

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	HIPÓTESIS	2
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivos Específicos	2
1.3	ALCANCES Y LIMITACIONES	2
1.4	METODOLOGÍA PROPUESTA	3
1.5	ESTRUCTURA DE TESIS	3
2	ESTADO DEL ARTE	4
2.1	TECNOLOGÍA HARDWARE IN THE LOOP	4
2.2	AEROGENERADOR	6
2.3	CLASIFICACIÓN SEGÚN LA DISPOSICIÓN DE SU EJE DE ROTACIÓN	6
2.3.1	Aerogeneradores de Eje Horizontal	6
2.3.1.1	Componentes Mecánicos	7
2.3.1.2	Componentes Eléctricos	7
2.3.1.3	Sistema de Control	8
2.4	PRINCIPALES CONFIGURACIONES DE LOS WECS (EN INGLÉS, WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM)	8
2.4.1	Velocidad Fija	8
2.4.1.1	Generador SCIG	8
2.4.2	Velocidad Variable	9
2.4.2.1	Generador DFIG	9
2.4.2.2	Generador SCIG, PMSG Y WRSYG	9
2.4.2.3	Modos De Operación Para Velocidad Variable	10
2.5	MODELO MATEMÁTICO DEL AEROGENERADOR	11
2.5.1	Modelo Mecánico de la Turbina Eólica	11
2.5.2	Cálculo de Torque	15
2.6	MPPT (MAXIMUN POWER POINT TRACKING)	17
2.6.1	Búsqueda del punto más Alto (en Inglés, Hill Climb Search, HCS.) Algoritmo MPPT basado en Direct Power Control (DPC)	17
2.6.2	Retroalimentación de Señal de Potencia (en inglés, Power Signal Feedback, PSF). Algoritmo MPPT basado en Indirect Power Control (IPC)	18
2.6.3	Razón de Velocidad de Punta de Aspa (en inglés, Tip Speed Radio, TSR). Algoritmo MPPT basado en Indirect Power Control (IPC)	18
2.6.4	Torque Óptimo (en inglés, Optimal Torque, OT). Algoritmo MPPT basado en Indirect Power Control (IPC)	18
2.7	PITCH CONTROL	19
2.7.1	Velocidad del viento	20
2.7.2	Velocidad mecánica del generador	20
2.7.3	Potencia nominal del generador	20

2.8	MODELO DEL GENERADOR	22
2.9	OBTENCIÓN DE LA POTENCIA DE REFERENCIA DE PMSG	24
2.10	PERFIL DE VIENTO	25
2.10.1	Modelo de Velocidad Viento.....	26
2.11	TOPOLOGÍA DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA BACK-TO-BACK (BTB).....	28
3	BANCO EXPERIMENTAL	29
3.1	TRIPHASE: PM5F60R	29
3.2	ESTRUCTURA DEL TRIPHASE PM5F60R:.....	30
3.2.1	Topología Back-To-Back en la Unidad Triphase PM5F60R.....	30
3.2.1.1	Capacitor de Enlace (Dclink)	32
3.2.1.2	Inversor Trifásico de 3 Piernas de dos Niveles (VSC1 y VSC2).....	32
3.2.1.3	Filtro LCL	32
3.2.2	Fuente de Alimentación de Entrada y Salida a la Unidad Triphase PM5F60R	32
3.2.2.1	Alimentación de Rectificadores	33
3.2.2.2	Alimentación de Inversor VSC1	33
3.2.2.3	Alimentación de Inversor VSC2	34
3.2.3	Resumen de los Parámetros del Triphase PM5F60R.....	34
4	ESTRATEGIAS DE CONTROL	35
4.1	“GRID-SIDE CONVERTER CONTROL”	35
4.1.1	Ecuaciones dinámicas del convertidor del lado de la red	36
4.1.2	Diseño de Control PI de Corriente.....	37
4.1.3	Diseño de Control PI de Tensión.....	39
4.1.4	Diseño del Phase-Locked Loop (PLL)	42
4.2	DRIVE CONTROL.....	44
4.2.1	Teoría de la Potencia Instantánea P-Q.....	45
4.2.2	Ecuaciones dinámicas del convertidor del lado de la máquina	45
4.2.3	Control Resonante Proporcional (en inglés, Proportional-Resonant Controller, PR).....	46
4.2.3.1	PR de Corriente.....	48
4.2.3.2	PR de Corriente con Compensación de Armónicos (en inglés, Harmonic Compensator, HC) ...	48
4.2.3.3	Diseño del Control PR+HC.....	49
4.3	ACTIVE DAMPING	55
4.3.1.1	Filtro LCL	56
5	RESULTADOS	63
5.1	OBTENCIÓN DE CURVA DE POTENCIA C_p (λ, β) (SIN CONSIDERAR PITCH CONTROL)	63
5.1.1	Resultados.....	63
5.2	VARIACIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS DEL AEROGENERADOR ANTE VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE VIENTO CONSIDERANDO ALGORITMO MPPT	64
5.2.1	Resultados.....	64
5.3	VALIDACIÓN DE PITCH CONTROL_ β	67

5.3.1	Resultados.....	67
5.4	PERFIL DE VIENTO	69
5.4.1.1	Resultados	69
5.5	VALIDACIÓN ALGORITMO MPPT	71
5.5.1	Resultados.....	71
5.6	ALGORITMO MPPT ANTE VARIACIÓN DE INERCIA DEL AEROGENERADOR	73
5.6.1	Resultados.....	73
5.7	CALIDAD DE SEÑAL	76
5.7.1	Control PR.....	77
5.7.2	Control PR + HC 5 ^{TO} _7 ^{mo}	79
5.7.3	Control PR + HC 5 ^{TO} _7 ^{mo} + Active Damping	81
6	CONCLUSIONES	83
7	BIBLIOGRAFÍA	85
8	ANEXOS.....	91
8.1	ANEXO A: CÓDIGO FUENTE DE LA EMULACIÓN DE UN AEROGENERADOR CONECTADO A LA RED A TRAVÉS DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL BACK-TO-BACK MEDIANTE LA TÉCNICA “HARDWARE IN THE LOOP”	91
8.2	ANEXO B: CÓDIGO FUENTE PARA SINTONIZACIÓN DEL CONTROL Y COMPENSACIÓN DEL 5 ^{TO} Y 7 ^{MO} ARMÓNICO Y COMPARACIÓN DE PLANTAS CON Y SIN ACTIVE DAMPING.....	98
8.3	ANEXO C: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA EMULACIÓN DE UN AEROGENERADOR CONECTADO A LA RED A TRAVÉS DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL BACK-TO-BACK MEDIANTE LA TÉCNICA “HARDWARE IN THE LOOP”	100
8.4	ANEXO D: TRASFORMACIONES AL MARCO DE REFERENCIA SINCRÓNICO Y ESTACIONARIO	102
8.4.1	Transformación al marco de referencia sincrónico.....	103
8.4.2	Transformación al marco de referencia estacionario	104
8.5	ANEXO E: CÁLCULO DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO E IMPEDANCIAS DEL TRANSFORMADOR	106
8.5.1	Cortocircuito Trifásico	106
8.5.2	Impedancia Interna del Transformador.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. PARÁMETROS DEL MODELO DEL AEROGENERADOR	23
TABLA 3.1. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DEL TRIPHASE PM5F60R	34
TABLA 5.1. NIVEL DE ARMÓNICOS COMO PORCENTAJE DE LA FUNDAMENTAL	70
TABLA 5.2. LÍMITES DE DISTORSIÓN PARA SISTEMAS DE GENERACIÓN DE DISTRIBUCIÓN COMO PORCENTAJE DE LA FUNDAMENTAL	76
TABLA 5.3. CALIDAD DE SEÑAL DE CORRIENTE MEDIANTE ACCIÓN PR.....	78
TABLA 5.4. CALIDAD DE SEÑAL DE CORRIENTE MEDIANTE ACCIÓN PR Y COMPENSACIÓN HC DEL 5 ^{TO} Y 7 ^{MO} ARMÓNICO	80
TABLA 5.5. CALIDAD DE SEÑAL DE CORRIENTE MEDIANTE ACCIÓN PR + HC 5 ^{TO} -7 ^{MO} Y ACTIVE DAMPING	82
TABLA 8.1. TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO μcc NORMALIZADA PARA LOS TRANSFORMADORES MT/BT DE DISTRIBUCIÓN PÚBLICA [58]	106

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 2.1. ARQUITECTURA DE LA TÉCNICA HARDWARE-IN-THE-LOOP IMPLEMENTADA EN TRIPHASE PM5F60R.....	5
FIGURA 2.2. CONFIGURACIÓN WECS CON GENERADOR SCIG [3].	8
FIGURA 2.3. CONFIGURACIÓN WECS CON GENERADOR DFIG.	9
FIGURA 2.4. CONFIGURACIÓN WECS CON GENERADOR SCIG, PMSG Y WRSG [3].....	10
FIGURA 2.5. REGIONES DE OPERACIÓN DE UN AEROGENERADOR.	10
FIGURA 2.6. CURVA DE COEFICIENTE DE POTENCIA VS LAMBDA PARA DISTINTOS VALORES DE β	12
FIGURA 2.7. MODELO DE TURBINA EÓLICA CONSIDERANDO ALGORITMO OT PARA MPPT	15
FIGURA 2.8. CÓDIGO DISCRETO DEL MODELO DE LA TURBINA	15
FIGURA 2.9. MODELO PARA CÁLCULO DE TORQUE	16
FIGURA 2.10. CÓDIGO DISCRETO DEL CÁLCULO DE TORQUE	17
FIGURA 2.11. COEFICIENTE DE POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA RAZÓN DE VELOCIDAD DE PUNTA DE ASPA [38]	18
FIGURA 2.12. ESTRATEGIA DE CONTROL. VELOCIDAD DEL VIENTO.....	20
FIGURA 2.13. ESTRATEGIA DE CONTROL. VELOCIDAD MECÁNICA DEL GENERADOR	20
FIGURA 2.14. ESTRATEGIA DE CONTROL. POTENCIA DEL GENERADOR.....	20
FIGURA 2.15. MODELO DE ESTRATEGIA PITCH CONTROL IMPLEMENTADO “POTENCIA DEL GENERADOR”.....	21
FIGURA 2.16. CÓDIGO DISCRETO DEL MODELO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL “POTENCIA DEL GENERADOR” IMPLEMENTADO.	22
FIGURA 2.17. MODELO DEL GENERADOR PMSG	24
FIGURA 2.18. POTENCIA GENERADA POR LA PMSG	25
FIGURA 2.19. CÓDIGO DISCRETO DE LA OBTENCIÓN DE LA POTENCIA DE REFERENCIA DE LA PMSG	25
FIGURA 2.20. GENERACIÓN DE LA VELOCIDAD DE VIENTO POR MODELO ARMA IMPLEMENTADO EN MATLAB/SIMULINK	28
FIGURA 3.1. EQUIPO TRIPHASE PM5F60R. (A) VISTA FRONTAL. (B) VISTA POSTERIOR	29
FIGURA 3.2. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LA TOPOLOGÍA DE LA UNIDAD TRIPHASE PM5F60R	30

FIGURA 3.3. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LA CONFIGURACIÓN BACK-TO-BACK DEL TRIPHASE PM5F60R.....	31
FIGURA 3.4. CONFIGURACIÓN DEL FILTRO LCL DE LOS CONVERTORES V_{VSC1} Y V_{VSC2}	32
FIGURA 3.5. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE I/O AL EQUIPO TRIPHASE PM5F60R	33
FIGURA 4.1. SISTEMA DE CONTROL GRID-SIDE CONVERTER	35
FIGURA 4.2. CONVERTIDOR ($VSC1$) CONECTADO A LA RED MEDIANTE FILTRO L	37
FIGURA 4.3. ESQUEMA DE CONTROL VECTORIAL GRID-SIDE CONVERTER.....	38
FIGURA 4.4. LUGAR DE LA RAÍZ CONTROLADOR DE CORRIENTE.....	39
FIGURA 4.5. DIAGRAMA DEL SISTEMA PARA CÁLCULO DE BALANCE DE POTENCIAS	39
FIGURA 4.6. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LAZO DE CONTROL DE TENSIÓN	41
FIGURA 4.7. LUGAR DE LA RAÍZ CONTROLADOR DE TENSIÓN	41
FIGURA 4.8. (A) DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN PLL CONVENCIONAL, (B) VECTOR VOLTAJE Y VECTOR UNITARIO FICTICIO CREADO POR EL PLL	42
FIGURA 4.9. DISEÑO DEL PLL CON ORIENTACIÓN DEL VOLTAJE DE LA RED.	43
FIGURA 4.10. SISTEMA DRIVE CONTROL.....	44
FIGURA 4.11. CONVERTIDOR ($VSC2$) CONECTADO A LA RED MEDIANTE FILTRO L	46
FIGURA 4.12. ESQUEMA DE CONTROL VECTORIAL DRIVE CONTROL CON CONTROLADOR RESONANTE MULTI-VARIABLE.	47
FIGURA 4.13. SISTEMA DE CONTROL CONSIDERANDO RETARDO DE TRANSPORTE	50
FIGURA 4.14. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL CONTROL RESONANTE DE CORRIENTE.....	51
FIGURA 4.15. CÓDIGO DE CONVERSIÓN DE “S” A “Z” DE MODELO DE PLANTA CONSIDERANDO RETARDO.....	52
FIGURA 4.16. CÓDIGO DE CONVERSIÓN DE “S” A “Z” DEL CONTROLADOR RESONANTE Y COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS.....	52
FIGURA 4.17. MÉTODO DEL LUGAR DE LA RAÍZ PARA SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES.....	52
FIGURA 4.18. DIAGRAMA DE BODE DEL CONTROL RESONANTE PROPORCIONAL (PR) DE CORRIENTE.....	53
FIGURA 4.19. DIAGRAMA DE BODE DEL CONTROL DE COMPENSACIÓN (HC) DEL 5 ^{TO} ARMÓNICO.....	53
FIGURA 4.20. DIAGRAMA DE BODE DEL CONTROL DE COMPENSACIÓN (HC) DEL 7 ^{MO} ARMÓNICO.....	54
FIGURA 4.21. DIAGRAMA DE BODE DEL CONTROL DE CORRIENTE (PR) Y COMPENSACIÓN (HC) DEL 5 ^{TO} , 7 ^{MO} ARMÓNICO.	54
FIGURA 4.22. POSIBLES POSICIONES PARA AMORTIGUAMIENTO RESISTIVO.....	55
FIGURA 4.23. ESTRATEGIA DE CONTROL ACTIVE DAMPING PARA ESTRATEGIAS DE CONTROL (A) “GRID-SIDE CONVERTER CONTROL” Y (B) “DRIVE CONTROL”.....	56
FIGURA 4.24. CIRCUITO ELÉCTRICO DE UN FILTRO LCL	56
FIGURA 4.25. COMPARACIÓN DEL PERFIL DE ATENUACIÓN ENTRE UN FILTRO L(ROJO) Y UN FILTRO LCL(AZUL)	57
FIGURA 4.26. SEÑAL DE CORRIENTE EN CONDICIONES NOMINALES CON ACCIÓN DEL CONTROL RESONANTE	58
FIGURA 4.27. ESPECTRO DE FOURIER DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DE LA RED.....	58
FIGURA 4.28. CIRCUITO ELÉCTRICO DE UN FILTRO LCL CONSIDERANDO PÉRDIDAS CON IMPEDANCIA VIRTUAL	59
FIGURA 4.29. CIRCUITO ELÉCTRICO DE UN FILTRO LCL CONSIDERANDO PÉRDIDAS CON IMPEDANCIA VIRTUAL SIMPLIFICADO	59
FIGURA 4.30. DIAGRAMA DE NYQUIST DE LA PLANTA Y CONTROLADOR CON COMPENSACIÓN, SIN CONSIDERAR ACTIVE DAMPING.	62

FIGURA 4.31. DIAGRAMA DE NYQUIST DE LA PLANTA Y CONTROLADOR CON COMPENSACIÓN, CONSIDERANDO ACTIVE DAMPING.	62
FIGURA 8.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PERFIL DE VIENTO, MODELO DE TURBINA Y CÁLCULO DE TORQUE.....	100
FIGURA 8.2. OBTENCIÓN DE LA POTENCIA DE REFERENCIA Y PITCH CONTROL	100
FIGURA 8.3. CONTROL DE CORRIENTE RESONANTE Y COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS	101
FIGURA 8.4. ENTRADA DE LA SEÑAL DE REFERENCIA DEL PWM DEL EQUIPO TRIPHASE PM5F60R	101
FIGURA 8.5. MODELO DEL CONVERTIDOR PWM CON FILTRO L.....	102

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICA 5.1. CURVA DE POTENCIA C_p PARA VARIACIONES DE $\beta = 0^\circ - 5^\circ - 10^\circ - 15^\circ - 20^\circ$ EN SIMULACIÓN.....	63
GRÁFICA 5.2. CURVA DE POTENCIA C_p PARA VARIACIONES DE $\beta = 0^\circ - 5^\circ - 10^\circ - 15^\circ - 20^\circ$ EN SISTEMA EXPERIMENTAL	63
GRÁFICA 5.3. VARIACIÓN DE VELOCIDAD DEL VIENTO ANTE CAMBIOS DE ESCALÓN EN SIMULACIÓN	64
GRÁFICA 5.4. VARIACIÓN DE VELOCIDAD DEL VIENTO ANTE CAMBIOS DE ESCALÓN EN SISTEMA EXPERIMENTAL	64
GRÁFICA 5.5. VELOCIDAD MECÁNICA DEL AEROGENERADOR EN SIMULACIÓN	64
GRÁFICA 5.6. VELOCIDAD MECÁNICA DEL AEROGENERADOR EN SISTEMA EXPERIMENTAL	64
GRÁFICA 5.7. TORQUE DEL AEROGENERADOR EN SIMULACIÓN.....	65
GRÁFICA 5.8. TORQUE DEL AEROGENERADOR EN SISTEMA EXPERIMENTAL.....	65
GRÁFICA 5.9. POTENCIA DEL AEROGENERADOR EN SIMULACIÓN	65
GRÁFICA 5.10. POTENCIA DEL AEROGENERADOR EN SISTEMA EXPERIMENTAL	65
GRÁFICA 5.11. CONTROL MPPT CP_{max} EN SIMULACIÓN.....	66
GRÁFICA 5.12. CONTROL MPPT CP_{max} EN SISTEMA EXPERIMENTAL.....	66
GRÁFICA 5.13. VARIACIÓN DE VELOCIDAD DEL VIENTO ANTE CAMBIOS DE ESCALÓN EN SIMULACIÓN.....	67
GRÁFICA 5.14. VARIACIÓN DE VELOCIDAD DEL VIENTO ANTE CAMBIOS DE ESCALÓN EN SISTEMA EXPERIMENTAL	67
GRÁFICA 5.15. VELOCIDAD MECÁNICA DEL AEROGENERADOR EN SIMULACIÓN	68
GRÁFICA 5.16. VELOCIDAD MECÁNICA DEL AEROGENERADOR EN SISTEMA EXPERIMENTAL	68
GRÁFICA 5.17. CORRIENTE EN EJE DIRECTO QUE GENERA EL AEROGENERADOR EN SISTEMA EXPERIMENTAL.....	68
GRÁFICA 5.18. ACCIÓN PITCH CONTROL EN SIMULACIÓN	68
GRÁFICA 5.19. ACCIÓN PITCH CONTROL EN SISTEMA EXPERIMENTAL.....	68
GRÁFICA 5.20. PERFIL DE VIENTO EN SISTEMA EXPERIMENTAL. DATOS OBTENIDOS EN LABS. RUTHERFORD EN OXFORD INGLATERRA EN SISTEMA EXPERIMENTAL	69
GRÁFICA 5.21. PERFIL DE VIENTO_ VELOCIDAD MEDIA, COMPONENTE DE RAMPA, RÁFAGAS Y TURBULENCIAS EN SISTEMA EXPERIMENTAL.....	69
GRÁFICA 5.22. FOURIER: PERFIL DE VIENTO_ VELOCIDAD MEDIA, RÁFAGAS Y TURBULENCIAS EN SISTEMA EXPERIMENTAL	70
GRÁFICA 5.23. VARIACIÓN DE VELOCIDAD DEL VIENTO EN SISTEMA EXPERIMENTAL	71
GRÁFICA 5.24. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD MECÁNICA DEL AEROGENERADOR EN SISTEMA EXPERIMENTAL	71
GRÁFICA 5.25. VARIACIÓN DE ÁNGULO β EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN SISTEMA EXPERIMENTAL ...	71
GRÁFICA 5.26. POTENCIA QUE GENERA EL AEROGENERADOR EN SISTEMA EXPERIMENTAL	71

GRÁFICA 5.27. MPPT_ C_p EN SISTEMA EXPERIMENTAL	71
GRÁFICA 5.28. CORRIENTE I_d QUE GENERA EL AEROGENERADOR EN SISTEMA EXPERIMENTAL.....	71
GRÁFICA 5.29. PERFIL DE VIENTO EN SISTEMA EXPERIMENTAL.....	73
GRÁFICA 5.30. VELOCIDAD ROTACIONAL [RPM] ANTE DIFERENTES INERCIAS EN SISTEMA EXPERIMENTAL	74
GRÁFICA 5.31. TENSIÓN DC LINK [V] ANTE VARIACIONES DE INERCIA EN EL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	74
GRÁFICA 5.32. CORRIENTE EN COMPONENTE DQ, DE LA CORRIENTE QUE INYECTA EL AEROGENERADOR A LA RED EN SISTEMA EXPERIMENTAL.....	74
GRÁFICA 5.33. ACCIÓN DEL CONTROLADOR PR EN SISTEMA EXPERIMENTAL	77
GRÁFICA 5.34. ESPECTRO DE FOURIER_ACCIÓN PR	77
GRÁFICA 5.35. ACCIÓN DEL CONTROLADOR PR + HC 5 ^{TO} _7 ^{MO} EN SISTEMA EXPERIMENTAL	79
GRÁFICA 5.36. ESPECTRO DE FOURIER_ACCIÓN PR + HC 5 ^{TO} _7 ^{MO}	79
GRÁFICA 5.37. ACCIÓN DEL CONTROLADOR PR + HC Y ACTIVE DAMPING EN SISTEMA EXPERIMENTAL.....	81
GRÁFICA 5.38. ESPECTRO DE FOURIER_ACCIÓN PR + HC Y ACTIVE DAMPING.....	81