo, la presión vuelve a subir a la presión atmosférica, causando más desaceleración del viento. Entonces, entre puntos alejados aguas arriba y aguas abajo no hay cambio en la presión estática pero existe una reducción considerable de energía cinética. Ver figura 38.

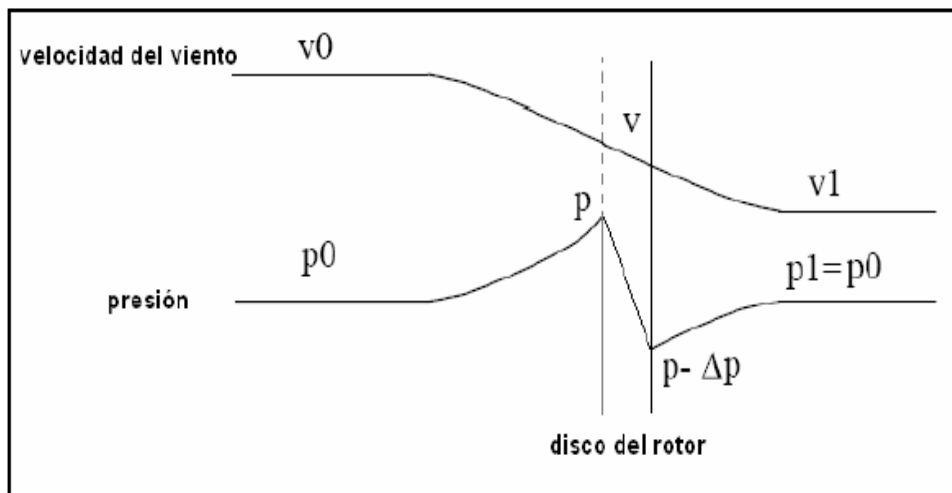


Figura 38. Variación de la presión y velocidad del viento en el rotor (Fuente: USCÁTEGUI, Omar y PRADA, Dario)

Para empezar a entender los fenómenos complejos que intervienen en la aerodinámica de una turbina eólica debemos iniciar analizando un modelo simple

(d) Las fronteras vientos arriba y vientos abajo están suficientemente alejadas del rotor y la presión estática en esos puntos es igual a la presión ambiente.

Anexo C: Modelo de transmisión mecánica de la turbina

El objetivo principal del modelamiento de la transmisión mecánica es hacer una abstracción del sistema real que permita una formulación matemática más sencilla pero con alto grado de precisión y similitud con el sistema real.

Para empezar con la simplificación del sistema de transmisión mecánica, sólo son de interés los componentes mecánicos presentes en una turbina eólica que puedan transmitir oscilaciones a la red, como las aspas, el eje de baja velocidad (incluye el buje), la caja multiplicadora y el eje de alta velocidad (incluye el rotor del generador eléctrico). En estudios de pequeña señal algunos autores representan por separado cada uno de estos componentes lo que permite representar por separado el par de entrada a cada aspa así como las oscilaciones entre aspa y buje. Otras formas para el modelado del sistema mecánico son:

- Separar las aspas y el buje, pero representar las aspas mediante una sola masa, como si estuvieran rígidamente unidas.
- Considerar que la unión aspa-buje está fuertemente amortiguada y manejar un modelo de dos masas.
- Utilizar un modelo de una sola masa, uniendo las aspas, el buje, la caja multiplicadora y el eje de alta velocidad.

Para el proyecto se considero un sistema mecánico de dos masas, como se observa en la figura 40. Corresponde a un modelo de dos masas conectadas por un eje flexible.

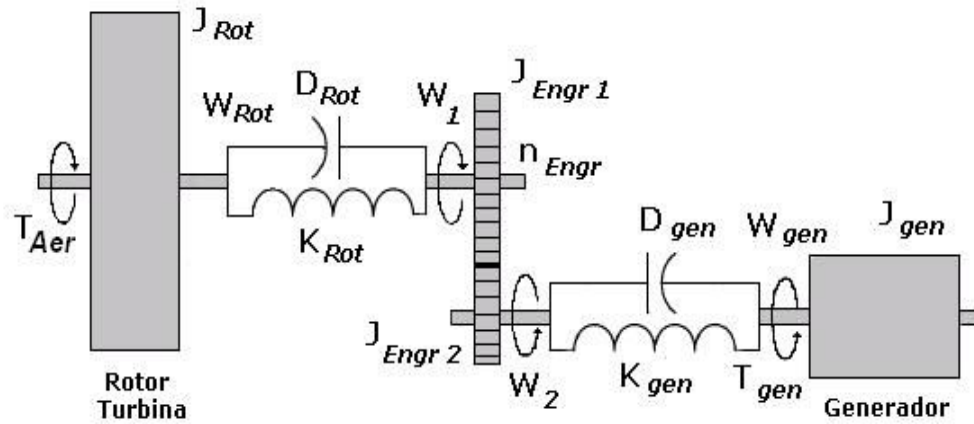


Figura 40. Transmisión mecánica modelada en sistema de masas (Fuente: Florin Iov)

Las ecuaciones que describen la dinámica del sistema, teniendo en cuenta el coeficiente de rigidez y amortiguamiento del eje de baja y alta velocidad, son:

$$T_{Aer} - D_{Rot} (W_{Rot} - W_1) - K_{Rot} (\theta_{Rot} - \theta_1) = J_{Rot} \frac{d}{dt} W_{Rot} \quad (8.15)$$

$$D_{Rot} (W_{Rot} - W_1) + K_{Rot} (\theta_{Rot} - \theta_1) - T_1 = J_{Engr1} \frac{d}{dt} \theta_1 \quad (8.16)$$

$$T_2 - D_{gen} (W_2 - W_{gen}) - K_{gen} (\theta_2 - \theta_{gen}) = J_{Engr2} \frac{d}{dt} W_2 \quad (8.17)$$

$$D_{gen} (W_2 - W_{gen}) + K_{gen} (\theta_2 - \theta_{gen}) - T_{gen} = J_{gen} \frac{d}{dt} W_{gen} \quad (8.18)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{\theta_2}{\theta_1} = n_{Eng} \quad (8.19)$$

Donde:

T_{Aer} Torque aerodinámico [Nm]

J_{Rot} Momento de inercia de las aspas y el buje [Kg-m²]

K_{Rot} Coeficiente de rigidez del eje de baja velocidad [Kg-m²/sg²]

D_{Rot}	Coeficiente de amortiguamiento del eje de baja velocidad [Kg-m ² /sg]
W_{Rot}	Velocidad mecánica del rotor de la turbina [rad/sg]
$J_{Eng1} - J_{Eng2}$	Momento de inercia de los engranes de la caja multiplicadora [Kg-m ²]
$W_1 - W_2$	Velocidad mecánica de los engranes de la caja multiplicadora [rad/sg]
n_{Eng}	Relación de engranes de la caja multiplicadora
K_{gen}	Coeficiente de rigidez del eje de alta velocidad [Kg-m ² /sg ²]
D_{gen}	Coeficiente de amortiguamiento del eje de alta velocidad [Kg-m ² /sg]
W_{gen}	Velocidad mecánica del rotor del generador de inducción [rad/sg]
J_{gen}	Momento de inercia del generador de inducción [Kg-m ²]
T_{gen}	Torque electromagnético [Nm]

Anexo D: Modelo del sistema eléctrico basado en marcos de referencia natural y sincrónico $dq0$

Las ecuaciones de este modelo se obtienen suponiendo que la máquina tiene una geometría simétrica, el flujo del entrehierro de la máquina es sinusoidal, la saturación es despreciable al igual que las pérdidas en el núcleo.

Las ecuaciones de voltaje para la máquina de inducción se pueden escribir como:

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[\Psi] \quad (8.20)$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (8.21)$$

Donde:

V_A, \dots, V_c son los voltajes de fase del bobinado del estator y el rotor.

I_A, \dots, I_c son las corrientes en el bobinado del estator y el rotor.

Ψ_A, \dots, Ψ_c son los flujos presentes en el bobinado del estator y el rotor.

La relación entre el flujo y la corriente a través de cada bobina esta dada por:

$$[\Psi] = [L][I] \quad (8.22)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & 0 & \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_3 \\ 0 & L_{ss} & 0 & \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_2 \\ 0 & 0 & L_{ss} & \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_1 \\ \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_2 & L_{rr} & 0 & 0 \\ \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_3 & 0 & L_{rr} & 0 \\ \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_1 & 0 & 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (8.23)$$

Con:

$$L_{ss} = L_s + L_m \quad (8.24)$$

$$L_{rr} = L_r + L_m \quad (8.25)$$

$$f_1 = \cos(\theta_r), f_2 = \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}), f_3 = \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \quad (8.26)$$

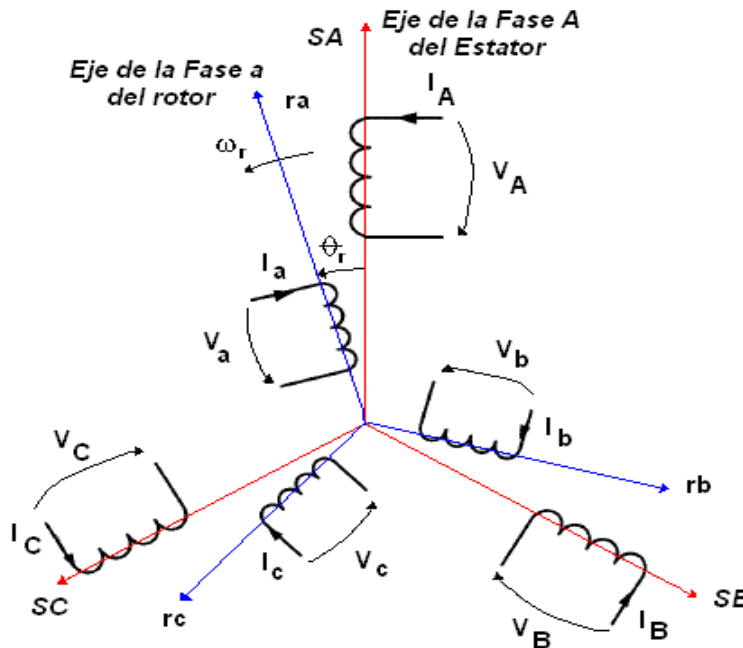


Figura 41. Diagrama Equivalente del Bobinado de una Máquina de Inducción en el marco de referencia ABC/abc (Fuente: Florin Iov)

Donde:

L_s Es la inductancia de dispersión del bobinado del estator

L_r Es la inductancia de dispersión del bobinado del rotor

L_m Es la inductancia magnetizante

Para obtener la ecuación (8.23) se debe tener en cuenta que:

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad \text{y} \quad I_a + I_b + I_c = 0 \quad (8.27)$$

Para expresar el modelo matemático correspondiente a la figura 41, en función de las corrientes del estator y rotor, como variables de estado, se sigue la relación:

$$\frac{d}{dt}[I] = -[L]^{-1} \left\{ [R] + \omega_r \frac{d}{d\theta_r} [L] \right\} [I] + [L]^{-1} [V] \quad (8.28)$$

Donde:

ω_r es la velocidad eléctrica del rotor

$[L]^{-1}$ es la inversa de la matriz de inductancias, definida como:

$$[L]^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} \end{bmatrix} \quad (8.29)$$

$$\begin{aligned}
b_{11} = b_{22} = b_{33} &= \frac{4L_{ss}L_{rr} - 3L_{aA}^2}{L_{ss}(4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2)} \\
b_{44} = b_{55} = b_{66} &= \frac{4L_{ss}L_{rr} - 3L_{aA}^2}{L_{rr}(4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2)} \\
b_{12} = b_{13} = b_{21} = b_{23} = b_{31} = b_{32} &= \frac{-3L_{aA}^2}{L_{ss}(4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2)} \\
b_{45} = b_{46} = b_{54} = b_{56} = b_{64} = b_{65} &= \frac{-3L_{aA}^2}{L_{rr}(4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2)} \\
b_{14} = b_{25} = b_{36} = b_{41} = b_{52} = b_{63} &= \frac{-4L_{aA}f_1}{4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2} \\
b_{15} = b_{26} = b_{34} = b_{43} = b_{51} = b_{62} &= \frac{-4L_{aA}f_2}{4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2} \\
b_{16} = b_{24} = b_{35} = b_{42} = b_{53} = b_{61} &= \frac{-4L_{aA}f_3}{4L_{ss}L_{rr} - 9L_{aA}^2} \\
L_{aA} &= \frac{2}{3}L_m
\end{aligned}$$

y

$$\frac{d}{d\theta_r}[L] = -\frac{2}{3}L_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & g_1 & g_2 & g_3 \\ 0 & 0 & 0 & g_3 & g_1 & g_2 \\ 0 & 0 & 0 & g_2 & g_3 & g_1 \\ g_1 & g_3 & g_2 & 0 & 0 & 0 \\ g_2 & g_1 & g_3 & 0 & 0 & 0 \\ g_3 & g_2 & g_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.30)$$

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

El torque electromagnético, en función de la corriente es:

$$T_e = -\frac{2}{3}pL_m \left\{ (I_A I_a + I_B I_b + I_C I_c) \sin(\theta_r) + (I_A I_b + I_B I_c + I_C I_a) \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \dots \right. \\
\left. + (I_A I_c + I_B I_a + I_C I_b) \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \right\} \quad (8.31)$$

Donde p es el número de par de polos.

La matriz de inductancias, ecuación (8.23), es 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 , como el sistema que se muestra en la figura 42. Se seleccionan dos ejes: eje de directa d y eje de cuadratura q : El eje q se asume noventa grados adelantado con respecto al eje d en la dirección de rotación. Si el eje d se escoge de forma que coincida con la fase A del estator, en $t=0$, su desplazamiento en cualquier instante de tiempo t es $\omega_s t$.

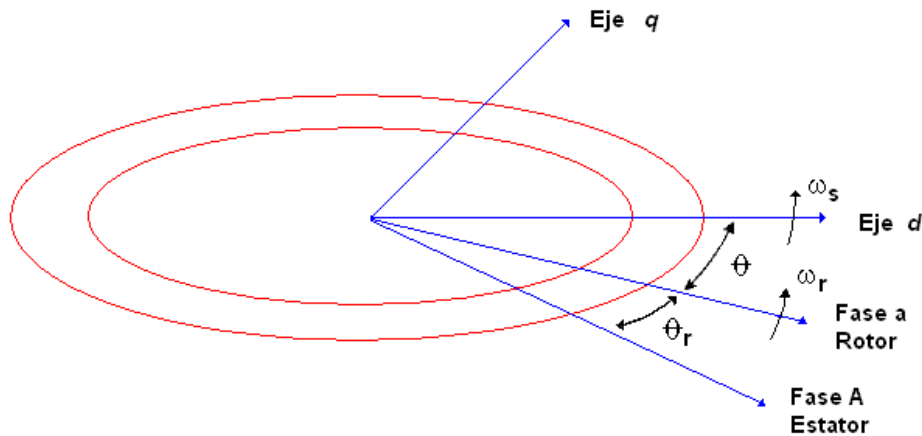


Figura 42. Sistema de Referencia $dq0$
(Fuente: Florin Iov)

La transformación de las corrientes del estator en los ejes d y q son:

$$\begin{aligned}
 I_{ds} &= \frac{2}{3} \left[I_A \cos(\omega_s t) + I_B \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_C \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\
 I_{qs} &= -\frac{2}{3} \left[I_A \sin(\omega_s t) + I_B \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_C \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{8.32}$$

La transformación inversa es:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{ds} \cos(\omega_s t) - I_{qs} \sin(\omega_s t) \\ I_B &= I_{ds} \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qs} \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_C &= I_{ds} \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qs} \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (8.33)$$

La transformación que se aplica a las variables del rotor son:

$$\begin{aligned} I_{dr} &= \frac{2}{3} \left[I_A \cos(\theta) + I_B \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_C \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ I_{qr} &= -\frac{2}{3} \left[I_A \sin(\theta) + I_B \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_C \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \quad (8.34)$$

θ es el ángulo por el cual el eje d adelanta al eje de la fase a del rotor.

$$\begin{aligned} \theta &= \omega_s t - \theta_r \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_s - \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r \end{aligned} \quad (8.35)$$

Donde 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.

Las ecuaciones de voltaje, aplicando la transformación son:

$$\begin{aligned} [V] &= [R][I] + \frac{d}{dt}[\Psi] + [\Omega][\Psi] \quad (8.36) \\ \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(\omega_s - \omega_r) \\ 0 & 0 & (\omega_s - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

La relación entre el flujo y la corriente está dada por la siguiente relación:

$$[\Psi] = [L][I] \quad (8.37)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{rr} & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (8.38)$$

Si las corrientes se seleccionan como variables de estado, la ecuación que representa la dinámica de la máquina de inducción es:

$$\frac{d}{dt}[I] = -\left([L]^{-1}[R] + [L]^{-1}[\Omega][L]\right)[I] + [L]^{-1}[V] \quad (8.39)$$

Donde:

$$[L]^{-1} = \frac{1}{L_{rr}L_{ss} - L_m^2} \begin{bmatrix} L_{rr} & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_{rr} & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_{ss} & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (8.40)$$

El torque electromagnético se define entonces como:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_{qr} I_{dr} - \Psi_{dr} I_{qr}) \quad (8.41)$$

La potencia total conformada por la potencia activa y la potencia reactiva es:

$$S = P_{act} + Q_{rea} = 3/2(V_{ds}I_{qs} + V_{qs}I_{ds}) + 3/2j(V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs}) \quad (8.42)$$

Anexo E: Índices de desempeño

Un índice de desempeño es una medida cuantitativa del desempeño del sistema [7] y es escogido según el énfasis dado a las especificaciones más importantes del mismo.

Una medida cuantitativa del desempeño es necesaria para la operación de sistemas 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 sistema es considerado de control óptimo, cuando los parámetros del mismo son ajustados de tal forma que los índices alcanzan un extremo, comúnmente un valor mínimo. Para que sea útil, un índice de desempeño debe ser un número siempre positivo o cero, entonces el mejor sistema está definido como el que minimiza éste índice.

Un índice de desempeño apropiado es la integral del cuadrado del error, ISE, el cual se define como:

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad (8.42)$$

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.

Otro índice de desempeño es la integral del valor absoluto de la magnitud del error, IAE, el cual se define como:

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (8.43)$$

Este índice es particularmente útil para estudios con simulación 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 establecimientos y sobrepicos más altos.

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 se define como:

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)| dt \quad (8.44)$$

Otro índice similar es la integral del tiempo multiplicado por el cuadrado del error, el cual se define como:

$$ITSE = \int_0^T te^2(t) dt \quad (8.45)$$

El índice de desempeño ITAE proporciona la mejor selectividad, esto significa que el valor mínimo de la integral varía con un pequeño cambio en los parámetros del sistema.

Anexo F: Modelo lineal de la turbina eólica de velocidad variable con DFIG mediante expansión en series de Taylor

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 (8.46), 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.

$$\frac{dx(t)}{dt} = f[x(t), r(t)] \quad (8.46)$$

La trayectoria de operación nominal se denota por $x_0(t)$, la cual corresponde a la entrada nominal $r_0(t)$ y algunos estados iniciales fijos. Al expandir la ecuación de estado no lineal de la ecuación (8.46) en una serie de Taylor alrededor de $x(t) = x_0(t)$ y descartando los términos de orden superior, se obtiene la expresión (8.47), donde $i = 1, 2, \dots, n$.

$$x_i(t) = f_i(x_0, r_0) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial x_j} \Big|_{x_0, r_0} (x_j - x_{0j}) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial r_j} \Big|_{x_0, r_0} (r_j - r_{0j}) \quad (8.47)$$

Si definimos

$$\Delta x_i = x_i - x_{0i} \quad (8.48)$$

$$\Delta r_i = r_i - r_{0i}$$

Entonces:

$$\Delta x_i = x_i - f_i(x_0, r_0) \quad (8.49)$$

La ecuación (8.47) se escribe como:

$$\Delta x_i(t) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial x_j} \Big|_{x_0, r_0} \Delta x_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial r_j} \Big|_{x_0, r_0} \Delta r_j \quad (8.50)$$

La ecuación (8.50) se puede escribir en la forma matricial obteniendo la expresión (8.51).

$$\Delta x = A^* \Delta x + B^* \Delta r \quad (8.51)$$

$$A^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad B^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r_1} & \frac{\partial f_1}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial r_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial r_1} & \frac{\partial f_2}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial r_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial r_1} & \frac{\partial f_n}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial r_n} \end{bmatrix} \quad (8.52)$$

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 (8.46).

Partiendo de las ecuaciones del sistema mecánico y eléctrico obtenemos los nueve estados que conforman las funciones $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9$.

Las ecuaciones del sistema mecánico son:

$$T_{Aer} - D_{Rot} (W_{Rot} - W_1) - K_{Rot} (\theta_{Rot} - \theta_1) = J_{Rot} \frac{d}{dt} W_{Rot} \quad (8.53)$$

$$D_{Rot} (W_{Rot} - W_1) + K_{Rot} (\theta_{Rot} - \theta_1) - T_1 = J_{Engr1} \frac{d}{dt} \theta_1 \quad (8.54)$$

$$T_2 - D_{gen} (W_2 - W_{gen}) - K_{gen} (\theta_2 - \theta_{gen}) = J_{Eng2} \frac{d}{dt} W_2 \quad (8.55)$$

$$D_{gen} (W_2 - W_{gen}) + K_{gen} (\theta_2 - \theta_{gen}) - T_{gen} = J_{gen} \frac{d}{dt} W_{gen} \quad (8.56)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{\theta_2}{\theta_1} = n_{Eng} \quad (8.57)$$

Las ecuaciones del sistema eléctrico se expresan en variables de estado tomando como estados las corrientes idr, ids, iqr, iqs .

$$\frac{dx(t)}{dt} = A_{elec} x(t) + B_{elec} u(t) \quad (8.57)$$

$$\frac{d}{dt} [I] = -\left([L]^{-1} [R] + [L]^{-1} [\Omega] [L] \right) [I] + [L]^{-1} [V] \quad (8.58)$$

Siendo $[L]^{-1}$, $[R]$ y $[\Omega]$ igual a:

$$[L]^{-1} = \frac{1}{L_{rr} L_{ss} - L_m^2} \begin{bmatrix} L_{rr} & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_{rr} & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_{ss} & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (8.59)$$

$$L_{ss} = L_s + L_m \quad (8.60)$$

$$L_{rr} = L_r + L_m \quad (8.61)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (8.62)$$

$$[\Omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(\omega_s - \omega_r) \\ 0 & 0 & (\omega_s - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \quad (8.63)$$

Tal que la representación en variables de estado queda según la ecuación (8.62).

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(\omega_s - \omega_r) \\ 0 & 0 & (\omega_s - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \quad (8.64).$$

Las ecuaciones aerodinámicas asociadas al sistema son:

$$T_{Aer} = \left(\frac{\pi}{2\lambda} \right) \rho R^3 V_{equ}^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (8.65)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{Rot} R}{v} \quad (8.66)$$

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-2/\lambda_i} + 0.0068\lambda \quad (8.67)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (8.68)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{w_2}{w_1} = n_{Engranes} \quad (8.69)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_f L_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (8.70)$$

Donde:

- T_{Aer} Torque aerodinámico [Nm]
- T_e Torque electromecánico producido por el generador DFIG [Nm]
- B Ángulo de ataque de las aspas
- J_{Rot} Momento de inercia de las aspas y el buje [Kg-m²]
- K_{Rot} Coeficiente de rigidez del eje de baja velocidad [Kg-m²/sg²]
- D_{Rot} Coeficiente de amortiguamiento del eje de baja velocidad [Kg-m²/sg]
- W_{Rot} Velocidad mecánica del rotor de la turbina [rad/sg]
- $J_{Eng1} - J_{Eng2}$ Momento de inercia de los engranes de la caja multiplicadora [Kg-m²]
- $W_1 - W_2$ Velocidad mecánica de los engranes de la caja multiplicadora [rad/sg]
- n_{Eng} Relación de engranes de la caja multiplicadora
- K_{gen} Coeficiente de rigidez del eje de alta velocidad [Kg-m²/sg²]
- D_{gen} Coeficiente de amortiguamiento del eje de alta velocidad [Kg-m²/sg]
- W_{gen} Velocidad mecánica del rotor del generador de inducción [rad/sg]
- J_{gen} Momento de inercia del generador de inducción [Kg-m²]
- T_{gen} Torque electromagnético [Nm]
- L_s Es la inductancia de dispersión del bobinado del estator
- L_r Es la inductancia de dispersión del bobinado del rotor
- L_m Es la inductancia magnetizante
- P_f Par de polos del generador DFIG

La representación del sistema en variables de estado, ecuación (8.51), se determina evaluando la derivada parcial de cada una de las funciones f_i con relación a las siguientes variables de estado:

W_{Rot}	Velocidad Mecánica del rotor de la turbina eólica
W_2	Velocidad mecánica del eje de alta velocidad de la caja multiplicadora
W_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
I_{ds}	Corriente del estator en el sistema $dq0$ – eje d
I_{qs}	Corriente del estator en el sistema $dq0$ – eje q

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_{qr}	Componente en cuadratura de la tensión del rotor
B	Ángulo de paso
V_{Equ}	Velocidad del viento

La representación de la dinámica en variables de estado sujetos al modelo lineal dado en la ecuación (8.51) de la turbina eólica está dada por la ecuación (8.71), en la cual

se asume que el deslizamiento es constante en el generador DFIG, para efectos de la linealización del sistema.

$$\begin{bmatrix} \dot{id_r} \\ \dot{id_s} \\ \dot{iqr} \\ \dot{iqs} \\ \dot{w_r} \\ \dot{Q_{Gen}} \\ \dot{Q_{Rot}} \\ \dot{w_2} \\ \dot{w_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -8.7599 & 6.5874 & -6268.8 & -6411.9 & 8470 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8.5601 & -6.7603 & 6432.8 & 6579.9 & -8276.8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6268.8 & 6411.9 & -8.7599 & 6.5847 & 2957.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6432.8 & -6579.9 & 8.5601 & -6.7603 & -2890 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.40655 & -0.28298 & 0.79155 & 0.81045 & -15.385 & 0.030769 & 0 & 30.769 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -50000 & 0 & 0 & 1 \cdot e^5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.9481 \cdot e^6 & 1.5 \cdot e^8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 49992 & -99.983 & 1.2985 & -1.1347 \cdot e^5 & 1.0388 \cdot e^6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 \cdot e^{-7} & 0.0020799 & -0.30002 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id_r \\ id_s \\ iqr \\ iqs \\ w_r \\ Q_{Gen} \\ Q_{Rot} \\ w_2 \\ w_t \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 6738.4 & 0 & 0 & 0 \\ -6584.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6738.4 & 0 & 0 \\ 0 & -6584.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.016847 & 0.064759 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vd_r \\ Vq_r \\ B \\ V_{Equ} \end{bmatrix} \quad (8.71)$$

$$\begin{bmatrix} P_{Activa} \\ Q_{Reactiva} \\ W_{Mec_tur} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 675 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -675 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id_r \\ id_s \\ iq_r \\ iq_s \\ w_r \\ Q_{Gen} \\ Q_{Rot} \\ w_2 \\ w_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vd_r \\ Vq_r \\ B \\ V_{Equ} \end{bmatrix} \quad (8.71).$$

El modelo lineal de la turbina eólica NM 2000/82, fabricada por Neg Micon, se evalúa para una velocidad media del viento de 10.342 [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, con el bobinado del rotor en cortocircuito. Los valores de los parámetros del sistema de transmisión mecánico y el generador DFIG se asumen los del anexo G, obteniendo las siguientes condiciones iniciales para los estados $x_i(t)$:

$$Id_s = -2915.463135449682 \text{ [Amp]}$$

$$Iq_s = -1514.261042488982 \text{ [Amp]}$$

$$Id_r = 2985.097289477132 \text{ [Amp]}$$

$$Iq_r = 1069.035568408645 \text{ [Amp]}$$

$$w_t = 2.0602 \text{ [rad/seg]}$$

$$w_2 = 158.6317 \text{ [rad/seg]}$$

$$w_r = 317.2633851634851 \text{ [rad/seg]}$$

$$Q_{Rot} = 972610 \text{ [N-m]}$$

$$Q_{Gen} = 12631 \text{ [N-m]}.$$

Anexo G: Parámetros generales para una turbina eólica de 2 MW NM 2000/82

ROTOR	
Número de palas	3
Velocidad nominal	19 [rpm] o 2 [rad/s]
Diámetro	82
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 (GEAR BOX)	
Tipo	Planetario
Relación	85
GENERADOR ELÉCTRICO	
Tipo	DFIG
Velocidad	750 - 1800 [rpm]

Momento de inercia	65 [Kg*m ²]
PARÁMETROS SISTEMA TRANSMISIÓN MECÁNICO [4]	
Rigidez del eje de baja velocidad	114*106 [Nm/rad]
Amortiguamiento del eje de baja velocidad	756*106 [Nm*seg/rad]
Rigidez del eje de alta velocidad	1*105 [Nm/rad]
Amortiguamiento del eje de alta velocidad	1*103 [Nm*seg/rad]
Inercia del tren de engranes de baja y alta velocidad	0.01 [Kg*m ²]
PARÁMETROS SISTEMA ELÉCTRICO (DFIG)	
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 4. Parámetros y especificaciones técnicas para una turbina Eólica de Velocidad variable con DFIG (NM 2000/82)
(Fuente: Florin iov)**

Anexo H: Manual de usuario herramienta gráfica (GUI) AGWIN v1.0

Requerimientos del sistema para ejecutar la herramienta:

- *Procesador Intel Pentium 4 de 2.4 Ghz mínimo.*
- *Memoria RAM de 1 GB como mínimo.*
- *Microsoft Windows XP professional SP2.*
- *Mathworks Matlab 7.0 o superior ó MCRinstaller en caso de no tener MATLAB 7.0 instalado, viene incluido en el CD del software.*
- *Microsoft Net Framework 1.0 o superior, incluido en el CD, “Importante” verificar si lo tiene instalado el PC.*

Pasos para la instalación de la herramienta:

1. Si se tiene MATLAB 7.0 en el PC ejecute el archivo AGWIN.m y aparecerá la ventana mostrada en la Figura 43. si no lo tiene instalado pase al numeral 2.
2. Verificar si el PC tiene instalado el software *Microsoft Net Framework 1.0* como mínimo, en *Inicio > Panel de Control > Agregar o quitar Programas*, si lo tiene instalado pase al numeral 4.
3. Instale el *Microsoft Net Framework* en el PC que viene incluido en el CD.
4. Instalar *MCRinstaller.exe*, con este programa ya se podrá ejecutar la herramienta AGWIN.exe sin Matlab.
5. Abrir la aplicación AGWIN.
6. Aparecerá después de unos instantes la ventana de Inicio para la ejecución de la Herramienta.



Figura 43. Ventana de inicio de la herramienta gráfica
(Fuente: Autores.)



Figura 44. Pasos para el inicio de la herramienta gráfica
(Fuente: Autores.)

1. **Crear control LQG:** Al dar click en éste botón se accederá a la siguiente ventana el cual se podrá diseñar el control LQG para la turbina eólica.
2. **Abrir control LQG:** Al dar click en éste botón se puede ingresar los datos de un diseño que se haya desarrollado en esta herramienta en una localización del PC donde se haya guardado.
3. **Finalizar:** Con éste botón podrá salir de la herramienta gráfica.
4. **Acerca de:** Nombre y Autores del proyecto.



Figura 45. Parámetros del algoritmo genético en la herramienta gráfica (Fuente: Autores.)

1. **Set point:** Ajuste de los parámetros del set point, tanto de la potencia activa, reactiva y velocidad de la turbina.
2. **Parámetros del algoritmo genético:** Se asignarán cada uno de los parámetros para el algoritmo genético.
3. **Parámetros de entrenamiento:** Se ingresarán los datos de simulación tanto el tiempo como el paso y velocidad media del viento, además del índice de desempeño deseado.
4. **Iniciar:** Empieza a entrenar el algoritmo genético para encontrar el mejor controlador.
5. **Resultados parciales:** La herramienta ira mostrando cual el valor Fitness y la generación actual.

6. **Convergencia del algoritmo:** Visualización de la convergencia del algoritmo, muestra todos los posibles valores Fitness que el algoritmo ha encontrado durante el proceso.
7. **Resultado:** Muestra el tiempo de simulación y el valor Fitness encontrado.
8. **Ver matrices:** Visualización de las matrices del controlador, que obtuvo el algoritmo genético, abrirá una nueva ventana el cual nos mostrará los resultados.



Figura 46. Matrices desarrolladas por el algoritmo genético en la herramienta gráfica (Fuente: Autores.)

Hay tres criterios de parada, el cual el algoritmo define que tipo de criterio se escogió para terminar.

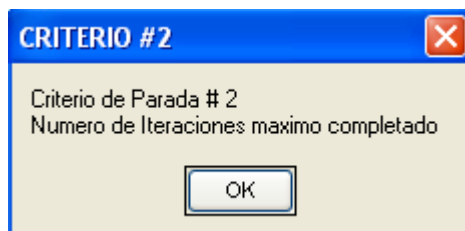


Figura 47. Ventana de visualización del criterio de parada (Fuente: Autores.)

9. Evaluar control: En esta ventana se podrá evaluar el control completo, se observarán tipos de índices, el comportamiento tanto de las salidas como de los errores y los actuadores y se podrán cambiar cada uno de los parámetros de simulación y se podrán exportar las graficas para su respectiva evaluación.

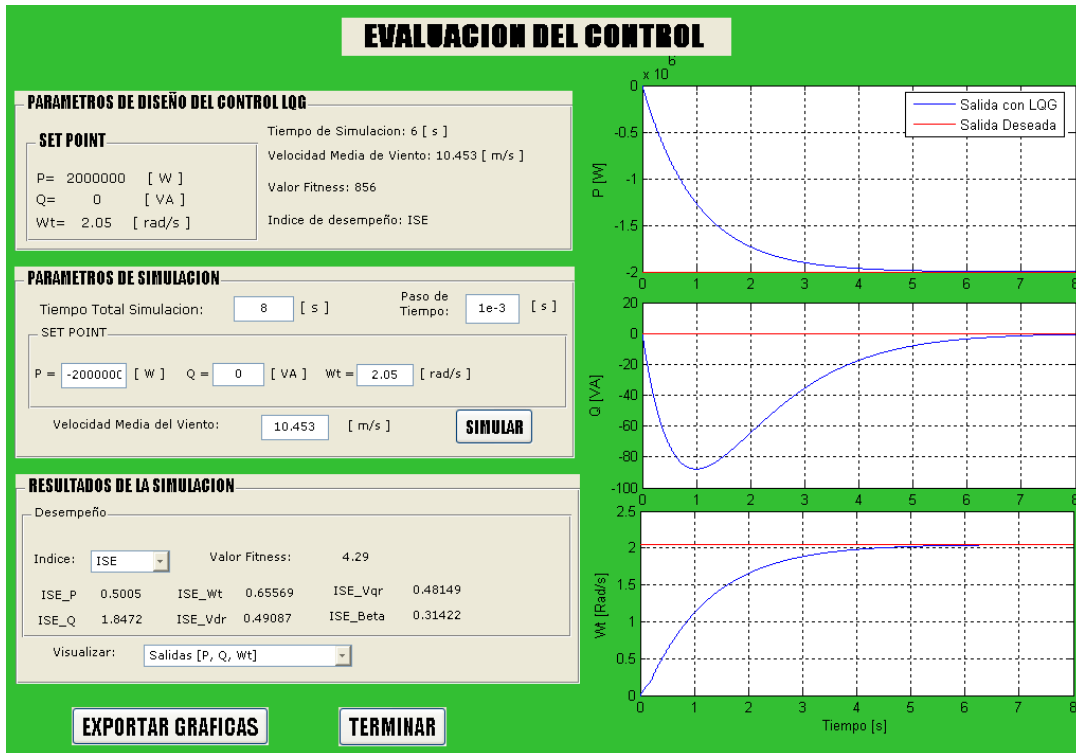


Figura 48. Ventana gráfica para evaluación del control LQG (Fuente: Autores.)

10. Exportar gráfica: Exporta la grafica de la convergencia del algoritmo.

11. Guardar: Guarda todos los resultados del algoritmo para después evaluarlo.

12. Terminar: Regresa a la ventana inicial.

Anexo I: Resultados numéricos del diseño LQG

	SIN ACCIÓN INTEGRAL	CON ACCIÓN INTEGRAL	DISEÑO CON EL ALGORITMO GENÉTICO
V. FITNESS	47.395	4.9005	4.426
ISE P	7.8945	0.5318	0.5010
ISE Q	11.8542	1.9484	1.8481
ISE Wt	8.4521	0.6001	0.5243
ISE Vdr	8.4751	0.6214	0.5429
ISE Vqr	7.5421	0.5907	0.5097
ISE Beta	3.4519	0.5985	0.4998
V. FITNESS	45.12	4.875	4.1807
ITSE P	7.5213	0.3158	0.2502
ITSE Q	9.4512	2.9458	2.773
ITSE Wt	7.4512	0.2748	0.2390
ITSE Vdr	6.4521	0.35012	0.3015
ITSE Vqr	7.4589	0.3215	0.2912
ITSE Beta	7.0213	0.6589	0.3254
V. FITNESS	58.134	7.352	7.818
IAE P	9.6845	0.8562	1.0009
IAE Q	15.423	2.4562	2.711
IAE Wt	8.2365	0.8452	0.9727
IAE Vdr	8.2351	0.9852	1.062
IAE Vqr	8.4521	0.8452	1.028
IAE Beta	9.2546	1.5987	1.041
V. FITNESS	70.123	14.985	10.577
ITAE P	11.2352	1.3205	0.997
ITAE Q	17.4521	7.1234	5.366
ITAE Wt	10.2356	1.0023	0.873
ITAE Vdr	10.4562	1.3256	1.099
ITAE Vqr	10.4978	1.3145	1.084
ITAE Beta	9.2748	2.9845	1.156

**Tabla 5. Resultados numéricos rendimiento del diseño LQG
(Fuente: Autores.)**