

**DISEÑO DE UN CONTROLADOR ROBUSTO QFT PARA EL
CONTROL DE POTENCIA ACTIVA GENERADA Y VELOCIDAD DE
ROTACIÓN DE UNA TURBINA EÓLICA**

LAURA MERCEDES TULCÁN CAMACHO

LEONEL CALDERÓN SUPELANO

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

2016

**DISEÑO DE UN CONTROLADOR ROBUSTO QFT PARA EL
CONTROL DE POTENCIA ACTIVA GENERADA Y VELOCIDAD DE
ROTACIÓN DE UNA TURBINA EÓLICA**

LAURA MERCEDES TULCÁN CAMACHO

LEONEL CALDERÓN SUPELANO

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director:

JOSÉ JORGE CARREÑO ZAGARRA Ph.D(c).

Co-Director:

RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016**

A mis padres Ángel Miguel Calderón Velandia y Cristina Supelano Monsalve por ser un apoyo incondicional en la parte moral y económica durante mi formación académica.

A mis hermanos, demás familia y amigos que me brindaron su apoyo para el desarrollo de esta tesis.

A los asesores José Jorge Carreño Zagarra y Rodolfo Villamizar Mejía que con sus indicaciones y consejos nos guiaron amablemente en el desarrollo de este trabajo de grado.

A la universidad Industrial de Santander por permitirme esta valiosa oportunidad de formarme como profesional.

Leonel Calderón Supelano.

A Dios, por darme un alma luchadora, permitiéndome vencer cada obstáculo que se presenta en mi vida.

A mi hermosa e inteligente madre: Herminia Camacho Ardila y a mi perseverante y dedicado padre: Jaime Tulcán Lozada, que con su amor, apoyo constante y paciencia variante, me han enseñado que en la vida todo se consigue con esfuerzo.

Para toda mi familia y amigos cercanos, con los cuales he compartido maravillosos momentos de mi vida ayudándome a crecer como ser humano.

Y a la persona más importante que hay en mi vida, mi abuelita: Mercedes Ardila Villarreal, sin duda ejemplo de alegría, vida, devoción y que con todas sus virtudes y consejos, me ha alentado a seguir adelante, como buenas Santandereanas que somos.

Laura Mercedes Tulcán Camacho.

“Y al que no se le aguaron los ojos escribiendo la dedicatoria, está mintiendo”

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	16
CAPÍTULO 1	18
1. 1 DESCRIPCIÓN GENERAL	18
1. 2 ALCANCE	19
1. 3 OBJETIVOS DEL PROYECTO	20
1. 4 JUSTIFICACIÓN	20
1. 5 ANTECEDENTES.....	21
1. 5. 1 Antecedentes de sistemas controlados mediante la técnica QFT.....	21
1. 5. 2 Antecedentes de sistemas de aerogeneradores controlados con diversas técnicas.....	23
CAPÍTULO 2.....	25
2. 1 ENERGÍA EÓLICA EN COLOMBIA	25
2. 2 CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES	26
2. 2. 1 Aerogeneradores de eje vertical	26
2. 2. 2 Aerogeneradores de eje horizontal	28
2. 3 PARTES DE UN AEROGENERADOR TRIPALA.....	29
2. 4 TURBINAS EÓLICAS DE VELOCIDAD VARIABLE	32
CAPÍTULO 3.....	33
3. 1 MODELO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO	33
3. 1. 1 Modelo de la velocidad del viento	33
3. 1. 2 Modelo aerodinámico de la turbina	36
3. 1. 3 Modelo del sistema mecánico.....	37
3. 1. 4 Modelo generador de inducción doblemente alimentado (DFIG).....	39
CAPÍTULO 4.....	44
4. 1 DINÁMICA DEL SISTEMA PARA UN AEROGENERADOR	44
4. 2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN MATLAB – SIMULINK	46
4. 2. 1 Modelo de la velocidad del viento	46
4. 2. 2 Modelo aerodinámico de la turbina	47
4. 2. 3 Sistema actuador del ángulo de paso del aspa (pitch)	48
4. 2. 4 Modelo del sistema mecánico.....	48
4. 2. 5 Modelo generador de inducción doblemente alimentado (DFIG).....	49

CAPÍTULO 5.....	53
5. 1 DISEÑO DEL CONTROLADOR QFT.....	53
5. 1. 1 Diseño del control para la velocidad mecánica a través del pitch	54
5. 1. 2 Diseño del control para la potencia del DFIG.....	60
5. 1. 3 Diseño del control para la velocidad mecánica a través del torque del generador..	65
 CAPÍTULO 6: RESULTADOS	71
6. 1 RESULTADOS TÉCNICA QFT	71
6. 2. 1 Resultados del control QFT para la velocidad mecánica a través del pitch	71
6. 2. 2 Resultados de control QFT para velocidad mecánica a través del torque del generador..	74
6. 2 RESULTADOS PI – SINTONIZADO EN SIMULINK.....	78
6. 2. 1 Resultados del control PI para la velocidad mecánica a través del pitch ...	78
6. 2. 2 Resultados de control PI para la velocidad mecánica a través del torque del generador.....	81
 CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES	85
 REFERENCIAS	87
 ANEXOS.....	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1. Diagrama de bloques para el desarrollo del proyecto.....</i>	19
<i>Figura 2. De izquierda a derecha esquemas de un aerogenerador de eje vertical savonius, darrieus y giromil.....</i>	27
<i>Figura 3. De izquierda a derecha esquemas de un aerogenerador de eje horizontal monopala, bipala y tripala.</i>	28
<i>Figura 4. Principales partes de un aerogenerador tripala.</i>	30
<i>Figura 5. Esquema implementado para el modelo de la velocidad equivalente del viento.</i>	35
<i>Figura 6. Perfil de la velocidad del viento.</i>	36
<i>Figura 7. Coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \beta)$.</i>	37
<i>Figura 8. Modelo de cuatro masas para el sistema mecánico implementado.....</i>	38
<i>Figura 9. Generador de inducción en el sistema de coordenadas dq0.</i>	41
<i>Figura 10. Diagrama de bloques – Control velocidad mecánica de la turbina.</i>	44
<i>Figura 11. Diagrama de bloques – Control potencia del DFIG.</i>	45
<i>Figura 12. Bloque del modelo de la velocidad del viento – Simulink.....</i>	47
<i>Figura 13. Perfil de velocidad del viento.</i>	47
<i>Figura 14. Bloque del modelo aerodinámico – Simulink.</i>	48
<i>Figura 15. Bloque del modelo para el pitch – Simulink.</i>	48
<i>Figura 16. Bloque del modelo mecánico – Simulink.</i>	49
<i>Figura 17. Bloque del modelo DFIG – Simulink.</i>	49
<i>Figura 18. Diagrama de bloques para modelar el comportamiento de una turbina eólica con DFIG – Alta velocidad.....</i>	50
<i>Figura 19. Diagrama de bloques para modelar el comportamiento de una turbina eólica con DFIG – Baja velocidad.....</i>	50
<i>Figura 20. Diagrama de bloques – Máxima potencia.....</i>	52
<i>Figura 21. Diagrama de bode – Alta velocidad.</i>	55
<i>Figura 22. Coeficientes e incertidumbres de la función de transferencia – Alta velocidad.....</i>	56
<i>Figura 23. Plantillas de la planta para el vector de frecuencia – Alta velocidad.....</i>	57
<i>Figura 24. Especificaciones de estabilidad – Alta velocidad.....</i>	58
<i>Figura 25. Sensibilidad complementaría – Alta velocidad.....</i>	58
<i>Figura 26. Situación L de partida (a), Síntesis del controlador (b) – Alta velocidad.</i>	58
<i>Figura 27. Validación dominio de la frecuencia – Alta velocidad.</i>	59
<i>Figura 28. Validación dominio del tiempo – Alta velocidad.</i>	59
<i>Figura 29. Diagrama de bode – DFIG.....</i>	60
<i>Figura 30. Coeficientes e incertidumbres de la función de transferencia – DFIG. .</i>	61

<i>Figura 31. Plantillas de la planta para el vector de frecuencia – DFIG.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 32. Situación L de partida (a), Síntesis del controlador (b) – DFIG.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 33. Validación dominio de la frecuencia – DFIG.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 34. Validación dominio del tiempo – DFIG.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 35. Diagrama de bode – Baja velocidad.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 36. Coeficientes e incertidumbres de la función de transferencia – Baja velocidad.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 37. Plantillas de la planta para el vector de frecuencia – Baja velocidad....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 38. Situación L de partida (a), Síntesis del controlador (b) – Baja velocidad.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 39. Validación dominio de la frecuencia – Baja velocidad.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 40. Validación dominio del tiempo – Baja velocidad.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 41. Velocidad del viento – Alta velocidad.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 42. Ángulo de paso de las aspas – Alta velocidad.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 43. Velocidad de rotación de la turbina en p.u. – Alta velocidad.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 44. Potencia activa generada en p.u. – Alta velocidad.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 45. Potencia reactiva generada en p.u. – Alta velocidad.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 46. Velocidad del viento – Baja velocidad.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 47. Velocidad de rotación mecánica de la turbina en p.u. – Baja velocidad.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 48. Potencia activa generada en p.u. – Baja velocidad.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 49. Potencia reactiva generada en p.u. – Baja velocidad.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 50. Tensión en el eje directo del rotor – Baja velocidad.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 51. Tensión en el eje de cuadratura del rotor – Baja velocidad.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 52. Ángulo de paso de las aspas – PI.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 53. Velocidad de rotación de la turbina en p.u. – PI.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 54. Potencia activa generada en p.u. – PI.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 55. Potencia reactiva generada en p.u. – PI.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 56. Velocidad del viento – Baja velocidad.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 57. Velocidad de rotación mecánica de la turbina en p.u. – Baja velocidad.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 58. Potencia activa generada en p.u. – Baja velocidad.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 59. Potencia reactiva generada en p.u. – Baja velocidad.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 60. Tensión en el eje directo del rotor – Baja velocidad.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 61. Tensión en el eje de cuadratura del rotor – Baja velocidad.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 62. Modos de operación del DFIG. a) Modo sub-síncrono y b) Modo sobre-síncrono.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 63. Ventana de inicio WQC.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 64. Parámetros – WQC.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 65. Función de transferencia lado de alta– WQC.</i>	<i>102</i>

<i>Figura 66. Función de transferencia lado de baja– WQC.</i>	103
<i>Figura 67. Advertencia cambio de datos.</i>	103
<i>Figura 68. Toolbox QFT.</i>	104
<i>Figura 69. Insertar controladores – WQC lado de baja.</i>	105
<i>Figura 70. Insertar controladores – WQC lado de alta.</i>	105
<i>Figura 71. Advertencia cambio de parámetros.</i>	105
<i>Figura 72. Advertencia cambio de controladores.</i>	106
<i>Figura 73. Resultados lado de baja – WQC.</i>	106
<i>Figura 74. Resultados lado de alta – WQC.</i>	107
<i>Figura 75. Esquema filosofía de la técnica QFT.</i>	108
<i>Figura 76: Estructura genérica de control realimentado – 2DOF.</i>	110
<i>Figura 77. Ejemplo de plantillas y planta nominal.</i>	113
<i>Figura 78. Situación L_o de partida (a), Resultado después de diseñar $G(j\omega)$ (b).</i>	114
<i>Figura 79. Tracking en el dominio de la frecuencia.</i>	116
<i>Figura 80. Tracking en el dominio del tiempo.</i>	116
<i>Figura 81. Diagrama de flujo para el diseño de la técnica QFT.</i>	117
<i>Figura 82. Ventana de inicio de la herramienta QFTCT.</i>	119
<i>Figura 83. Definición de la planta.</i>	120
<i>Figura 84. Templates (Plantillas).</i>	121
<i>Figura 85. Specifications window (Ventana de especificaciones).</i>	122
<i>Figura 86. Bounds (Contornos).</i>	123
<i>Figura 87. Controller design (Diseño del controlador).</i>	124
<i>Figura 88. Prefilter design en el dominio de la frecuencia.</i>	127
<i>Figura 89. Prefilter design en el dominio del tiempo.</i>	128
<i>Figura 90. Analysis (Análisis de respuestas).</i>	128

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Valor de k y p para tres valores distintos de velocidades del viento – Alta velocidad.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 2. Valor de k y z para tres valores distintos de velocidades del viento – Baja velocidad.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 3. Valor de p para tres valores distintos de velocidades del viento – Baja velocidad.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 4. Especificaciones técnicas – turbina NM 2000/82.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 5. Parámetros eléctricos – Generador DFIG 2MW.</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 6. Aporte de las dinámicas de control.</i>	<i>125</i>

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<i>ANEXO A: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS– TURBINA NM 2000/82.....</i>	<i>91</i>
<i>ANEXO B: LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA.....</i>	<i>93</i>
<i>ANEXO C: MANUAL DE USUARIO – WQC.....</i>	<i>99</i>
<i>ANEXO D: DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA QFT.....</i>	<i>108</i>
<i>ANEXO E: MANUAL DE USUARIO – QFTCT.....</i>	<i>118</i>

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN CONTROLADOR ROBUSTO QFT PARA EL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA GENERADA Y VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UNA TURBINA EÓLICA*.

AUTORES: Laura Mercedes Tulcán Camacho**.
Leonel Calderón Supelano**.

PALABRAS CLAVE:

Energía eólica, Control de turbinas eólicas, Control robusto, Teoría de la realimentación cuantitativa QFT, DFIG.

CONTENIDO:

Uno de los métodos propuestos para disminuir el efecto invernadero y contrarrestar el avance del cambio climático, es sustituir poco a poco las energías suministradas mediante combustibles fósiles, por las energías renovables, proporcionando electricidad generada gracias a los recursos naturales, como el sol y el viento, disminuyendo la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera.

Los sistemas de generación eólica buscan proporcionar grandes cantidades de energía eléctrica, sin embargo, son sistemas no lineales con dinámica multivariable, expuestos a fuertes perturbaciones externas e incertidumbre generada al momento de modelarlo.

Por las razones anteriores, se diseña un controlador robusto mediante la teoría de realimentación cuantitativa QFT (*Quantitative Feedback Theory*), basado en el dominio de la frecuencia, para regular la potencia generada y la velocidad de una turbina eólica, dependiendo de la velocidad del viento para la cual se diseñe y se vaya a implementar, para así cumplir con el objetivo de mejorar la robustez del sistema.

El desempeño del controlador propuesto es analizado mediante la herramienta-software *Wind QFT Controller (WQC)*, creada por los autores del proyecto. Los resultados de simulación muestran que el esquema de control funciona de manera óptima frente a fuertes perturbaciones del viento, dinámicas no modeladas o despreciadas debido al proceso de linealización e incertidumbre en los parámetros del modelo.

*Trabajo de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: José Jorge Carreño Zagarra Ph.D (c). Co-Director: Rodolfo Villamizar Mejía Ph.D.

SUMMARY

TITLE: DESIGN OF A ROBUST QFT CONTROLLER FOR CONTROLLING THE GENERATED ACTIVE POWER AND ROTATION SPEED OF A WIND TURBINE*.

AUTHORS: Laura Mercedes Tulcán Camacho**.
Leonel Calderón Supelano**.

KEYWORDS:

Wind turbine control, Wind power, Robust control, Quantitative feedback theory QFT, DFIG.

CONTENT:

A proposed method to reduce the greenhouse effect and counter the advance of climate change, is eliminate gradually the energy supplied by fossil fuels, to renewable energy, providing electricity generated by natural resources such as sun and wind, decreasing the emission of carbon dioxide into the atmosphere.

Wind generation systems look for provide big quantities of electricity, however, are nonlinear systems with multivariable dynamics, exposed to external disturbances and uncertainty.

For these reasons, a robust controller is designed using the quantitative feedback theory (QFT), based on the frequency domain, to regulate the generated power and the speed of a wind turbine, depending of the wind speed used for design and implement it. The main goal is improving the robustness of the system.

The performance of the proposed controller is analyzed by *WQC* tool-software, created by the authors of the project. Simulation results show that the control scheme works in an ideal way when it is exposed to powerful disturbances of the wind, unmodeled dynamics or despised due to the process of linearization and uncertainty in model parameters.

*Research work.

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical Engineering, Electronic and Telecommunications. Director: José Jorge Carreño Zagarra Ph.D(c). Co-Director: Rodolfo Villamizar Mejía Ph.D.

INTRODUCCIÓN

Las energías renovables han aumentado su auge en la actualidad, puesto que prometen generar energía más limpia, inagotable, eficiente y que a diferencia de las energías a base de combustibles fósiles, no contribuyen al aumento de emisión de dióxido de carbono en la atmósfera, aportando de esta manera a la disminución del efecto invernadero y el cambio climático.

La energía eólica tuvo un gran avance e implementación a comienzos del siglo XXI, dichos sistemas de generación son un ejemplo del aprovechamiento de los recursos naturales para obtener energía eléctrica. Su funcionamiento consiste en transformar el potencial del aire en torque rotacional, el cual acoplado a un generador produce energía eléctrica.

Dado que el comportamiento del viento es inestable respecto al tiempo y la dinámica de un aerogenerador se comporta de forma no lineal y multivariable, con fuertes perturbaciones, diversas restricciones y acoplamiento dinámico entre sus variables, se hace necesario el uso de sistemas de control robusto para turbinas eólicas, con el fin de monitorear y controlar la velocidad de rotación del eje y la potencia generada por la turbina, en presencia de los factores ya mencionados¹.

La implementación de aerogeneradores de velocidad variable permite extraer la máxima energía eléctrica posible a bajas velocidades del viento y mantener la generación en sus valores nominales en presencia de fuertes corrientes de aire. Para esto se requiere el uso de controladores complejos con el fin de mantener el sistema operando en los puntos de máxima eficiencia, regulando la velocidad angular de la turbina y la potencia generada².

En este trabajo de grado se pretende diseñar un controlador robusto, basado en la teoría de la realimentación cuantitativa (QFT) para mejorar la robustez de un sistema eólico, simulando el comportamiento de un aerogenerador, teniendo como variables manipulables el ángulo de paso del viento y la tensión en el eje director y de cuadratura del rotor, y como variables de control la velocidad del rotor de la turbina y la potencia generada.

La técnica de control QFT, se define como un método de ingeniería de control basado en el dominio de la frecuencia, que propone explícitamente el uso de la

¹GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

²RAMIREZ MORENO, Gerson y CASTELLANOS LAMUS Alonso. Desarrollo de una herramienta de diseño automático de reguladores LQG para turbinas eólicas de velocidad variable. Trabajo de grado (Ingeniería electrónica). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías físico-mecánicas, 2008. 94p.

realimentación para reducir simultáneamente los efectos de la incertidumbre de la planta y satisfacer las especificaciones de comportamiento deseadas³.

Se implementaron modelos para asemejar el sistema a la realidad de la velocidad del viento, aerodinámica de la turbina, sistema actuador del ángulo de paso del aspa, sistema mecánico y del generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) en la herramienta de diseño automático *WQC*, creada por los autores de este proyecto, con el fin de facilitar el cálculo de la función de transferencia característica de la planta, para así obtener y analizar el comportamiento del sistema una vez se diseñe el controlador.

³MUÑOZ MANSILLA, Rocío. Control multivariable mediante técnicas QFT. Aplicaciones a sistemas navales. Tesis doctoral. Madrid. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Departamento de informática y automática, 2007. 320p.

CAPÍTULO 1

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

En esta sección se efectúa una revisión bibliográfica del control de turbinas eólicas de velocidad variable y se selecciona los modelos matemáticos que describen la dinámica de las mismas, para obtener una representación en variables de estado e implementar un esquema en el software Matlab-Simulink.

A partir de lo anterior, se realiza un análisis de la técnica de control avanzado QFT (por sus siglas en inglés: Quantitative Feedback Theory) y posteriormente una revisión bibliográfica acerca de su aplicación en los sistemas dinámicos, para evidenciar la evolución del controlador diseñado mediante dicha técnica.

Una vez asegurado el óptimo funcionamiento en sistemas dinámicos complejos como el estudiado por Park, Hong y Sunwoo⁴, la tesis doctoral de Rocío Muñoz M sobre aplicaciones de QFT en sistemas navales⁵, las investigaciones de Egaña y su equipo acerca de QFT en un helicóptero de tres grados de libertad⁶, entre otros trabajos, se procede a realizar el diseño del controlador siguiendo los pasos descritos en la tesis doctoral de Montserrat Gil Martínez⁷ y se lleva al modelo del aerogenerador implementado en el software anteriormente mencionado.

Después de implementar el controlador, se evalúa el comportamiento del sistema teniendo en cuenta sus condiciones óptimas de desempeño en potencia generada y velocidad rotacional, en presencia de incertidumbre en el modelo y perturbaciones externas. Además se compara con el desempeño obtenido usando un control PI sintonizado mediante Matlab-Simulink.

En la *figura 1* se muestra el diagrama a seguir para el desarrollo de este proyecto.

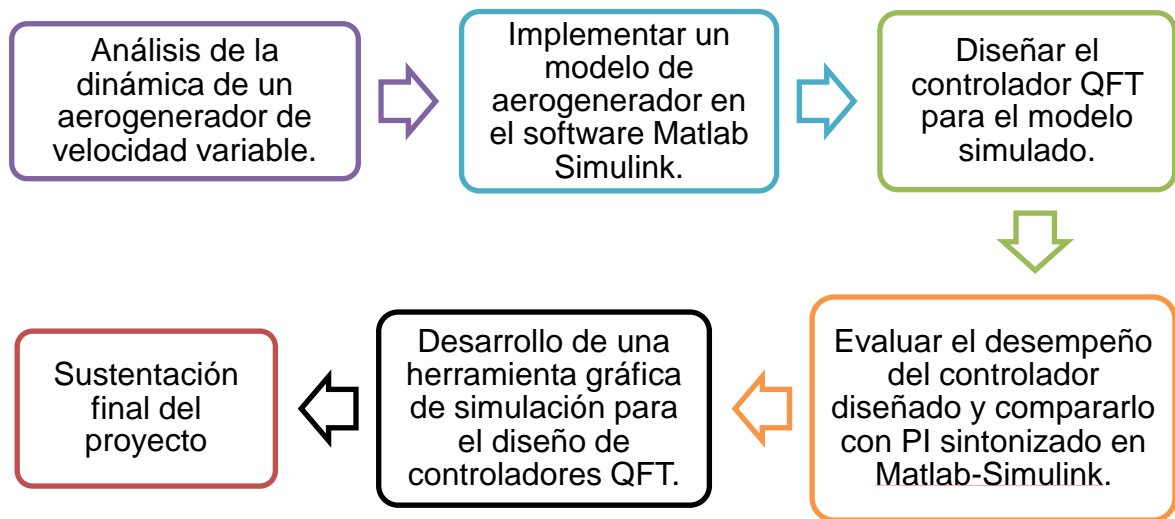
⁴PARK, Inseok; HONG, Seungwoo y SUNWOO, MyoungHo. Robust Air-to-Fuel Ratio and Boost Pressure Controller Design for the EGR and VGT Systems Using Quantitative Feedback Theory. *En: IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Noviembre, 2014.vol. 22, no. 6, p. 2218- 2231.

⁵ MUÑOZ MANSILLA, Rocío. Control multivariable mediante técnicas QFT: Aplicaciones a sistemas navales. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia. Departamento de informática y automática, 2007. 320p.

⁶ EGAÑA, Igor, *et al.* Control robusto QFT de un helicóptero de 3 GDL. *En: Seminario anual de automática y electrónica industrial (septiembre 1998)*. Pamplona, España. Departamento de Automática y Computación, Campus de Arrosadía, 1998. P 59-62.

⁷ GIL MARTÍNEZ, Montserrat. Síntesis de controladores robustos mediante el análisis de la compatibilidad de especificaciones incertidumbre. Tesis doctoral. Pamplona: Universidad Pública de Navarra. Departamento de Automática y Computación, 2001. 462p.

Figura 1. Diagrama de bloques para el desarrollo del proyecto.



1.2 ALCANCE

Con base en el modelo dinámico e incertidumbre en los parámetros obtenidos en el proceso de linealización, se diseñará el controlador aplicando la estrategia de control robusto QFT de forma que garantice el cumplimiento de especificaciones como: estabilidad robusta, reducción de la sensibilidad, limitación del esfuerzo de control y seguimiento de la referencia.

Una vez obtenido el diseño del controlador para el sistema, mediante la herramienta-software *WQC*, creada por los autores de este proyecto, se verifica su desempeño en un aerogenerador de velocidad variable. Con el fin de realizar un análisis detallado del funcionamiento se utiliza una representación aproximado del viento y su interacción con el sistema eólico.

Luego se comparará con un controlador PI sintonizado mediante Simulink, para analizar los resultados de simulación con los obtenidos usando la técnica QFT, permitiendo identificar y comprobar la garantía de usar un controlador robusto multivariable en un sistema con incertidumbre en los parámetros y perturbaciones externas como lo es el sistema de generación de energía eólica.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación es esencial relacionar las variables de entrada del sistema (tensiones en el rotor del DFIG, ángulo de paso de las aspas y velocidad del viento) con el controlador a diseñar para cada caso de estudio, con el fin de obtener los resultados deseados en las salidas (Potencia generada y velocidad de rotación de la turbina).

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo general de este proyecto es mejorar la robustez de un sistema de generación eólico a partir del control diseñado con la técnica QFT (Quantitative Feedback Theory), para mantener sus condiciones óptimas de desempeño en potencia generada y velocidad rotacional, en presencia de la incertidumbre propia del modelo y las perturbaciones externas.

En cumplimiento al objetivo general, el trabajo de grado posee los siguientes objetivos específicos:

- Simular en Matlab-Simulink el comportamiento del modelo que describe un aerogenerador para analizar la respuesta del sistema en presencia de la incertidumbre paramétrica y las perturbaciones externas.
- Diseñar un controlador robusto mediante la técnica de la realimentación cuantitativa, para controlar la velocidad de rotación de los álabes (ω_t) y la potencia generada (P_g) en presencia de incertidumbre y perturbaciones.
- Comparar los resultados de simulación con los obtenidos al utilizar un control PI sintonizado en Matlab-Simulink.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Actualmente la crisis ambiental del planeta (Contaminación, calentamiento global, emisión de gases de efecto invernadero, entre otros inconvenientes) exige sistemas de generación que satisfagan la creciente demanda energética, pero que en lo posible no perjudiquen el medio ambiente. De ahí surge la idea del uso de energías renovables, que aumentan su auge con mayor rapidez e innovación. En particular la energía eólica es un claro ejemplo del avance en tecnologías, para los procesos de producción de energía eléctrica. Por ello se realiza el presente estudio, que de una u otra forma aporta a este campo de investigación.

Partiendo que para mejorar la eficiencia de aerogeneradores es conveniente controlar variables como la velocidad de rotación del eje y la potencia generada, a partir de las entradas tensión en el rotor del DFIG y ángulo de paso de las aspas. Para ello es necesario modificar el modo de operación de la turbina eólica convencional, agregando controladores robustos que garantizan la operación en un punto óptimo, lo cual permite el funcionamiento del sistema a velocidades variables y mejora la eficiencia del mismo. Estas modificaciones se diseñan con miras a extraer la máxima energía eléctrica en sistemas eólicos, operando a diversas velocidades de giro y manteniendo el aerogenerador en el punto de operación nominal cuando se presentan fuertes variaciones del viento sin sufrir averías en la estructura.

La idea de este proyecto de grado surge con la intención de optimizar el rendimiento de un sistema de generación eólico, en función del diseño de un controlador robusto multivariable para una turbina eólica, usando la técnica de control *Quantitative Feedback Theory (QFT)* por sus siglas en inglés.

1.5 ANTECEDENTES

La siguiente sección presenta algunos artículos y tesis de pregrado, maestría y doctorado, publicados en orden cronológico, donde se muestra diferentes técnicas de control para aerogeneradores y la implementación de la técnica de control QFT en sistemas no lineales, multivariables y con grandes perturbaciones, todos ellos han alcanzado los objetivos planteados en cuanto a mejorar la velocidad de respuesta, cumplir las especificaciones deseadas y seguir con precisión la referencia.

1.5.1 Antecedentes de sistemas controlados mediante la técnica QFT

En el año de 1998 se implementó la técnica de control robusto QFT, en un prototipo de helicóptero de laboratorio de tres grados de libertad, según el artículo titulado "*Control Robusto QFT de un Helicóptero de 3 GDL*"⁸, el esquema de control está compuesto por tres lazos, dos en cascada donde se gobierna el avance del helicóptero, mediante el ángulo de pitch y otro independiente para la elevación. Los resultados experimentales del controlador robusto, cumplieron satisfactoriamente con las especificaciones de estabilidad robusta, reducción de la sensibilidad, limitación del esfuerzo de control y seguimiento de la referencia.

Con el objetivo de rechazar el efecto de las perturbaciones mecánicas de un interferómetro óptico, se publica en el año 2004 el artículo "*Aplicación de la técnica de la QFT para el control activo de las perturbaciones mecánicas en un interferómetro óptico*"⁹, donde se diseña un control *PI* mediante la técnica QFT, logrando reducir el efecto de las perturbaciones mecánicas, como vibraciones o turbulencias atmosféricas, en un factor de 1/50 (equivalente a -34 dB) para un rango de frecuencias que oscilan entre 0.5 Hz y 1.4 Hz.

Tres años después con el fin de resolver y estudiar el posicionamiento dinámico de una plataforma marina fondeada, la estabilidad de un buque de alta velocidad,

⁸EGAÑA, Igor, *et al.* Control robusto QFT de un helicóptero de 3 GDL. En: Seminario Anual de Automática y Electrónica Industrial (septiembre: Pamplona, España). Departamento de Automática y Computación, Campus de Arrosadía, 1998. p. 59- 62.

⁹COMASÓLIVAS, Ramón; ESCOBET, Teresa y QUEVEDO, Joseba. Aplicación de la técnica de la QFT para el control activo de las perturbaciones mecánicas en un interferómetro óptico. En: Sistemas, Cibernética e Informática. 2004. vol. 1, no 1.

y el seguimiento de referencia para un aerodeslizador se implementa la técnica de la realimentación cuantitativa, en la tesis doctoral titulada “*Control multivariable mediante técnicas QFT. Aplicaciones a sistemas navales*”¹⁰, demostrando que los diseños de control con QFT implementados, son una elección efectiva, dado que se consigue un monitoreo robusto, disminuyendo el efecto de las perturbaciones ambientales y aumentando la velocidad de la respuesta y precisión en el seguimiento.

Se ha seguido implementando la técnica de control QFT en los últimos años, con la finalidad de abordar y solucionar problemas en la industria, producidos por perturbaciones externas e incertidumbre en los parámetros de los sistemas. Un antecedente clave es el artículo “*Vibration control of 3P(S)4 class parallel mechanisms for high speed applications using Quantitative Feedback Design*”¹¹ publicado en septiembre de 2014, donde se consigue controlar en un 72% más rápido el tiempo de estabilización, comparado con el control PID, de las vibraciones a altas velocidades producidas por la baja inercia y alta rigidez de los manipuladores paralelos.

En el mismo año, se publicó “*Development of robust Quantitative Feedback Theory controller for Quanser bench-top helicopter*”¹², en el cual se controla satisfactoriamente el ángulo de paso, del helicóptero bench-top a escala de laboratorio con tres grados de libertad, mejorando el rendimiento en comparación con el controlador proporcional integral derivativo (PID).

El diseño de control, propuesto por “*Real time implementation of robust QFT controller and prefilter for magnetic levitation system*”¹³ hace un año, plantea que a pesar de las incertidumbres, inestabilidad, perturbaciones externas y no linealidades que existe en el sistema de levitación magnética, se logra cumplir con las sólidas especificaciones de estabilidad, seguimiento a la referencia y rendimiento para el cual fue planteado el control. Lo anterior se comprueba en el software experimental “*Educational Control Product Magnetic Levitation – ECP 730*” diseñado por los mismo autores.

Con el fin de perpetuar en la actualidad la implementación de la técnica de control QFT en diversos sistemas no lineales, donde las perturbaciones y la variación de los parámetros tienen una fuerte influencia en la velocidad de respuesta y el

¹⁰ MUÑOZ MANSILLA, Rocio. Control multivariable mediante técnicas QFT. Aplicaciones a sistemas navales. Tesis doctoral. Madrid. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Departamento de informática y automática, 2007. 320p.

¹¹ AVCI, Ebubekir, *et al.* Vibration control of 3P(S) 4 class parallel mechanisms for high speed applicatios using Quantitative Feedback Design. En: RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (14-18, septiembre, 2014: Chicago, Estados Unidos). IEEE. 2014. p. 5.

¹² SAIFUL YAZAN, Siti, *et al.* Development of robust Quantitative Feedback Theory controller for Quanser bench-top helicopter. En: Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA) (25-25, noviembre, 2014: Kuala Lumpur). International Conference IEEE. 2014. p. 4.

¹³ PATIL, Mukesh, *et al.* Real time implementation of robust QFT controller and prefilter for magnetic levitation system. En: Industrial Instrumentation and Control (ICIC) (28-30, mayo, 2015: Pune). International Conference IEEE. 2015. p. 703-708.

óptimo seguimiento de la referencia, en este proyecto de grado se ha optado por aplicar dicha técnica de control robusto en turbinas eólicas, con el objetivo de monitorear y controlar la velocidad de rotación del eje y la potencia generada por la turbina, teniendo como variables manipulables el ángulo de paso del viento y el torque de referencia del generador.

De esta manera se busca continuar con la investigación del artículo "*Beyond the linear limitations by combining switching and QFT: Application to wind turbines pitch control systems*"¹⁴ publicado en el 2009, donde se diseña una familia de controladores robustos, basados en la teoría de la realimentación cuantitativa, con el fin de manipular el ángulo de paso, optimizando el rendimiento y disminuyendo la fatiga mecánica.

1. 5. 2 Antecedentes de sistemas de aerogeneradores controlados con diversas técnicas

La mayor parte de los artículos relacionados con la mejora del rendimiento de un sistema de generación eólico, dan solución a esta situación por medio de la sintonización de un controlador robusto multivariable, que permite el funcionamiento óptimo considerando la no linealidad del modelo, fuertes perturbaciones externas, diversas restricciones y gran interacción entre sus variables. A continuación se describen algunas investigaciones en las cuales se ha basado este proyecto.

En la literatura se encuentran diversas investigaciones con respecto al diseño de controladores para turbinas eólicas, obteniendo muy buenos resultados en el comportamiento del sistema. Una de dichas investigaciones fue desarrollada por el *Ingeniero Hernando González y el Doctor Hermann Vargas*¹⁵ en 2008, cuyos autores realizan una comparación entre tres tipos de controladores diseñados cada uno con estrategias de control diferentes (clásica PI, la técnica H_{∞} y LQG). Para regular la potencia activa y reactiva suministrada por el generador a la red, se emplea el control por orientación del flujo del estator y para regular la velocidad de la turbina, un sistema de control por ángulo de paso. Los resultados obtenidos permiten concluir que el uso de técnicas de control robusto (H_{∞}) responde de forma óptima ante variaciones de la velocidad del viento.

La estrategia de control LQG (Linear-Quadratic-Gaussian) en la tesis de pregrado "*Desarrollo de una herramienta de diseño automático de reguladores LQG para*

¹⁴ GARCÍA SANZ, Mario y ELSO, Jorge. Beyond the linear limitations by combining switching and QFT: Application to wind turbines pitch control systems. *En*: International journal of robust and nonlinear control. 2009. p. 40-58.

¹⁵ GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

*turbinas de velocidad variable*¹⁶, presentó resultados favorables en cuanto a criterios de optimización de las variables conjuntas, aunque para mejorar el seguimiento de la turbina eólica respecto de las referencias deseadas, los autores argumentaron la necesidad de agregar un complemento integral.

En el año 2010, se publicó el artículo titulado "*Control multivariable centralizado con desacoplo para aerogeneradores de velocidad variable*"¹⁷, el cual se basa en controladores PID con diseños de tipo descentralizado, centralizado con diversas redes de desacoplo y un esquema con cuatro PI, obteniendo así que el comportamiento del sistema más cercano al deseado, se presentó usando la última técnica de control mencionada.

Un modelo de controlador PID basado en el método de Ziegler-Nichols se describe en "*Pitch control for variable speed wind turbines*"¹⁸, el cual da como resultado, que al ajustar adecuadamente las ganancias del controlador, según la propuesta, se garantiza la consecución de una convergencia rápida al punto de ajuste de potencia extraída con el mínimo de fluctuaciones incluso en condiciones de viento extremas.

Cada uno de los modelos mencionados, desde los primeros controladores tradicionales, hasta los controladores robustos diseñados actualmente para aerogeneradores, contribuye a la mejora de la eficiencia y el buen funcionamiento del sistema.

Para el modelo matemático se toma como referencia los trabajos¹⁹ quienes describen en forma detallada el comportamiento del sistema, considerando la aerodinámica de las aspas de la hélice, las fuerzas del mecanismo de la turbina, aspectos eléctricos del generador y presentan un modelo adicional para describir los cambios en la velocidad del viento.

¹⁶RAMÍREZ MORENO, Gerson y CASTELLANOS LAMUS, Alonso. Desarrollo de una herramienta de diseño automático de reguladores LQG para turbinas eólicas de velocidad variable. Trabajo de grado (Ingeniería electrónica). Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 100p.

¹⁷ GONZÁLEZ, Miguel; VÁZQUEZ, Francisco y MORILLA, Fernando. Control multivariable centralizado con desacoplo para aerogeneradores de velocidad variable, España. En: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Octubre, 2010, vol. 7, no 4, p. 53-64.

¹⁸ROUSSOS, A.; NTAMPASI, V. y KOSMIDOU, O. Pitch control for variable speed wind turbines. En: 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (14-18, septiembre, 2014: Chicago, Estados Unidos). SCITEPRESS. 2013. p. 43-49.

¹⁹ VÁSQUEZ, W. y JÁTIVA, J. Modelación, simulación y control de aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado utilizando Matlab. En: Revista técnica Energía. 2014, no 11, p. 143-152.

CAPÍTULO 2

2.1 ENERGÍA EÓLICA EN COLOMBIA

Las energías renovables han aumentado su auge en la actualidad, puesto que prometen generar energía más limpia, inagotable, eficiente y no contaminante ayudando a reducir la emisión de gases de efecto invernadero, la explotación indebida de los recursos naturales por la mano del hombre y la producción de energía a base de combustibles fósiles.

El viento según el *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM)*, se define como el movimiento de aire causado por el calentamiento diferencial de la superficie terrestre y la atmósfera, debido a los diversos valores de radiación solar sobre distintos puntos de la tierra, presentando variaciones significativas en el tiempo y espacio. Por lo tanto la velocidad es la magnitud que determina la fuerza del vector viento con su respectiva dirección, donde sus parámetros dependen del clima, posición geográfica, estructura topográfica, horario, altura sobre el nivel del mar, entre otros²⁰.

Modelar la velocidad del viento para una zona específica, es un trabajo complejo, dado que este tiene altas variaciones, que dependen de los parámetros mencionados con anterioridad. La verificación de dicho comportamiento en Colombia está a cargo del IDEAM, este tiene estaciones de medición del viento en puntos estratégicos del país, donde los anemómetros miden y grafican continuamente las características vectoriales del viento²¹.

Con los datos que registran las diferentes estaciones, se evalúa el potencial energético del recurso eólico con el mérito de impulsar la implementación de producción de energía eólica en Colombia, como se expresa en el *Plan de Expansión de Referencia Generación Transmisión 2014-2028* de la *Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)*, que promueve en el plazo de 2019-2028 la capacidad instalada de 474 MW provenientes de fuentes eólicas, con el fin de desplazar y remplazar la generación térmica convencional²².

Las generalidades presentadas en el Atlas del Viento del IDEAM, expresan un potencial eólico en el país superior a 5 m/s persistente a lo largo del año en la península de la Guajira, Isla de San Andrés, sectores de Boyacá, principalmente en el municipio de Gachaneca y Galerazamba ubicado en el centro del litoral

²⁰ Marco conceptual. En: Atlas del viento y energía eólica en Colombia. IDEAM. 2006.

²¹ Anexo 2: Medición, procesamiento de la información y red de estaciones que miden viento en Colombia. En: Atlas del viento y energía eólica en Colombia. IDEAM. 2006.

²² Plan de expansión de referencia generación transmisión 2014-2028. UPME. 2015.

Caribe en el departamento de Bolívar. Velocidades del viento persistentes entre 4 m/s y 5 m/s se ubican en La Legiosa (Huila), isla de Providencia (Mar Caribe) y Riohacha (La Guajira)²³.

El primer parque eólico construido en Colombia recibe el nombre de *Jepirachi*, que significa en Wayuunaiki (lengua nativa Wayuu) “*Vientos del nordeste en dirección al Cabo de la Vela*”. Entró en operación comercial el 19 de abril de 2004, tiene una capacidad instalada actualmente de 19.5 MW, con 15 aerogeneradores Nordex N60/250 – 1300kW cada uno.

Bucaramanga geográficamente se encuentra en 7° 08' de latitud norte y 73° 08' de longitud oeste, sus vientos proceden en una gran mayoría del norte y nororiente de la ciudad, con una velocidad promedio menor a los 2 m/s, sin embargo, en las zonas vecinas al Aeropuerto Internacional Palonegro (Lebrija - Santander) el viento proviene de la dirección noroccidente y presenta velocidades un poco más altas. Acá se recomienda realizar un estudio del potencial eólico y posteriormente aprovechar el recurso para la generación de energía eólica, preferiblemente con aerogeneradores que tengan una velocidad inicial menor a 2 m/s²⁴.

2. 2 CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES

La energía eólica tuvo un gran avance e implementación a comienzos del siglo XXI, aunque en sus inicios se utilizaba para mover embarcaciones y aspas de molinos. Dicha forma de generación transforma la energía cinética del viento, en energía mecánica por medio del movimiento de las aspas y la caja de velocidades de la turbina eólica, el cual hace girar el rotor de un generador, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Los aerogeneradores se pueden clasificar dependiendo del eje del rotor, ya sea de eje vertical u horizontal.

2. 2. 1 Aerogeneradores de eje vertical

Estos aerogeneradores, como lo dice su clasificación, tienen el rotor en el eje vertical, esta característica hace que no necesiten un sistema para orientarse según la dirección del viento, ya que tiene la libertad de moverse y poder generar en cualquier trayectoria. Otra de sus ventajas es su fácil instalación y mantenimiento de la parte eléctrica y mecánica, puesto que el generador eléctrico, la caja multiplicadora y el mecanismo de control, van instaladas al nivel del suelo.

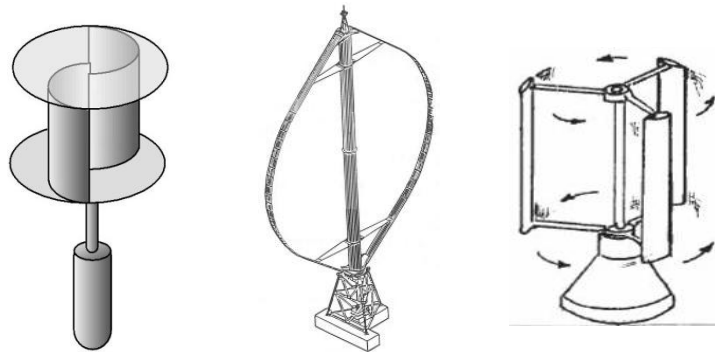
²³Generalidades. En: Atlas del viento y energía eólica en Colombia. IDEAM. 2006.

²⁴VERGARA BARRIOS, Pedro Pablo, *et al.* Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia. En: UIS Ingenierías. Julio-diciembre, 2014, vol. 13, no 2, p. 49-57.

Lastimosamente su desventaja más significativa radica en que la mayoría de aerogeneradores de este tipo necesitan de un sistema externo para arrancar, esto desencadena una baja eficiencia y por lo tanto su uso no es muy común.

En la *figura 2* se muestran tres principales tipos de aerogeneradores de eje vertical. Sus características se describen a continuación:

Figura 2. De izquierda a derecha esquemas de un aerogenerador de eje vertical savonius, darrieus y giromil.



Fuente: Minieólica Lanzarote. Área de energía [en línea]
<http://www.minieolicadelanzarote.com/tecnologia_tipos.php> [Citado 05/06/16].

•**Savonius:** Es el modelo más simple de aerogenerador, construido desde 1922, se emplea generalmente en áreas rurales, está conformado por una esfera hueca partida por mitad y unida a un solo eje vertical, con el objetivo de que la parte cóncava de las aspas empuje el viento y así su parte convexa no oponga mayor resistencia al movimiento.

Aunque el diseño del Savonius tiene como finalidad no oponer resistencia al viento, sigue siendo pesado, por esto, su eficiencia está entre 15% y 25%, generando potencias entre 0,1 y 5 kW.

•**Darrieus:** Es una turbina de generación eólica, construida desde 1931, conformada por dos palas en forma de hojas delgadas, unidas al eje en los extremos con una curva diseñada para optimizar el rendimiento el cual está en un porcentaje de 20% a 35%.

Tiene una velocidad de arranque de 2 m/s, mayor al savonius, aunque a veces necesita de un sistema externo para comenzar a generar, sigue sin alcanzar la potencia de los aerogeneradores con eje horizontal.

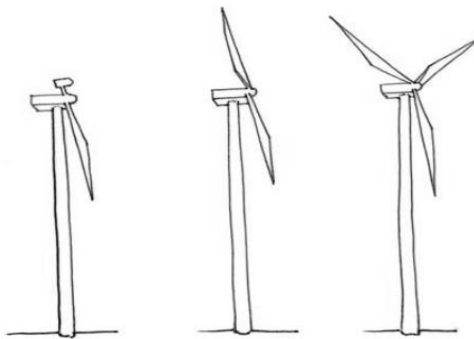
•**Giromill:** Aerogenerador eólico, el cual se utiliza generalmente para el consumo doméstico, está construido con palas verticales unidas al eje mediante unos brazos horizontales, es decir que es la combinación de los diseños Savonius, por su manera de oponer resistencia al viento, y Darrieus, por su posición de eje vertical.

2. 2. 2 Aerogeneradores de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal, son básicamente generadores síncronos de imanes permanentes, son los más utilizados ya que permiten cubrir la demanda de pequeñas potencias, como residencias, y altas potencias, como parques eólicos. Ésta máquina rotacional, transforma de una manera más eficiente la energía cinética en eléctrica a comparación de los aerogeneradores de eje vertical, ya que su diseño de 3 aspas, por lo general, o menos, permite tener un rango de impacto del aspa contra el viento mayor.

La energía que se obtiene mediante aerogeneradores, depende del área barrida por las aspas, la velocidad y densidad del viento, con éstos parámetros se empieza a controlar las variables del ángulo de las aspas, arranque y conexión a la línea de distribución, todos estos controles están por lo general en la base de la torre con el objetivo de tener fácil acceso para el mantenimiento de la parte eléctrica.

Figura 3. De izquierda a derecha esquemas de un aerogenerador de eje horizontal monopala, bipala y tripala.



Fuente: *Energía eólica y territorio*. José Manuel Izquierdo [en línea]
<http://www.ciccp.es/biblio_digital/Urbanismo_1/congreso/pdf/040207.pdf> [Citado 05/06/16].

Los aerogeneradores horizontales se clasifican dependiendo del número de aspas que posea, como se muestra en la *figura 3*, el más utilizado es el tripala, éste consta de tres palas o aspas, colocadas a 120° unas con respecto a otras, con la finalidad de que genere a una velocidad mayor, pero con un giro más suave y

estable a comparación de los de menor número de aspas, esto permite tener una eficiencia mayor con respecto a los otros modelos, ya que está entre un 16% a 41%.

El peso del tripala y su número de aspas, es óptimo ya que a comparación con los de mayor número de palas, éste no pierde su eficiencia por su peso, generando una mayor dificultad para que las aspas muevan el motor, y a diferencia de los de menor número, no disminuye su estabilidad al enfrentar cambios bruscos de dirección y velocidad del viento.

Las torres tubulares, es un aerogenerador que no tiene aspas, consiste en grandes tubos de acero en forma cónico o tubular, que generan energía aprovechando las vibraciones del viento al golpear la estructura. Su instalación requiere de más trabajo y es más costosa con respecto a los otros aerogeneradores, pero ofrece una mayor resistencia y durabilidad necesitando menos mantenimiento.

2.3 PARTES DE UN AEROGENERADOR TRIPALA

En esta parte del capítulo se describirán algunas de las partes más relevantes de un aerogenerador tripala²⁵ mostradas en la *figura 4*, con el fin de entrar en detalle del funcionamiento real de un sistema de generación eólico, usado en este proyecto:

- **Rotor:**

Es la parte externa de la góndola que gira para aprovechar la energía cinética del viento, convirtiéndola en energía mecánica rotacional. Está compuesta por el buje y las palas.

Si se tiene un control de potencia mediante el cambio del ángulo de paso en las palas, el rotor cambia su velocidad de giro para encontrar la situación óptima de generación.

- **Buje:**

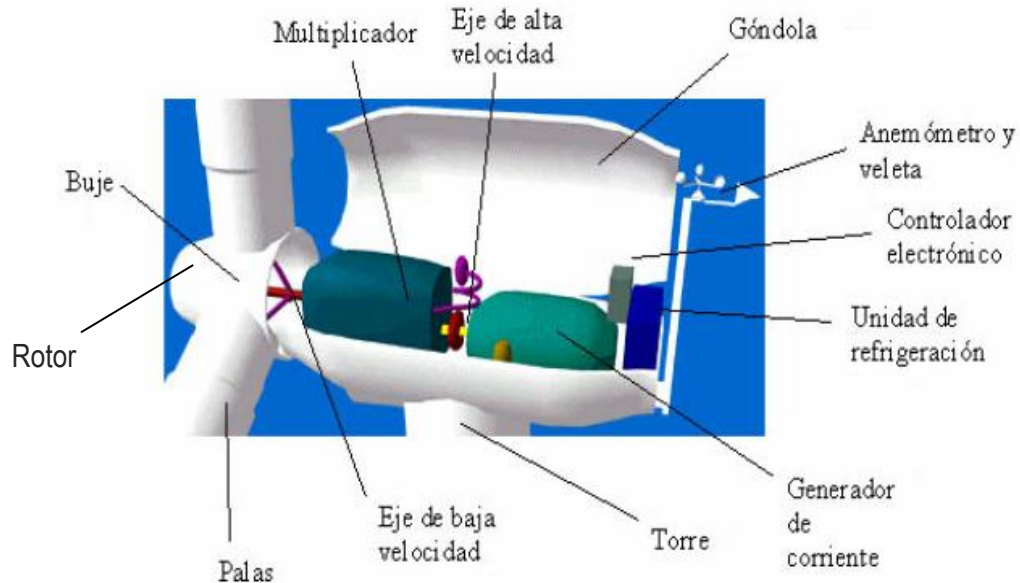
Es el elemento que acopla las palas y el rotor por medio del eje de baja velocidad del aerogenerador.

- **Palas:**

Son elementos con un diseño aerodinámicos que se encargan de capturar la energía del viento, transmitiendo su potencia hacia el buje.

²⁵ SAN ROMÁN, Álvaro. Diseño de un aerogenerador para uso particular. Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Madrid. Universidad Carlos III de Madrid. 2012-2013. 80p.

Figura 4. Principales partes de un aerogenerador tripala.



Fuente: Tecnología-Cardones [en línea]

<<https://tecnologia-cardones.wikispaces.com/1>> [Citado 26/06/16].

- **Eje de baja velocidad:**

Conecta el buje del rotor con el multiplicador y así transmite la energía captada por las palas. También contiene conductos del sistema hidráulico para el funcionamiento de los frenos aerodinámicos, los cuales frenan suavemente y de forma segura el aerogenerador por medio del giro del ángulo de las palas.

- **Multiplicador:**

O caja multiplicadora, cumple la función de aumentar la velocidad de giro del rotor, a la necesaria para que el generador produzca electricidad. Posee una respectiva relación de transformación de velocidad de giro del eje de entrada (lado del rotor) con respecto a la del eje de salida (lado del generador eléctrico, conectado al eje de alta velocidad).

- **Eje de alta velocidad:**

Se encarga del accionamiento del generador eléctrico. Posee freno de disco mecánico de emergencia, en caso de que falle el freno aerodinámico o cuando la turbina entre en mantenimiento.

- **Góndola:**

Contiene en su interior el multiplicador, el generador eléctrico y los demás componentes claves del aerogenerador, protegiéndolos de los daños causados

por la intemperie y aislando acústicamente los ruidos de los componentes de las máquinas, también incorpora las aberturas necesarias para lograr una ventilación efectiva en su interior.

Para el respectivo mantenimiento del aerogenerador, el personal de servicio puede entrar en la góndola por las escaleras ubicadas en la torre de la turbina.

- **Anemómetro y veleta:**

Miden la velocidad y dirección del viento respectivamente, sus señales electrónicas, son enviadas al controlador del aerogenerador el cual controla la potencia generada y al ángulo de paso de las aspas.

- **Controlador electrónico:**

Es un sistema que tiene como función mantener la velocidad de rotación constante para regular y limitar la potencia eólica aprovechada y la potencia generada.

En los casos en que la velocidad del viento es mayor o menor a los valores de fábrica establecidos, el sistema de control acciona el freno aerodinámico o mecánico, dependiendo de la situación, para parar la generación e inyección de potencia y prevenir daños o accidentes.

- **Unidad de refrigeración:**

Se utiliza para enfriar por medio de un ventilador el generador eléctrico para mantenerlo en unas condiciones ambientales óptimas de funcionamiento y contiene una unidad refrigerante por aceite, utilizada para enfriar el aceite de la caja multiplicadora.

- **Generador de corriente:**

También llamado generador eléctrico, su función es convertir la energía mecánica rotacional entregada por el multiplicador, en energía eléctrica. Suele utilizarse un generador asíncrono o de inducción, ya que debe trabajar bajo niveles de cargas fluctuantes debido a la variación en la velocidad del viento.

A su lado se encuentra el módulo de tiristores, encargado del arranque y el acoplamiento suave del generador a la red.

- **Convertidor:**

Cumple el objetivo de inyectar la potencia generada a la red de forma óptima, reduciendo al máximo las fluctuaciones de potencia y las oscilaciones presentadas, a pesar de la operación a velocidad variable del rotor.

- **Torre:**

Se encarga de soportar el peso del rotor y la góndola con sus componentes. En su interior posee escaleras para acceder a la góndola y realizar diversas operaciones como mantenimiento.

2. 4 TURBINAS EÓLICAS DE VELOCIDAD VARIABLE

Los aerogeneradores más comunes son los de eje horizontal con tres aspas, ya que sus perfiles se caracterizan por ser aerodinámicos, permitiendo la mayor captación de viento y por lo tanto obtienen una mayor eficiencia con respecto a los otros aerogeneradores, como se explicó en la sección 2.2 de este libro. Se pueden clasificar en turbinas de velocidad variable y de velocidad fija.

En las turbinas de velocidad fija, se utilizan generadores de inducción, generalmente conectados de forma directa a la red eléctrica y por ello, la velocidad angular del rotor no depende de la velocidad del viento, sino de la frecuencia de la red. El principal inconveniente con este sistema, se presenta cuando la velocidad de rotación del generador no ha superado la velocidad de sincronismo, porque funciona como motor consumiendo potencia y por ende produciendo pérdidas.

En la actualidad el uso de turbinas eólicas de velocidad fija se ha venido sustituyendo por turbinas de velocidad variable, que gracias a la electrónica de potencia el generador puede operar a diferentes velocidades.

Los generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG) son los más empleados en este tipo de sistemas, dado que pueden operar en un rango amplio de velocidades mediante la variación del deslizamiento. Por esa razón la potencia generada y la velocidad angular del rotor, depende directamente de la velocidad del viento incidente, haciendo que este tipo de turbinas sean más eficientes que las de velocidad fija para velocidades del viento bajas (velocidades del viento menores a la nominal de la turbina eólica).

Los DFIG tienen el bobinado del estator conectado de forma directa y constante a la red de frecuencia mediante un sistema de engranajes, este inyecta corrientes trifásicas de amplitud, fase y frecuencia variable, permitiendo controlar la potencia activa y reactiva, eliminando los compensadores que requieren las turbinas de velocidad fija.²⁶

²⁶RAMIREZ MORENO, Gerson y CASTELLANOS LAMUS Alonso. Desarrollo de una herramienta de diseño automático de reguladores LQG para turbinas eólicas de velocidad variable. Trabajo de grado (Ingeniería electrónica). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías físico-mecánicas, 2008. 94p.

CAPÍTULO 3

3. 1 **MODELO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO**

Un sistema de generación eólico consiste en una entrada de energía cinética proveniente del viento, la cual se convierte en energía mecánica de rotación mediante el rotor de la turbina eólica y con la acción de un generador acoplado al eje de forma directa o a través de una caja de engranajes se obtiene finalmente energía eléctrica. Para describir la dinámica de dicho sistema, se emplean los siguientes modelos matemáticos: modelo para la velocidad del viento, modelo aerodinámico, modelo de la caja multiplicadora y modelo del generador eléctrico.

3. 1. 1 **Modelo de la velocidad del viento**

Para que sea posible evaluar la estrategia de control propuesta, se requiere un modelo que se asemeje al comportamiento real de la velocidad del viento. En este proyecto el viento se describe como una combinación de efectos estocásticos o aleatorios, causados por la turbulencia y efectos determinísticos representados por un perfil promedio de la velocidad del viento.

El efecto determinístico del viento que actúa sobre el área del rotor, se asume constante durante un periodo de diez minutos y el efecto estocástico se refiere a las variaciones del viento durante este tiempo, siendo válido únicamente para periodos cortos, ya que para periodos prolongados existen otras variaciones lentas en la velocidad media del viento, debido a los cambios atmosféricos²⁷.

La ecuación (3.1) describe el fenómeno de la turbulencia, basada en el espectro de Kaimal, el cual se aproxima a datos empíricos obtenidos de las observaciones atmosféricas²⁸, y en la expresión matemática (3.3) se muestra la desviación estándar, dependiendo de la intensidad y la velocidad media del viento.

²⁷USCÁTEGUI CRISTANCHO, Omar y PRADA PARRA, Dario. Modelado y simulación del sistema mecánico de un generador eólico de eje horizontal con tres palas. Trabajo de grado (Ingeniería mecánica). Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. 2007. 197p.

²⁸ GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

$$S(f) = \frac{\sigma^2 L_t}{2v_m \left(1 + \frac{3}{2} \frac{L_t}{v_m} f_t\right)^{5/3}} \quad (3.1)$$

$$L_t(z) = \begin{cases} 20z, & z < 20 \text{ m} \\ 600, & z \geq 20 \text{ m} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\sigma = I v_m \quad (3.3)$$

Dónde

f_t : Frecuencia de la turbina [Hz].

L_t : Longitud de la escala de la turbulencia [m].

z : Altura de la torre [m].

σ : Desviación estándar de la velocidad del viento [m/s].

σ^2 : Varianza [m^2/s^2].

I : Intensidad de la turbulencia en porcentaje.

v_m : Velocidad media del viento [m/s] a la altura del buje de un aerogenerador.

La componente estocástica de la velocidad del viento, se puede simular en el dominio del tiempo empleando un generador de ruido blanco, seguido de un filtro análogo (3.4), cuya densidad espectral de potencia se aproxima a la del filtro de Kaimal. Con lo anterior se obtiene el espectro de la turbulencia en un punto fijo sobre el área del rotor.

$$H(s) = \sigma \sqrt{\frac{L_t}{v_m} \frac{0.0182c^2s^2 + 1.3653cs + 0.9846}{1.3463c^2s^2 + 3.7593cs + 1}} \quad (3.4)$$

$$c = \frac{L_t}{2\pi v_m} \quad (3.5)$$

Dado que en una turbina eólica de tres aspas perfectamente espaciadas, se ha demostrado que las componentes de turbulencia que generan fluctuaciones en el torque aerodinámico, son los armónicos de tercer orden con frecuencia

fundamental igual a la velocidad de giro del rotor²⁹, se hace necesario el uso de la función de transformación de Sorensen que convierte la turbulencia de un punto fijo sobre el área del rotor en turbulencia rotacional. Dicha transformada se expresa como funciones de transferencia en la ecuación (3.6) para el armónico cero y (3.7) para el tercer armónico.

$$H_{v0}(s) = \frac{4.78689 d_{TF} s + 0.9904}{7.6823 d_{TF}^2 s^2 + 7.3518 d_{TF} s + 1} \quad (3.6)$$

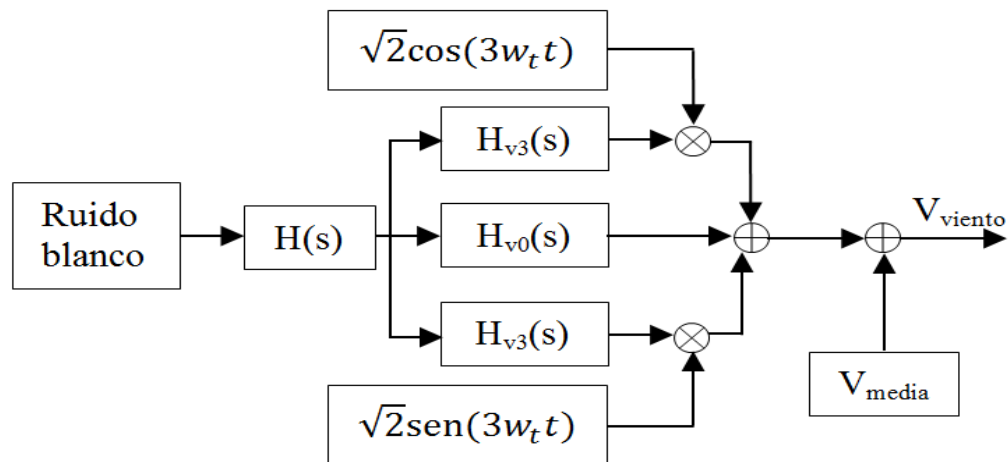
$$H_{v3}(s) = \frac{0.2766 d_{TF} s + 0.0307}{0.3691 d_{TF}^2 s^2 + 1.7722 d_{TF} s + 1} \quad (3.7)$$

$$d_{TF} = \frac{R}{v_m} \quad (3.8)$$

Siendo R el radio del rotor de la turbina [m].

En la *figura 5* se muestra el esquema usado en este proyecto del modelo de la velocidad equivalente del viento vista desde una pala rotando³⁰.

Figura 5. Esquema implementado para el modelo de la velocidad equivalente del viento.

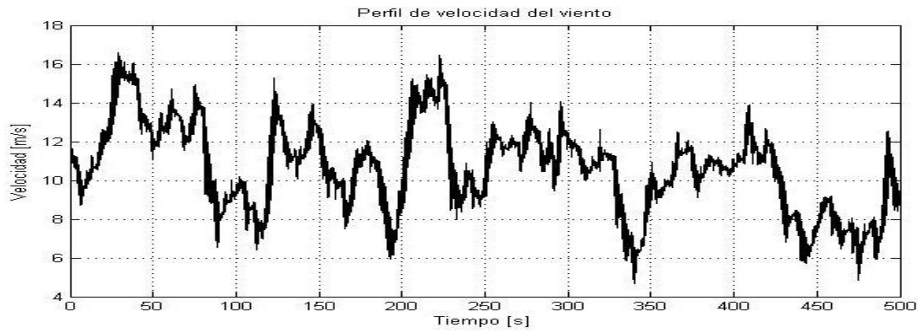


²⁹ GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

³⁰ VÁSQUEZ, W y JÁTIVA, J. Modelación, simulación y control de aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentando utilizando Matlab. En: Revista técnica Energía. 2014. no 11, p. 143-152.

Utilizando $L= 600[m]$, $v_m= 11[m/s]$, $R= 35[m]$, intensidad de turbulencia del 20% y velocidad rotacional del rotor de $2.6765 [rad/s]$, se obtuvo la *figura 6*, donde se observa la variación de la velocidad del viento con el tiempo:

Figura 6. Perfil de la velocidad del viento.



3. 1. 2 Modelo aerodinámico de la turbina

El torque generado por la fuerza del viento depende directamente de las características aerodinámicas de la hélice, donde intervienen factores como: la forma, tamaño y orientación de las aspas, la densidad, la velocidad y dirección del viento. La ecuación (3.9) determina el par aerodinámico T_{Aer} , en función de ρ que corresponde a la densidad del aire, v la velocidad equivalente del viento, β el ángulo de paso de las aspas, λ la velocidad específica de la punta del aspa y $C_p(\lambda, \beta)$ el coeficiente de potencia.

$$T_{Aer} = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} * \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \quad (3.9)$$

El máximo valor teórico de C_p es de 0.593 que corresponde al límite de Betz. Dicho coeficiente depende del diseño aerodinámico de la turbina y es inferior al máximo, por motivo de imperfecciones en el diseño y pérdidas por carga aerodinámica. Según la tesis de maestría del Ingeniero Hernando Gonzales Acevedo³¹ se han desarrollado varias aproximaciones numéricas para obtener el coeficiente de potencia, como la mostrada en la expresión (3.10).

³¹GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

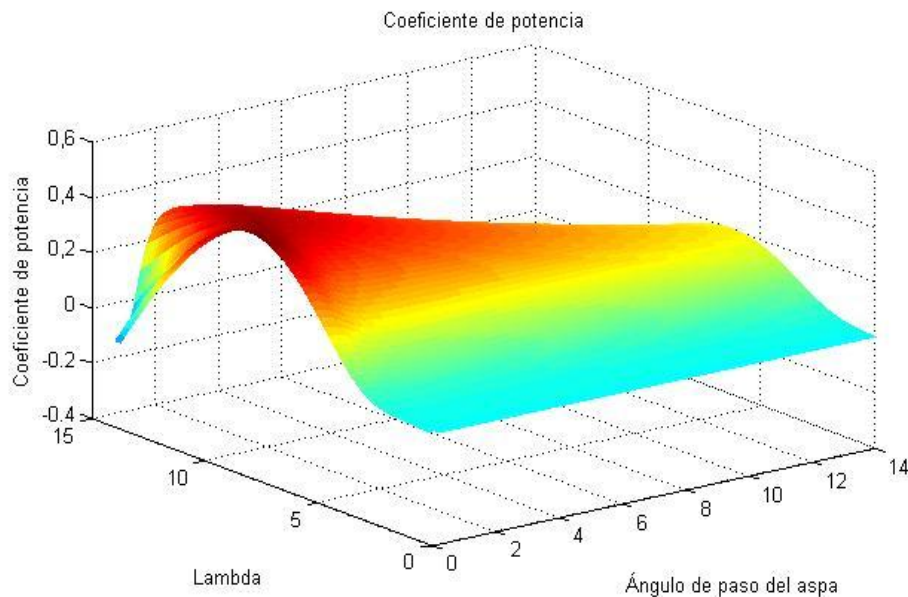
$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda}} + 0.0068\lambda \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.11)$$

$$\lambda = \frac{w_t R}{v} \quad (3.12)$$

En la *figura 7* se observa una representación gráfica del coeficiente de potencia C_p (λ , β) para la aproximación numérica anterior.

Figura 7. Coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \beta)$.

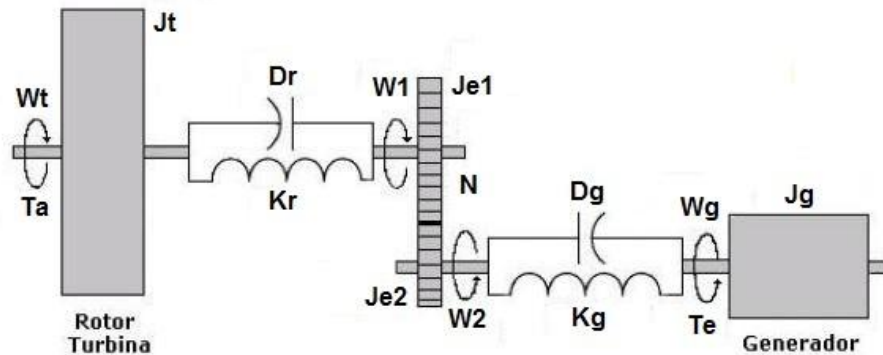


3. 1. 3 Modelo del sistema mecánico

El modelo del sistema mecánico de un aerogenerador, tiene como propósito describir el funcionamiento de la transmisión mecánica a partir de una formulación matemática más sencilla, pero con alto grado de precisión y similitud con el sistema real. Para nuestro análisis, es necesario tener en cuenta las partes de la turbina que pueden llegar a transmitir grandes oscilaciones en la potencia generada como las aspas, la caja multiplicadora, el eje de alta y de baja velocidad.

Existen varios modelos diferentes para la transmisión mecánica³², cada uno con diferente grado de aproximación al sistema real, dependiendo de la complejidad de cada modelo. El modelo mecánico para este trabajo se puede ver en la *figura 8* y consta de cuatro masas rotando (rotor, engranaje del eje de baja, engranaje del eje de alta y generador) teniendo en cuenta coeficientes de amortiguamiento y rigidez para los dos ejes y despreciando pérdidas por fricción viscosa en los cojinetes. En el *anexo A* se muestran los valores de las especificaciones técnicas de la turbina NM 2000/82 utilizados para modelar el sistema mecánico y eléctrico

Figura 8. Modelo de cuatro masas para el sistema mecánico implementado.



Fuente: González Hernando. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico.

Las ecuaciones dinámicas para este sistema se presentan a continuación.

$$J_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_a - D_r(\omega_t - \omega_1) - Q_r \quad (3.13)$$

$$J_{e1} \frac{d\omega_1}{dt} = D_r(\omega_t - \omega_1) + Q_r - T_1 \quad (3.14)$$

$$J_{e2} \frac{d\omega_2}{dt} = T_2 - D_g(\omega_2 - \omega_g) - Q_g \quad (3.15)$$

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = D_g(\omega_2 - \omega_g) + Q_g - T_e \quad (3.16)$$

$$\frac{dQ_r}{dt} = K_r(\omega_t - \omega_1) \quad (3.17)$$

$$\frac{dQ_g}{dt} = K_g(\omega_2 - \omega_g) \quad (3.18)$$

³²USCÁTEGUI CRISTANCHO, Omar y PRADA PARRA, Dario. Modelado y simulación del sistema mecánico de un generador eólico de eje horizontal con tres palas. Trabajo de grado (Ingeniería mecánica). Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. 2007. 197p.

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = N \quad (3.19)$$

$$\tau \frac{d\beta}{dt} = \beta_{ref} - \beta \quad (3.20)$$

Dónde:

T_a : Par aerodinámico [Nm].

T_e : Par electromagnético producido por el generador de inducción [Nm].

ω_t : Velocidad de rotación mecánica de la turbina [rpm].

ω_g : Velocidad de rotación del generador [rpm].

ω_1 : Velocidad de rotación del engranaje de baja velocidad [rpm].

ω_2 : Velocidad de rotación del engranaje de alta velocidad [rpm].

D_r : Coeficiente de amortiguamiento del eje de baja velocidad [$Nm.s/rad$].

D_g : Coeficiente de amortiguamiento del eje de alta velocidad [$Nm.s/rad$].

N : Relación de engranes de la caja multiplicadora.

K_r : Coeficiente de rigidez del eje de baja velocidad [Nm/rad].

K_g : Coeficiente de rigidez del eje de alta velocidad [Nm/rad].

J_r : Momento de inercia de las aspas y el buje [$Kg.m^2$].

J_g : Momento de inercia del generador [$Kg.m^2$].

J_{e1} : Momento de inercia de los engranes de baja velocidad de la caja multiplicadora [$Kg.m^2$].

J_{e2} : Momento de inercia de los engranes de alta velocidad de la caja multiplicadora [$Kg.m^2$].

Q_r : Par de reacción debido a la rigidez del eje de baja velocidad [Nm].

Q_g : Par de reacción debido a la rigidez del eje de alta velocidad [Nm].

β : Ángulo de paso de las aspas.

3. 1. 4 Modelo generador de inducción doblemente alimentado (DFIG)

El uso de generadores de inducción doblemente alimentados para aplicaciones en turbinas eólicas de velocidad variable, permite que el convertidor no maneje la potencia total del sistema, sino tan solo una fracción de la misma (entre 20% y

30%). Por tanto el costo del convertidor y las perdidas disminuyen, comparado con uno que tenga que manejar la potencia total.

Las ecuaciones que describen la dinámica de una máquina de inducción se pueden presentar en el marco de referencia ABC/abc o en el sistema $dq0$. Para obtener un modelo matemático invariante en el tiempo y simplificado, para nuestros intereses se ha tenido en cuenta la teoría propuesta por R.H. Park.

- **Sistema de ecuaciones en el marco $dq0$**

Para estudiar la máquina de inducción se prefiere modelarla como un sistema de coordenadas que rote a la velocidad de sincronismo ω_s , como se implementa en la Transformada de Park, para ello se elige dos ejes, el eje directo d y el de cuadratura q , donde el eje q se asume noventa grados adelante del eje d en la dirección de rotación del sistema tal como lo muestra la figura a continuación.

La matriz de transformación de las corrientes del estator a los ejes d y q se obtiene con las ecuaciones a continuación.

$$I_{ds} = \frac{2}{3} \left[I_A \cos(\omega_s t) + I_B \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_C \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (3.21)$$

$$I_{qs} = -\frac{2}{3} \left[I_A \sin(\omega_s t) + I_B \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_C \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (3.22)$$

La transformada inversa al sistema ABC se obtiene de la siguiente manera (3.23) (3.24) (3.25):

$$I_A = I_{ds} \cos(\omega_s t) - I_{qs} \sin(\omega_s t) \quad (3.23)$$

$$I_B = I_{ds} \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qs} \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.24)$$

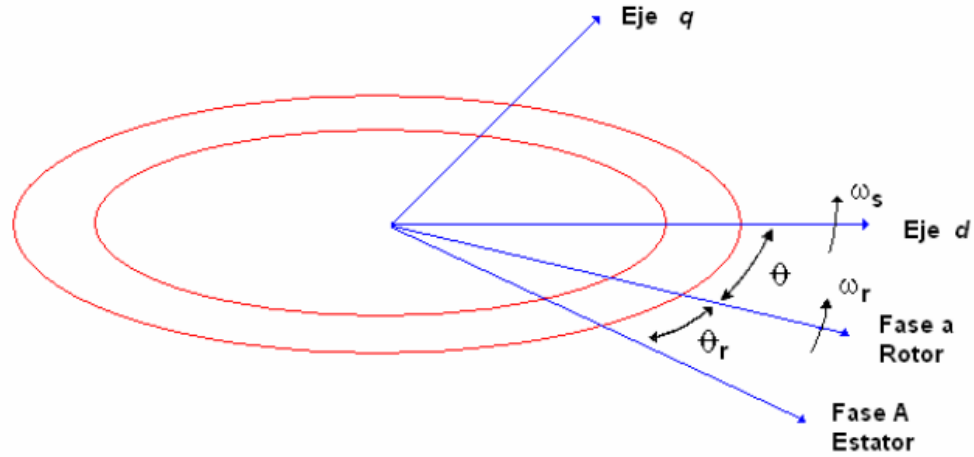
$$I_C = I_{ds} \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qs} \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.25)$$

La transformada para la corriente del rotor está definida por las ecuaciones (3.26) (3.27):

$$I_{dr} = \frac{2}{3} \left[I_a \cos(\theta) + I_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (3.26)$$

$$I_{qr} = -\frac{2}{3} \left[I_a \sin(\theta) + I_b \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (3.27)$$

Figura 9. Generador de inducción en el sistema de coordenadas dq0.



Fuente: González Hernando. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico.

Dónde:

I_{ds} : Corriente del estator en el sistema $dq0$ – eje d .

I_{qs} : Corriente del estator en el sistema $dq0$ – eje q .

I_{dr} : Corriente del rotor en el sistema $dq0$ – eje d .

I_{qr} : Corriente del rotor en el sistema $dq0$ – eje q .

θ : Ángulo de adelanto del eje d con respecto a la fase a del rotor *figura9*.

θ_r : Ángulo de adelanto del eje de la fase a del rotor respecto a la fase A del estator.

$$\theta = \omega_s t - \theta_r \quad (3.28)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (3.29)$$

La transformada inversa en términos de está dada por (3.30) (3.31) (3.32):

$$I_a = I_{dr} \cos(\theta) - I_{qr} \sin(\theta) \quad (3.30)$$

$$I_b = I_{dr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qr} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.31)$$

$$I_c = I_{dr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) - I_{qr} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.32)$$

Al aplicar la transformada de Park para calcular las ecuaciones de la tensión del bobinado del estator y rotor se obtiene (3.33):

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[\Psi] + [\Omega][\Psi] \quad (3.33)$$

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

Dónde:

$\Psi = [\Psi_{ds} \Psi_{qs} \Psi_{dr} \Psi_{qr}]^T$: Vector de flujo en cada uno de los ejes

$I = [I_{ds} I_{qs} I_{dr} I_{qr}]^T$: Vector de corrientes.

$V = [V_{ds} V_{qs} V_{dr} V_{qr}]^T$: Vector de tensiones.

El flujo se relaciona con la corriente como lo muestra la ecuación (3.34). Si se toman las corrientes como variables de estado³³ la dinámica de la máquina de inducción está dada por las ecuaciones a continuación:

$$[\Psi] = [L][I] \quad (3.34)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{rr} & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} L_{ss} &= L_s + L_m \\ L_{rr} &= L_r + L_m \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\frac{d}{dt}[I] = -([L]^{-1}[R] + [L]^{-1}[\Omega][L])[I] + [L]^{-1}[V] \quad (3.37)$$

³³GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

$$[L]^{-1} = \frac{1}{L_{rr}L_{ss} - L_m^2} \begin{bmatrix} L_{rr} & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_{rr} & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_{ss} & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_f L_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (3.39)$$

$$S = P_{act} + jQ_{rea} = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) + j \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \quad (3.40)$$

Dónde:

L_s : Inductancia del bobinado del estator [mH].

L_r : Inductancia del bobinado del rotor [mH].

L_m : Inductancia mutua [mH].

R_s : Resistencia del bobinado del estator [Ω].

R_r : Resistencia del bobinado del rotor [Ω].

ω_s : Velocidad de sincronismo [rpm].

ω_r : Velocidad eléctrica del rotor [rpm].

P_f : Número de pares de polos.

S : Potencia aparente [VA].

P_{act} : Potencia activa [W].

Q_{rea} : Potencia reactiva [VAR].

CAPÍTULO 4

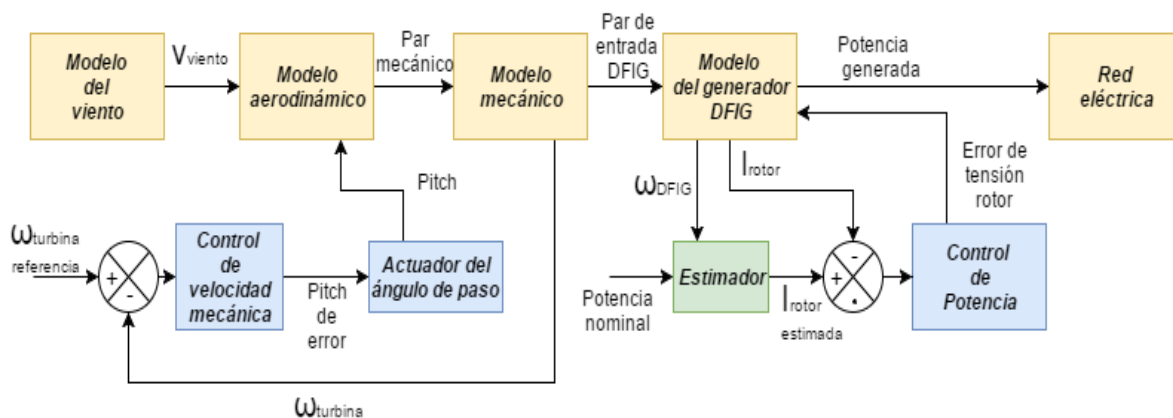
4.1 DINÁMICA DEL SISTEMA PARA UN AEROGENERADOR

El modelado de un aerogenerador está conformado por los siguientes submodelos: modelo del viento, modelo aerodinámico, modelo del sistema mecánico y modelo del generador DFIG, todos ellos conectados finalmente a la red, que para este caso se trabajó con una frecuencia de 50 Hz y una tensión de línea de 450 V.

Cada uno de los bloques representa el comportamiento descrito por las ecuaciones que se especificaron en el *capítulo 3*, las cuales modelan la dinámica del aerogenerador y el sistema de control.

Para controlar un sistema de generación eólico en presencia de velocidades del viento mayores a la velocidad a la cual la turbina genera la potencia nominal, se diseñó el esquema de control mostrado en la *figura 10*, en el cual mediante la manipulación del pitch (β) se busca mantener el aerogenerador en condiciones de operación nominal. la variable de control corresponde a la velocidad de rotación de la turbina (ω_t).

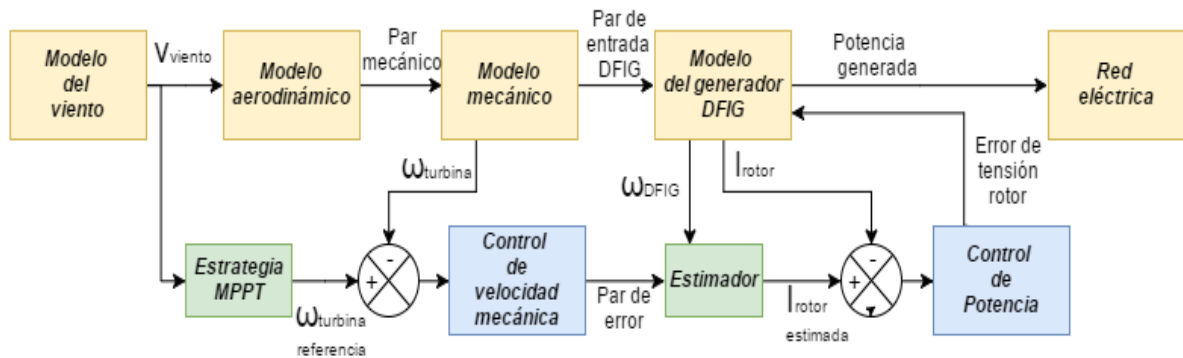
Figura 10. Diagrama de bloques – Control velocidad mecánica de la turbina.



Para velocidades del viento menor a la velocidad de potencia nominal de la turbina, se diseñó un sistema de control, mostrado en la *figura 11*, encargado de seguir la referencia de velocidad rotacional de la turbina.

Para ambos diagramas de control, se sensan las variables del generador *DFIG* (velocidad de rotación de la turbina y corrientes y tensiones del rotor y del estator) con el fin de extraer la máxima potencia. A partir de esta información se genera la acción de control, para la tensión en el eje directo y de cuadratura del rotor (V_{dr} y V_{qr} respectivamente).

Figura 11. Diagrama de bloques – Control potencia del DFIG.



Para extraer la máxima potencia, el torque eléctrico T_g es manipulado por el sistema de control con el fin de conseguir la máxima eficiencia aerodinámica C_{pmax} a bajas velocidad del viento. Esta estrategia tiene como objetivo mantener la relación (λ) entre la velocidad del viento (v) y la velocidad del rotor (ω_t) en un valor óptimo (λ_{opt}), el mayor tiempo posible. Para ello se modifica la velocidad del rotor, cambiando el torque eléctrico, en contra del par mecánico, produciendo así un par de aceleración para seguir los cambios de velocidad del viento y mantener $\lambda = \lambda_{opt}$.

El torque aerodinámico está dado por:

$$T_a = \frac{0.5\rho\pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3}{\omega_t} \quad (4.1)$$

Reemplazando en la ecuación anterior $C_p = C_{pmax}$ y $v = \frac{\omega_t R}{\lambda_{opt}}$ el par eléctrico resultante ecuación (4.2), es el exigido para capturar la máxima potencia en cada velocidad del viento en estado estacionario.

$$T_e = \left(\frac{0.5\rho\pi R^5 C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \right) \omega_t^2 \quad (4.2)$$

Para garantizar el seguimiento óptimo de la velocidad de rotación de referencia, es necesario utilizar un controlador para monitorear la velocidad mecánica de la turbina a partir del torque eléctrico del generador T_e .

La potencia máxima esta dada por la ecuación 4.3:

$$P_{max} = T_e * \omega_g \quad (4.3)$$

A continuación se especifica detalladamente el contenido de cada uno de los bloques del sistema que conforma la planta y en capítulos posteriores se define el sistema de control diseñado.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN MATLAB – SIMULINK

En este capítulo se describen los esquemas implementados en el software Matlab-Simulink del sistema, con el fin de simularlo en función del tiempo y posteriormente probar el desempeño del controlador diseñado comparando los resultados con los obtenidos usando un controladorPI sintonizado.

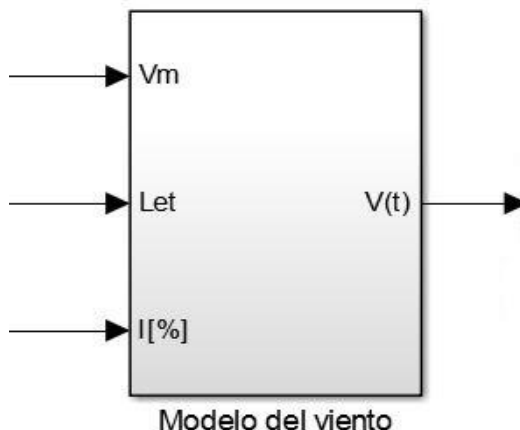
4.2.1 Modelo de la velocidad del viento

El modelo del viento, para interés del proyecto, se compone de la combinación de efectos estocásticos y determinísticos como se mencionó en el contenido. La componente estocástica (turbulencia), está formada por el generador de ruido blanco, seguido de un filtro análogo cuya densidad espectral de potencia se aproxima a la del filtro de Kaimal.

La salida del filtro Kaimal es la entrada a las funciones de transferencia que conforman el fenómeno de muestreo rotacional de turbulencia. La señal obtenida corresponde a la turbulencia del viento, a al cual se le suma la componente determinística que corresponde a un perfil de velocidad promedio.

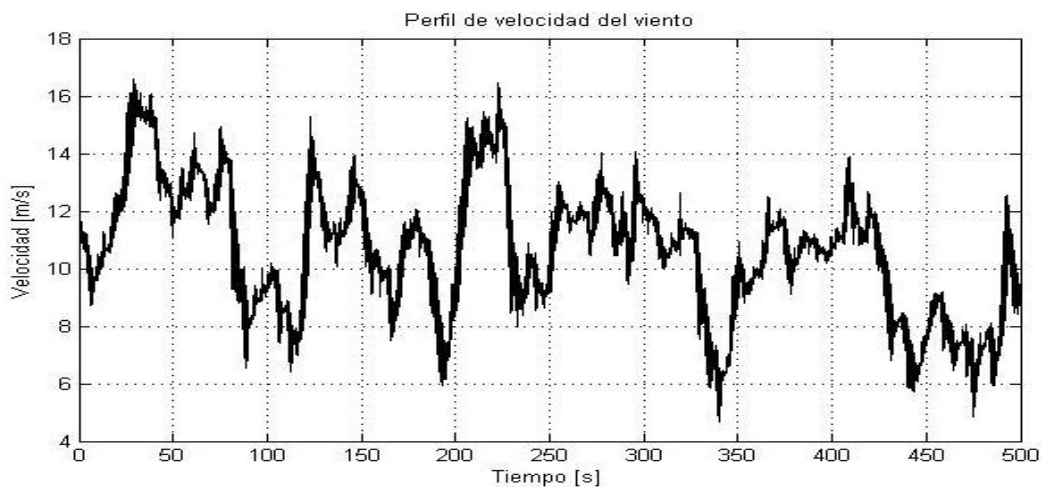
El boque de la *figura 12* obtiene la simulación de la velocidad del viento respecto al tiempo, vista desde las aspas de una turbina rotando. Las entradas mostradas corresponden a la velocidad promedio del viento (V_m), la longitud de escala de la turbulencia (L_e) y la intensidad de la turbulencia (I).

Figura 12. Bloque del modelo de la velocidad del viento – Simulink.



Utilizando $L = 600[m]$, $v_m = 11[m/s]$, $R = 35[m]$, intensidad de turbulencia del 20% y velocidad rotacional del rotor $1.9 [rad/s]$, se obtuvo la *figura 13*, donde se observa la variación de la velocidad del viento con el tiempo:

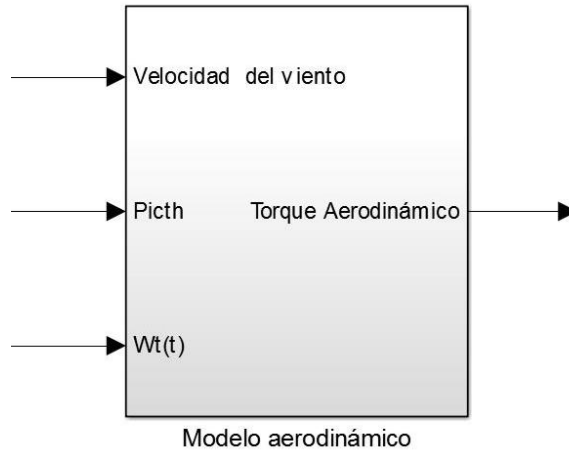
Figura 13. Perfil de velocidad del viento.



4. 2. 2 Modelo aerodinámico de la turbina

El modelo mostrado en la *figura 14*, reúne las características aerodinámicas de la turbina, el cual tiene como entradas el perfil de velocidad del viento, la velocidad de rotación y el ángulo de paso del aspa y la salida corresponde al torque aerodinámico del rotor.

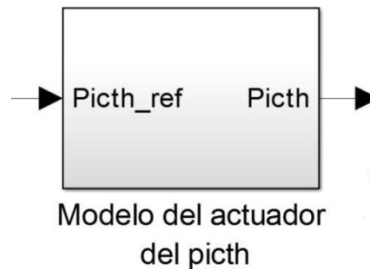
Figura 14. Bloque del modelo aerodinámico – Simulink.



4. 2. 3 Sistema actuador del ángulo de paso del aspa (pitch)

Para modelar el sistema actuador del ángulo de paso, se puede realizar por medio de un sistema de primer orden cuya entrada es la referencia del ángulo de paso y la salida es el valor real de dicha variable *figura 15*.

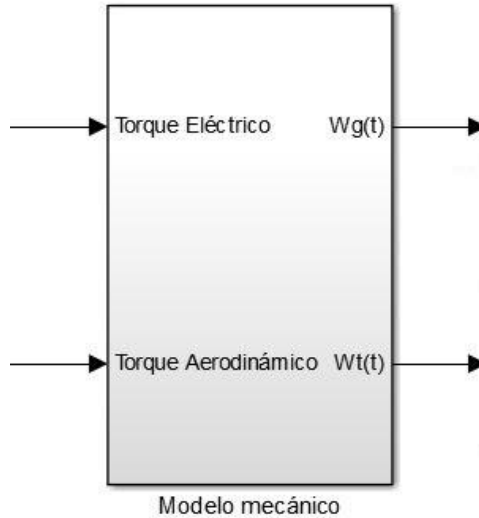
Figura 15. Bloque del modelo para el pitch – Simulink.



4. 2. 4 Modelo del sistema mecánico

El modelo mecánico que representa el bloque de la *figura 16*, consta de cuatro masas rotando (rotor, engranaje del eje de baja, engranaje del eje de alta y generador), teniendo en cuenta coeficientes de amortiguamiento y rigidez para los dos ejes y despreciando pérdidas por fricción viscosa en los cojinetes.

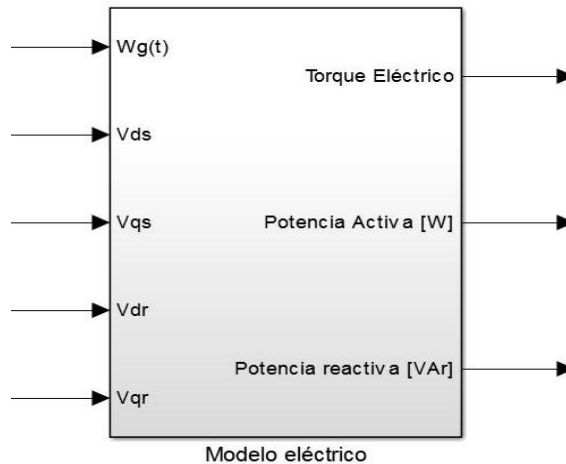
Figura 16. Bloque del modelo mecánico – Simulink.



4. 2. 5 Modelo generador de inducción doblemente alimentado (DFIG)

El bloque para el modelo del generador de inducción doblemente alimentado DFIG *figura 17*, describe su comportamiento en un sistema de referencia $dq0$, que permite obtener un modelo matemático invariante en el tiempo y simplificado. Para ello se tuvo en cuenta la teoría propuesta por R. H. Park.

Figura 17. Bloque del modelo DFIG – Simulink.



Al integrar los bloques mostrados anteriormente se implementa en Simulink, los modelos de control explicados en la sección 4.1, para representar y simular el comportamiento de una turbina eólica de velocidad variable, con generador de inducción doblemente alimentado DFIG, para velocidades del viento mayores a la nominal de la turbina *figura 18*, y menores a la nominal de turbina *figura 19*.

Figura 18. Diagrama de bloques para modelar el comportamiento de una turbina eólica con DFIG – Alta velocidad.

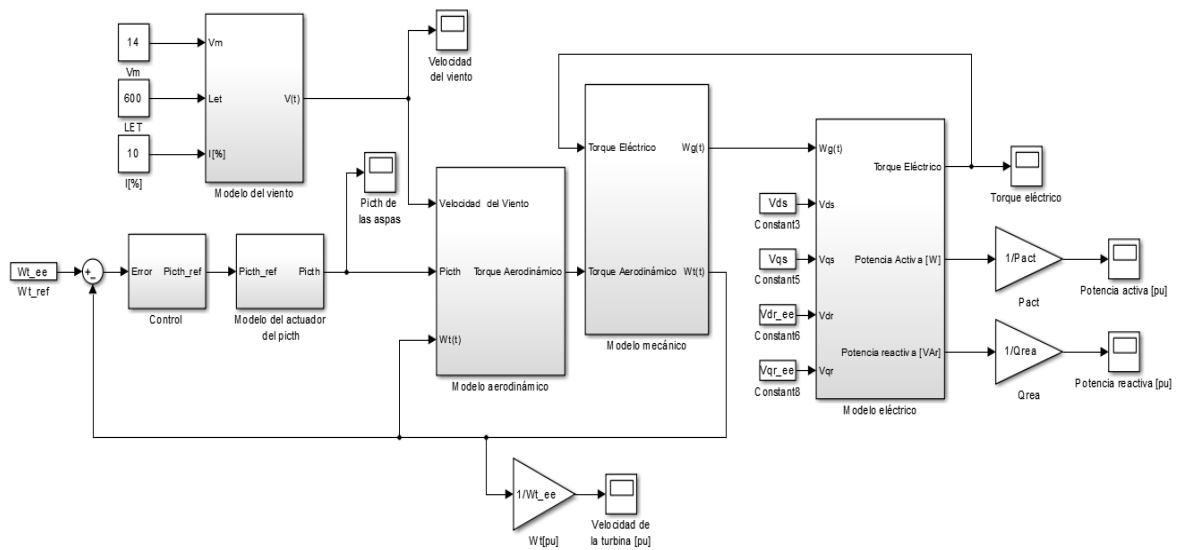
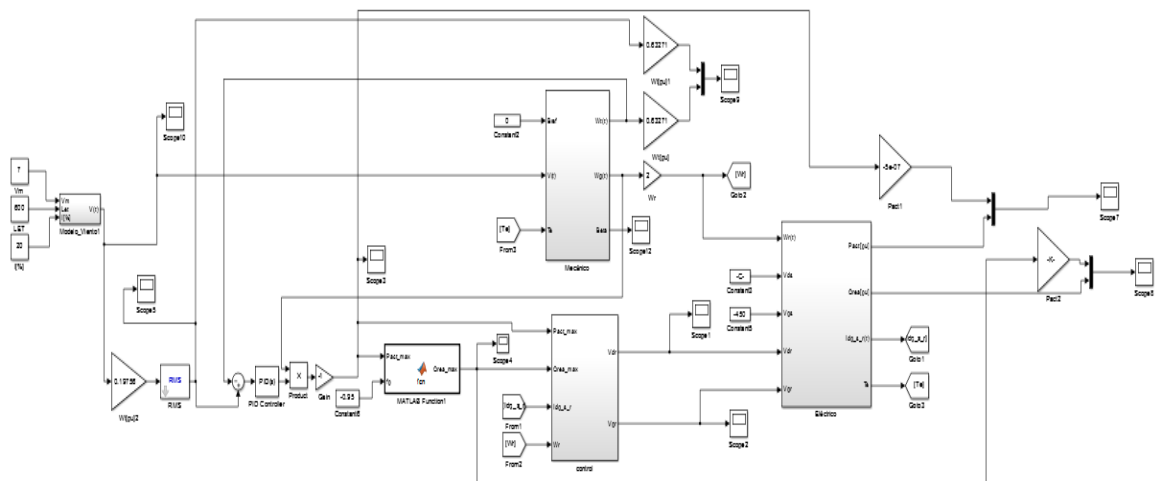


Figura 19. Diagrama de bloques para modelar el comportamiento de una turbina eólica con DFIG – Baja velocidad.



Para controlar la potencia en un generador de inducción doblemente alimentado DFIG, en el bloque de control de la *figura 26*, se presenta la técnica de control por orientación de flujo del estator, donde se concluye que tanto la potencia activa como la reactiva se pueden controlar de forma independiente a partir de las

componentes de la corriente del rotor I_{dr} e I_{qr} como lo muestran las expresiones (4.4) y (4.5) respectivamente³⁴:

$$P_{act} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_{ss}} |\vec{V}_s| I_{qr} \quad (4.4)$$

$$Q_{rea} = \frac{3}{2} |\vec{V}_s| \frac{L_m}{L_{ss}} (|\vec{I}_{ms}| - I_{dr}) \quad (4.5)$$

Donde V_s corresponde a V_{qs} despreciando la resistencia del bobinado del estator.

De las expresiones anteriores se puede obtener las referencias para la corriente en el eje directo (4.6) y de cuadratura del rotor (4.7) despejándolas de cada expresión.

$$I_{dr\ ref} = |\vec{I}_{ms}| - \frac{2}{3} \frac{L_{ss}}{|\vec{V}_s|} \frac{L_{ss}}{L_m} Q_{rea} \quad (4.6)$$

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

Donde I_{ms} corresponde a (4.8):

$$|\vec{I}_{ms}| = \frac{L_m}{L_{ss}} I_{ds} + I_{dr} \quad (4.8)$$

Las ecuaciones para el voltaje del rotor están dadas por (4.9) (4.10) (4.11):

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \sigma L_{rr} \frac{dI_{dr}}{dt} - (\omega_o - \omega_r) \sigma L_{rr} I_{qr} \quad (4.9)$$

$$V_A = R_r I_{qr} + \sigma L_{rr} \frac{dI_{qr}}{dt} + (\omega_o - \omega_r) \sigma L_{rr} I_{dr} \quad (4.10)$$

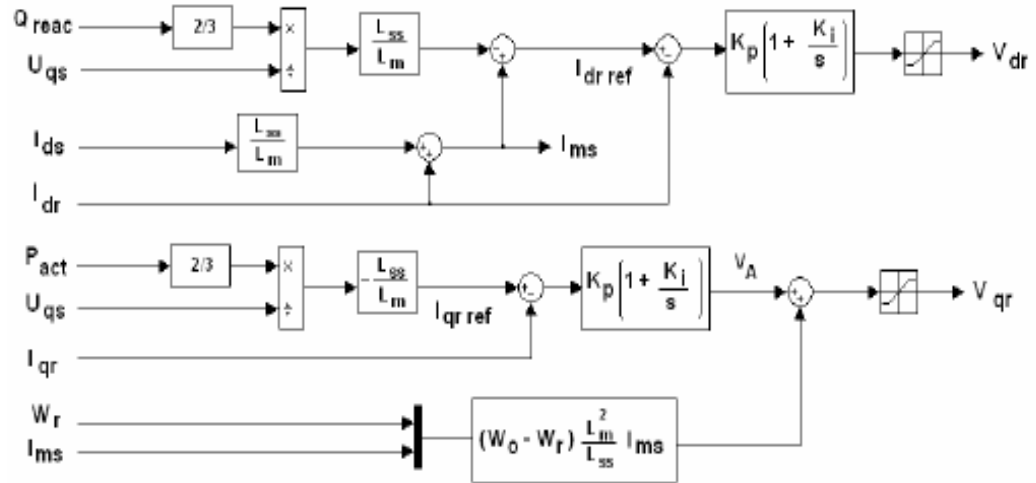
$$V_A = V_{qr} - \frac{(\omega_o - \omega_r) L_m^2 |\vec{I}_{ms}|}{L_{ss}} \quad (4.11)$$

En la *figura 20* se presenta el diagrama de bloques implementado para calcularla tensión en el eje directo y de cuadratura que producen las corrientes de referencia, con las cuales el generador entrega a la red la potencia máxima extraída, operando a condiciones inferiores de potencia nominal del generador. La variable

³⁴GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

manipulada (salida del controlador) para controlar la potencia reactiva es V_{dr} , y la variable manipulada para controlar la potencia activa es V_{qr} .

Figura 20. Diagrama de bloques – Máxima potencia.



CAPÍTULO 5

5.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR QFT

Para realizar el diseño del sistema de control que monitoree la velocidad de giro y la potencia generada de un aerogenerador, se requiere conocer los modelos matemáticos no lineales que describen su comportamiento. La complejidad de dichos modelos presenta un reto significativo para diseñar el control, por lo cual es necesario obtener un modelo lineal equivalente alrededor de un punto o trayectoria de operación. En el *anexo B* se explica la teoría de Taylor con la cual se linealiza el sistema.

Para este caso de estudio, no es suficiente aplicar el método de expansión en series de Taylor únicamente alrededor de un punto de operación, sino que se ha aplicado alrededor de tres puntos de operación diferentes, con miras a obtener un modelo equivalente (función de transferencia) con incertidumbre paramétrica asociada.

El procedimiento anterior se lleva a cabo para obtener la función de transferencia con incertidumbre paramétrica, que relaciona la velocidad de rotación de la turbina ω_t con el ángulo de paso de las aspas β_{ref} y con el torque del generador T_g . Para obtener la función de transferencia que relaciona la potencia activa P_{act} con la tensión en el eje de cuadratura del rotor V_{qr} y la potencia reactiva Q_{rea} con la tensión en el eje directo del rotor V_{dr} . Una vez se tienen las funciones de transferencia mencionadas, se procede a diseñar el controlador para cada caso.

Para facilitar la obtención de las funciones de transferencia mencionadas, se diseñó una herramienta-software llamada *WQC* que permite al usuario interactuar con una interfaz cómoda y fácil de usar, la cual a partir de las especificaciones técnicas de una turbina eólica de velocidad variable (generador DFIG) controlada por variación del ángulo de paso, le proporciona las funciones de transferencia tanto para el control de velocidad como para el control de potencia con su respectiva incertidumbre. Para mayor información consultar el respectivo manual de usuario que se encuentra en el *anexo C*.

Las especificaciones más críticas a tener en cuenta cuando la velocidad del viento es mayor a la nominal (control de ω_t mediante β_{ref}) son estabilidad robusta y rechazo de perturbaciones (turbulencia del viento), dado que se debe garantizar que el sistema sea estable para el intervalo de incertidumbre obtenido y en presencia de las fuertes perturbaciones producidas por la turbulencia del viento.

Cuando la velocidad del viento está por debajo de la nominal del aerogenerador (control de ω_t mediante T_g) y para controlar la potencia del DFIG, se tiene en cuenta especificaciones de estabilidad robusta y seguimiento de referencia, para así garantizar que el sistema sea estable y buscar el punto de operación de máxima eficiencia de la turbina eólica.

Una vez se obtienen las funciones de transferencia con incertidumbre y las especificaciones mencionadas se procede a diseñar los controladores mediante la *toolbox de QFT* creada por el profesor Mario García-Sanz³⁵ (donde su fundamento teórico se explica en el anexo D), la cual se despliega al pulsar desde *WQC* la opción “*Diseñar controlador*” o escribiendo el comando QFTCT en la ventana principal de trabajo de Matlab. Para ello se debe agregar previamente la carpeta de la toolbox de QFT siguiendo los pasos del *anexo E* donde además se encuentra información y un manual resumido de dicha interfaz gráfica.

En los siguientes numerales se presentan tomas de la interfaz gráfica de QFT para ilustrar paso a paso el procedimiento de diseño de los controladores.

5. 1. 1 Diseño del control para la velocidad mecánica a través del pitch

Para realizar el diseño del controlador que monitorea la velocidad de rotación de la turbina, se linealizaron los modelos no lineales alrededor de tres valores distintos de velocidades del viento, todos cercanos a la velocidad del viento promedio en la región, para la cual se asume que va a funcionar el sistema de generación eólico y suponiendo que dicha velocidad es mayor o igual a la nominal del aerogenerador (para nuestro caso se asumió el valor promedio de $11 [m/s]$).

La función de transferencia mostrada en la ecuación (5.1) corresponde a la planta equivalente para esta región de operación, la cual se obtuvo empleando la interfaz *WQC*.

$$\frac{\Delta\omega_t}{\Delta\beta} = \frac{k \left(\frac{s}{-5.546 \times 10^6} + 1 \right) \left(\frac{s^2}{216.2} + \frac{1.535s}{216.2} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{10} + 1 \right) \left(\frac{s}{p} + 1 \right) \left(\frac{s^2}{236} + \frac{1.677s}{236} + 1 \right)} \quad (5.1)$$

Los parámetros con incertidumbre asociada son la ganancia (k) y el polo más significativo (el polo más cercano al origen) (p). La obtención de dichos parámetros se calcularon con el fin de registrar que una pequeña variación en los mismos, ocasiona un cambio significativo en la planta, como se muestra en el diagrama de bode de la *figura 21* donde a bajas frecuencias es dominante la

³⁵Control & Energy Systems Center (CESC). The QFT Control Toolbox (QFTCT) [en línea]. <http://cesc.case.edu/OurQFTCT.htm> [Citado el 17 de junio de 2016].

ganancia y a medida que aumenta la frecuencia los decrece el margen de ganancia, lo cual implica que los polos sobresalen.

Con esta información y mediante una serie de operaciones matemáticas de la ecuación (5.1), se obtiene (5.2), donde se observa que los coeficientes del polinomio del numerador como también los del denominador dependen de k y p :

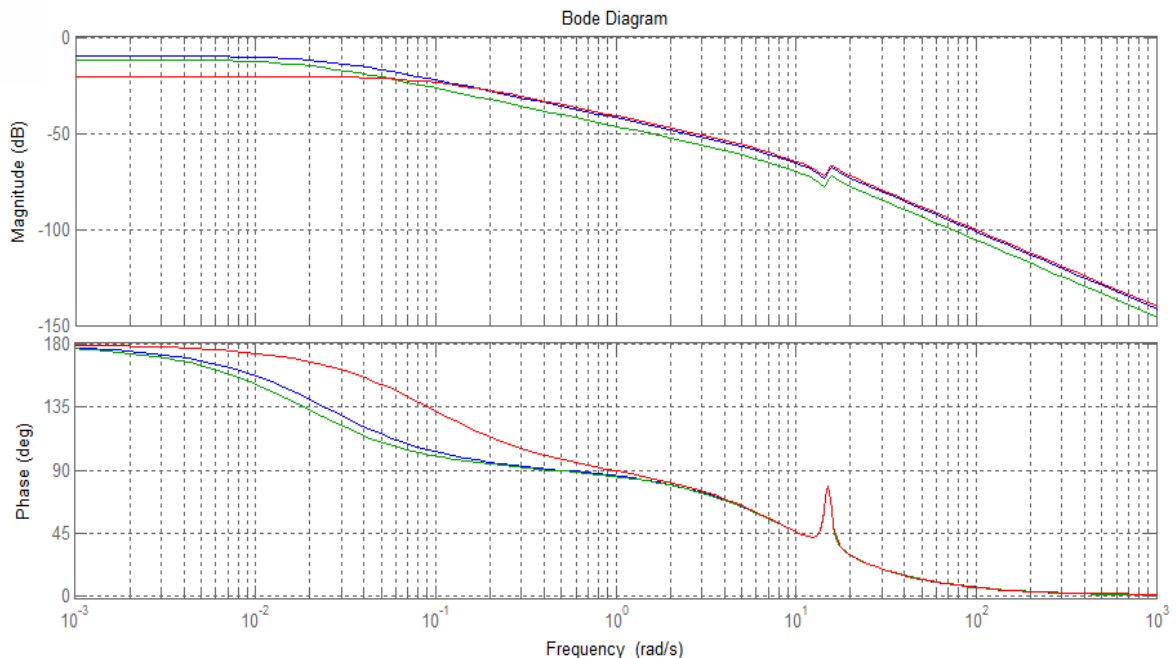
$$\frac{k(8.3410 \times 10^{-10} s^3 - 0.0046 s^2 - 0.0071 s - 1)}{\left(\frac{4.2373 \times 10^{-4}}{p}\right) s^4 + \left(\left(\frac{0.0050}{p}\right) + 4.2373 \times 10^{-4}\right) s^3 + \left(\left(\frac{0.1071}{p}\right) + 0.0050\right) s^2 + \left(\left(\frac{1}{p}\right) + 0.1071\right) s + 1} \quad (5.2)$$

La incertidumbre de k y p corresponde al intervalo comprendido entre el valor mínimo y máximo de los tres resultados obtenidos para k y p en el proceso de linealización para distintas velocidades del viento. Los resultados aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Valor de k y p para tres valores distintos de velocidades del viento – Alta velocidad.

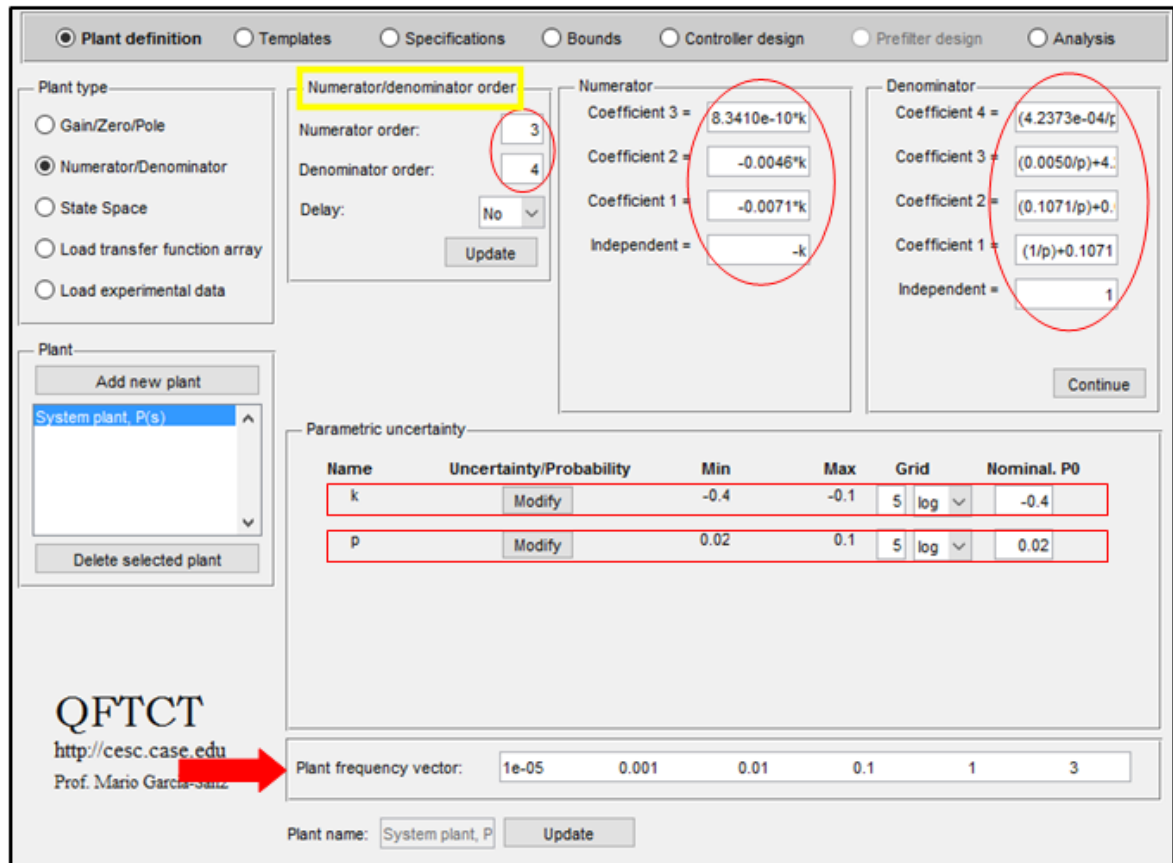
	Velocidad del viento [m/s]	k	p
1	11	-0.3238	-0.0245
2	14	-0.2588	-0.0186
3	16	-0.0965	-0.0928

Figura 21. Diagrama de bode – Alta velocidad.



La parte superior de la *figura 22* muestra la forma en la cual se insertaron los coeficientes del numerador y denominador de la función de transferencia en la toolbox de QFT, en la parte central se puede observar el valor máximo y mínimo para k y p , junto con el valor escogido para la planta nominal.

Figura 22. Coeficientes e incertidumbres de la función de transferencia – Alta velocidad.



Para finalizar la definición de la planta, en la sección inferior de la *figura 22*, se inserta el vector de frecuencias de interés, el cual se puede extraer del diagrama de bode de la función de transferencia, teniendo en cuenta que en los valores de frecuencia donde se encuentren sobrepicos o fluctuaciones bruscas, como el observado en la *figura 21* para frecuencias entre 10 y 15 [rad/s], se debe tener mayor cercanía de los valores elegidos para garantizar que el diseño del controlador abarque estos picos de resonancia.

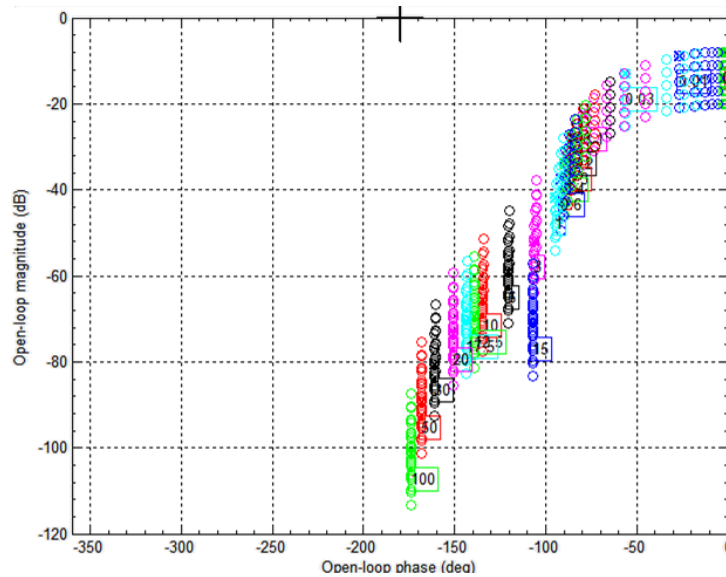
Una vez definida la planta nominal y la incertidumbre en los parámetros, se generan las plantillas correspondientes, mostradas en la *figura 23*, la cuales se obtienen evaluando los valores del vector de frecuencia, un cada una de las plantas obtenidas, para un número finito de puntos de la región de incertidumbre.

Como se puede observar en la *figura 23* el comportamiento de las plantillas tanto para altas como para bajas frecuencias es asintótico, por ello se elige el intervalo de frecuencia para el que las plantillas cambian de forma.

Una vez se tengan las plantillas se definen las especificaciones ya mencionadas.

- Estabilidad robusta: Como criterio de diseño se elige $\lambda = 1.07$ que corresponde a un margen de fase (MF) de 55.717° y un margen de ganancia (MG) de 5.7317 dB, como se muestra en la *figura 24*.

Figura 23. Plantillas de la planta para el vector de frecuencia – Alta velocidad.



Los valores anteriores se obtienen a partir de las expresiones a continuación:

$$MF \geq 180 - \arccos\left(\frac{0.5}{\lambda^2} - 1\right) \quad (5.3)$$

$$MG \geq 1 + \frac{1}{\lambda} \quad (5.4)$$

- Rechazo de perturbaciones (turbulencia del viento): Como se mencionó en el contenido, la componente que más afecta el torque aerodinámico son los armónicos de tercer orden en baja frecuencia, por lo tanto, se diseña un filtro pasa altas basado en la sensibilidad complementaria, cuya función de transferencia (5.5) y respectiva gráfica en el dominio de la frecuencia (*figura25*) se definen a continuación³⁶:

³⁶ GARCÍA, Mario y HOUPIS, Constantine. Wind energy systems. Control engineering design. Estados Unidos: CRC Press, 2012. 602p. ISBN 978-1-4398-2179-4.

$$T(s) = \frac{s}{15s + 1} \quad (5.5)$$

Figura 24. Especificaciones de estabilidad – Alta velocidad.

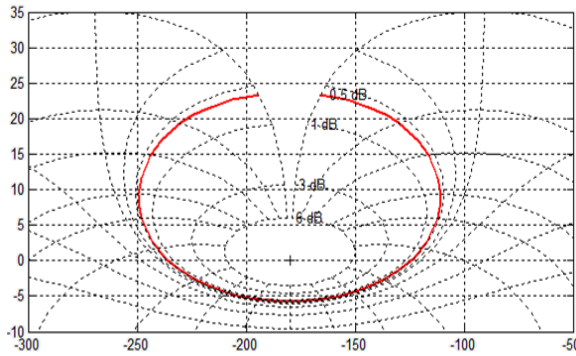
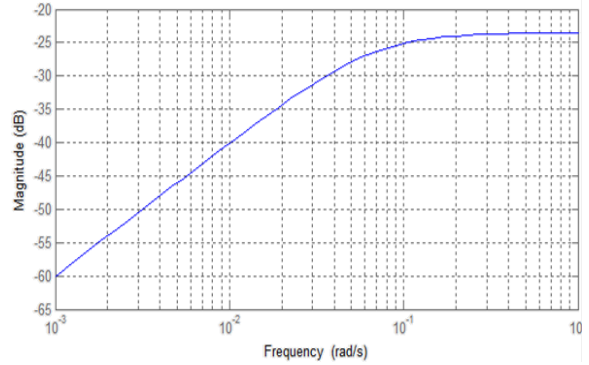


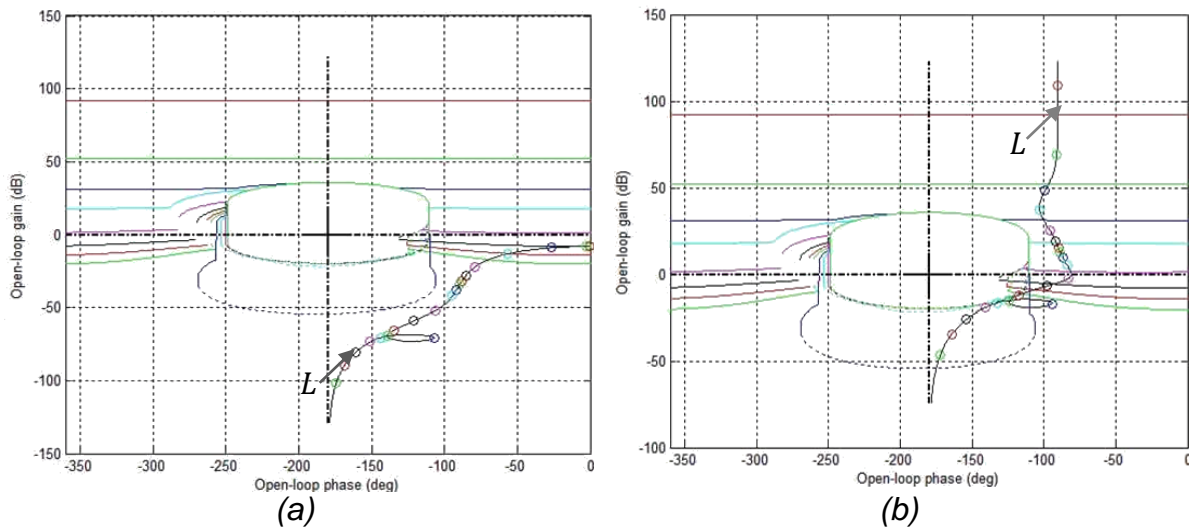
Figura 25. Sensibilidad complementaria – Alta velocidad.



A partir de las especificaciones se generan los contornos de las plantas, en la figura 26(a) se visualiza la intersección de los contornos y la naturaleza de la planta el lazo abierto L sin controlar, la figura 26(b) muestra la intersección de los contornos y L con el controlador PID robusto diseñado (5.6).

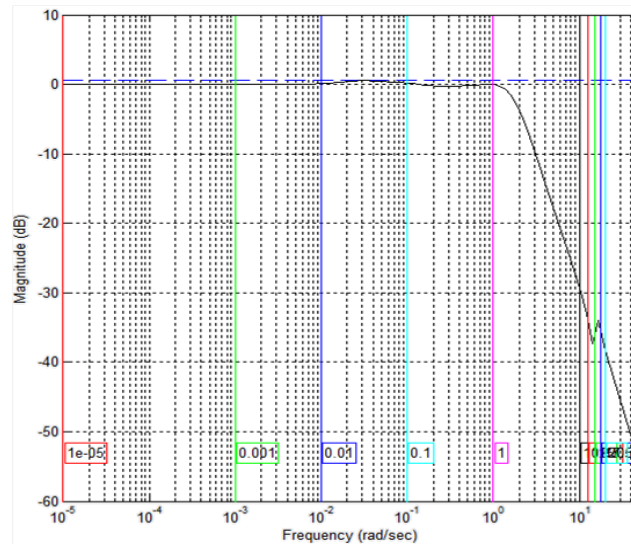
$$G_{alta}(s) = \frac{-542.5(s + 0.032)(s + 2.5)}{s(s + 6.2)} \quad (5.6)$$

Figura 26. Situación L de partida (a), Síntesis del controlador (b) – Alta velocidad.



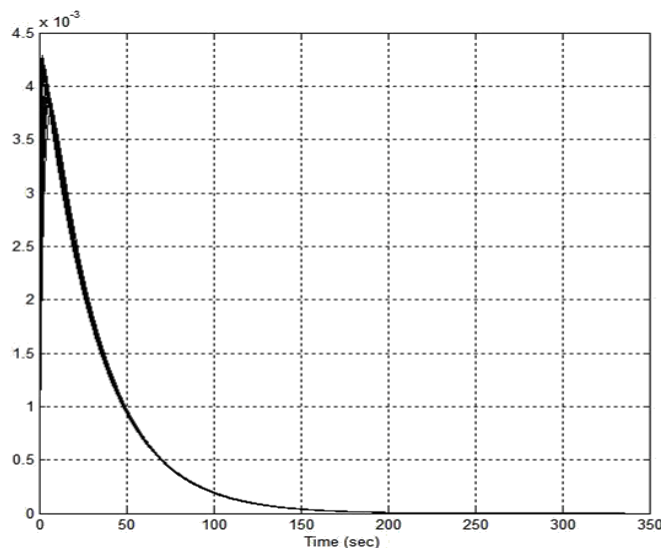
Una vez diseñado el controlador se comprueba su funcionamiento, evaluando el cumplimiento de las especificaciones mediante un análisis en el dominio de la frecuencia, a través del diagrama de bode, como se muestra en *figura 27*, donde se observa que el comportamiento del controlador es el deseado, ya que no supera el valor máximo en magnitud, propuesto por las especificaciones.

Figura 27. Validación dominio de la frecuencia – Alta velocidad.



De igual manera se analiza en el dominio del tiempo, evaluando las especificaciones ante la respuesta al escalón (*figura 28*), donde su tiempo de establecimiento ante una fuerte perturbación, es el deseado. Si alguna de las pruebas anteriores no cumplen con las especificaciones, se debe rediseñar el controlador.

Figura 28. Validación dominio del tiempo – Alta velocidad.



5. 1. 2 Diseño del control para la potencia del DFIG

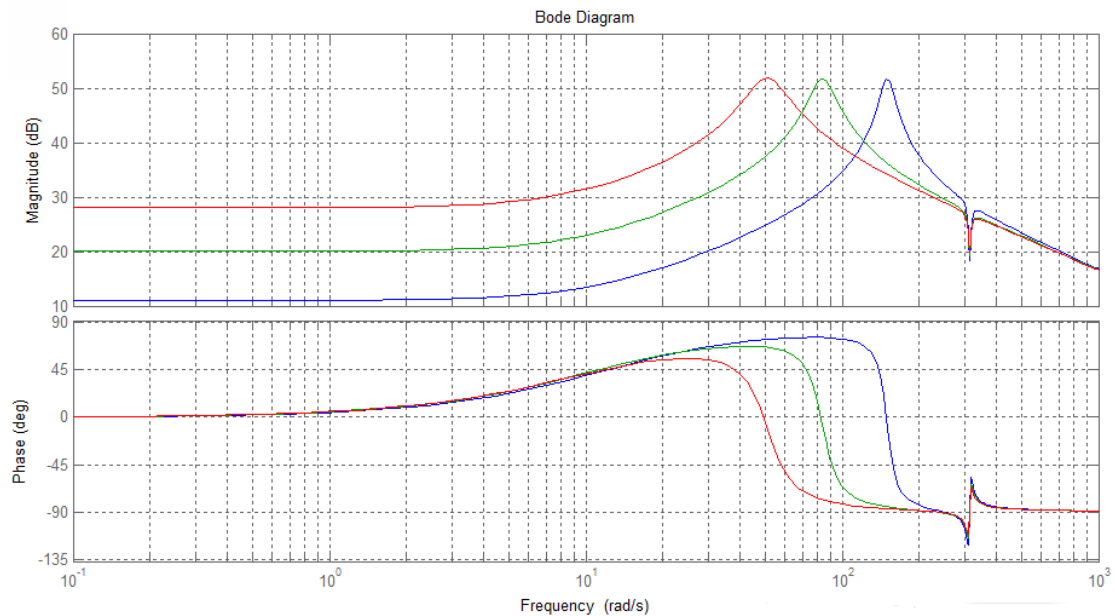
Para realizar el diseño del controlador que monitorea la potencia generada, se linealizaron los modelos no lineales alrededor de tres valores distintos de velocidades del viento, a partir de la velocidad del viento promedio en la región para la cual se asume que va a funcionar el sistema de generación eólico y suponiendo que dicha velocidad es menor a la nominal de la turbina eólica (11 [m/s]).

La función de transferencia característica de la planta, se muestra en la ecuación (5.7), donde los parámetros que tienen incertidumbre es el cero más cercano al origen (z) y la ganancia (k).

$$\frac{\Delta I_{qr}}{\Delta V_A} = \frac{\Delta I_{dr}}{\Delta V_{dr}} = \frac{k \left(\frac{s}{z} + 1 \right) \left(\frac{s^2}{9.865 \times 10^4} + \frac{5.376s}{9.865 \times 10^4} + 1 \right)}{\left(\frac{s^2}{7041} + \frac{17.52s}{7041} + 1 \right) \left(\frac{s^2}{9.859 \times 10^4} + \frac{13.52s}{9.859 \times 10^4} + 1 \right)} \quad (5.7)$$

La obtención de dichos parámetros se calcularon con el fin de registrar que una pequeña variación en los mismos, ocasiona un cambio significativo en la planta, como se muestra en el diagrama de bode de la *figura 29*, donde a bajas frecuencias es dominante la ganancia y a medida que aumenta la frecuencia sucede un incremento en el margen de ganancia para el intervalo de frecuencia de interés, lo cual implica que los ceros sobresalen.

Figura 29. Diagrama de bode – DFIG.



Mediante una serie de operaciones matemáticas, de la ecuación (5.7) se obtiene (5.8), donde los coeficientes del numerador dependen de k y z :

$$\frac{k \left(s^3 + \left(\frac{5.4501 \times 10^{-5}}{z} + 1.0138 \times 10^{-5} \right) s^2 + \left(\frac{1}{z} + 5.4501 \times 10^{-5} \right) s + 1 \right)}{1.4405 \times 10^{-9} s^4 + 4.4719 \times 10^{-8} s^3 + 1.5250 \times 10^{-4} s^2 + 0.0026 s + 1} \quad (5.8)$$

De igual manera se calcula la incertidumbre de k y z a partir del valor máximo y mínimo de los tres resultados, para las distintas velocidades del viento que aparecen en la *tabla 2*.

Tabla 2. Valor de k y z para tres valores distintos de velocidades del viento – Baja velocidad.

	Velocidad del viento [m/s]	k	z
1	5	3.5545	-11.8203
2	7	10.0260	-10.4698
3	8	25.1996	-9.7931

La *figura 30* en la parte superior muestra la forma en la cual se insertaron los coeficientes del numerador y denominador de la función de transferencia en la toolbox de QFT, en la parte central se puede observar el valor máximo y mínimo para k y z , junto con el valor escogido para la planta nominal.

Figura 30. Coeficientes e incertidumbres de la función de transferencia – DFIG.

The screenshot shows the QFTCT software interface. The 'Plant definition' tab is selected. The 'Numerator/denominator order' is set to 3/4. The numerator coefficients are: Coefficient 3 = $k/(9.865e4 \cdot z)$, Coefficient 2 = $(5.4496e-05) \cdot k$, and Coefficient 1 = $(k/z) + (5.4496)$. The denominator coefficients are: Coefficient 4 = $6.942e08/4.8$, Coefficient 3 = $2.155e10/4.8$, Coefficient 2 = $7.349e13/4.8$, and Coefficient 1 = $1.265e15/4.8$. The independent variable is k . The 'Parametric uncertainty' table shows the following values:

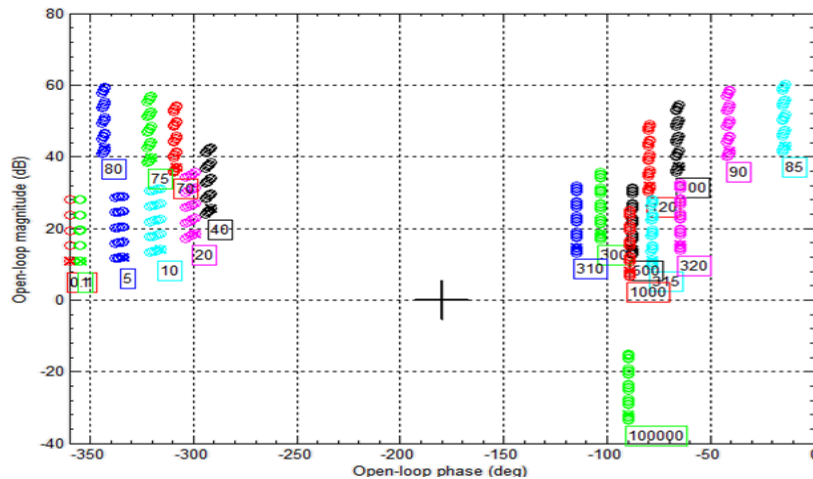
Name	Uncertainty/Probability	Min	Max	Grid	Nominal, P0
k	Modify	3.5	25	5 log	3.5
z	Modify	9.8	11.8	5 log	9.8

The 'Plant frequency vector' is 0.1, 1, 5, 10, 20, 40. A red arrow points to the URL <http://cesc.case.edu>.

En la sección inferior, se inserta el vector de frecuencias generado en el diagrama de bode *figura 29*, para las cuales se diseñará el controlador, teniendo en cuenta que en los valores de frecuencia donde se encuentren sobrepicos o fluctuaciones bruscas se debe tener mayor cercanía entre estos.

Una vez definida la planta nominal y la incertidumbre en los parámetros, se generan las plantillas correspondientes a todos los puntos de cada planta para los diferentes valores del vector de frecuencia, mostradas en la *figura 31*.

Figura 31. Plantillas de la planta para el vector de frecuencia – DFIG.



Una vez generadas las plantillas, se definen las especificaciones, para este caso el margen de fase y ganancia que garantiza estabilidad robusta, son los mismos valores diseñados para el controlador de ω_t a partir de β_{ref} .

Para el seguimiento de la referenciase se usa como límite superior la función de transferencia de un sistema de segundo orden sub-amortiguado (5.9). Para el límite inferior se emplea un sistema de tercer orden sobre-amortiguado (5.10).

- Margen superior (T_U) en lazo cerrado:

$$T_U = \frac{(\omega_n^2/a)(s + a)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.9)$$

- Margen inferior (T_L) en lazo cerrado:

$$T_L = \frac{a1 * a2 * a3}{(s + a_1)(s + a_2)(s + a_3)} \quad (5.10)$$

Según el libro titulado “Optimal Control of Wind Energy Systems – Toward a Global Approach”³⁷, los valores designados para las constantes son los siguientes:

$$a = 1.2\omega_n \quad a_1 = 0.5\omega_n \quad a_2 = 1.5\omega_n \quad a_3 = 2\omega_n \quad (5.11)$$

Con las ecuaciones anteriores, con un sobre-pico máximo 25%, tiempo de establecimiento de diez milisegundos, $\xi = 0.4559$ y $\omega_n = 877.2895$ [rad/s] se calculó el margen superior (5.12) e inferior (5.13) del seguimiento a la referencia.

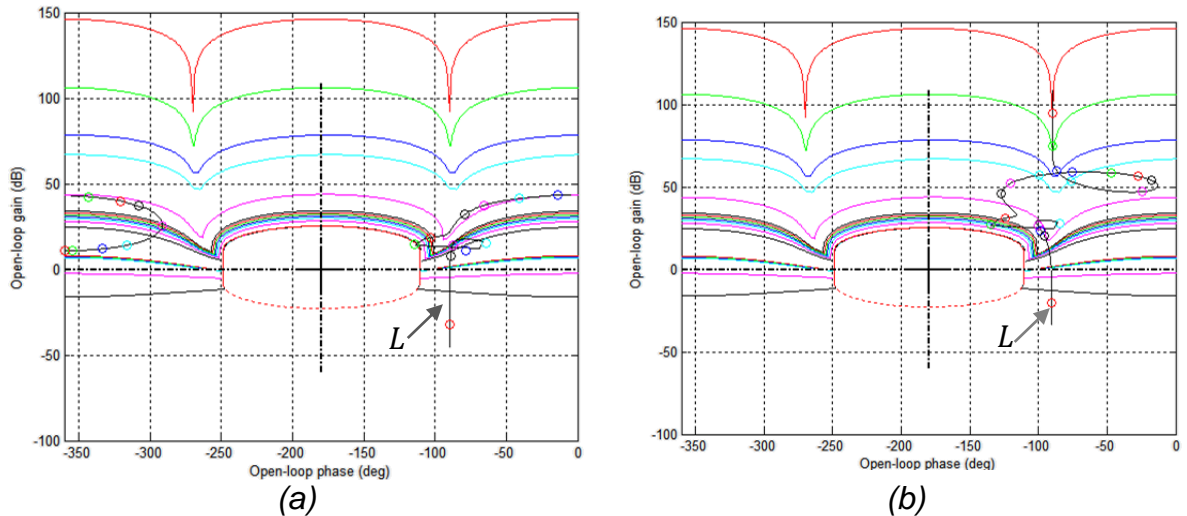
$$T_U = \frac{(731.0746s + 769636.9379)}{s^2 + 800s + 769636.9379} \quad (5.12)$$

$$T_L = \frac{1012791654}{s^3 + 3509.1582s^2 + 3655775.455s + 1012791654} \quad (5.13)$$

A partir de las especificaciones se generan los contornos de la planta. En la *figura 32 (a)* se visualiza la intersección de los contornos junto con la naturaleza de la planta el lazo abierto L sin controlar, la *figura 32 (b)* muestra la intersección de los contornos y L con un controlador PID robusto diseñado (5.14).

$$G_{DFIG}(s) = \frac{3.9584 (s + 90)(s + 30)}{s(s + 7)} \quad (5.14)$$

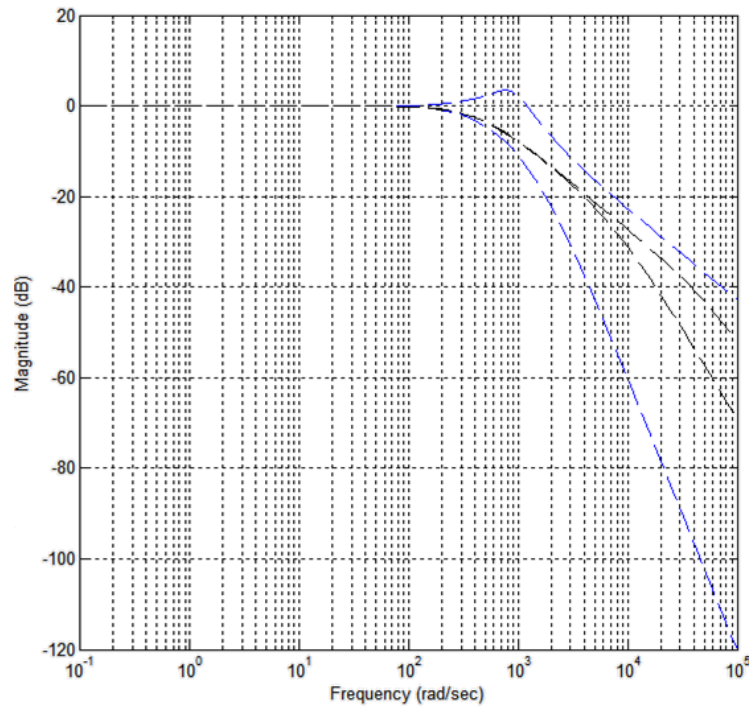
Figura 32. Situación L de partida (a), Síntesis del controlador (b) – DFIG.



³⁷MUNTEANU, Iulian, *et al.* Optimal Control of Wind Energy Systems – Toward a Global Approach. Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-079-7.

Una vez diseñado el controlador se comprueba su funcionamiento, evaluando el cumplimiento de las especificaciones para el seguimiento a la referencia, mediante un análisis en el dominio de la frecuencia, a través del diagrama de bode, como se muestra en *figura 33*, donde se observa que el comportamiento del controlador es el deseado, ya que no sobrepasa los límites.

Figura 33. Validación dominio de la frecuencia – DFIG.

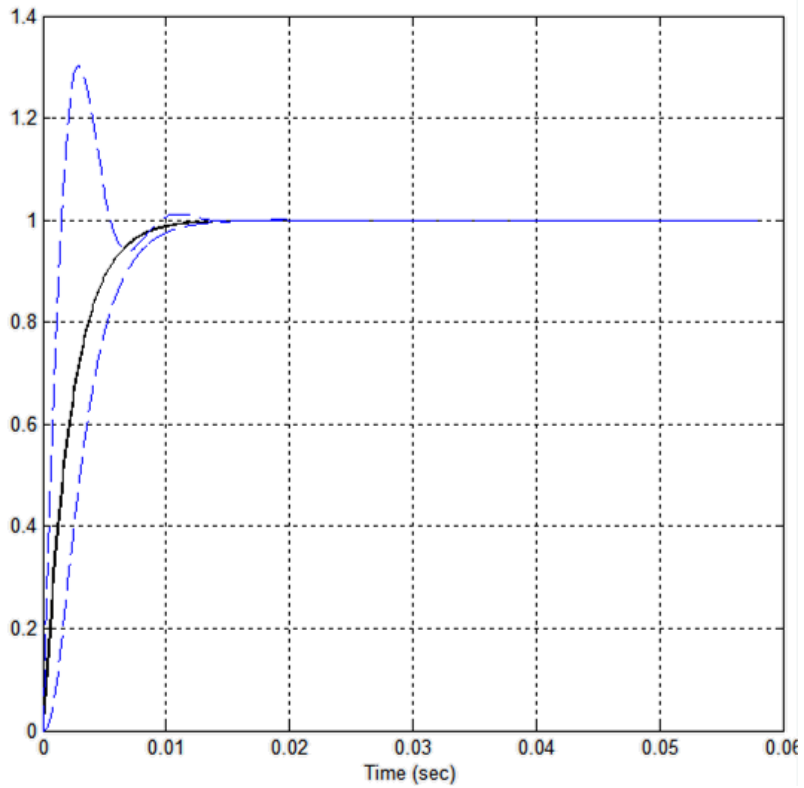


De igual manera se analiza en el dominio del tiempo, evaluando el seguimiento a la referencia ante la respuesta al escalón (*figura 34*), donde su tiempo de establecimiento ante una fuerte perturbación, es el deseado.

La ecuación (5.23) muestra el prefiltro diseñado, basado en la técnica QFT, como se explicó en la teoría del anexo D.

$$F_{prefiltro}(s) = \frac{526.795}{(s + 526.795)} \quad (5.15)$$

Figura 34. Validación dominio del tiempo – DFIG.



5. 1. 3 Diseño del control para la velocidad mecánica a través del torque del generador.

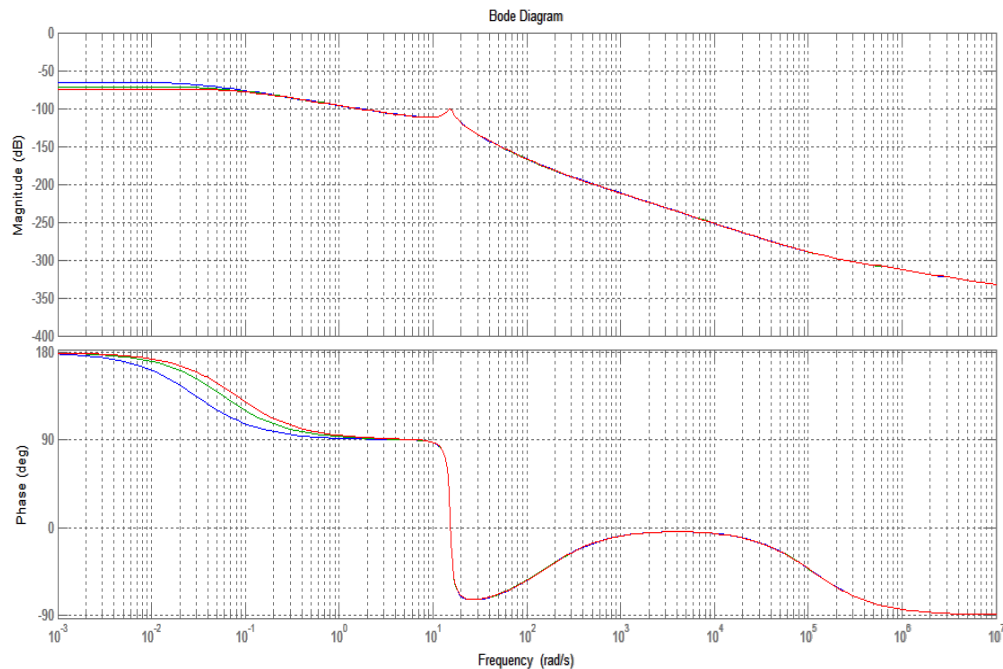
Para realizar el diseño del controlador que monitorea la velocidad de rotación mecánica para baja velocidad a partir del torque del generador, se linealizaron los modelos no lineales alrededor de tres valores distintos de velocidades del viento, a partir de la velocidad del viento promedio en la región para la cual se asume que va a funcionar el sistema de generación eólico y suponiendo que dicha velocidad es menor a la nominal del de la turbina eólica (11 [m/s]).

La función de transferencia característica de la planta, se muestra en la ecuación (5.16), donde el parámetro con incertidumbre es el polo más cercano al origen (p).

$$\frac{\Delta\omega_t}{\Delta T_g} = \frac{2.2818 \times 10^{-10} (s - 1.113 \times 10^5)(s + 150.9)(s + 100)}{(s + 105.1)(s + p)(s^2 + 1.683s + 236)} \quad (5.16)$$

La obtención de dicho parámetro se calcula con el fin de registrar que una pequeña variación en el polo dominante, ocasiona un cambio significativo en la planta, como se muestra en el diagrama de bode de la *figura 35*.

Figura 35. Diagrama de bode – Baja velocidad.



Mediante una serie de operaciones matemáticas, de la ecuación (5.16) se obtiene (5.17), donde los coeficientes del polinomio del denominador dependen de p .

$$\frac{2.2818 \times 10^{-10} s^3 - 2.5329 s^2 - 0.0064 s - 0.3834}{s^4 + (106.8 + p) s^3 + (410.8 + 106.8 p) s^2 + (2.48 \times 10^4 + 410.8 p) s + 2.48 \times 10^4 p} \quad (5.17)$$

La incertidumbre de p se obtiene a partir del valor máximo y mínimo de los tres resultados, para las distintas velocidades del viento dados en la *tabla 3*.

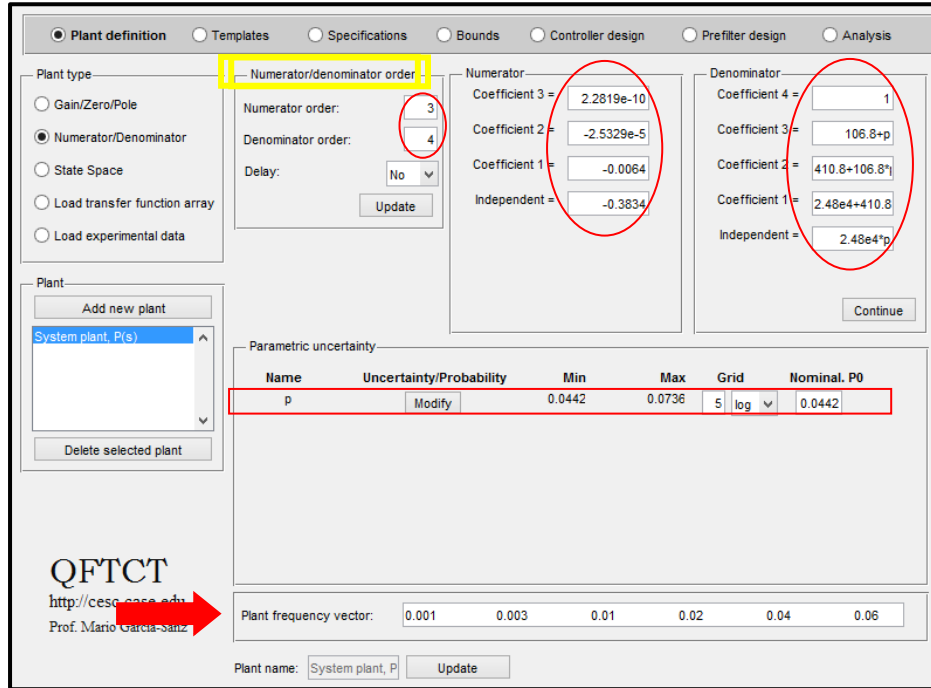
Tabla 3. Valor de p para tres valores distintos de velocidades del viento – Baja velocidad.

	Velocidad del viento [m/s]	p
1	5	-0.0442
2	7	-0.0589
3	8	-0.0736

La *figura 36* en la parte superior muestra la forma en la cual se insertaron los coeficientes del numerador y denominador de la función de transferencia en la

toolbox ya mencionada, en la parte central se puede observar el valor máximo y mínimo para p , junto con el valor escogido para la planta nominal.

Figura 36. Coeficientes e incertidumbres de la función de transferencia – Baja velocidad.



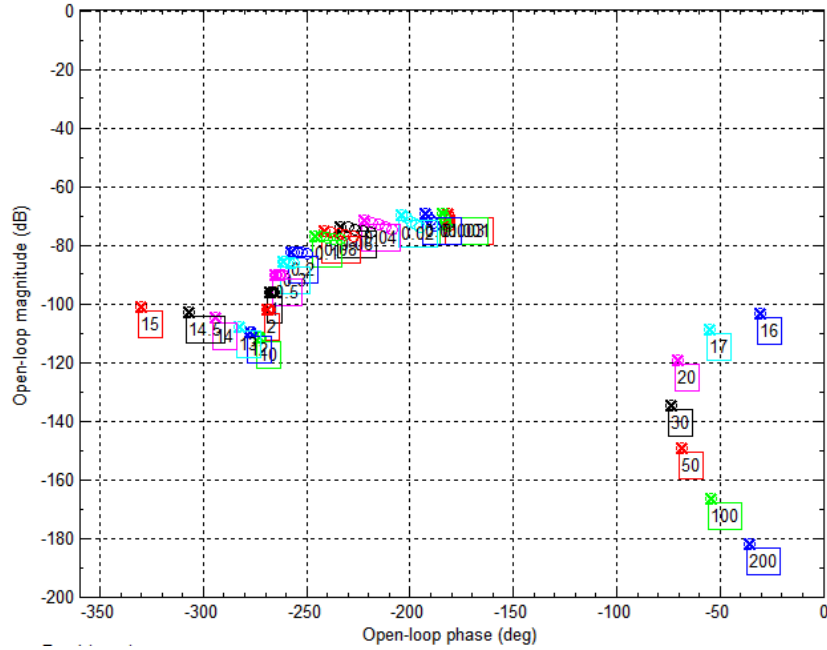
En la sección inferior, se inserta el vector de frecuencias generado en el diagrama de bode *figura 35*, para las cuales se diseñará el controlador, teniendo en cuenta que en los valores de frecuencia donde se encuentren sobrepicos o fluctuaciones bruscas, se debe tener mayor cercanía entre estos.

Una vez definida la planta nominal y la incertidumbre en los parámetros, se generan las plantillas correspondientes a todos los puntos de cada planta para los diferentes valores del vector de frecuencia, mostradas en la *figura 37*.

Una vez se cuente con las plantillas, se definen las especificaciones, para este caso el margen de fase y ganancia que garantiza estabilidad robusta, son los mismos valores diseñados para el controlador de ω_t a partir de β_{ref} .

Para el seguimiento de la referenciase se usa como límite superior la función de transferencia de un sistema de segundo orden sub-amortiguado (5.18). Para el límite inferior se emplea un sistema de tercer orden sobre-amortiguado (5.19).

Figura 37. Plantillas de la planta para el vector de frecuencia – Baja velocidad.



Con un sobre-pico máximo 25% y tiempo de establecimiento de seis segundos, se calculó el margen superior (5.18) e inferior (5.19).

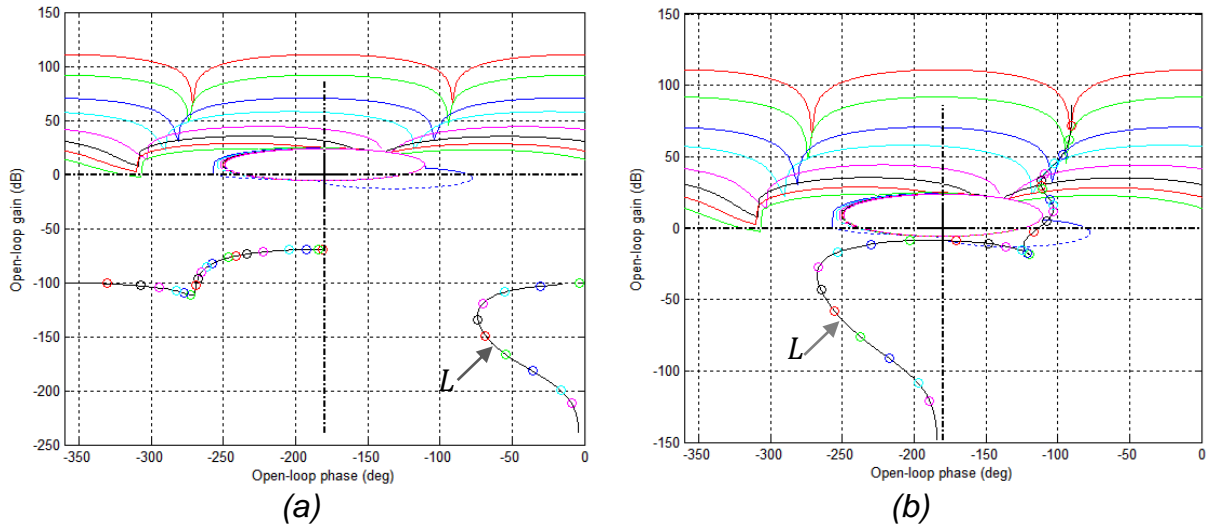
$$T_U = \frac{(1.075s + 1.663)}{s^2 + 1.333s + 1.663} \quad (5.18)$$

$$T_L = \frac{3.218}{s^3 + 5.159s^2 + 7.9s + 3.218} \quad (5.19)$$

A partir de las especificaciones se generan los contornos de la planta. En la figura 38 (a) se visualiza la intersección de los contornos junto con la naturaleza de la planta el lazo abierto L sin controlar, la figura 38 (b) muestra la intersección de los contornos y L con un controlador PID robusto diseñado (5.20).

$$G_{baja}(s) = \frac{-3.5166 \times 10^4 (s + 0.092)(s + 8.5)}{s(s + 2.5)} \quad (5.20)$$

Figura 38. Situación L de partida (a), Síntesis del controlador (b) – Baja velocidad.



Una vez diseñado el controlador se procede con el diseño del prefiltro para garantizar las especificaciones de seguimiento a la referencia. La ecuación (5.21) muestra el prefiltro diseñado, basado en la técnica QFT, como se explicó en la teoría del anexo D.

$$F_{prefiltro}(s) = \frac{0.1122(s + 5.17)}{(s + 0.58)} \quad (5.21)$$

Mediante un análisis en el dominio de la frecuencia, a través del diagrama de la figura 39, se observa que el comportamiento de la planta junto con el controlador y el prefiltro es el deseado, ya que la respuesta se ubica dentro de los límites estipulados.

De igual manera se analiza en el dominio del tiempo, evaluando el seguimiento a la referencia ante la respuesta al escalón (figura 40), donde el tiempo de establecimiento y sobrepico máximo, corresponden con los valores asignados inicialmente (sobrepico menor al 25% tiempo de establecimiento de seis segundos).

Figura 39. Validación dominio de la frecuencia – Baja velocidad.

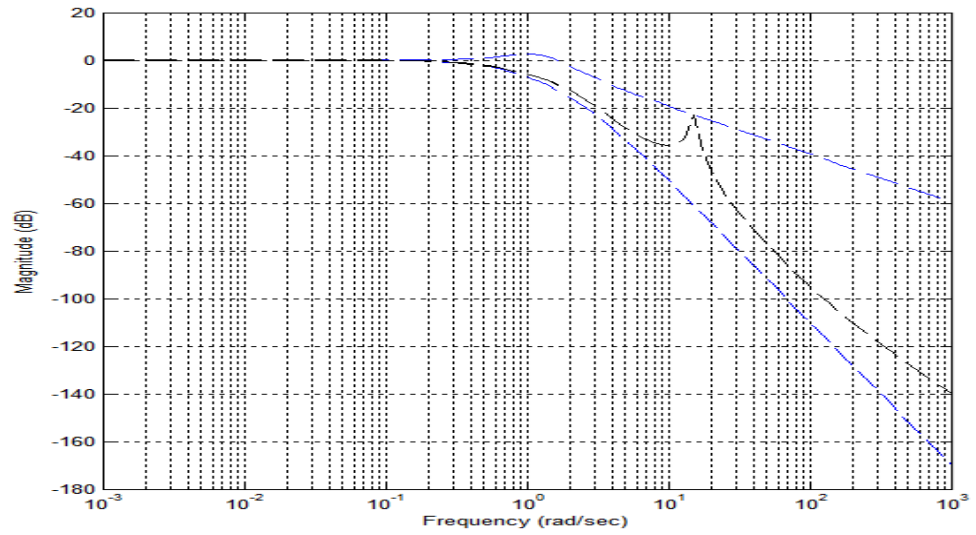
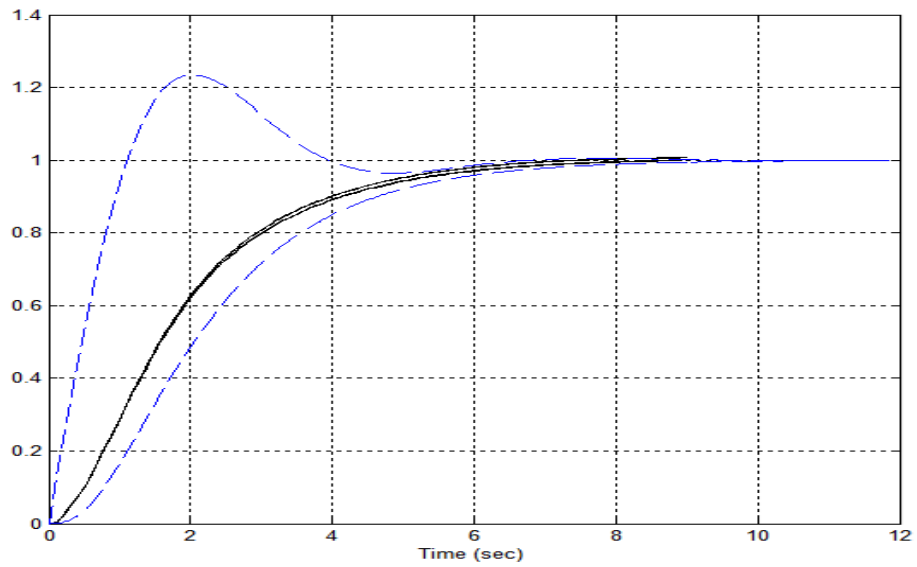


Figura 40. Validación dominio del tiempo – Baja velocidad.



CAPÍTULO 6: RESULTADOS

En el capítulo a continuación se presenta los resultados obtenidos en el proceso de investigación llevado a cabo en esta tesis de grado. Se detallan las gráficas de las variables a controlar mediante la técnica QFT (velocidad de rotación de la turbina y potencia generada), de las variables manipuladas (ángulo de paso de las aspas, torque del generador y tensión en el rotor del DFIG) y la señal externa de entrada (velocidad del viento), para los dos casos de funcionamiento del sistema ya mencionados: velocidad promedio del viento mayor (alta velocidad) y menor (baja velocidad) a la velocidad nominal de la turbina.

Para alta velocidad se muestran los resultados de las variables: velocidad de rotación de la turbina, ángulo de paso de las aspas (pitch), potencia activa y reactiva del generador. Para baja velocidad se tiene en cuenta: velocidad angular del rotor, potencia activa y reactiva generada y tensiones en el eje directo y de cuadratura del rotor.

Además las señales mencionadas anteriormente se comparan con las obtenidas utilizando un sistema de control PI sintonizado en Simulink, para realizar los análisis correspondientes.

6. 1 RESULTADOS TÉCNICA QFT

Cada controlador se diseña de manera independiente para los casos de estudio. Con el objetivo de controlar la velocidad mecánica de la turbina en la región de alta velocidad, se asignaron las especificaciones de estabilidad robusta y rechazo de perturbaciones. El seguimiento a la referencia y estabilidad robusta, son características propias del controlador QFT diseñado para la potencia del DFIG.

A continuación se muestran las gráficas generadas para el comportamiento de las variables controladas para cada caso.

6. 2. 1 Resultados del control QFT para la velocidad mecánica a través del pitch

Para validar el desempeño del controlador diseñado mediante la técnica QFT se generó un perfil de viento con una velocidad promedio de 18 m/s y una intensidad de turbulencia del 15%, para garantizar que el aerogenerador *NM 2000/82* genere la potencia nominal. De la *figura 42* hasta la *figura 45* se muestran los resultados de simulación obtenidos del comportamiento de las variables del sistema, en un tiempo de simulación igual a 500 segundos, ante dicha entrada de velocidad del viento (*figura 41*).

Figura 41. Velocidad del viento – Alta velocidad.

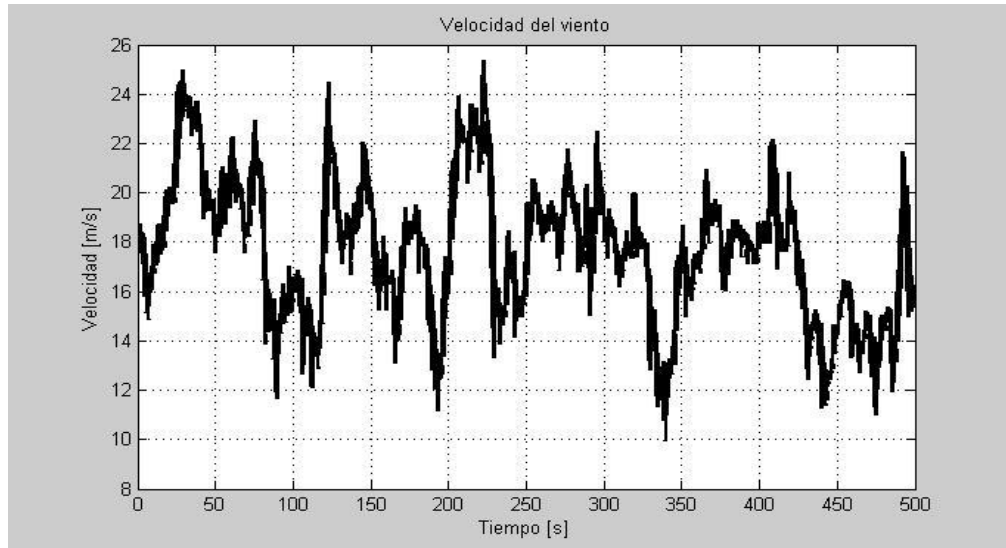


Figura 42. Ángulo de paso de las aspas – Alta velocidad.

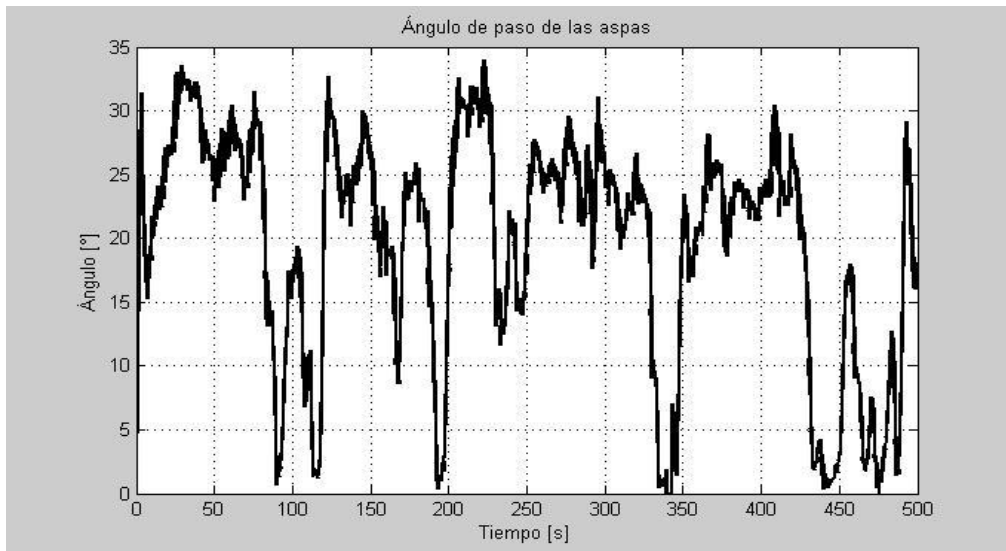


Figura 43. Velocidad de rotación de la turbina en p.u. – Alta velocidad.

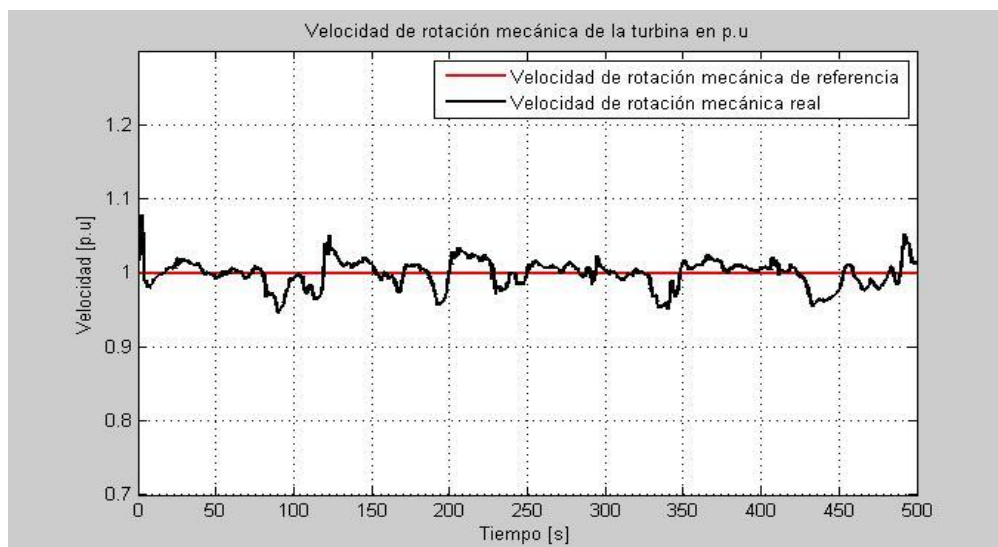


Figura 44. Potencia activa generada en p.u. – Alta velocidad.

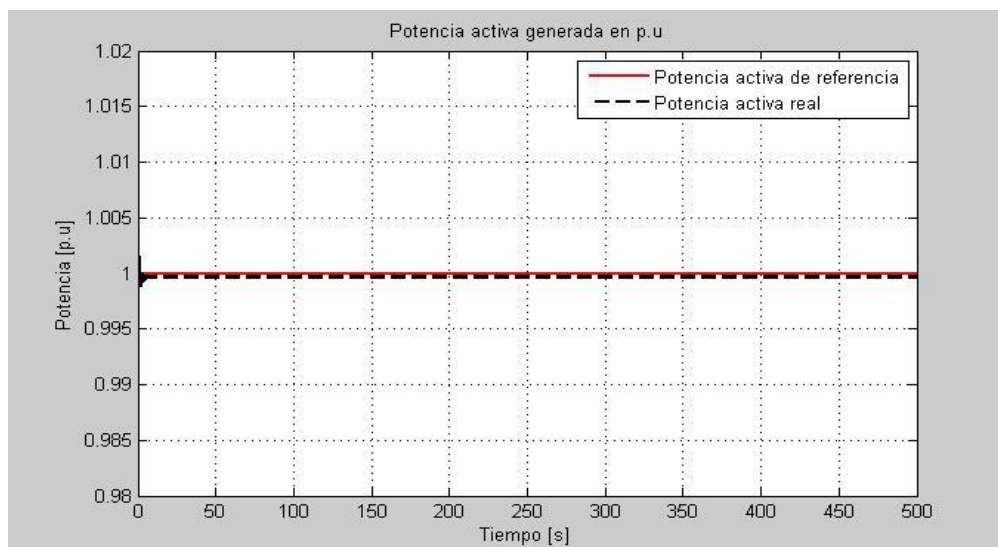
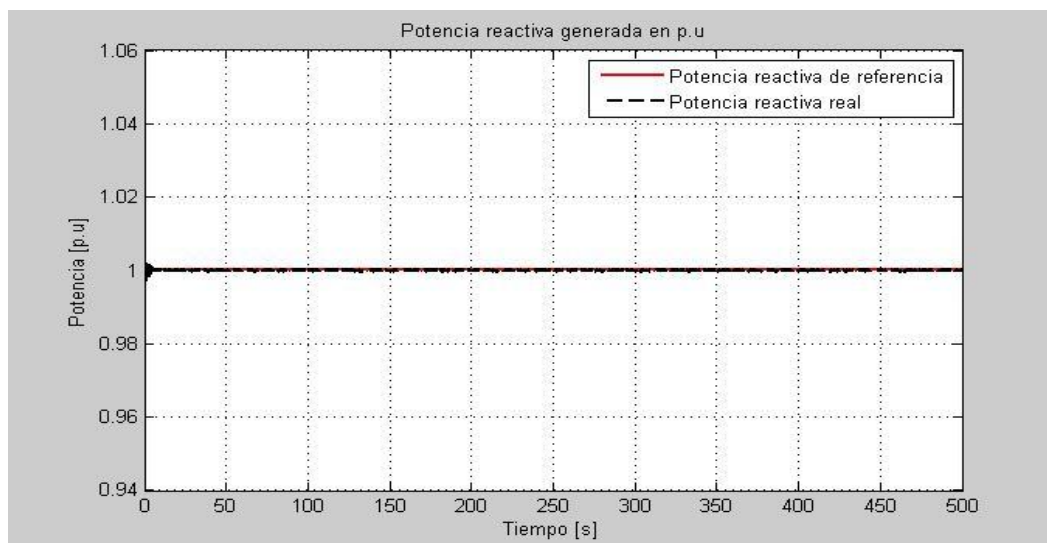


Figura 45. Potencia reactiva generada en p.u. – Alta velocidad.



La velocidad de rotación nominal del rotor del generador es de 19 rpm (velocidad base), la potencia nominal de 2 MW (potencia base) y el factor de potencia es de 0.95 según especificaciones dadas en el *anexo A*, el máximo valor del ángulo de paso se fija en 45° .

El control actúa cuando la velocidad del viento es superior a la nominal (11 m/s) manteniendo la velocidad mecánica de la turbina en 1 p.u (19 rpm) con variaciones menores al 1% (*figura 43*), pero la potencia activa suministrada llega a ser el valor nominal con sobrepicos menores al 1% (*figura 44*). La potencia reactiva (*figura 45*) presenta un comportamiento similar a la potencia activa. Se considera que la causa fundamental de los picos en la señal de velocidad mecánica, es la limitación en la razón de cambio del sistema actuador del ángulo de paso de las aspas, que debe ser menor a $10^\circ/\text{s}$, lo cual impide el seguimiento de las variaciones del viento.

6. 2. 2 Resultados de control QFT para velocidad mecánica a través del torque del generador

Para validar el desempeño del controlador diseñado mediante la técnica QFT, se generó un perfil de viento con una velocidad promedio de 7 m/s y una intensidad de turbulencia del 15% , el cual es menor a la velocidad del viento nominal del aerogenerador *NM 2000/82*. De la *figura 47* hasta la *figura 51* se muestran los resultados de simulación obtenidos del comportamiento de las variables del sistema, en un tiempo de simulación igual a 500 segundos, ante dicha entrada de velocidad del viento (*figura 46*).

Figura 46. Velocidad del viento – Baja velocidad.

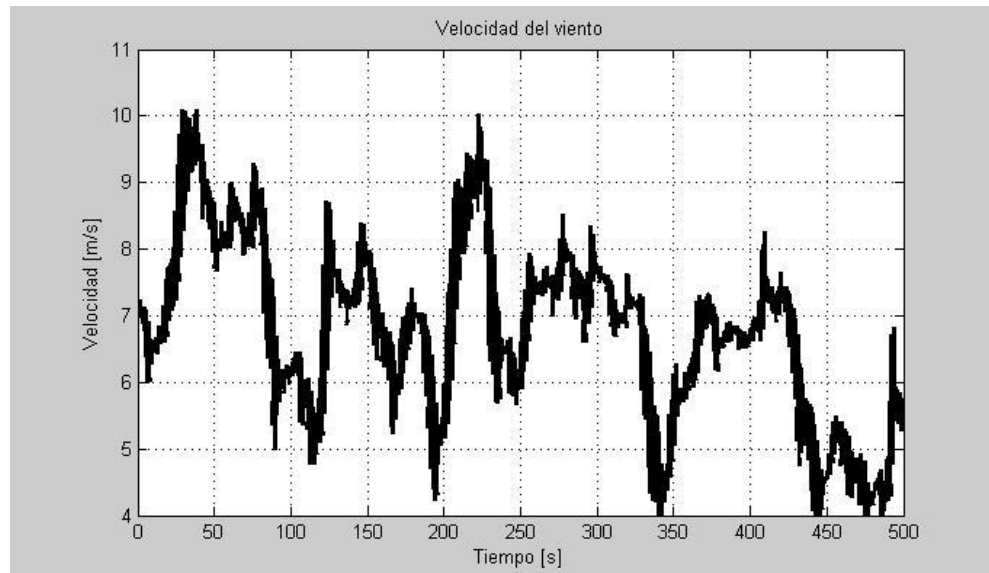


Figura 47. Velocidad de rotación mecánica de la turbina en p.u. – Baja velocidad.

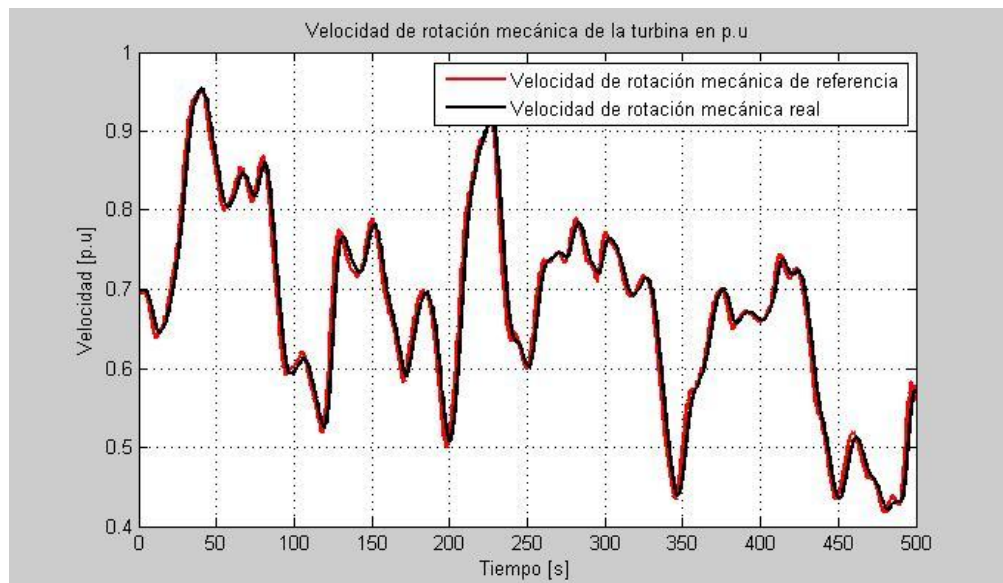


Figura 48. Potencia activa generada en p.u. – Baja velocidad.

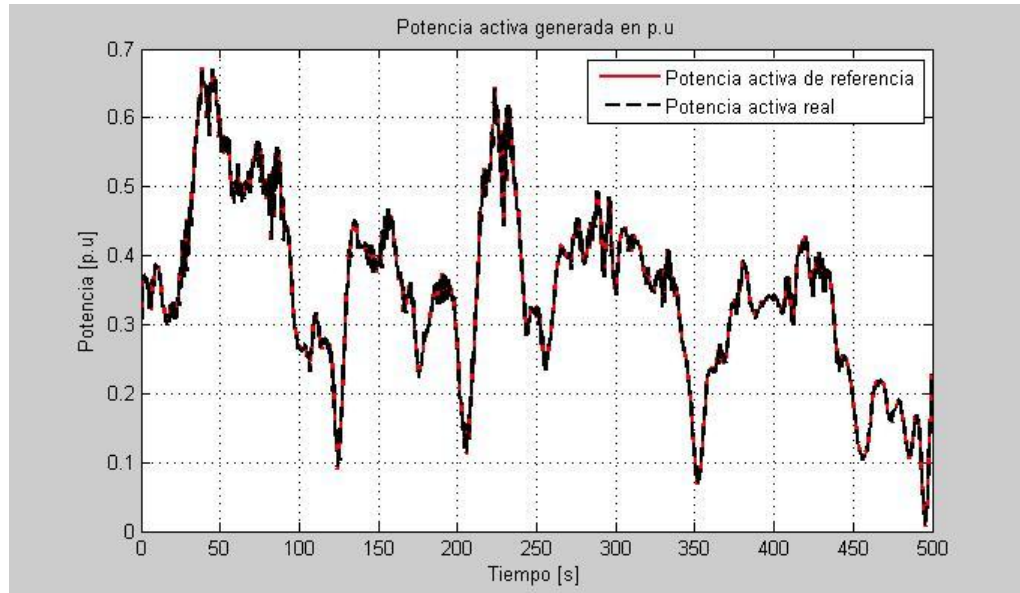


Figura 49. Potencia reactiva generada en p.u. – Baja velocidad.

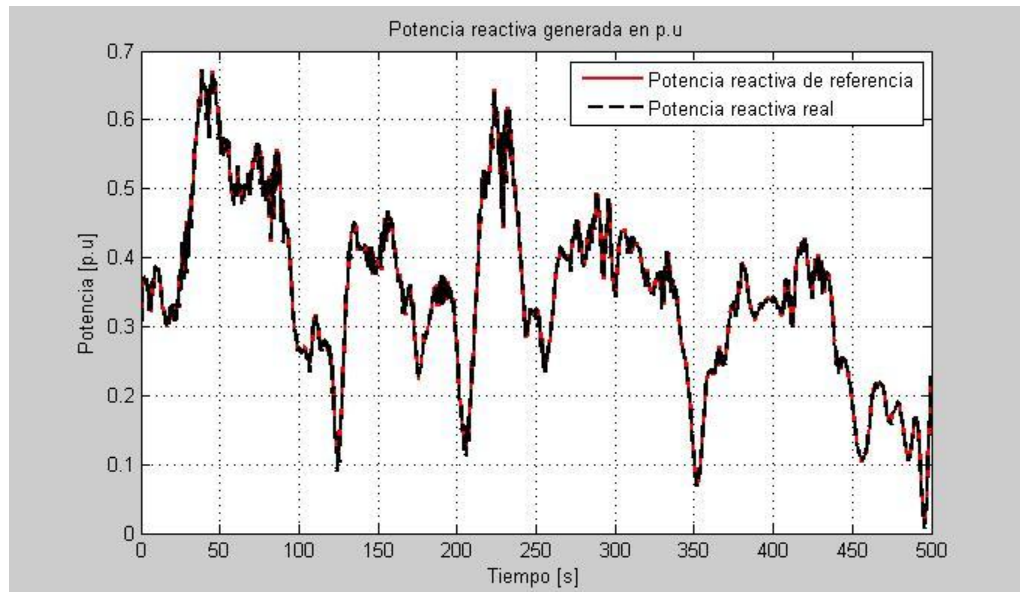


Figura 50. Tensión en el eje directo del rotor – Baja velocidad.

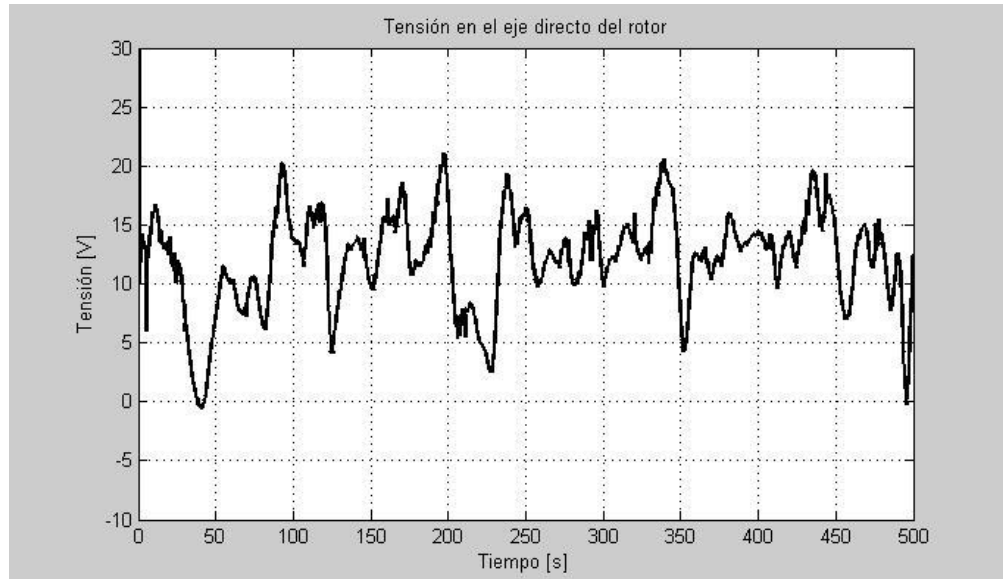
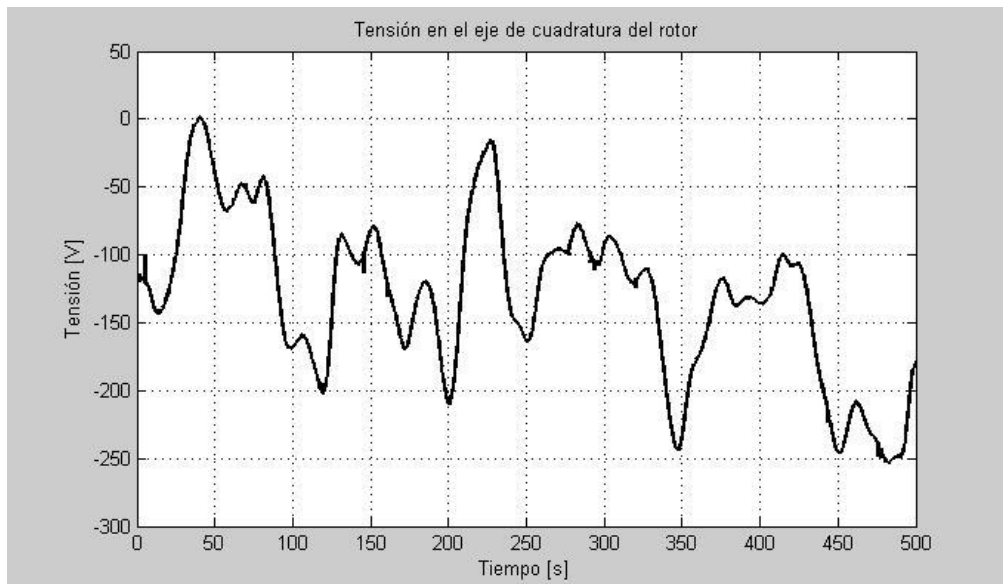


Figura 51. Tensión en el eje de cuadratura del rotor – Baja velocidad.



Al igual que en el caso anterior la velocidad nominal del rotor del generador es de 19 rpm (velocidad base), la potencia nominal de 2 MW (potencia base) y el factor de potencia es de 0.95 según especificaciones dadas en el *anexo A*, la tensión del rotor en eje directo y en el eje de cuadratura no se limita, permitiendo que el generador opere tanto en modo sub-síncrono como en modo sobre-síncrono. Para

esta región de operación la referencia no es fija sino variable dado que se busca extraer la potencia máxima dependiendo del perfil de velocidad del viento.

El objetivo de control es extraer la máxima potencia activa y reactiva, a partir de una entrada de velocidad de viento menor a la velocidad de potencia nominal de la turbina. La gráfica de velocidad de rotación de la turbina *figura 47*, presenta un buen seguimiento de la referencia, debido a que se está manipulando el torque del generador para garantizar la velocidad mecánica de rotación óptima y así lograr extraer la potencia activa máxima.

La *figura 48* muestra una gran similitud entre la potencia activa generada real y la potencia activa generada de referencia, esto comprueba que se está extrayendo la máxima potencia activa, a pesar de que la velocidad del viento es menor a la velocidad de potencia nominal. La potencia activa generada, es controlada por la tensión en el eje de cuadratura del rotor (*figura 51*), en la cual se observan unas variaciones para garantizar la potencia activa máxima.

La potencia reactiva generada *figura 49*, muestra una gran similitud entre el valor de la potencia reactiva real y la potencia reactiva de referencia, esto comprueba que se está extrayendo la máxima potencia reactiva, a pesar de que la velocidad del viento es menor a la velocidad de potencia nominal. La potencia reactiva generada, es controlada por la tensión en el eje directo del rotor (*figura 50*), en la cual se observan unas variaciones para garantizar la potencia reactiva máxima.

6. 2 RESULTADOS PI – SINTONIZADO EN SIMULINK

6. 2. 1 Resultados del control PI para la velocidad mecánica a través del pitch

Los resultados que se muestran a continuación, se obtuvieron al controlar la velocidad mecánica de un generador DFIG mediante un regulador PI sintonizado en Simulink, considerando que el aerogenerador va a operar en una zona donde la velocidad del viento presenta un valor mayor al nominal del aerogenerador.

La ecuación (6.1) muestra el controlador sintonizado, el cual se probó con una entrada de velocidad promedio del viento de 18 m/s , una intensidad de turbulencia del 15% (ver *figura 41*) en el modelo de la turbina eólica implementado en Matlab-Simulink.

$$G_{PI}(s) = -87.9 - \frac{1.4}{s} \quad (6.1)$$

La *figura 52* corresponde a la variable manipulada (ángulo de paso de las aspas) para controlar la velocidad de rotación mecánica de la turbina. El máximo valor de la acción de control es cercana a 32° y se presenta coincidiendo con el pico máximo de la velocidad del viento.

En la *figura 53*, se puede observar el comportamiento de la velocidad de rotación mecánica de la turbina usando el regulador PI.

Dicha señal se mantiene en un valor cercano al de referencia durante el tiempo de simulación pero tiene mayor variación y sobrepicos más altos si se compara con la señal vista en la *figura 43*, que corresponde a la gráfica de dicha velocidad utilizando el control diseñado es este proyecto, mediante la técnica QFT.

Figura 52. Ángulo de paso de las aspas – PI.

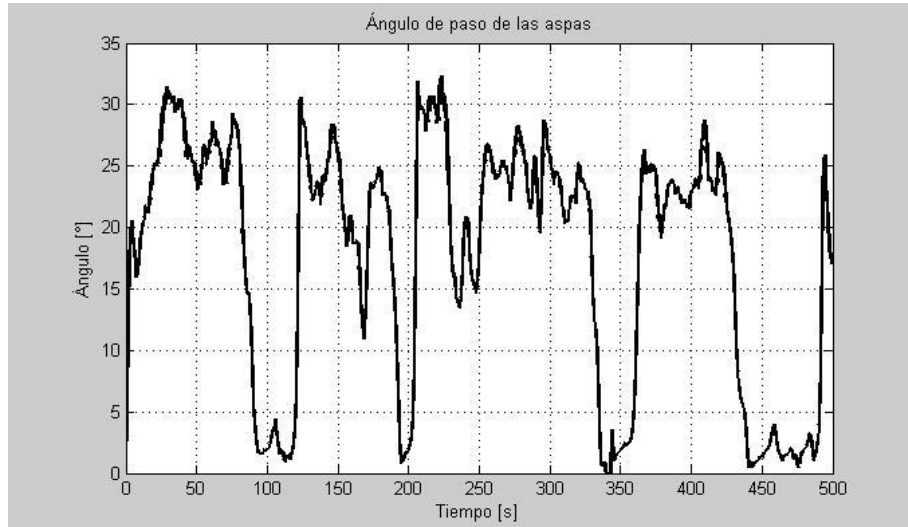
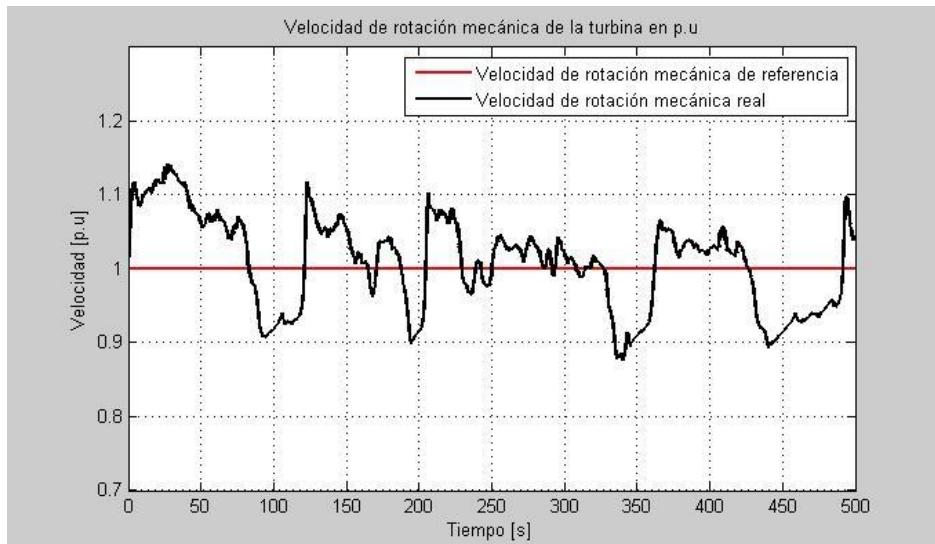


Figura 53. Velocidad de rotación de la turbina en p.u. – PI.



La potencia activa y reactiva generada (*figura 54 y 55*) para una velocidad del viento alta, permanecen en un valor cercano al nominal (valor de referencia) durante el tiempo de simulación.

Figura 54. Potencia activa generada en p.u. – PI.

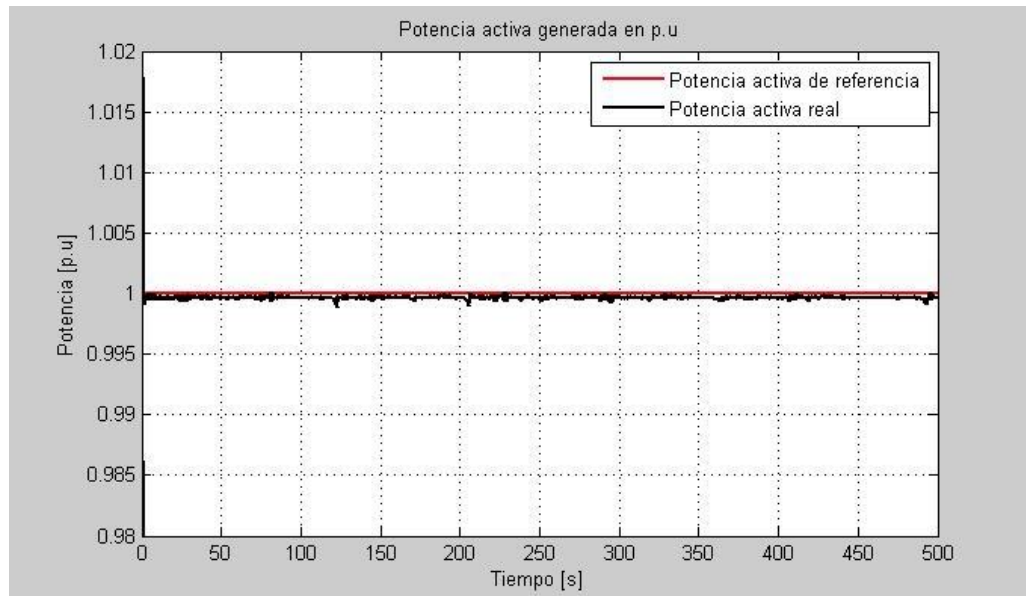
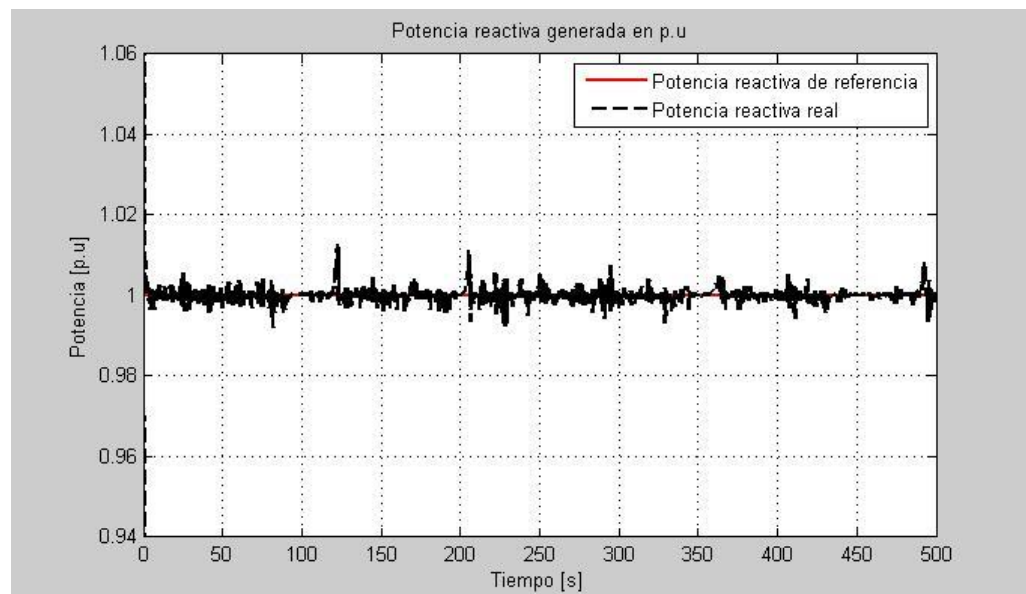


Figura 55. Potencia reactiva generada en p.u. – PI.



6. 2. 2 Resultados de control PI para la velocidad mecánica a través del torque del generador

Para la condición de operación donde la velocidad del viento es menor a la nominal del aerogenerador se sintonizó un controlador PI con el fin de monitorear la velocidad de la turbina. La ecuación 6.2 corresponde a dicho controlador.

$$G_{PI}(s) = -28053 - \frac{11713}{s} \quad (6.2)$$

Para analizar el desempeño del PI sintonizado se usó el perfil de viento de la *figura 56* que coincide con el usado para evaluar el desempeño del controlador QFT, cuya velocidad promedio es de 8 m/s y una intensidad de turbulencia del 15%. De la *figura 57* hasta la *figura 61* se muestran los resultados de simulación obtenidos del comportamiento de las variables del sistema.

Figura 56. Velocidad del viento – Baja velocidad.

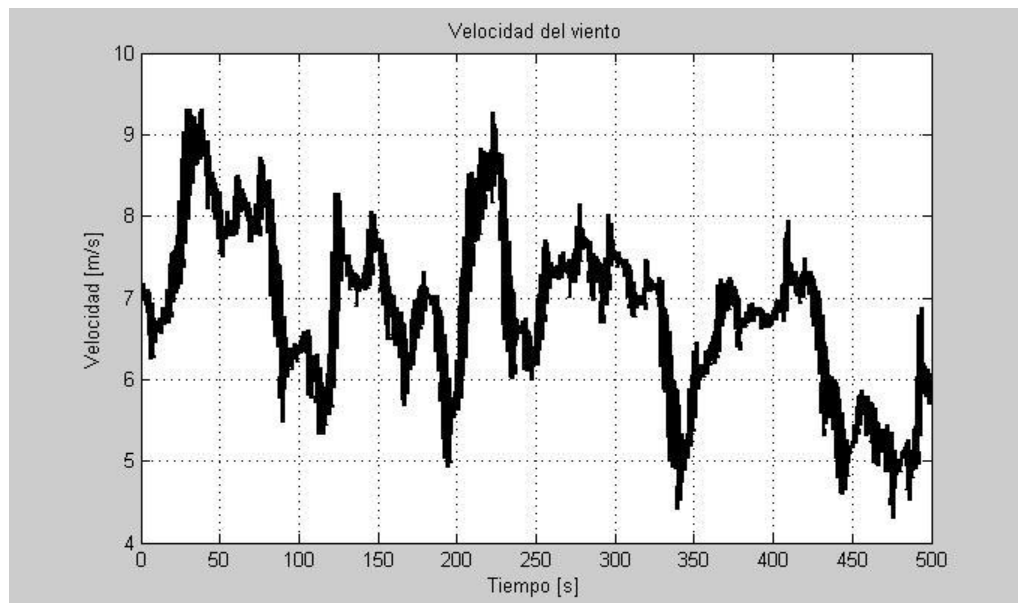


Figura 57. Velocidad de rotación mecánica de la turbina en p.u. – Baja velocidad.

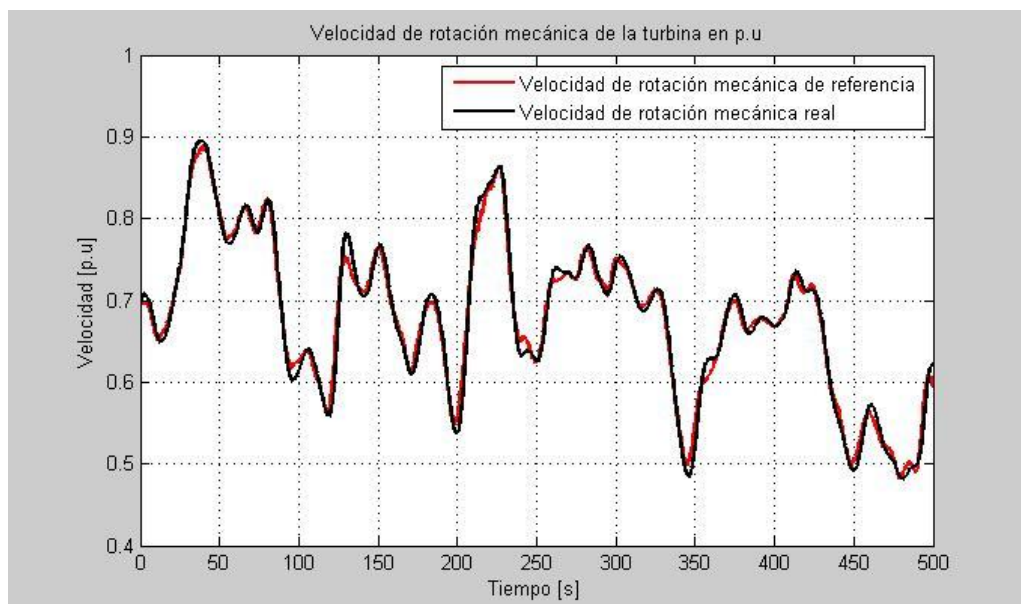


Figura 58. Potencia activa generada en p.u. – Baja velocidad.

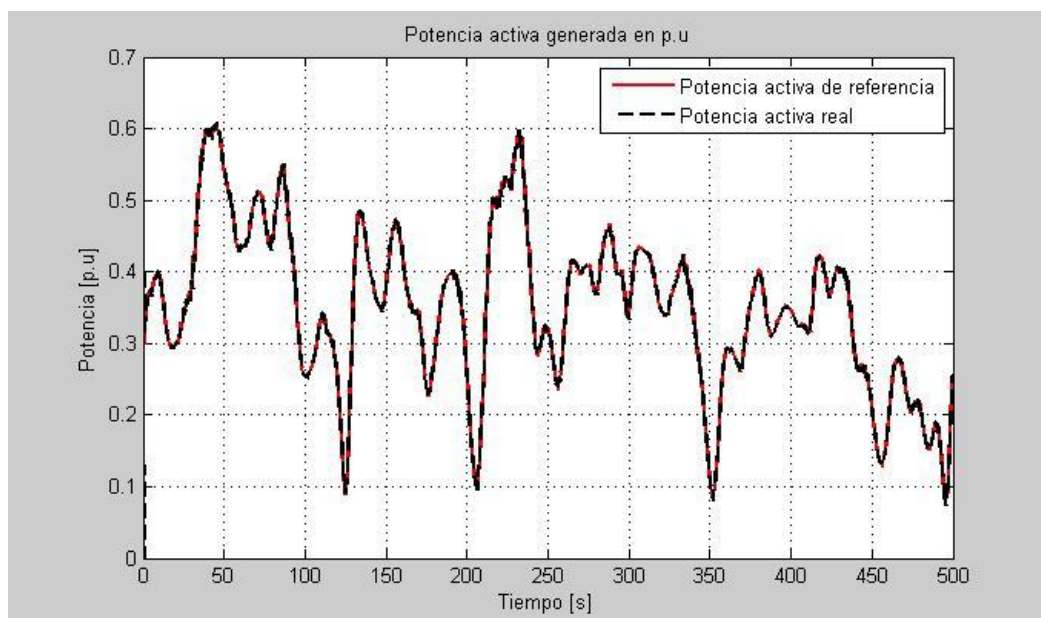


Figura 59. Potencia reactiva generada en p.u. – Baja velocidad.

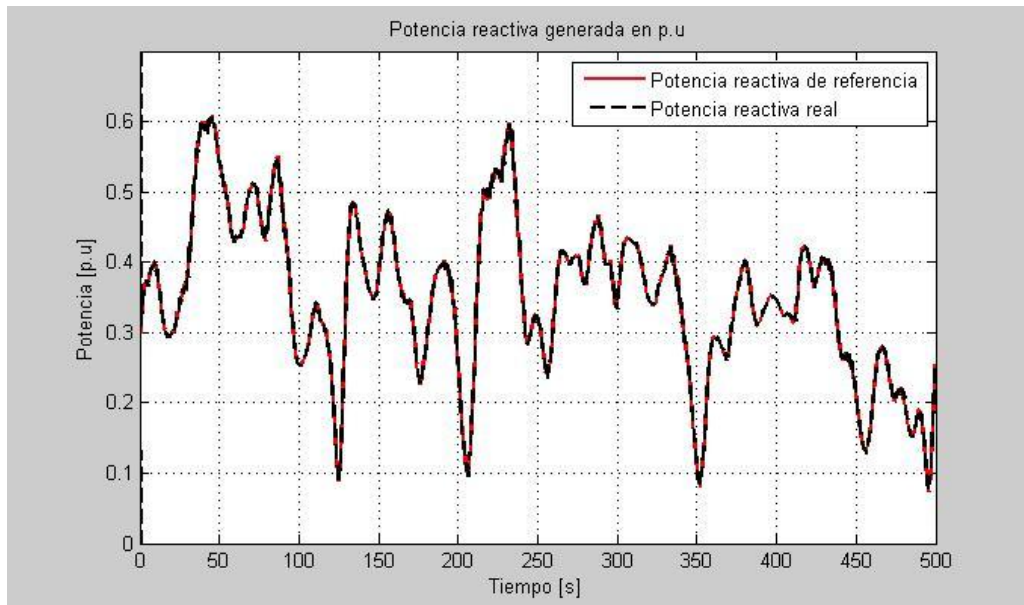


Figura 60. Tensión en el eje directo del rotor – Baja velocidad.

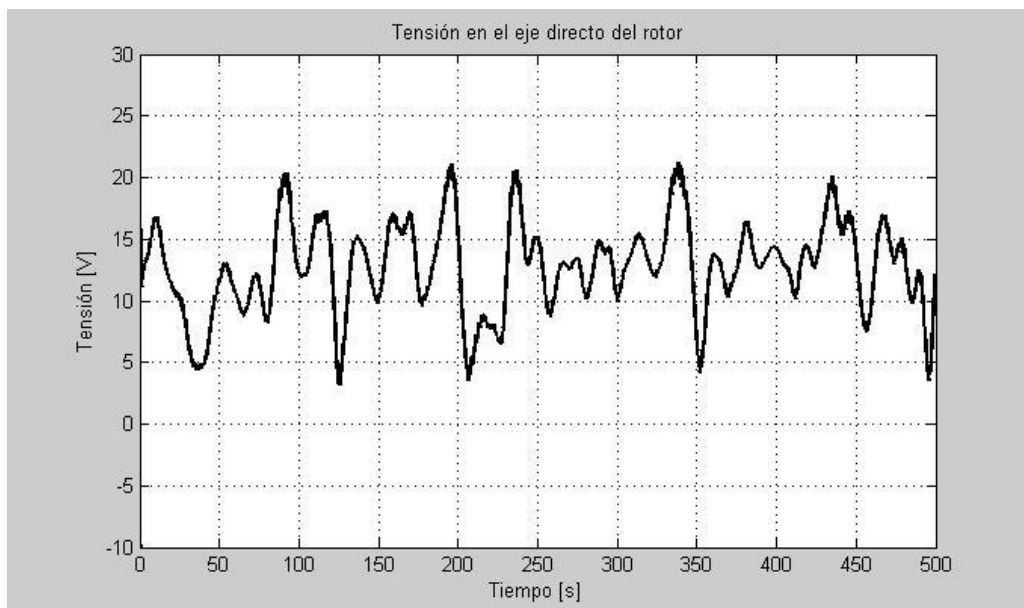
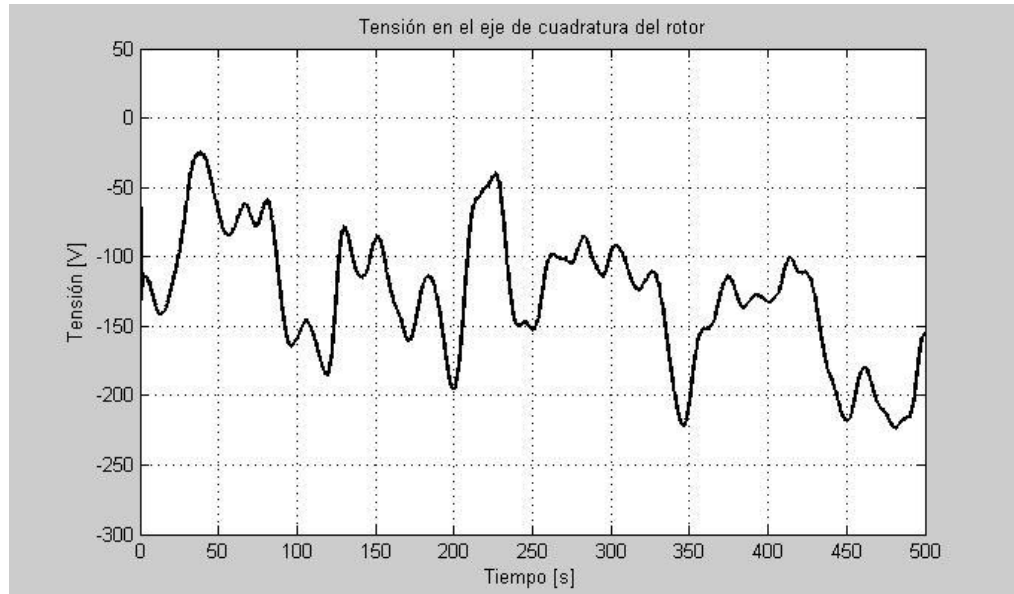


Figura 61. Tensión en el eje de cuadratura del rotor – Baja velocidad.



El objetivo de control es extraer la máxima potencia activa y reactiva, a partir de una entrada de velocidad de viento menor a la velocidad de potencia nominal de la turbina. La gráfica de velocidad de rotación de la turbina *figura 57*, al igual que la *figura 47* tiene buen seguimiento de la referencia, pero el control diseñado con QFT, gracias al prefiltro, presenta un seguimiento más preciso.

Para esta región de operación la referencia no es fija sino variable, dado que se busca extraer la potencia máxima dependiendo del perfil de velocidad del viento. La *figura 58* corresponde a la potencia activa generada por el DFIG, la cual tiene buen seguimiento de la referencia de máxima potencia.

La potencia reactiva generada *figura 59*, muestra una gran similitud entre el valor de la potencia reactiva real y la potencia reactiva de referencia.

La tensión en el eje director y de cuadratura del rotor (*figura 60* y *61* respectivamente), presentan variaciones más suaves con respecto a las presentadas usando el control QFT.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

El objetivo general de este proyecto es mejorar la robustez de un sistema de generación eólico a partir del control diseñado con la técnica QFT (Quantitative Feedback Theory), para mantener sus condiciones óptimas de desempeño en potencia generada y velocidad rotacional, en presencia de la incertidumbre propia del modelo y las perturbaciones externas. Para dar cumplimiento a lo anterior se diseñaron dos sistemas de control que actúan de forma separada, dependiendo de la velocidad del viento a la cual va a operar el aerogenerador

Por lo tanto, se presentan las siguientes conclusiones, como prueba del cumplimiento del objetivo general del presente proyecto de grado.

- Los resultados permiten evidenciar el buen desempeño de los controladores robustos diseñados para las condiciones de funcionamiento del aerogenerador propuestas, pero un único regulador monovariante no logra controlar todas las variables de salida a la vez (velocidad mecánica rotacional y potencia tanto activa como reactiva generada), debido a que el sistema tiene múltiples entradas y múltiples salidas. Por lo tanto se concluye que es necesario diseñar varios lazos de control, uno para monitorear cada una de las variables de interés o utilizar un controlador multivariante.
- Para facilitar el proceso de diseño de un controlador robusto para una turbina eólica con regulador DFIG, se diseñó la interfaz gráfica WQC, que con base a las especificaciones técnicas de cada aerogenerador y las características del viento en el lugar donde va a funcionar, permite diseñar y probar controladores con características y condiciones de operación específicas para cada necesidad.
- El uso de control robusto para turbinas eólicas presenta un mejor desempeño comparado con controladores clásicos, dado que además de considerar especificaciones de sobrepico y tiempo de establecimiento, permite tener en cuenta la incertidumbre propia del modelo y el rechazo de perturbaciones externas.
- El controlador robusto basado en la técnica QFT, que se diseñó para monitorear la velocidad angular mecánica de los álabes de la turbina a partir del ángulo de paso de las aspas, presenta un comportamiento óptimo, ya que tanto velocidad mecánica como la potencia activa y reactiva generada se mantienen en su valor nominal, para altas velocidades del viento, a pesar de la incertidumbre paramétrica asociada al modelo linealizado y a las fuertes perturbaciones debidas a la turbulencia del viento.

- El controlador robusto basado en la técnica QFT, que se diseñó para monitorear la velocidad mecánica de la turbina a través del torque del generador, presenta un comportamiento óptimo, dado que el seguimiento a la referencia es más preciso, lo cual implica que la potencia activa y reactiva generada en terminales del generador corresponde a la máxima potencia que se puede generar, ante una entrada de velocidad del viento menor a la nominal del aerogenerador.

REFERENCIAS

AVCI, Ebubekir, *et al.* Vibration control of 3P(S) 4 class parallel mechanisms for high speed applications using Quantitative Feedback Design. En: RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (14-18, septiembre, 2014: Chicago, Estados Unidos). IEEE. 2014. p. 5.

COMASÒLIVAS, Ramón; ESCOBET, Teresa y QUEVEDO, Joseba. Aplicación de la técnica de la QFT para el control activo de las perturbaciones mecánicas en un interferómetro óptico. En: Sistemas, Cibernética e Informática. 2004. vol. 1, no 1.

EGAÑA, Igor, *et al.* Control robusto QFT de un helicóptero de 3 GDL. En: Seminario anual de automática y electrónica industrial (septiembre 1998). Pamplona, España. Departamento de Automática y Computación, Campus de Arrosadía, 1998. P 59-62.

GARCÍA SANZ, Mario. Control robusto cuantitativo QFT: Historia de una idea. En: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. 2005. vol. 2, no. 3, p. 25-38.

GARCÍA SANZ, Mario y ELSO, Jorge. Beyond the linear limitations by combining switching and QFT: Application to wind turbines pitch control systems. En: International journal of robust and nonlinear control. 2009. p. 40-58.

GARCÍA SANZ, Mario. Control robusto Q.F.T. Teoría y aplicaciones. Pamplona. Universidad Pública de Navarra. Departamento de automática y computación. 2003. 65p.

GARCÍA, Mario y HOUPIS, Constantine. Wind energy systems. Control engineering design. Estados Unidos: CRC Press, 2012. 602p. ISBN 978-1-4398-2179-4.

GIL MARTÍNEZ, Montserrat. Síntesis de controladores robustos mediante el análisis de la compatibilidad de especificaciones incertidumbre. Tesis doctoral. Pamplona: Universidad Pública de Navarra. Departamento de Automática y Computación, 2001. 462p.

GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

GONZÁLEZ, Miguel; VÁZQUEZ, Francisco y MORILLA, Fernando. Control multivariable centralizado con desacoplo para aerogeneradores de velocidad variable, España. En: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Octubre, 2010, vol. 7, no 4, p. 53-64.

MUNTEANU, Iulian, *et al.* Optimal Control of Wind Energy Systems – Toward a Global Approach. Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-079-7.

MUÑOZ MANSILLA, Rocío. Control multivariable mediante técnicas QFT. Aplicaciones a sistemas navales. Tesis doctoral. Madrid. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Departamento de informática y automática, 2007. 320p.

PARK, Inseok; HONG, Seungwoo y SUNWOO, Myoungcho. Robust Air-to-Fuel Ratio and Boost Pressure Controller Design for the EGR and VGT Systems Using Quantitative Feedback Theory. En: IEEE Transactions on Control Systems Technology. Noviembre, 2014. vol. 22, no. 6, p. 2218- 2231.

PATIL, Mukesh, *etal.* Real time implementation of robust QFT controller and prefilter for magnetic levitation system. En: Industrial Instrumentation and Control (ICIC) (28-30, mayo, 2015: Pune). International Conference IEEE. 2015. p. 703-708.

RAMIREZ MORENO, Gerson y CASTELLANOS LAMUS Alonso. Desarrollo de una herramienta de diseño automático de reguladores LQG para turbinas eólicas de velocidad variable. Trabajo de grado (Ingeniería electrónica). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías físico-mecánicas, 2008. 94p.

ROUSSOS, A.; NTAMPASI, V. y KOSMIDOU, O. Pitch control for variable speed wind turbines. En: 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotic (14-18, septiembre, 2014: Chicago, Estados Unidos). SCITEPRESS. 2013. p. 43-49.

SAIFUL YAZAN, Siti, *et al.* Development of robust Quantitative Feedback Theory controller for Quanser bench-top helicopter. En: Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA) (25-25, noviembre, 2014: Kuala Lumpur). International Conference IEEE. 2014. p. 4.

SAN ROMÁN, Álvaro. Diseño de un aerogenerador para uso particular. Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Madrid. Universidad Carlos III de Madrid. 2012-2013. 80p.

USCÁTEGUI CRISTANCHO, Omar y PRADA PARRA, Dario. Modelado y simulación del sistema mecánico de un generador eólico de eje horizontal con tres palas. Trabajo de grado (Ingeniería mecánica). Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. 2007. 197p.

VÁSQUEZ, W y JÁTIVA, J. Modelación, simulación y control de aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentando utilizando Matlab. En: Revista técnica Energía. 2014. no 11, p. 143-152.

VERGARA BARRIOS, Pedro Pablo, *et al.* Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia. En: UIS Ingenierías. Julio-diciembre, 2014, vol. 13, no 2, p. 49-57.

ANEXOS

ANEXO A: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS– TURBINA NM 2000/82.

Las especificaciones técnicas de la turbina eólica y los parámetros eléctricos del generador DFIG se tomaron de la tesis de maestría *Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico*³⁸, donde ellos referencian el aerogenerador NM 2000/82, fabricado por *Neg Micon*, de velocidad variable controlado por variación del ángulo de paso (pitch), como se muestra en la *tabla 4* y generador DFIG de 2MW de potencia, cuyos valores se encuentran en la *tabla 5*.

Tabla 4. Especificaciones técnicas – turbina NM 2000/82.

ROTOR		
Parámetro	Valor	Unidad
<i>Número de palas</i>	3	
<i>Velocidad nominal</i>	19	[rpm]
<i>Diámetro</i>	82	[m]
<i>Regulación de potencia</i>	<i>Pitch</i>	
<i>Velocidad del viento de arranque</i>	4	[m/s]
<i>Velocidad del viento de frenado</i>	25	[m/s]
<i>Velocidad del viento para la potencia nominal</i>	<i>Aprox. 11</i>	[m/s]
<i>Momento de inercia</i>	$50 \cdot 10^5$	[Kg.m ²]
CAJA MULTIPLICADORA		
Parámetro	Valor	
<i>Tipo</i>	<i>Planetario</i>	
<i>Relación de engranajes</i>	85	
TRANSMISIÓN MECÁNICA		
Parámetro	Valor	Unidad
<i>Coefficiente de rigidez del eje de baja velocidad</i>	$114 \cdot 10^5$	[Nm/rad]
<i>Coefficiente de amortiguamiento del eje de baja velocidad</i>	$756 \cdot 10^5$	[Nm * s/rad]
<i>Coefficiente de rigidez del eje de alta velocidad</i>	$1 \cdot 10^5$	[Nm/rad]
<i>Coefficiente de amortiguamiento del eje de alta velocidad</i>	$1 \cdot 10^3$	[Nm * s/rad]
<i>Inercia del tren de engranajes de baja velocidad</i>	0.01	[Kg.m ²]
<i>Inercia del tren de engranajes de alta velocidad</i>	0.01	[Kg.m ²]
GENERADOR		
Parámetro	Valor	Unidad
<i>Tipo</i>	<i>DFIG</i>	

³⁸GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. *Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico*. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

Velocidad de rotación mínima	750	[rpm]
Velocidad de rotación máxima	1800	[rpm]

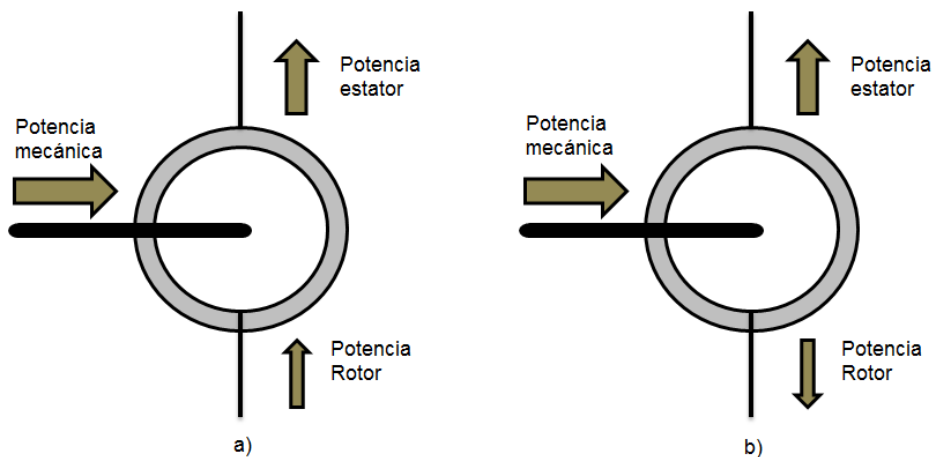
Tabla 5. Parámetros eléctricos – Generador DFIG 2MW.

Generador DFIG - 2MW			
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Inductancia del bobinado del estator	L_s	0.07	[mH]
Inductancia del bobinado del rotor	L_r	0.08	[mH]
Inductancia mutua	L_m	3	[mH]
Resistencia del bobinado del estator	R_s	0.001	[Ω]
Resistencia del bobinado del rotor	R_r	0.0013	[Ω]
Número de pares de polos	P_f	2	
Inercia del generador	J_g	65	[Kg.m ²]

El DFIG presenta dos modos de operación³⁹ los cuales dependen de la magnitud y fase de la tensión en el rotor con relación al deslizamiento. El modo sub-síncrono se presenta si el voltaje del rotor se encuentra en contrafase con el voltaje inducido y su magnitud es menor, y el modo sobre-síncrono se presenta cuando el voltaje del rotor está en fase con el voltaje inducido y su magnitud es mayor.

En la *figura 62*, se presenta el flujo de potencia para los dos modos de operación mencionados, donde a) corresponde al modo sub-síncrono y b) corresponde al modo sobre-síncrono

Figura 62. Modos de operación del DFIG. a) Modo sub-síncrono y b) Modo sobre-síncrono.



³⁹GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

ANEXO B: LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA

Un sistema no lineal se puede representar mediante variables de estado en forma matricial, para ello se requiere expresar cada ecuación diferencial siguiendo el modelo mostrado en la ecuación (B.1).

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t)) \quad (B.1)$$

Donde $x(t)$ corresponde al vector de estados de orden $n \times 1$, siendo n el número de estados, $u(t)$ el vector de entradas de orden $p \times 1$, con p como el número de entradas y $f(x(t), u(t))$ un vector función de $n \times 1$.

Una vez obtenidas las ecuaciones de estado según la estructura anterior, se identifican aquellas que sean no lineales y se procede a linealizarlas mediante la expansión en series de Taylor alrededor de un punto o trayectoria de operación. Dicha trayectoria de operación se representa por $P_0 = [\bar{U}_i, \bar{X}_i]$ con \bar{U}_i el vector de entradas en estado estable y \bar{X}_i el vector de estados en estado estable.

Al expandir la ecuación no lineal (B.1) en una serie de Taylor alrededor de P_0 y descartando los términos de orden superior de la serie, se obtiene la expresión (B.2) para $i=1, 2, 3, \dots, n$.

$$\dot{x}_i(t) = f_i(\bar{X}, \bar{U}) + \sum_{j=1}^n \left. \frac{df_i(x, u)}{dx_j} \right|_{P_0} (x_j - \bar{X}_j) + \sum_{j=1}^p \left. \frac{df_i(x, u)}{du_j} \right|_{P_0} (u_j - \bar{U}_j) \quad (B.2)$$

Siendo

$$\begin{aligned} \Delta x_j &= x_j - \bar{X}_j \\ \Delta u_j &= u_j - \bar{U}_j \\ \Delta \dot{x}_i &= \dot{x}_i - f_i(\bar{X}, \bar{U}) \end{aligned} \quad (B.3)$$

Entonces

$$\Delta \dot{x}_i = \sum_{j=1}^n \left. \frac{df_i(x, u)}{dx_j} \right|_{P_0} \Delta x_j + \sum_{j=1}^p \left. \frac{df_i(x, u)}{du_j} \right|_{P_0} \Delta u_j \quad (B.4)$$

Reescribiendo la ecuación anterior en forma matricial se tiene:

$$\Delta \dot{x} = A * \Delta x + B * \Delta u$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \frac{df_1}{dx_2} & \dots & \frac{df_1}{dx_n} \\ \frac{df_2}{dx_1} & \frac{df_2}{dx_2} & \dots & \frac{df_2}{dx_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{df_n}{dx_1} & \frac{df_n}{dx_2} & \dots & \frac{df_n}{dx_n} \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{du_1} & \frac{df_1}{du_2} & \dots & \frac{df_1}{du_n} \\ \frac{df_2}{du_1} & \frac{df_2}{du_2} & \dots & \frac{df_2}{du_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{df_n}{du_1} & \frac{df_n}{du_2} & \dots & \frac{df_n}{du_n} \end{bmatrix} \quad (B.5)$$

Aplicando el procedimiento descrito se obtiene el modelo lineal de una turbina eólica. Para ello se escriben las ecuaciones diferenciales que caracterizan la dinámica, en la forma dada por la ecuación (B.1).

$$f_1 = \frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{J_t} (T_a - D_r(\omega_t - \omega_1) - Q_r) \quad (B.6)$$

$$f_2 = \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{N^2}{J_{e1} + N^2 J_{e2}} \left(\frac{D_r}{N} (\omega_t - \frac{\omega_2}{N}) + \frac{Q_r}{N} - D_g(\omega_2 - \omega_g) - Q_g \right) \quad (B.7)$$

$$f_3 = \frac{d\omega_g}{dt} = \frac{1}{J_g} (D_g(\omega_2 - \omega_g) + Q_g - T_e) \quad (B.8)$$

$$f_4 = \frac{dQ_r}{dt} = K_r(\omega_t - \omega_1) \quad (B.9)$$

$$f_5 = \frac{dQ_g}{dt} = K_g(\omega_2 - \omega_g) \quad (B.10)$$

$$f_6 = \frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{\tau} (\beta_{ref} - \beta) \quad (B.11)$$

$$\begin{bmatrix} f_7 \\ f_8 \\ f_9 \\ f_{10} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = -([L]^{-1}[R] + [L]^{-1}[\Omega][L]) \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + [L]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (B.12)$$

Definiendo

$$T_a = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} * \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \quad (B.13)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda}} + 0.0068\lambda \quad (B.14)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (B.15)$$

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v} \quad (B.16)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(\omega_s - \omega_r) \\ 0 & 0 & (\omega_s - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (B.17)$$

$$\omega_r = p\omega_g \quad (B.18)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} = [L] \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (B.19)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{rr} & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (B.20)$$

$$[L]^{-1} = \frac{1}{L_{rr}L_{ss} - L_m^2} \begin{bmatrix} L_{rr} & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_{rr} & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_{ss} & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (B.21)$$

$$\begin{aligned} L_{ss} &= L_s + L_m \\ L_{rr} &= L_r + L_m \end{aligned} \quad (B.22)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_f L_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (B.23)$$

Dónde:

T_a : Par aerodinámico [Nm].

T_e : Par electromagnético producido por el generador de inducción [Nm].

ω_t : Velocidad de rotación mecánica de la turbina [rpm].

ω_g : Velocidad de rotación del generador [rpm].

ω_2 : Velocidad de rotación del engranaje de alta velocidad [rpm].

D_r : Coeficiente de amortiguamiento del eje de baja velocidad [$Nm.s/rad$].

D_g : Coeficiente de amortiguamiento del eje de alta velocidad [$Nm.s/rad$].

N : Relación de engranes de la caja multiplicadora.

K_r : Coeficiente de rigidez del eje de baja velocidad [Nm/rad].

K_g : Coeficiente de rigidez del eje de alta velocidad [Nm/rad].

J_r : Momento de inercia de las aspas y el buje [$Kg.m^2$].

J_g : Momento de inercia del generador [$Kg.m^2$].

J_{e1} : Momento de inercia de los engranes de baja velocidad de la caja multiplicadora [$Kg.m^2$].

J_{e2} : Momento de inercia de los engranes de alta velocidad de la caja multiplicadora [$Kg.m^2$].

Q_r : Par de reacción debido a la rigidez del eje de baja velocidad [Nm].

Q_g : Par de reacción debido a la rigidez del eje de alta velocidad [Nm].

β : Ángulo de paso de las aspas.

L_s : Inductancia del bobinado del estator [mH].

L_r : Inductancia del bobinado del rotor [mH].

L_m : Inductancia mutua [mH].

R_s : Resistencia del bobinado del estator [Ω].

R_r : Resistencia del bobinado del rotor [Ω].

ω_s : Velocidad de sincronismo [rpm].

ω_r : Velocidad eléctrica del rotor [rpm].

P_f : Número de pares de polos.

S : Potencia aparente [VA].

P_{act} : Potencia activa [W].

Q_{rea} : Potencia reactiva [VA_r].

La representación en variables de estado se determina con el objeto de diseñar los controladores que regulan tanto la potencia generada, como la velocidad de rotación de la turbina, por tal motivo se realiza un desacoplo de la dinámica del sistema mecánico del sistema eléctrico. Esta aproximación es válida porque la dinámica del generador DFIG presenta un tiempo de establecimiento del orden de los milisegundos, comparado con la dinámica de la caja multiplicadora que se encuentra en el orden de los segundos⁴⁰.

Las variables de estado para el sistema mecánico son:

- ω_t : Velocidad de rotación mecánica de la turbina [*rpm*].
- ω_2 : Velocidad de rotación del engranaje de alta velocidad [*rpm*].
- ω_g : Velocidad de rotación del generador [*rpm*].
- Q_r : Par de reacción debido a la rigidez del eje de baja velocidad [*Nm*].
- Q_g : Par de reacción debido a la rigidez del eje de alta velocidad [*Nm*].
- β : Ángulo de paso de las aspas [°].

Las variables de estado para el sistema eléctrico son:

- I_{ds} : Corriente en el eje directo del estator [*A*].
- I_{qs} : Corriente en el eje de cuadratura del estator [*A*].
- I_{dr} : Corriente en el eje directo del rotor [*A*].
- I_{qr} : Corriente en el eje de cuadratura del rotor [*A*].

Las variables de entrada para el sistema mecánico son el ángulo de paso de referencia de las aspas (β_{ref}) y la velocidad del viento (v), y para el sistema eléctrico son las corrientes en el eje directo y de cuadratura del rotor ($I_{dr} - I_{qr}$). A continuación se presentan los modelos desacoplados en variables de estado.

⁴⁰GONZÁLEZ, Hernando y VARGAS, Hermann. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. 2008. 128p.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{Q}_r \\ \dot{Q}_g \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} & 0 & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & a_{35} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{52} & a_{53} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_2 \\ \omega_g \\ Q_r \\ Q_g \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_{61} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \beta_{ref} \\ v \end{bmatrix} \quad (B.24)$$

$$\omega_t = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] * \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_2 \\ \omega_g \\ Q_r \\ Q_g \\ \beta \end{bmatrix} \quad (B.25)$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{J_r} \left(\frac{dT_a}{d\omega_t} - D_r \right) & a_{12} &= \frac{D_r}{NJ_r} & a_{14} &= -\frac{1}{J_r} \\ a_{16} &= \frac{1}{J_r} \left(\frac{dT_a}{d\beta} \right) & a_{21} &= \frac{D_r N}{J_{e1} + N^2 J_{e2}} & a_{22} &= \frac{-(D_r + N^2 D_g)}{J_{e1} + N^2 J_{e2}} \\ a_{23} &= \frac{D_g N^2}{J_{e1} + N^2 J_{e2}} & a_{24} &= \frac{N}{J_{e1} + N^2 J_{e2}} & a_{25} &= \frac{-N^2}{J_{e1} + N^2 J_{e2}} \\ a_{32} &= \frac{D_g}{J_g} & a_{33} &= -\frac{D_g}{J_g} & a_{35} &= \frac{1}{J_g} \\ a_{41} &= k_r & a_{42} &= -\frac{k_r}{N} & a_{52} &= k_g \\ & & & & a_{32} &= -k_g \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \\ \dot{I}_{dr} \\ \dot{I}_{qr} \end{bmatrix} = -([L]^{-1}[R] + [L]^{-1}[\Omega][L]) \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + [L]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (B.26)$$

$$\begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 1] * \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (B.27)$$

ANEXO C: MANUAL DE USUARIO – WQC



C.1 INTRODUCCIÓN

WQC– Wind QFT Controller es una herramienta-software desarrollada en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander – Colombia, en la cual se calcula la función de transferencia que describe la planta de un sistema de generación eólico acoplado a la red, a partir de modelos aproximados para la velocidad del viento y los sistemas aerodinámico, mecánico y eléctrico de la turbina eólica con generador doblemente alimentado (DFIG), que van programados internamente.

La herramienta calcula los polos, ceros, ganancia y diagrama de Bode de la función de transferencia, a partir de la velocidad promedio del viento y de la velocidad nominal de la turbina eólica. Con el fin de facilitar el cálculo del controlador mediante la toolbox QFT para MATLAB, diseñada por Mario García-Sanz, ver anexo E.

Si la velocidad del viento es menor que la velocidad de potencia nominal, se debe diseñar un prefiltro con la técnica QFT(ver anexo D). Una vez diseñado el control se digita en el software para generar las gráficas, del comportamiento para la velocidad promedio del viento y las variables controladas que pueden ser: potencia activa y reactiva generada por el sistema, ángulo de paso del aspa o velocidad rotacional del aerogenerador, dependiendo de la velocidad promedio del viento para la cual se esté trabajando.

C.2 INSTALACIÓN - WQC

La herramienta-software *WQC*, está diseñada para ejecutarse de la versión de MATLAB R2014a en adelante. Los pasos para su correcta instalación son los siguientes:

1. Descomprimir los archivos de la carpeta *WQC*, en el escritorio o en una dirección de fácil acceso para el ordenador.
2. Instalar desde MATLAB la toolbox QFT que se encuentra en la carpeta *WQC* como *QFTCT*.
3. Verificar que la toolbox de QFT se ejecute correctamente, digitando las siglas *QFTCT* en el workspace de MATLAB.
4. Agregar la carpeta *WQC* al path de MATLAB.

C.3 PASOS PARA LA EJECUCIÓN – WQC

1. Para la ejecución de la herramienta-software, se debe escribir en la ventana de comandos de MATLAB la palabra *INICIO*, de esta manera se desplegará la presentación del programa, como se muestra en la *figura 63*.

Figura 63. Ventana de inicio WQC.




La ventana de *inicio* está compuesta por dos botones:

- **Botón 1:** Direcciona al usuario a la ventana donde se introducen las especificaciones para las variables del viento, modelo eléctrico DFIG, parámetros eléctricos de la turbina y de su transmisión mecánica *figura 64*.
 - **Botón 2:** Antes de salir, se pregunta al usuario si está seguro de que desea realizar dicha acción, siendo así, se cierra el programa.
2. Una vez ejecutada la ventana, se procede a introducir todos los parámetros que describen los modelos implementados en la herramienta-software, si se requiere asignar un valor decimal, se debe separar con punto (.).

Suponiendo que se olvide asignar un valor a algún espacio o este no cumpla los rangos de diseño, saldrá un mensaje de error dependiendo el caso.

Figura 64. Parámetros – WQC.



WQC

INTRODUZCA LOS SIGUIENTES PARÁMETROS

Variables del viento

Velocidad promedio [m/s]

Intensidad de turbulencia [%]

Especificaciones técnicas de la turbina

Radio del aspa [m]

Velocidad de rotación nominal [rpm]

Velocidad de arranque [m/s]

Velocidad de frenado [m/s]

Velocidad potencia nominal [m/s]

Momento de inercia [Kg*m²]

Constante de tiempo del actuador pitch [s]

Especificaciones transmisión mecánica

Relación de transmisión

Rigidez eje de baja velocidad [Nm/rad]

Rigidez eje de alta velocidad [Nm/rad]

Amortiguamiento eje de baja velocidad [Nm*s/rad]

Amortiguamiento eje de alta velocidad [Nm*s/rad]

Inercia tren de engranaje baja velocidad [Kg*m²]

Inercia tren de engranaje baja velocidad [Kg*m²]

Especificaciones eléctricas DFIG

Velocidad de rotación min [rpm]

Velocidad de rotación máx [rpm]

Resistencia del estator [ohm]

Resistencia del rotor [ohm]

Inductancia del estator [H]

Inductancia del rotor [H]

Frecuencia de la red: 50 Hz

Inductancia mutua [H]

Inercia del generador [Kg*m²]

Número de pares de polos

Potencia del generador [W]

Factor de potencia

Tensión de línea de la red [V]

Velocidad de rotación nominal [rpm]

Limpiar datos 3

Calcular función de transferencia 4

INICIO 5

Autores: Laura Tulcán - Leonel Calderón

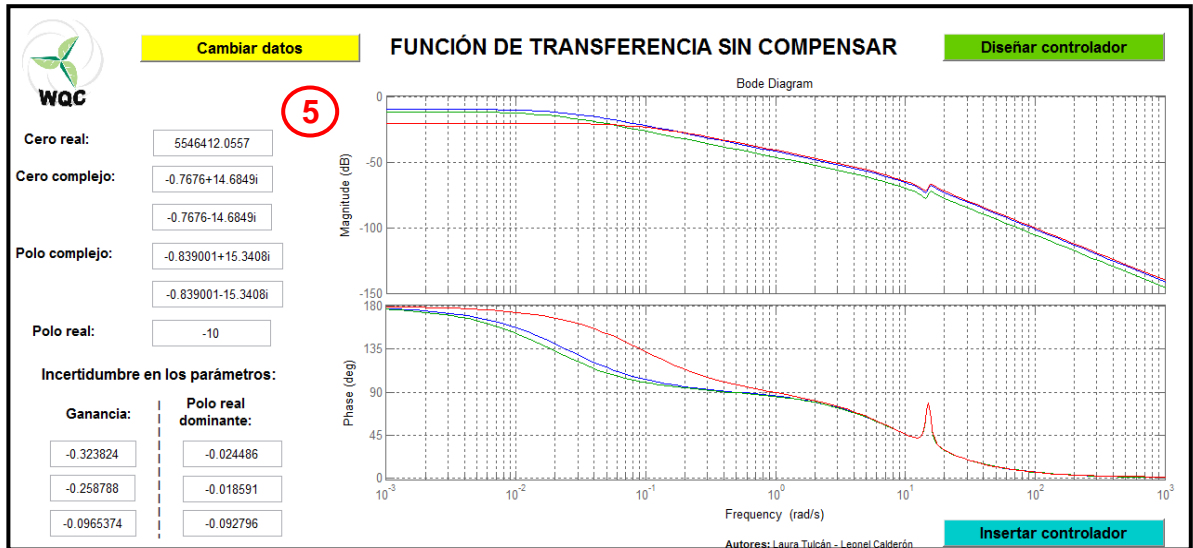
Botón 3: Elimina todos los valores asignados en cada uno de los espacios.

Botón 5: Regresa al inicio al usuario.

3. Al presionar el botón 4, la herramienta calcula la función de transferencia a partir de los parámetros asignados. Si la velocidad promedio del viento es mayor o igual a la velocidad de potencia nominal se ejecuta la *figura 65*, pero si

es menor, se ejecuta la *figura 66*. Esto toma un poco de tiempo ya que la dinámica de los sistemas tienen un tiempo de respuesta lento.

Figura 65. Función de transferencia lado de alta- WQC.



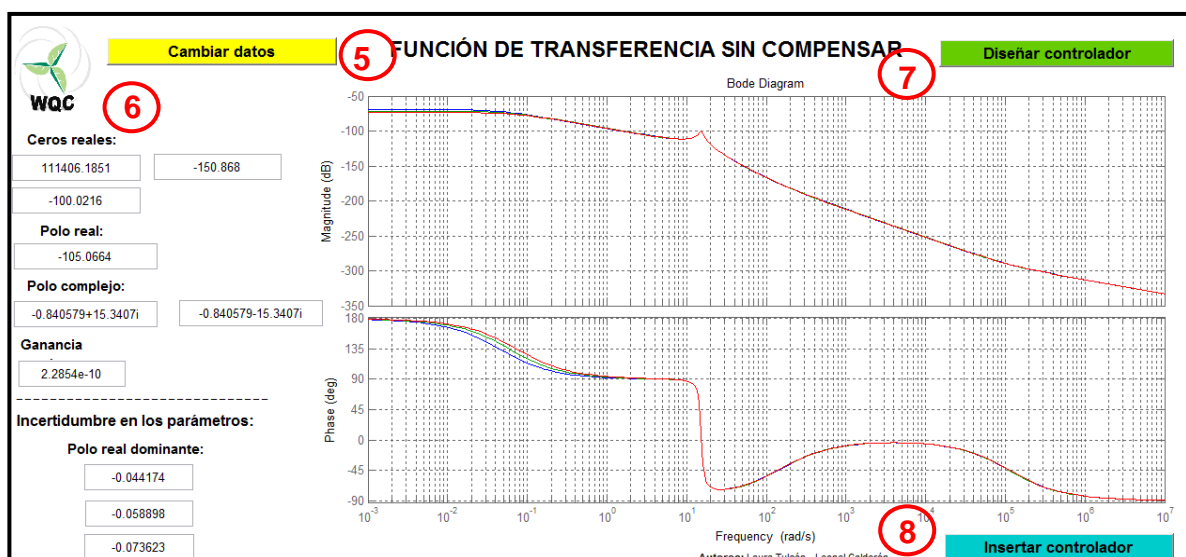
Como se especificó en un principio, se calculan los polos, ceros, ganancia y diagrama de Bode propios de la función de transferencia que describe el sistema.

Se muestran tres valores diferentes para el polo real dominante, cero real dominante y ganancia, dependiendo de la velocidad promedio del viento, con estos datos se calcula el rango de variación de los parámetros, escogiendo el valor máximo y mínimo entre los tres, que luego se insertarán en la toolbox de QFT.

El diagrama de Bode describe el comportamiento de la planta que se calculó en el dominio de la frecuencia. Con los valores de frecuencia que se muestra en el diagrama, se diseña el controlador. En donde se presentan sobrepicos, se introducen los valores de frecuencias cercanas a dichas fluctuaciones.

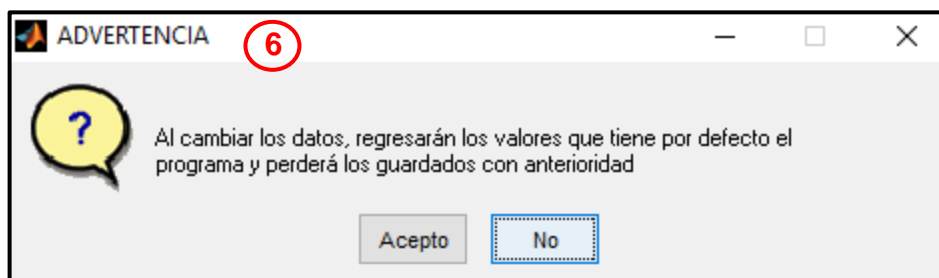
La ventana de *función de transferencia* está compuesta por tres botones *figura 65-66*:

Figura 66. Función de transferencia lado de baja- WQC.



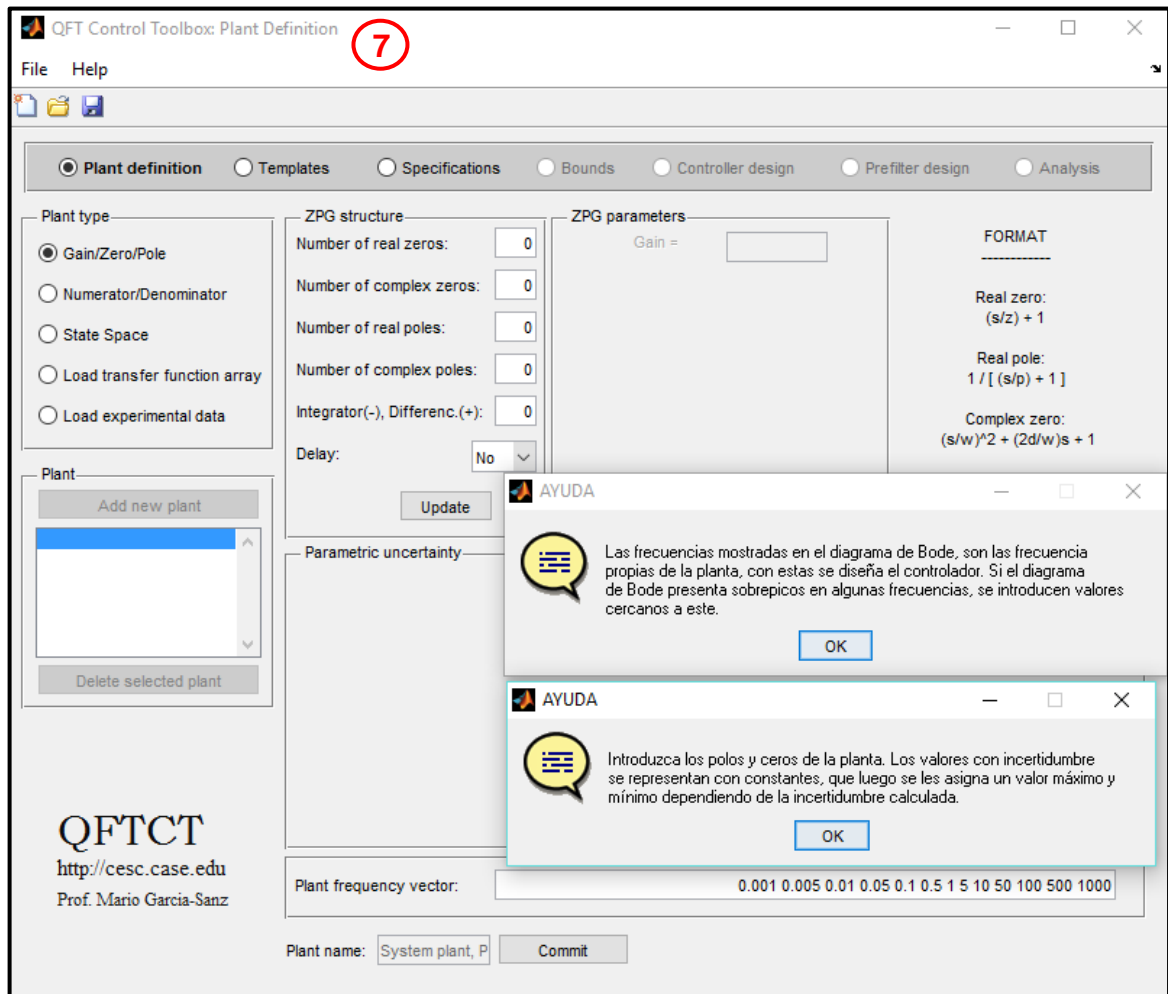
- **Botón 6:** Antes de direccionar al usuario a la ventana para que introduzca de nuevo los parámetros, muestra una advertencia donde menciona que se perderán los datos guardados *figura 67*.
- **Botón 7:** Ejecuta la toolbox de QFT, donde el usuario debe diseñar por su cuenta el controlador *figura 68*.
- **Botón 8:** Después de diseñar el controlador (alta velocidad) o controlador y prefiltro (baja velocidad), se insertan cada uno de los polos, ceros y ganancia calculadas *figura 69-70*.

Figura 67. Advertencia cambio de datos.



4. Antes de proceder con el diseño de los controladores, se muestran dos ayudas al usuario, para que tenga mayor claridad acerca de los datos que se le muestran en la herramienta y cómo utilizarlos e interpretarlos correctamente *figura 68*.

Figura 68. Toolbox QFT.



5. Una vez diseñado el control respectivo para cada caso de estudio, se insertan los valores calculados para los polos, ceros y ganancia para cada uno. En el caso de baja velocidad, se debe diseñar un prefiltro. Los valores de los controladores y del prefiltro, vienen predeterminados, el usuario después de diseñarlo, puede insertar sus valores calculados. La ventana de *Insertar prefiltro- Insertar controlador*, tiene los siguientes botones, ver figura 69-70:

- **Botón 9:** Antes de direccionar al usuario a la ventana para que introduzca de nuevo los parámetros, muestra una advertencia donde menciona que se perderán los datos guardados y debe diseñar el controlador nuevamente figura 71.
- **Botón 10:** La opción *Probar controlador*, genera las gráficas automáticamente después de que termine el tiempo de simulación que ya viene predeterminado para obtener óptimos resultados.

Figura 69. Insertar controladores – WQC lado de baja.

8

INSERTAR PREFILTRO

Ganancia:

Cero:

Polo:

9

Modificar constantes

10

INSERTAR CONTROLADOR

Ganancia:

Cero 1:

Cero 2:

Polo 1:

Polo 2:

Probar controlador

Autores: Laura Tulcán - Leonel Calderón

Figura 70. Insertar controladores – WQC lado de alta.

INSERTAR CONTROLADOR

Ganancia:

Cero 1:

Cero 2:

Polo 1:

Polo 2:

8

9

Modificar constantes

Probar controlador

10

Autores: Laura Tulcán - Leonel Calderón

Figura 71. Advertencia cambio de parámetros.

ADVERTENCIA **9**

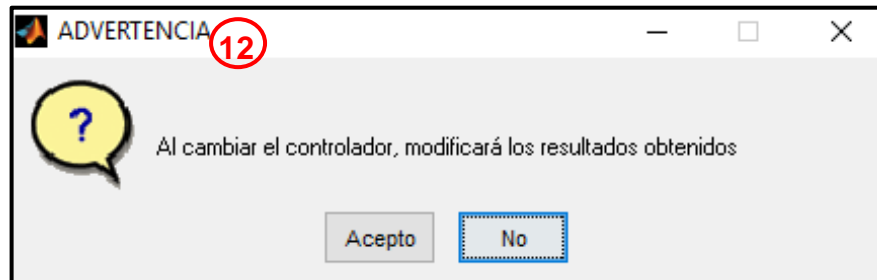
?

Al cambiar los parámetros, tendrá que diseñar nuevamente el controlador

Acepto No

6. La ventana de *resultados*, tiene los siguientes botones:
- **Botón 11:** Antes de direccionar al usuario a la ventana para que introduzca de nuevo los controladores, muestra una advertencia donde menciona que se modificará todos los resultados obtenidos *figura 72*.
 - **Botón 12:** Antes de salir, se pregunta al usuario si está seguro de que desea realizar dicha acción, siendo así, se cierra el programa.

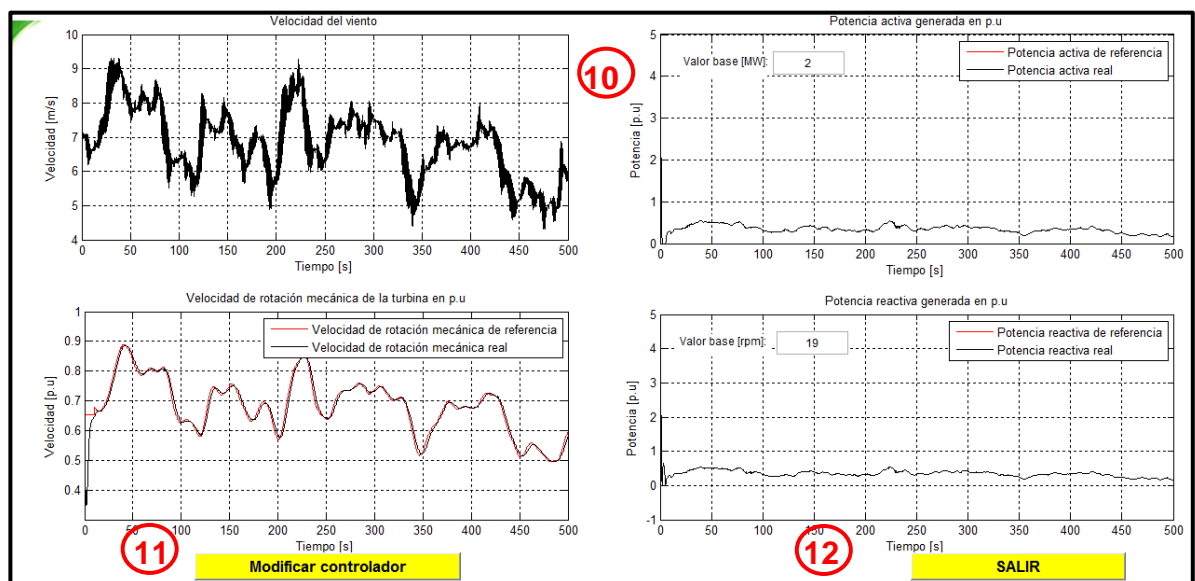
Figura 72. Advertencia cambio de controladores.



Luego de insertar los polos, ceros y ganancia del controlador, se ejecuta la ventana de resultados, la cual genera las gráficas automáticamente que se mencionan a continuación para cada caso de estudio. Esto toma aproximadamente 2 minutos.

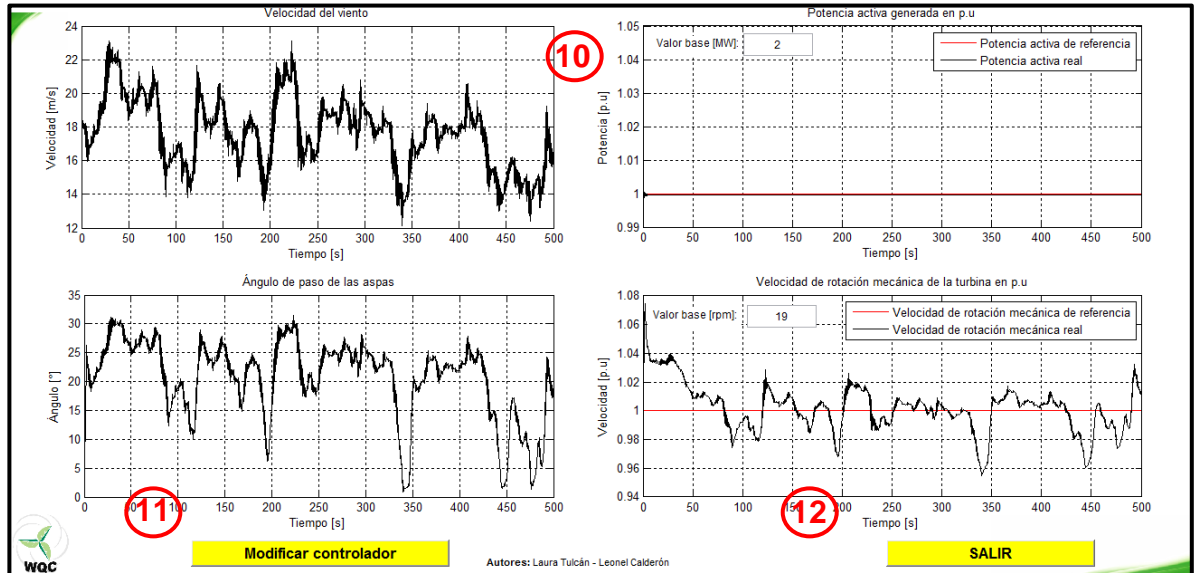
Para una velocidad del viento menor a la velocidad de potencia nominal, se muestran las siguientes gráficas: velocidad promedio del viento, velocidad de rotación mecánica de la turbina en por unidad y potencia activa y reactiva generada en por unidad, ver *figura 73*.

Figura 73. Resultados lado de baja – WQC.



Para una velocidad del viento mayor o igual a la velocidad de potencia nominal, se muestran las siguientes gráficas: velocidad promedio del viento, potencia activa generada en por unidad, ángulo de paso de las aspas y velocidad de rotación mecánica de la turbina en por unidad, ver *figura 74*.

Figura 74. Resultados lado de alta – WQC.

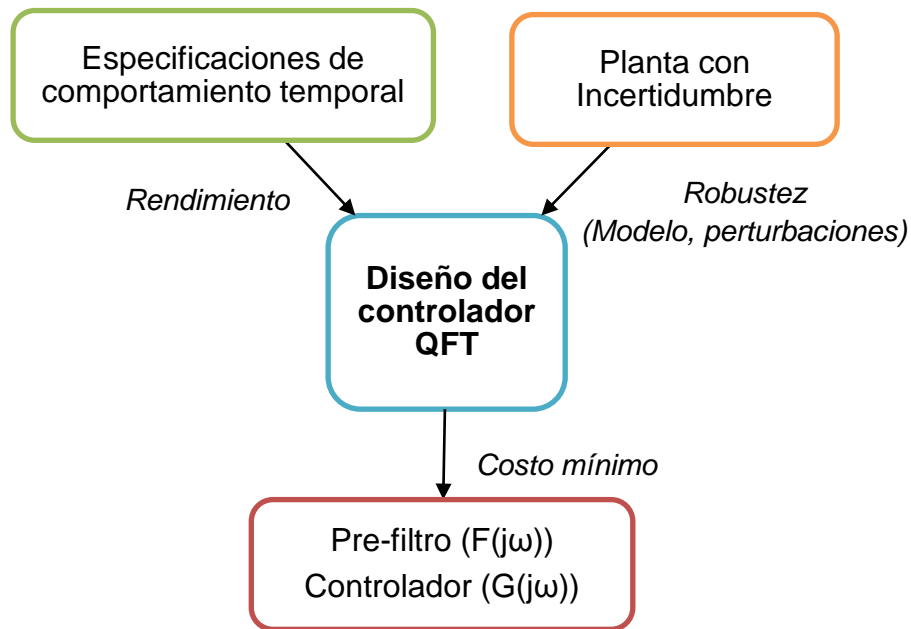


ANEXO D: DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA QFT

La técnica *Quantitative Feedback Theory (QFT)*, en español *Teoría de la Realimentación Cuantitativa*, desarrollada por Horowitz en 1963, está basada en el dominio de la frecuencia, utilizando la *Carta de Nichols (NC)* para el diseño de controladores, en plantas con incertidumbre asociada, perturbaciones externas y especificaciones de estabilidad y de control requeridas, con el fin de obtener a la salida del sistema, una respuesta adecuada y un coste mínimo en el consumo de energía⁴¹.

El diseño se realiza en dos etapas, en la primera se sintoniza el controlador (reduciendo la variación de la planta en lazo cerrado debida a la incertidumbre en el modelo (lazo abierto) y las perturbaciones externas) y en la segunda se diseña el pre-filtro después de reducir la sensibilidad en lazo cerrado (Estabilidad robusta y rechazo de perturbaciones), con el fin de asegurar el seguimiento a la referencia. En la *figura 75* se muestra un esquema donde se explica de una manera resumida la filosofía de la técnica QFT⁴²:

Figura 75. Esquema filosofía de la técnica QFT.



Fuente: *Control robusto QFT – Teoría y aplicaciones*. Mario García-Sanz.

⁴¹MUÑOZ MANSILLA, Rocío. Control multivariable mediante técnicas QFT. Aplicaciones a sistemas navales. Tesis doctoral. Madrid. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Departamento de informática y automática, 2007. 320p.

⁴²GARCÍA SANZ, Mario. Control robusto Q.F.T. Teoría y aplicaciones. Pamplona. Universidad Pública de Navarra. Departamento de automática y computación. 2003. 65p.

La técnica QFT permite el diseño de compensadores con gran flexibilidad en sistemas de una entrada – una salida (SISO) invariantes en el tiempo (LTI) y no lineales (requieren linealización en un punto de operación que garantice solución para una gran variedad de problemas), sistemas de múltiple entrada – múltiple salida (MIMO) no lineales y LTI (se debe aclarar las especificaciones de rendimiento para cada función de transferencia en lazo cerrado), sistemas distribuidos, muestreados, con retardo y de fase mínima y no mínima.

Los pasos más importantes para desarrollar la metodología de QFT para sistemas SISO continuos, lineales, invariantes en el tiempo y de fase mínima, se muestran a continuación, donde posteriormente se dedicará una sección del capítulo para explicar cada uno de ellos:

1. Definición de las especificaciones.
2. Modelo de la planta, generación de plantillas y planta nominal.
3. Creación de contornos.
4. Síntesis del controlador.
5. Síntesis del pre-filtro.
6. Formación del lazo.
7. Validación del diseño.

D. 1. DEFINICIÓN DE ESPECIFICACIONES

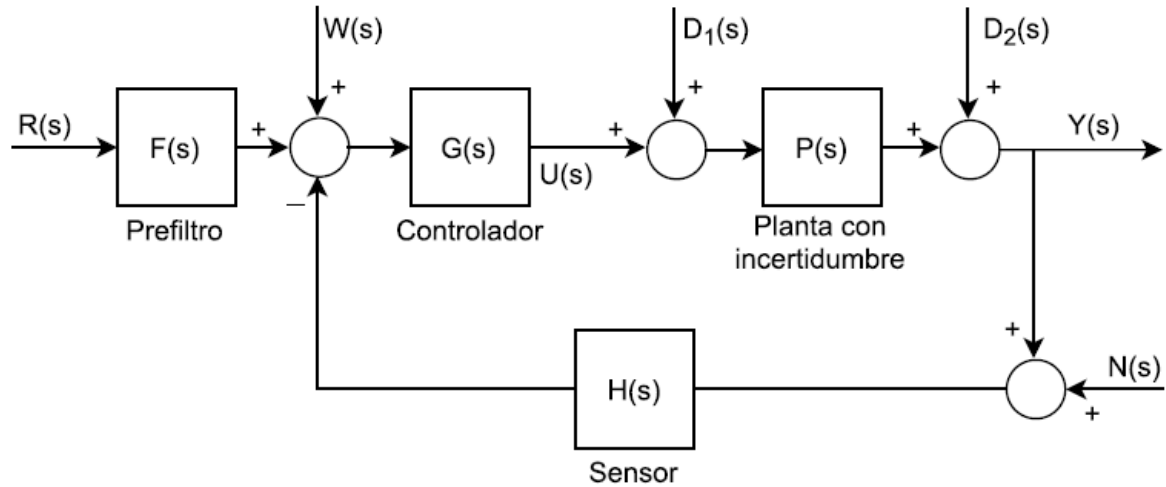
Para la técnica QFT, se definen las especificaciones de estabilidad y comportamiento robusto deseadas en lazo cerrado, en el dominio de la frecuencia.

Ante un problema de seguimiento a la referencia y rechazo de perturbaciones, es necesario partir de un sistema de control con dos grados de libertad (2 DOF): controlador y el pre-filtro, como se muestra en la estructura genérica de control realimentado, para dos grados de libertad mostrado en la *figura 76*, donde se incluye el conjunto de plantas con incertidumbre $\mathfrak{P}(j\omega_i) = \{P(j\omega_i), \omega_i \in \Omega\}$, el controlador $G(j\omega)$, el prefiltro a diseñar $F(j\omega)$ y la dinámica del sensor $H(j\omega)$.

Las entradas externas son: $R(j\omega)$, $W(j\omega)$, $D_1(j\omega)$, $D_2(j\omega)$ y $N(j\omega)$ que corresponden respectivamente a: señal de referencia, perturbaciones en la referencia, perturbaciones en la entrada de la planta, perturbaciones en la salida de la planta y el ruido asociado a la medida.

La variable a controlar es $Y(j\omega)$, la variable manipulada es $U(j\omega)$ y la diferencia entre la señal de Referencia y la de salida es el error asociado $E(j\omega)$.

Figura 76: Estructura genérica de control realimentado – 2DOF.



Fuente: Síntesis de controladores robustos mediante el análisis de la compatibilidad de especificaciones incertidumbre. Montserrat Gil Martínez. Digitado por autores

Del anterior esquema se pueden extraer las funciones de transferencia que corresponden a la salida del sistema (D.1), la variable manipulada (salida del controlador) (D.2) y el error (D.3) respecto a cada entrada del sistema.

$$Y = \frac{1}{1 + PGH} D_2 + \frac{P}{1 + PGH} D_1 + \frac{PG}{1 + PGH} (W + FR) - \frac{PGH}{1 + PGH} N \quad (D.1)$$

$$U = \frac{G}{1 + PGH} (W + FR) - \frac{GH}{1 + PGH} (N + D_2 + PD_1) \quad (D.2)$$

$$E = -\frac{H}{1 + PGH} D_2 + \frac{PH}{1 + PGH} D_1 + \frac{PGH}{1 + PGH} W + \frac{1}{1 + PGH} FR - \frac{H}{1 + PGH} N \quad (D.3)$$

D. 1. 1. Especificaciones de estabilidad

Antes de comenzar el diseño, se debe tener claro el comportamiento deseado del sistema en lazo cerrado, dichas especificaciones deben expresarse en términos frecuenciales ya que la metodología de QFT lo requiere, por lo tanto, todas las restricciones en el dominio del tiempo se deben expresar en el dominio de la frecuencia.

Las especificaciones que se emplean en esta técnica son: Estabilidad robusta (D.4), eliminación de perturbaciones en la salida de la planta (D.5), seguimiento de

referencia (D.6), reducción de sensibilidad (D.7) y esfuerzo de control (D.8). Sus rangos y expresiones matemáticas se describen a continuación⁴³:

$$\left| \frac{Y}{RF} \right| = \left| \frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1 + P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \lambda(\omega); \forall \omega > 0, \forall P \in \mathfrak{S}P \quad (D.4)$$

$$\left| \frac{Y}{D_1} \right| = \left| \frac{P(j\omega)}{1 + P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \delta_s(\omega); \forall \omega > 0, \forall P \in \mathfrak{S}P \quad (D.5)$$

$$T_L(\omega) \leq \left| \frac{Y}{R} \right| = \left| \frac{F(j\omega)P(j\omega)G(j\omega)}{1 + P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq T_U(\omega); \forall \omega > 0, \forall P \in \mathfrak{S}P \quad (D.6)$$

$$\left| \frac{Y}{D_2} \right| = \left| \frac{1}{1 + P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \delta_1(\omega); \forall \omega > 0, \forall P \in \mathfrak{S}P \quad (D.7)$$

$$\left| \frac{U}{D_2} \right| = \left| \frac{U}{N} \right| = \left| \frac{G(j\omega)}{1 + P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \delta_2(\omega); \forall \omega > 0, \forall P \in \mathfrak{S}P \quad (D.8)$$

Las especificaciones de estabilidad robusta que se describen en las ecuaciones (D.4) y (D.5), están relacionadas con el margen de ganancia (*MG*) y margen de fase (*MF*) de las ecuaciones (D.9) y (D.10).

$$MG = 1 + \frac{1}{\lambda} \quad (D.9)$$

$$MF = 180 - \frac{180}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{0.5}{\lambda^2} - 1 \right) \quad (D.10)$$

D. 1. 2. Funciones sensibilidad y sensibilidad complementaria

Definiendo la función de transferencia en lazo abierto $L(s) = P_o(s)G(s)$, se describe la función de sensibilidad del lazo de realimentación ($S(s)$) que se expresa como⁴⁴:

$$S = \frac{\partial T/T}{\partial P/P} = \frac{1}{1 + L} \quad (D.11)$$

⁴³GARCÍA SANZ, Mario. Control robusto Q.F.T. Teoría y aplicaciones. Pamplona. Universidad Pública de Navarra. Departamento de automática y computación. 2003. 65p.

⁴⁴GIL MARTÍNEZ, Montserrat. Síntesis de controladores robustos mediante el análisis de la compatibilidad de especificaciones incertidumbre. Tesis doctoral. Pamplona: Universidad Pública de Navarra. Departamento de Automática y Computación, 2001. 462p.

La función $S(s)$ condiciona fundamentalmente la estabilidad robusta y el comportamiento robusto en el rechazo de perturbaciones en la salida de la planta $|Y/D_2|$.

La sensibilidad complementaria ($T(s)$), excluyendo el prefiltro, se define de la siguiente manera:

$$T = \frac{L}{1 + L} \quad (D.12)$$

La función $T(s)$ condiciona principalmente el comportamiento robusto en la atenuación de ruidos a la salida $|Y/N|$, el esfuerzo de control ante perturbaciones en la entrada $|U/D_1|$ y la estabilidad robusta al igual que $S(s)$.

Se tiene en cuenta que la función de sensibilidad y sensibilidad complementaria, deben satisfacer la siguiente igualdad:

$$S + T = 1 \quad (D.13)$$

A partir de la ecuación (D.13), se deduce que en altas frecuencias $S(s)$ es igual a uno y la función $T(s)$ tiende a cero, pero en bajas frecuencias $T(s)$ es igual a uno y $S(s)$ tiende a cero.

Al aumentar la ganancia en lazo abierto L , la función de sensibilidad tiende a cero y la sensibilidad complementaria se aproxima a la unidad, mejorando el comportamiento en el seguimiento a la referencia y rechazo de perturbaciones. Sin embargo, hay que tener en cuenta que también se incrementa la respuesta en la entrada de la planta, es decir que el ruido del sensor y las perturbaciones ante entradas de referencia pueden desestabilizar el sistema.

D. 2. *MODELO DE LA PLANTA, GENERACIÓN DE PLANTILLAS Y PLANTA NOMINAL*

QFT permite describir el modelo dinámico de la planta a controlar desde diversas perspectivas: mediante datos de respuesta en frecuencia (dB, Φ , ω), mediante funciones de transferencia lineales, variantes o invariantes en el tiempo y mediante ecuaciones no-lineales, todas ellas con incertidumbre paramétrica y/o no paramétrica.

Las incertidumbres se definen como las imprecisiones de modelado y se clasifican en incertidumbre paramétrica (se conoce la estructura del modelo, pero algunos parámetros contienen un rango de variación), incertidumbre no paramétrica (error propio del modelo) e incertidumbre mixta donde se combina las dos tipos anteriores. Las incertidumbres se tienen en cuenta con el fin de responder a casos más realistas.

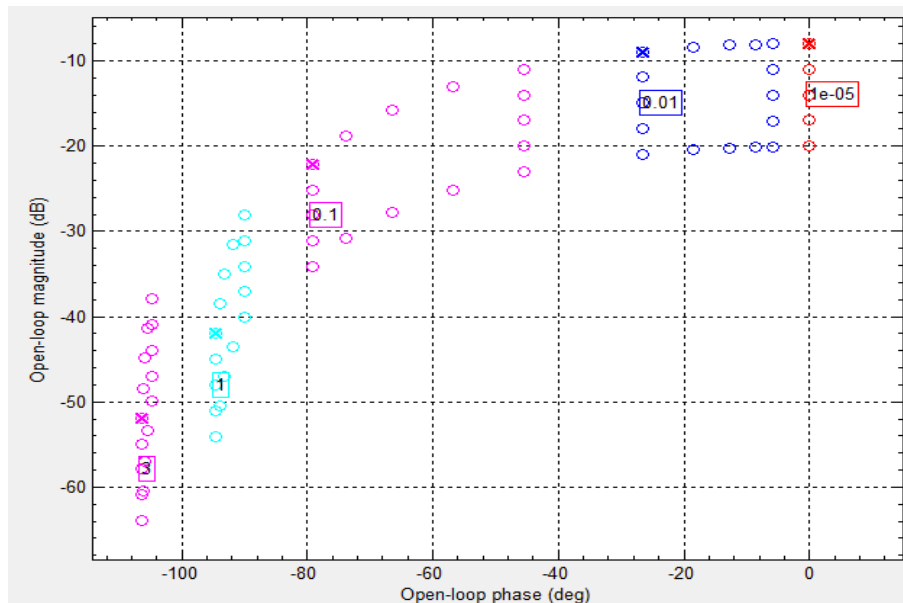
Los modelos son trasladados al dominio de la frecuencia, generándose en el diagrama de Nichols, a cada frecuencia de interés $\omega_i \in \Omega$ un conjunto de puntos (números complejos dB, Φ) uno para cada planta dentro del rango de incertidumbre.

Dicho conjunto de puntos a cada frecuencia se denominan plantillas $\mathfrak{S}P(j\omega_i)$ (*templates*), las cuales describen la dinámica de la planta a cada frecuencia ω_i , y son más o menos extensos según la incertidumbre asociada a la planta $\mathfrak{S}P(j\omega_i) = \{P(j\omega_i), \omega_i \in \Omega\}$.

Del conjunto de posibles plantas obtenidas se elige una de ellas que corresponderá a la planta nominal $P_o(j\omega)$.

La *figura 77* muestra un ejemplo de las plantillas y la planta nominal (x) para un conjunto de frecuencias $\omega = [1 \times 10^{-5}, 0.01, 0.1, 1, 3]$, se consiguieron las $N=5$ plantillas para cada ω y los puntos (o) de cada plantillas se obtuvieron combinando cada valor de los parámetros con incertidumbre.

Figura 77. Ejemplo de plantillas y planta nominal.



D. 3. CREACIÓN DE CONTORNOS

Ya elegida la planta $P_o(j\omega)$, la metodología QFT convierte las especificaciones en lazo cerrado y la incertidumbre de la planta $\mathfrak{S}P(j\omega_i)$ en un conjunto de curvas de restricción o contorno para cada frecuencia de interés $\omega_i \in \Omega$ dibujados sobre el diagrama de Nichols. Finalmente los contornos ya generados son agrupados, de

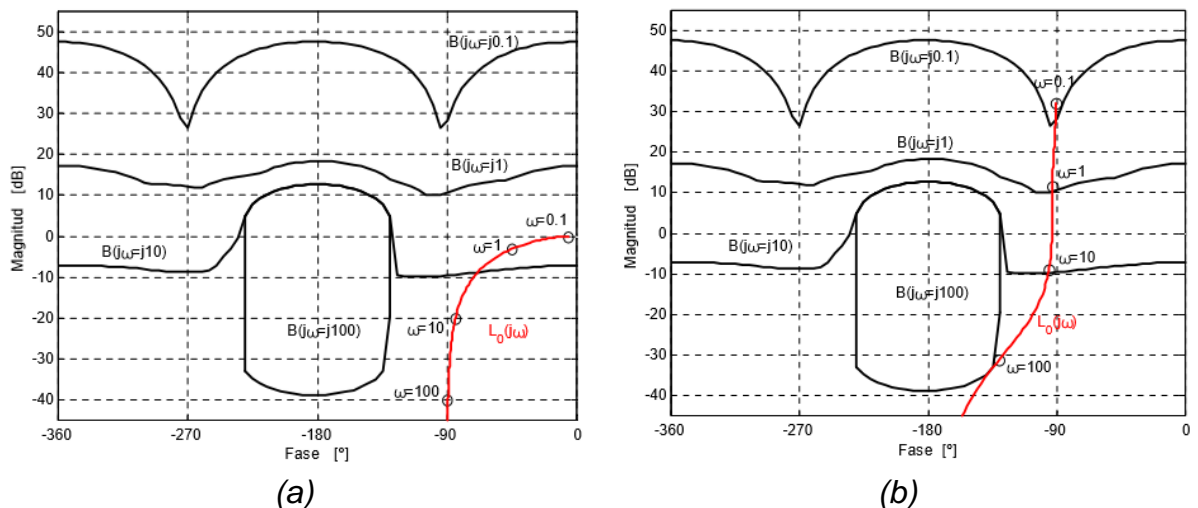
modo que exista una sola curva para cada frecuencia que corresponde a la que reúne la mayor cantidad de restricciones.

D. 4. SÍNTESIS DEL CONTROLADOR $G(j\omega)$

Ya dibujados los contornos y superpuesta la función de transferencia el lazo abierto $L(s) = P_o(s)G(s)$, para $G(s) = 1$, se procede a añadir polos y ceros hasta que la función L_o se encuentre a cada frecuencia. El controlador óptimo $G(j\omega)$ es aquel que teniendo mínima ganancia consiga que L descansa sobre los contornos a cada frecuencia de interés sin violar las especificaciones planteadas⁴⁵.

En la *figura 78 (a)* se muestra la situación de partida para una planta a diferentes frecuencias de ω , después de aplicar el controlador en la *figura 78 (b)* se evidencia el paso de cada una de las frecuencias coincidiendo con su respectivo contorno.

Figura 78. Situación L_o de partida (a), Resultado después de diseñar $G(j\omega)$ (b).



Fuente: Síntesis de controladores robustos mediante el análisis de la compatibilidad de especificaciones incertidumbre. Montserrat Gil Martínez.

D. 5. FORMACIÓN DEL LAZO (LOOP SHAPING)

Después de generar los contornos (*bounds*) para las especificaciones planteadas en QFT, se diseña la función de transferencia de lazo nominal $L_o(s) = P_o(s)G(s)$,

⁴⁵GARCÍA SANZ, Mario. Control robusto cuantitativo QFT: Historia de una idea. En: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. 2005. vol. 2, no. 3, p. 25-38.

teniendo en cuenta que un óptimo $L_o(s)$ es el que satisface los límites manteniendo un ancho de banda pequeño.

La formación del *loop shaping* se diseña añadiendo polos y ceros, con el fin de satisfacer los contornos de la especificación en la *Carta de Nichols*, esto se logra conservando en todo momento la estabilidad del lazo cerrado y el cumplimiento de las especificaciones.

Durante esta parte del método, el diseñador debe encontrar un controlador que cumpla con las especificaciones propuestas al comienzo, que tenga un nivel de complejidad acorde con la planta y un coste mínimo en el ancho de banda⁴⁶.

D. 6. SÍNTESIS DEL PRE-FILTRO $F(j\omega)$

En algunas ocasiones se requerirá diseñar un pre-filtro con el fin de garantizar las especificaciones de seguimiento de referencia (tracking). Un ejemplo de tracking resuelto por Mario García-Sanz⁴⁷, se muestra a continuación.

- Margen superior (T_U) en lazo cerrado:

$$T_U = \frac{(\omega_n^2/a)(s + a)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (D.14)$$

- Margen inferior (T_L) en lazo cerrado:

$$T_L = \frac{k}{(s + \sigma_1)(s + \sigma_1)(s + \sigma_1)} \quad (D.15)$$

Teniendo una especificación de tracking que exija a la salida del sistema localizarse entre $y_U(t)$ y $y_L(t)$ (*figura 79*), es decir, que su respuesta en frecuencia esté entre $B_U(\omega)$ y $B_L(\omega)$ (*figura 80*), el controlador reducirá el área de salida del sistema en el dominio de la frecuencia, para que la incertidumbre sea menor que $\delta_R(\omega)$, y el pre-filtro moverá el área para ubicarla entre $B_U(\omega)$ y $B_L(\omega)$.

⁴⁶COMASÓLIVAS, Ramón; ESCOBET, Teresa y QUEVEDO, Joseba. Aplicación de la técnica de la QFT para el control activo de las perturbaciones mecánicas en un interferómetro óptico. En: *Sistemas, Cibernética e Informática*. 2004. vol. 1, no 1.

⁴⁷GARCÍA SANZ, Mario. *Control robusto Q.F.T. Teoría y aplicaciones*. Pamplona. Universidad Pública de Navarra. Departamento de automática y computación. 2003. 65p.

Figura 79. Tracking en el dominio de la frecuencia.

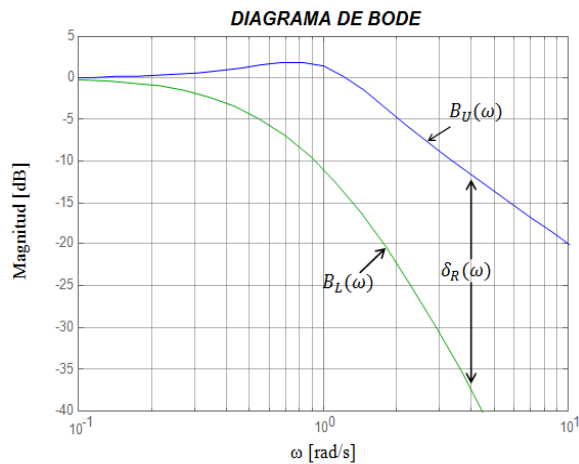
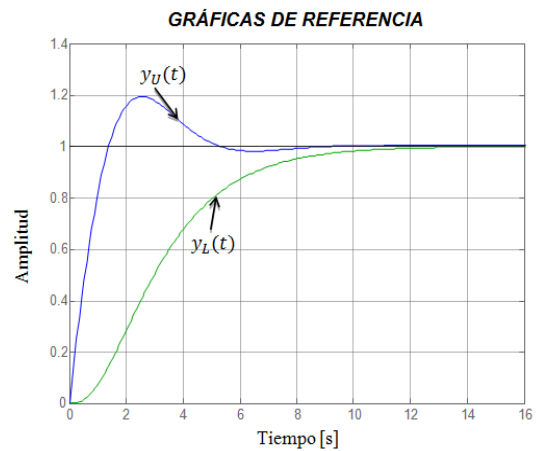


Figura 80. Tracking en el dominio del tiempo.



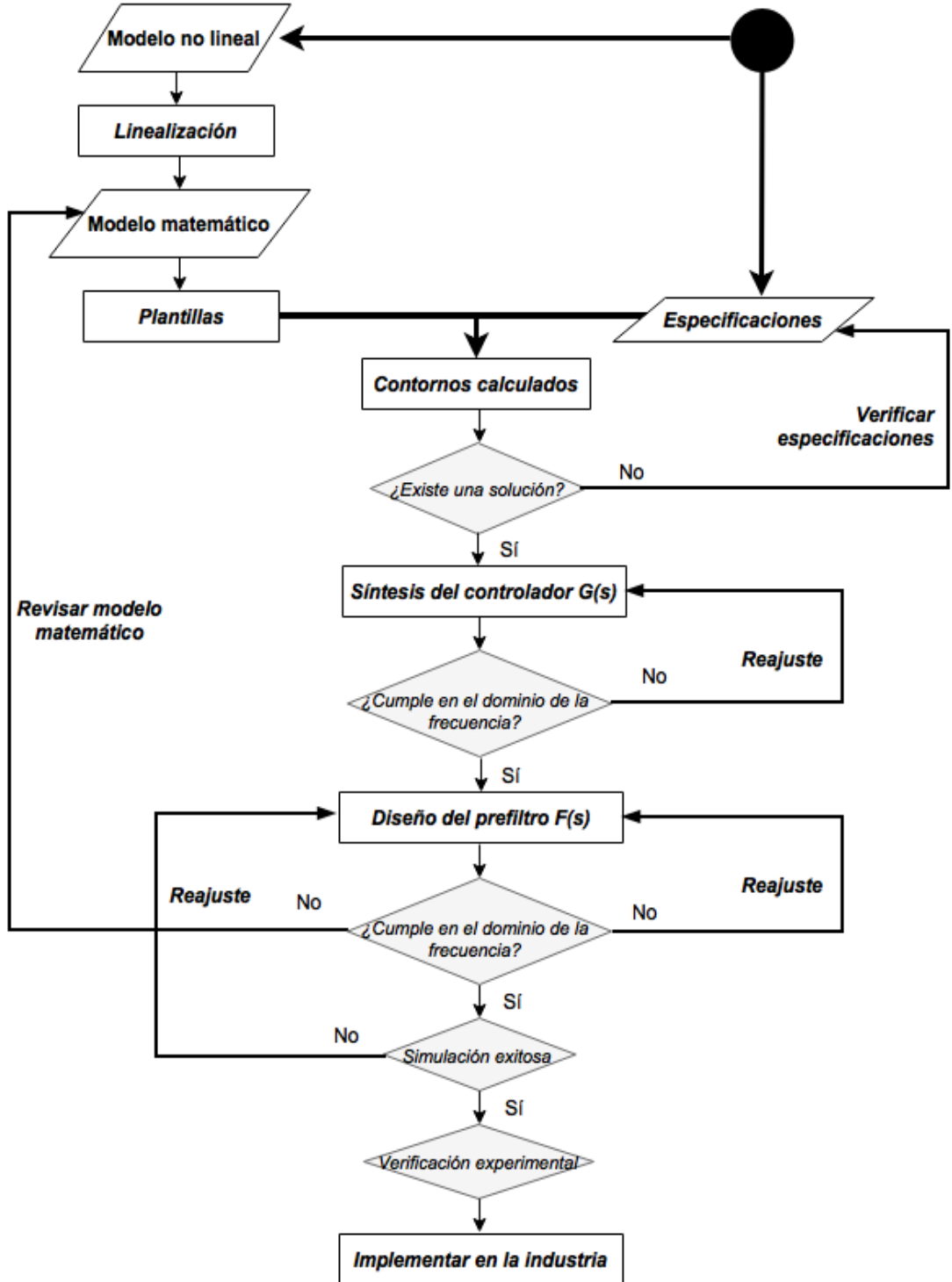
D. 7. VALIDACIÓN DEL DISEÑO

Una vez diseñado el controlador es necesario analizar su comportamiento frente a las especificaciones deseadas, tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia y ante los casos más desfavorables de la incertidumbre de la planta.

Todas las especificaciones temporales, como lo es el *seguimiento a la referencia* (*tracking*), se deben trasladar previamente al dominio de la frecuencia. Por lo general si se cumplen las especificaciones frecuenciales asociadas, en las temporales ocurrirá lo mismo, sino, se redefinen las especificaciones temporales asociadas a la frecuencia.

Con el fin de aclarar y resumir lo explicado en esta sección del libro, se presenta un diagrama de flujo que contiene los principales pasos a seguir para realizar correctamente un diseño de control mediante la técnica QFT, como se muestra en la *figura 81*.

Figura 81. Diagrama de flujo para el diseño de la técnica QFT.



Fuente: Control robusto QFT – Teoría y aplicaciones. Mario García-Sanz. Traducido por los Autores.

ANEXO E: MANUAL DE USUARIO – QFTCT

En este anexo se presenta una breve descripción de la toolbox QFTCT para el diseño de controladores robustos mediante la teoría de la realimentación cuantitativa (QFT por sus siglas en inglés), la cual fue desarrollada por el profesor Mario García-Sanz y está enlazada con el software *WQC*. Dicha herramienta permite realizar el diseño de controladores robustos de forma fácil e interactiva para plantas representadas como funciones o matrices de transferencia, variables de estado y datos experimentales. Para una revisión más detallada ver *QFT CONTROL TOOLBOX USER'S GUIDE* que se encuentra al descargar la toolbox de QFT.

E.1 INSTALACIÓN DE LA TOOLBOX QFT

1. Descargar los archivos correspondientes que se encuentran en el siguiente link⁴⁸. Descomprimir los archivos en una dirección de fácil acceso para el ordenador.
2. Agregar al path de Matlab la carpeta de archivos denominada *QFTCT* que se encuentra en la dirección del paso anterior (file->set path->add folder->save->close).

E.2 PASOS PARA LA EJECUCIÓN – QFTCT

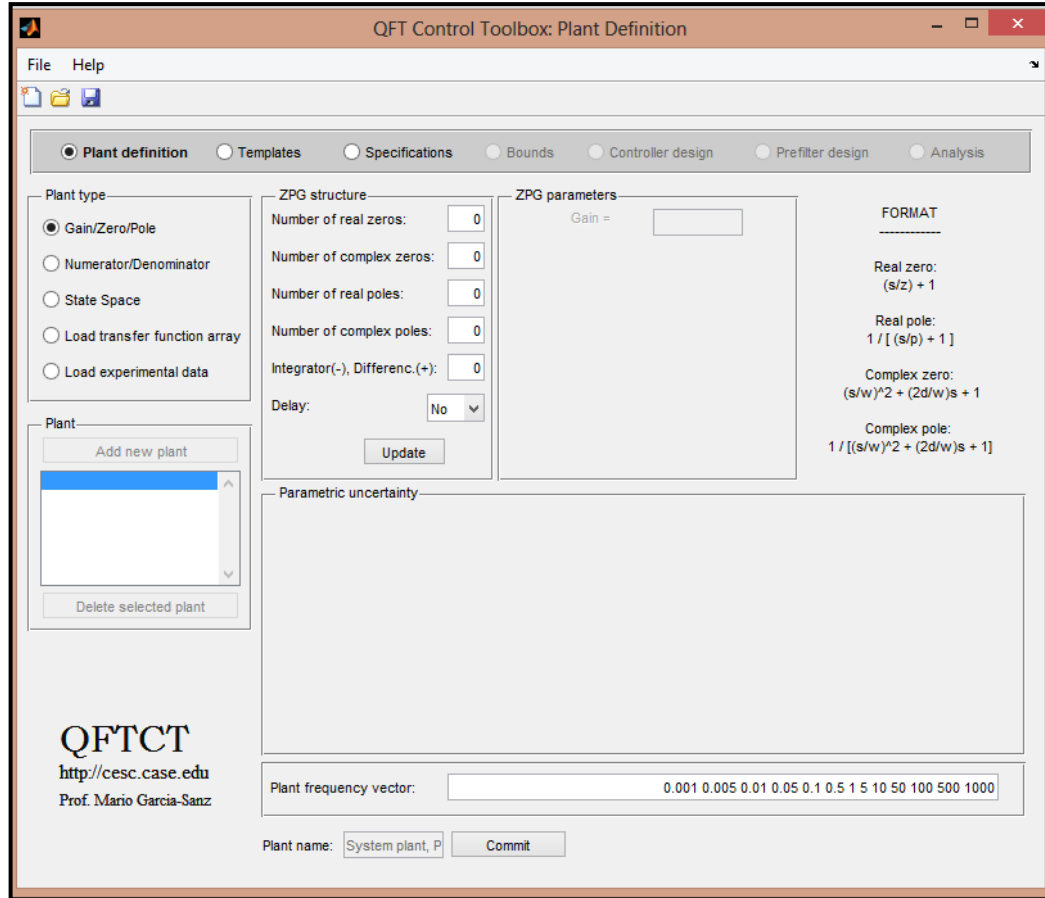
Para la ejecución de la toolbox de *QFT*, se escribe en la ventana principal de comandos de MATLAB la palabra “*QFTCT*” en mayúscula, una vez digitada la palabra se pulsa enter, a continuación se desplegará la ventana inicial de la herramienta, la cual se muestra en la *figura 82*. Esta ventana está distribuida en siete categorías que son: definición de la planta, plantillas, especificaciones de control, contornos o fronteras, diseño del controlador, diseño del prefiltro y análisis.

En la ventana principal se pueden encontrar las siguientes opciones:

- **Barra de herramientas:** Permite al usuario crear un nuevo proyecto, abrir uno ya existente o guardar el proyecto actual.
- **Menú:** Contiene las opciones de la barra de herramientas e información acerca de la toolbox.

⁴⁸ Control & Energy Systems Center (CESC). The QFT Control Toolbox (QFTCT) [en línea]. <http://cesc.case.edu/OurQFTCT.htm> [Citado el 17 de junio de 2016].

Figura 82. Ventana de inicio de la herramienta QFTCT.



1. *Plant definition (definición de la planta):*

Como se mencionó al inicio de este anexo, la toolbox permite introducir plantas modeladas de diferentes formas (variables de estado, función de transferencia en términos de ganancia/cero/polo, etc.). Para este proyecto, se eligió la opción *Numerator/Denominator*, que consiste en expresar la función de transferencia del sistema en términos de un polinomio para el numerador y un polinomio para el denominador de la siguiente forma (E.1):

$$P(s) = \frac{n(s)}{d(s)} = \frac{Ncoef_n s^n + Ncoef_{n-1} s^{n-1} + \dots + Ncoef_1 s + Ncoef_{ind}}{Dcoef_n s^n + Dcoef_{n-1} s^{n-1} + \dots + Dcoef_1 s + Dcoef_{ind}} \quad (E.1)$$

Para cada coeficiente el usuario puede introducir números o letras; si se introducen letras, la toolbox la identifica como parámetro con incertidumbre. Una vez se tenga la planta, se procede a expresar la incertidumbre paramétrica.

Seguidamente se define el vector de frecuencia de interés de la planta teniendo en cuenta elegir un número suficiente de frecuencias en las regiones donde hay resonancia o cambios bruscos en la magnitud y en la fase, como también seleccionar apropiadamente el mínimo y el máximo valor de frecuencia. En la *figura 83* se muestra la definición de la planta teniendo en cuenta los aspectos anteriores.

Figura 83. Definición de la planta.

Plant type:

- Gain/Zero/Pole
- Numerator/Denominator
- State Space
- Load transfer function array
- Load experimental data

Numerator/denominator order:

Numerator order:

Denominator order:

Delay:

Update

Numerator:

Coefficient 3 =

Coefficient 2 =

Coefficient 1 =

Independent =

Denominator:

Coefficient 4 =

Coefficient 3 =

Coefficient 2 =

Coefficient 1 =

Independent =

Continue

Plant:

Add new plant

System plant, P(s)

Delete selected plant

Parametric uncertainty:

Name	Uncertainty/Probability	Min	Max	Grid	Nominal. P0
k	<input type="button" value="Modify"/>	-0.0905	0.9489	5 log	-0.0905
p	<input type="button" value="Modify"/>	-0.0156	0.1585	5 log	-0.0156

Plant frequency vector:

Plant name:

QFTCT
http://cesc.case.edu
Prof. Mario Garcia-Sanz

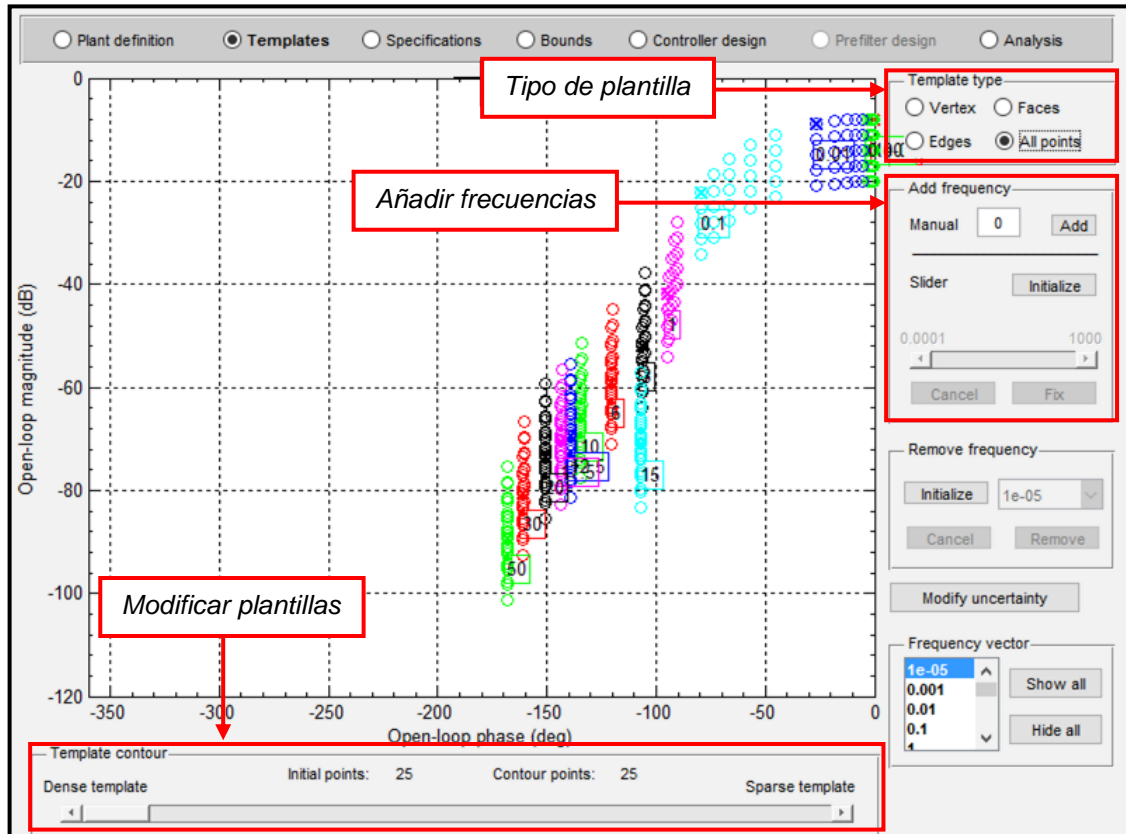
2. Templates (Plantillas):

Corresponden a la representación de la respuesta en frecuencia de la planta, incluyendo la incertidumbre, en la Carta de Nichols para cada frecuencia en particular. El usuario tiene la libertad de elegir el número de puntos más adecuado para las plantillas, dicho número depende del tipo de plantilla, de la incertidumbre paramétrica y del contorno de la plantilla *figura 84*.

Para el tipo de plantilla se tiene cuatro opciones que van desde escasos puntos a muchos puntos sobre la plantilla, respectivamente: vértices, bordes, caras y todos los puntos. Para el intervalo de incertidumbre paramétrica, los demás puntos sobre

la plantilla son muestreados dependiendo el rango en el que varíe cada parámetro figura 84.

Figura 84. Templates (Plantillas).



Para el contorno de la plantilla se puede mover la barra inferior de la ventana hacia la derecha para disminuir la cantidad de puntos internos, además el usuario puede añadir o eliminar frecuencias usando la opción *Add frequency* o la ventana de *templates* y también le permite modificar la incertidumbre paramétrica figura 85.

3. **Specifications window (Ventana de especificaciones):**

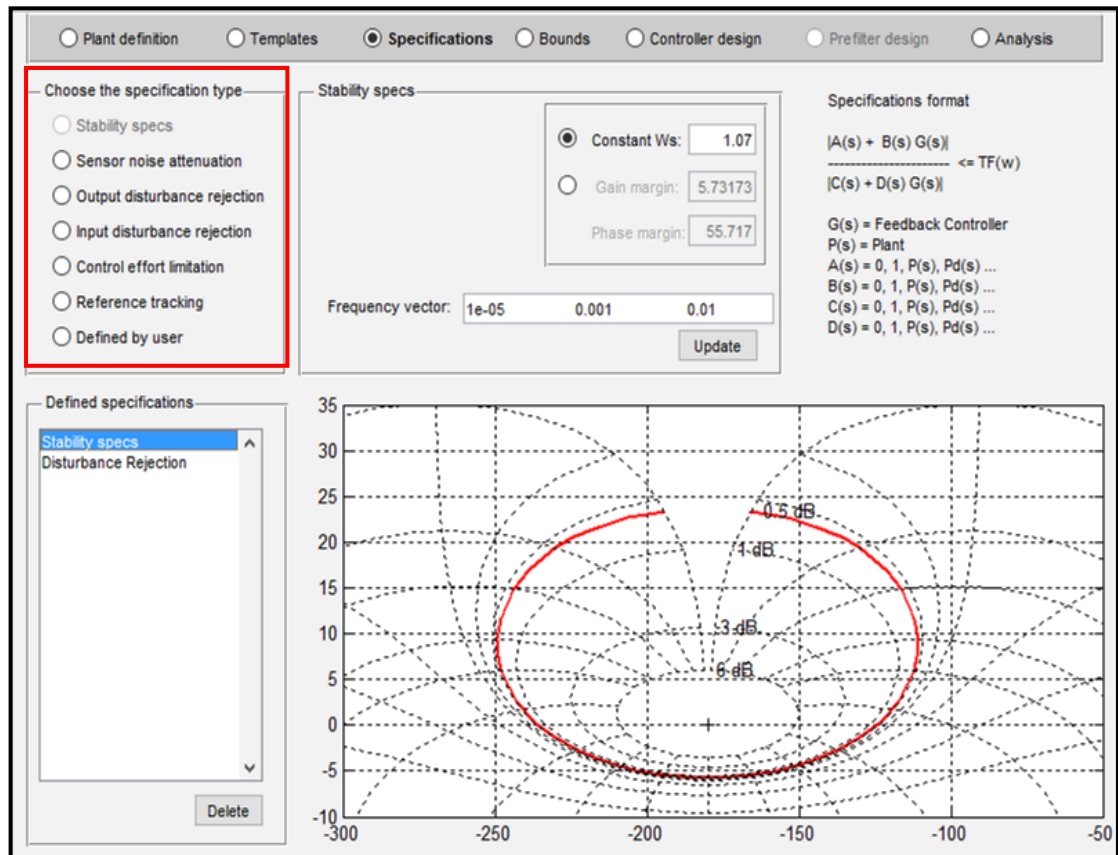
Esta ventana permite ingresar las especificaciones de estabilidad robusta y control robusto. Para el tipo de especificación se dispone de siete grupos, de los cuales el diseñador selecciona las más representativas según el proceso o sistema a controlar figura 85.

Para cada una de las especificaciones la toolbox muestra sus respectivas gráficas y cómo se deben insertar los datos. Las opciones a elegir de especificaciones son:

- Sensor de atenuación de ruido.
- Rechazo de perturbaciones en la salida.

- Rechazo de perturbaciones en la entrada.
- Limitación del esfuerzo de control.
- Seguimiento a la referencia.
- Otra especificación definida por el usuario (sensibilidad, sensibilidad complementaria, etc.).

Figura 85. Specifications window (Ventana de especificaciones).



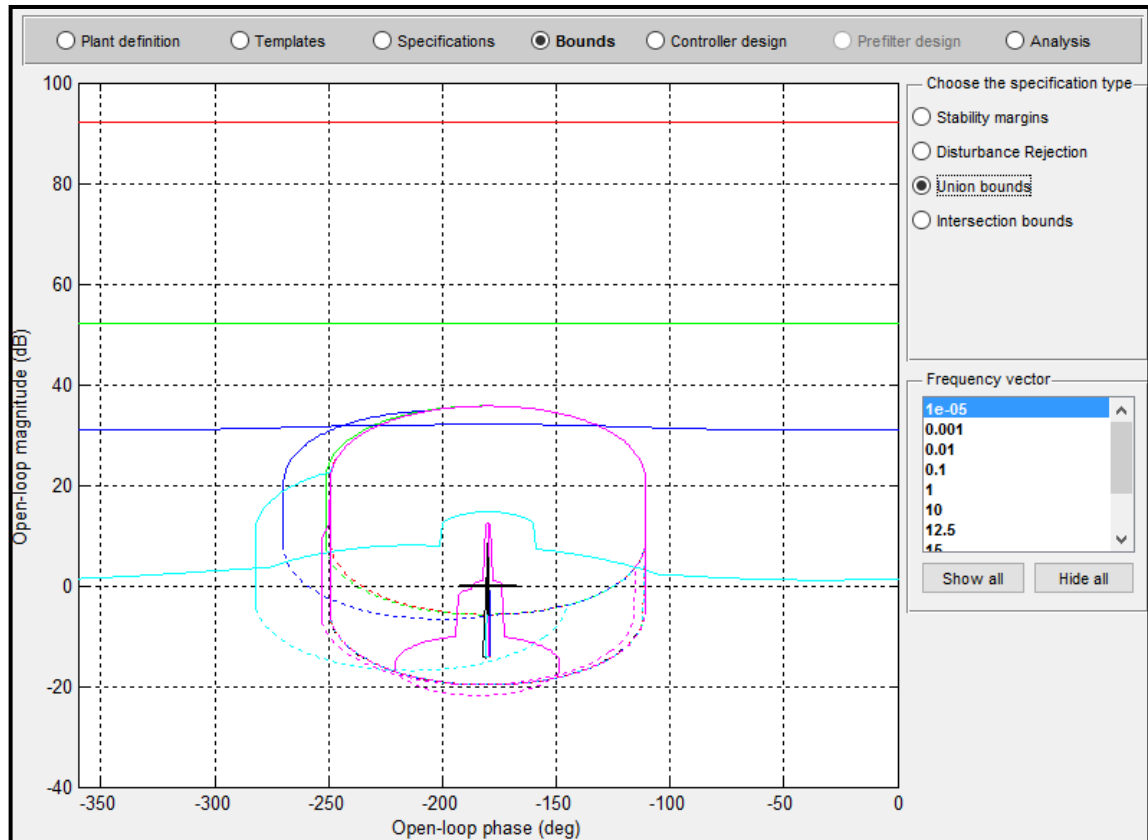
4. Bounds (Contornos):

Una vez escogida la planta nominal, la toolbox continúa con la metodología de QFT, convirtiendo las especificaciones escogidas en lazo cerrado y la incertidumbre de la planta en un conjunto de contornos para cada valor del vector de frecuencias dibujándolos sobre el diagrama de Nichols, permitiendo posteriormente el diseño del controlador.

La *figura 86* muestra las opciones que entrega la toolbox al usuario, ya que este puede visualizar los márgenes de estabilidad, el rechazo de perturbaciones, unión

e intersección de los contornos, del conjunto de frecuencias o de algún valor específico. Si en la intersección de los contornos no es la deseada o requerida, el usuario puede insertar nuevos valores de frecuencias para modificar los resultados a sus necesidades.

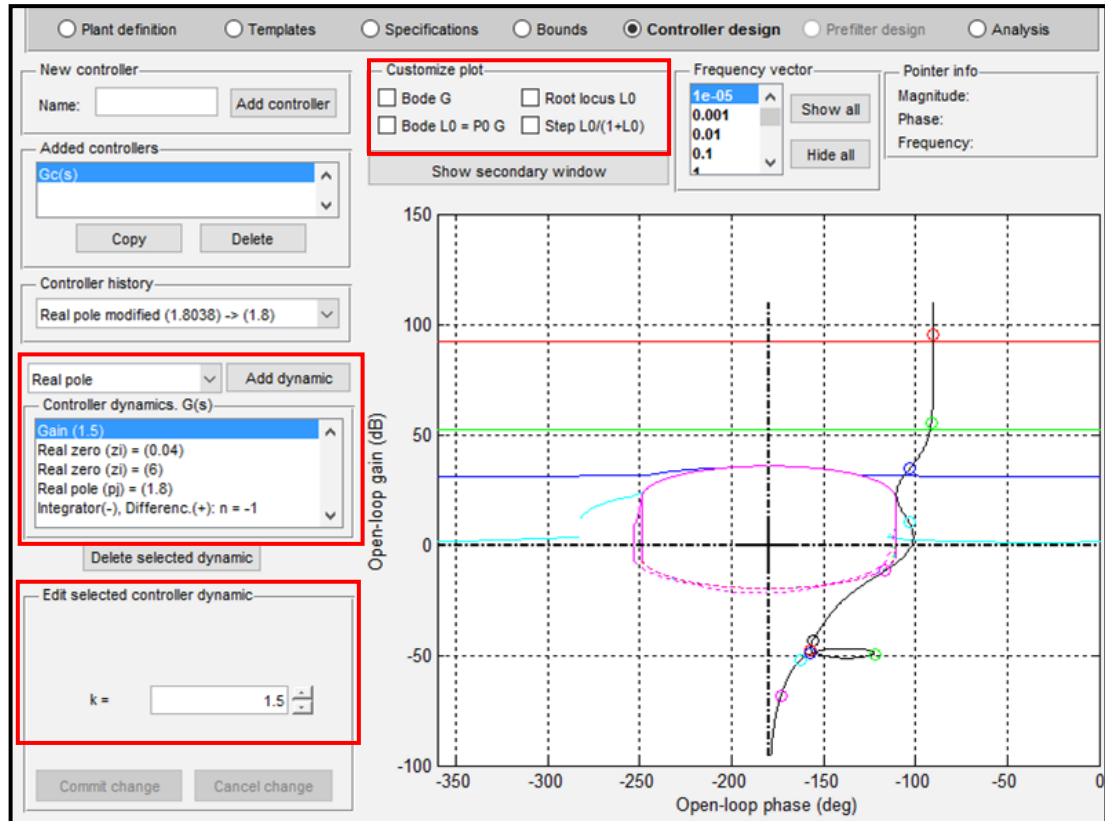
Figura 86. Bounds (Contornos).



5. Controller design (Diseño del controlador):

La toolbox cuenta con las opciones de agregar ganancia, polos reales y complejos, ceros reales y complejos, integrador, derivador, filtro de Notch y compensador en atraso y adelante, como dinámicas de control. Los valores de sus parámetros van variando con las dos flechas que se encuentran en la parte inferior izquierda de la pantalla *figura 87*; a su vez se modifica en tiempo real la gráfica de la función de lazo abierto $L(s)$.

Figura 87. Controller design (Diseño del controlador).



El objetivo del diseño del controlador es modificar la función $L(s)$ agregando las dinámicas de control necesarias para que la función sea estable, no esté dentro de los contornos y cada frecuencia esté por encima de ella misma. Con el fin de facilitar los valores de ganancia, polos, ceros y demás; la toolbox tiene la opción de mostrar las siguientes gráficas:

- Diagrama de bode del controlador.
- Diagrama de bode de $L(s)$.
- Lugar de las raíces de $L(s)$.
- Respuesta al escalón de $L(s)/(1 + L(s))$.

En la *tabla 6* se muestra cómo afecta a la función en lazo abierto $L(s)$, al agregar las dinámicas de control mencionadas con anterioridad, con su respectiva estructura.

Tabla 6. Aporte de las dinámicas de control.

Dinámica de control	Estructura	Aporte
<i>Ganancia</i>	K	Desplaza $L(s)$ hacia arriba $K > 1$ o abajo si $K < 1$
<i>Polo real</i>	$\left[\frac{1}{(s/p) + 1} \right]$	En la frecuencia $\omega = p$ rad/s, el polo desplaza $L(s)$ hacia abajo -3dB y a la izquierda -45° .
<i>Cero real</i>	$[(s/z) + 1]$	En la frecuencia $\omega = z$ rad/s, el cero desplaza $L(s)$ hacia arriba +3dB y a la derecha $+45^\circ$.
<i>Integrador</i>	$\frac{1}{s^n}; n = 1, 2, \dots$	Desplaza todas las frecuencias de $L(s)$ a la izquierda -90° . No se desplaza verticalmente.
<i>Derivador</i>	$s^n; n = 1, 2, \dots$	Desplaza todas las frecuencias de $L(s)$ a la derecha $+90^\circ$. No se desplaza verticalmente.
<i>Polo complejo</i>	$\left[\frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2)} \right];$ $(\zeta < 0.707)$	Desplaza hacia arriba, por un valor máximo de magnitud (resonancia) de $-20\log_{10}[2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}]$ dB y en frecuencia $\omega = \omega_n\sqrt{1-2\zeta^2}$ rad/s. Además las frecuencias se desplazan a la derecha $-90^\circ + \sin^{-1}[\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}]$ grados.
<i>Cero complejo</i>	$\frac{(s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2)}{\omega_n^2}$	Desplaza hacia abajo, por un valor máximo de magnitud (resonancia) de $20\log_{10}[2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}]$ dB y en frecuencia $\omega = \omega_n\sqrt{1-2\zeta^2}$ rad/s. Además las frecuencias se desplazan a la derecha $90^\circ - \sin^{-1}[\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}]$ grados.
<i>Compensador en adelanto</i>	$\frac{(s/z) + 1}{(s/p) + 1}; \quad (z < p)$	Desplaza $L(s)$ a la izquierda un valor máximo en fase de $\phi_{max} = 90 - 2\tan^{-1}\sqrt{z/p}$ grados y $\omega = \sqrt{zp}$ rad/s en frecuencia. Además las frecuencias se

		desplazan hacia arriba $10\log_{10}(p/z)$.
<i>Compensador en atraso</i>	$\frac{(s/z) + 1}{(s/p) + 1}; \quad (z > p)$	Desplaza $L(s)$ a la derecha un valor máximo en fase de $\phi_{max} = -90 + 2\tan^{-1}\sqrt{z/p}$ grados y $\omega = \sqrt{zp}$ rad/s en frecuencia. Además las frecuencias se desplazan hacia abajo $-10\log_{10}(p/z)$.
<i>Filtro de Notch</i>	$\frac{(s^2 + 2\zeta_1\omega_n + \omega_n^2)}{(s^2 + 2\zeta_2\omega_n + \omega_n^2)}$	Desplaza $L(s)$ hacia abajo un valor máximo en magnitud de $20\log_{10}(\zeta_1/\zeta_2)$ dB y de frecuencia $\omega = \omega_n$ rad/s. No se desplaza horizontalmente.

6. Prefilter design (Diseño del prefiltro)

El objetivo del prefiltro es el cumplimiento de las especificaciones de seguimiento a la referencia (*tracking*), para esto, se usa como límite superior la función de transferencia de un sistema de segundo orden sub-amortiguado con sobre-pico y tiempo de establecimiento escogidos por el diseñador (T_U) (E.2). Para el límite inferior se emplea un sistema de tercer orden sobre-amortiguado (T_L) (E.3).

- Margen superior (T_U) en lazo cerrado:

$$T_U = \frac{(\omega_n^2/a)(s + a)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (E.2)$$

- Margen inferior (T_L) en lazo cerrado:

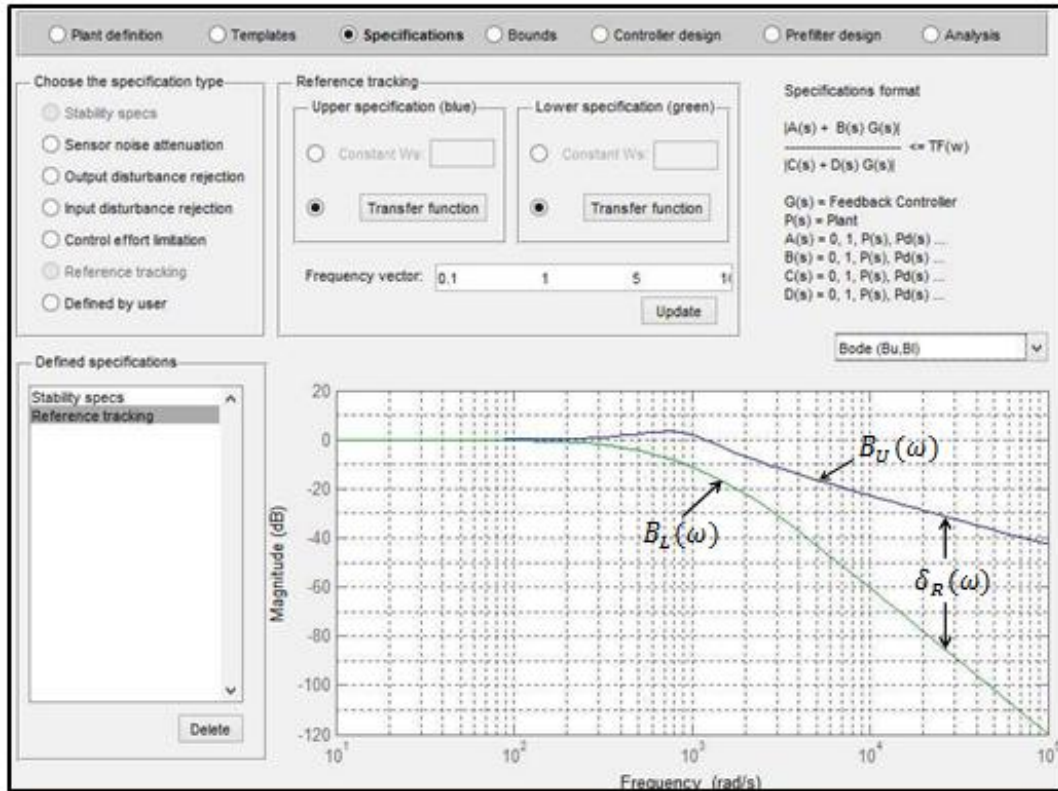
$$T_L = \frac{a_1 * a_2 * a_3}{(s + a_1)(s + a_2)(s + a_3)} \quad (E.3)$$

Según el libro titulado “Optimal Control of Wind Energy Systems – Toward a Global Approach”⁴⁹, los valores designados para las constantes son los siguientes (E.4):

$$a = 1.2\omega_n \quad a_1 = 0.5\omega_n \quad a_2 = 1.5\omega_n \quad a_3 = 2\omega_n \quad (E.4)$$

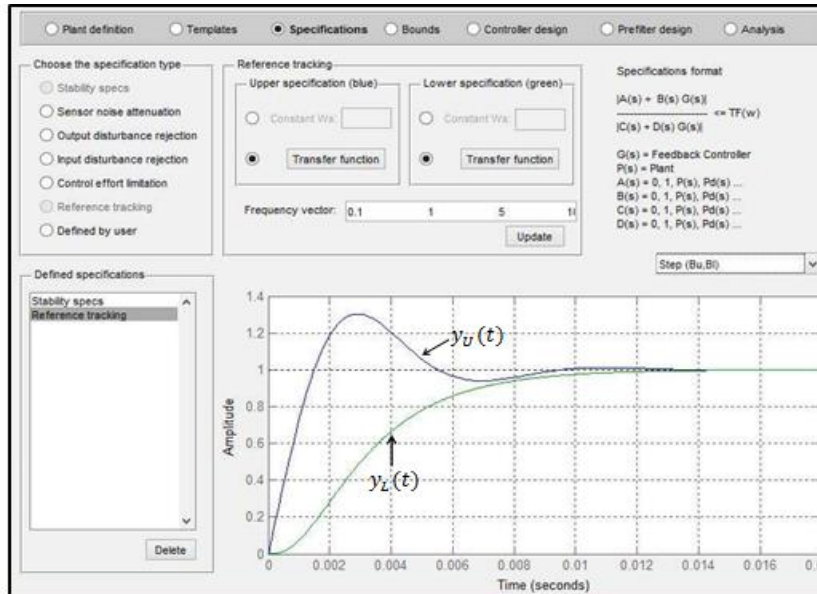
Teniendo una especificación de tracking que exija a la salida del sistema localizarse entre $y_U(t)$ y $y_L(t)$ figura 88, es decir, que su respuesta en frecuencia esté entre $B_U(\omega)$ y $B_L(\omega)$, el controlador reducirá el área de salida del sistema en el dominio de la frecuencia, para que la incertidumbre sea menor que $\delta_R(\omega)$, y el pre-filtro moverá el área para ubicarla entre $B_U(\omega)$ y $B_L(\omega)$ figura 89.

Figura 88. Prefilter design en el dominio de la frecuencia.



⁴⁹MUNTEANU, Iulian, *et al.* Optimal Control of Wind Energy Systems – Toward a Global Approach. Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-079-7.

Figura 89. Prefilter design en el dominio del tiempo.



7. Analysis (Análisis de respuestas)

Para comprobar el funcionamiento del controlador diseñado, la metodología de QFT sugiere evaluar el cumplimiento de las especificaciones, realizando un análisis en el dominio de la frecuencia, mediante el diagrama de bode y en el dominio del tiempo, evaluando las especificaciones ante la respuesta al escalón y al impulso, como se muestra en el figura 90.

Figura 90. Analysis (Análisis de respuestas).

