

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis	5
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Alcance del trabajo	5
1.5. Metodología	6
2. Estado del arte y Marco teórico	7
2.1. Cargas estructurales en un aerogenerador	7
2.1.1. Tipos de carga y tensiones en una turbina eólica	8
2.1.2. Sistema de coordenadas para análisis de cargas	9
2.1.3. Tipos de carga a analizar	12
2.1.3.1. Viento uniforme y constante	12
2.1.3.2. Cizalladura de viento cortante y vientos cruzados	12
2.2. Dinámica del aerogenerador	13
2.3. Modelamiento de la máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM)	14
2.3.1. Ecuaciones de la máquina síncrona de imanes permanentes	16
2.3.2. Transformación de ecuaciones al sistema de referencia al rotor	19
2.3.3. Ecuaciones de la máquina al sistema de referencia del rotor	20
2.3.4. Modos de operación del PMSM	21
2.3.4.1. Operación como motor	21
2.3.4.2. Operación como generador	22
2.4. Lazos de control	22
2.4.1. Control vectorial (VC) orientado en flujo de la máquina síncrona de imanes permanentes	22
2.4.2. Control vectorial del convertidor conectado a la red	24
2.5. Modelamiento vibracional del sistema mecánico de un aerogenerador	26
2.5.1. Elemento de viga	28
2.5.2. Ecuaciones cinemáticas del sistema mecánico de un aerogenerador	31
2.5.2.1. Energías cinéticas	32
2.5.2.2. Energías potenciales	34
2.5.2.3. Ecuaciones de movimiento del sistema	34
2.5.3. Estudio del estado de degradación del aspa	36
2.6. Modelos electromecánicos	38

3. Modelamiento y validación del sistema mecánico	41
3.1. Modelo cinemático del sistema mecánico	42
3.1.1. Energías cinéticas	42
3.1.2. Energías potenciales	44
3.1.3. Ecuaciones de movimiento del sistema	44
3.2. Validación del modelo del aspa	46
3.3. Validación modelo rotacional del aspa	50
3.3.1. Comparativa del modelo lineal y no lineal en condiciones estáticas y ángulo de pitch 0°	50
3.3.2. Comparativa del modelo lineal y no lineal en condiciones rotacionales	53
3.3.2.1. Modelo no lineal	53
3.3.2.2. Modelo lineal	56
3.4. Respuesta vibracional del modelo	60
3.4.1. Caso de estudio: Respuesta a un perfil de viento	60
4. Modelamiento y simulación sistema electro-mecánico	63
4.1. Modelo electro-mecánico	64
4.2. Análisis de frecuencias	68
4.2.1. Bornes máquina	70
4.2.2. Enlace DC	72
4.2.3. Bornes conversor de la red	74
4.2.4. Filtro LCL	76
5. Degradación aspa	79
5.1. Matriz de degradación	80
6. Conclusiones y trabajo futuro	83
6.1. Trabajo futuro	85
Bibliografía	86
Anexo A. Elementos matriciales	90
Anexo B. Características de elementos finitos	91
Anexo C. Coordenadas $abc/\alpha\beta/dq$.	92
Anexo D. Detección de amortiguamiento naturales	95