



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADO A MÁQUINAS
SOMETIDAS A VELOCIDAD Y CARGA VARIABLES MEDIANTE
ANÁLISIS DE ÓRDENES**

Tesis doctoral

Luisa Fernanda Villa Montoya

Ingeniera Mecánica

2011

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADO A MÁQUINAS
SOMETIDAS A VELOCIDAD Y CARGA VARIABLES MEDIANTE
ANÁLISIS DE ÓRDENES

Autor:

Luisa Fernanda Villa Montoya

Ingeniera Mecánica

Directores:

Dr. D. Aníbal Reñones Domínguez

Investigador Fundación CARTIF

Dr. D. Luis Javier de Miguel González

Profesor titular de Universidad

Valladolid, 2011

*Para mis padres
y
para mi tío Luis Carlos (Q.E.P.D)*

Agradecimientos

El trabajo que aquí presento es el resultado de mis casi cuatro años de investigación en la Fundación CARTIF, durante estos años he recibido el apoyo de muchas personas que de una u otra manera han aportado su granito de arena para que este trabajo llegara a buen final.

En primer lugar quiero agradecer a mis directores de tesis, Dr. Aníbal Reñones por estar siempre ahí para resolver mis dudas y guiarme en este largo camino, por apoyarme en los momentos de desánimo y ayudarme a ver la luz cuando veía las cosas oscuras. Dr. José R. Perán González y Dr. Luis Javier de Miguel por apostar por mí desde el principio y ayudarme a desembarcar en este proyecto.

Para la realización de este proyecto se necesitaron muchas horas de experimentación y procesado de información, quiero darle especialmente las gracias a Roberto Arnanz por ser mi gran ayuda y apoyo durante todo este proceso, fue mucho lo que aprendí. También a mis compañeros de CARTIF, que de alguna u otra manera me ayudaron en la consecución de éste logro académico.

Por último pero no menos importante quiero darles las gracias a mis padres que sin su apoyo y cariño no hubiera tomado la decisión de venir a estudiar este doctorado a un lugar tan alejado de mi casa. A mi familia y amigos por su apoyo y aliento durante todo este proceso.

Resumen

Este trabajo se ha desarrollado en el ámbito de diagnóstico de máquinas. El objetivo principal es el diagnóstico de fallos por medio del análisis de vibraciones, en máquinas que operan en condiciones de velocidad y carga variable. Para lograr este objetivo se desarrolló una plataforma de test basada en la configuración de un aerogenerador de velocidad variable con el objetivo de simular diferentes tipos de defecto.

A su vez, se desarrolló un algoritmo de remuestreo angular que permite compensar estas variaciones de velocidad y carga, dicho algoritmo aporta un valor añadido a algoritmos propuestos previamente que se encuentran en la bibliografía, que es el de compensar altas variaciones de velocidad.

En lo que se refiere al diagnóstico de fallos, se desarrolló una metodología para seleccionar las variables y sensores más sensibles a las condiciones de funcionamiento y fallos del sistema y un algoritmo que permite realizar una diagnosis de los diferentes tipos de fallos del sistema bajo condiciones de velocidad y carga variables.

Abstract

This work has been developed in the field of machinery diagnosis. The main objective is the diagnosis of faults by means of vibration analysis in machines that operate under variable speed and load conditions. To achieve this objective a test-bench based on the configuration of a variable speed wind turbine in order to simulate different types of defect was developed.

At the same time was developed an angular resampling algorithm to compensate these variations of speed and load, the algorithm exhibit an added value to previously algorithms found in the literature, which is to compensate high speed variations.

With regards to fault diagnosis, it has been developed a methodology to select the variables and sensors more sensitive to operating conditions and system failures, and an algorithm that allows a diagnosis of different types of system failures under variable speed and load conditions.

Índice general

Índice general	I
Índice de figuras	V
Índice de tablas.....	IX
Capítulo 1	1
1. Introducción y objetivos.....	1
1.1. Marco de la línea de investigación	2
1.2. Objetivos de la tesis	3
1.3. Organización de la tesis	4
1.4. Publicaciones	6
Capítulo 2	9
2. Energía eólica: antecedentes históricos y tecnología asociada	9
2.1. Aerogeneradores	13
2.1.1. ¿Qué es un aerogenerador?	13
2.1.2. Subsistemas.....	14
2.1.3. Sistemas auxiliares del aerogenerador.....	16
2.1.4. Otros sistemas y equipos	17
2.2. Proceso de generación de la energía.....	18
2.3. Velocidad variable	18
2.3.1. Aerogeneradores de velocidad de giro variable y coeficiente de potencia constante	20

2.3.2. Aerogeneradores de velocidad de giro fija y coeficiente de potencia variable	21
2.3.3. Comparación entre sistemas de velocidad constante y de velocidad variable	23
2.3.4. Aerogeneradores de regulación por cambio del ángulo de paso ("pitch controlled").....	24
2.3.5. Aerogeneradores de regulación por pérdida aerodinámica ("stall controlled")	25
2.4. Carga variable.....	27
Capítulo 3	31
3. Mantenimiento en energía eólica.....	31
3.1. Importancia de la monitorización	31
3.2. Monitorización de la condición en aerogeneradores.....	34
3.3. Proyectos que se han realizado para optimizar el mantenimiento y mejorar la disponibilidad y rentabilidad de los parques eólicos....	41
3.3.1. WT_Ω (WT_OMEGA = Wind Turbine Operation and Maintenance based on Condition Monitoring).....	42
3.3.2. CONMOW (condition monitoring for offshore wind farms)	44
3.3.3. The Cleverfarm project.....	44
3.3.4. UpWind	45
3.3.5. Advanced maintenance and repair for offshore wind farms using fault prediction and condition monitoring techniques (OffshoreM&R)	46
Capítulo 4	49
4. Estado del arte del diagnóstico de maquinaria funcionando bajo condiciones de velocidad y carga variables	49
4.1. Investigación realizada en máquinas que trabajan bajo condiciones de velocidad y carga variables.....	49
4.1.1. Sistemas que trabajan bajo condiciones de velocidad variable	49

4.1.2. Sistemas que trabajan bajo condiciones de carga variable	52
Capítulo 5	57
5. Remuestreo angular para análisis de vibraciones en aerogeneradores bajo fluctuaciones de velocidad no lineales.....	57
5.1. Pruebas simuladas.....	61
5.2. Pruebas en bancadas	67
5.3. Pruebas en aerogeneradores.....	71
Capítulo 6	75
6. Experimentación en bancada a escala	75
6.1. Descripción de la bancada de pruebas.....	75
6.2. Fallos simulados	79
6.3. Adquisición de datos y procesamiento	81
6.4. Selección experimental de variables	83
Capítulo 7	87
7. Selección de variables de diagnóstico.....	87
7.1. Selección de variables por regresión lineal	87
Capítulo 8	99
8. Diagnóstico estadístico de fallos basada en un análisis de vibraciones bajo condiciones de velocidad y carga variable.....	99
8.1. Algoritmo de diagnóstico	99
8.2. Aplicación del algoritmo - desequilibrio.....	101
8.3. Aplicación del algoritmo – fallos en engranajes	105
Capítulo 9	111
9. Conclusiones y líneas futuras de investigación	111
9.1. Conclusiones.....	111
9.2. Líneas futuras de investigación	113
Bibliografía.....	115
Anexos	125
Anexo A	125
Anexo B	128

Índice de figuras

Figura 1. Evolución de los aerogeneradores [Escudero08]	10
Figura 2. Partes de un aerogenerador [Escudero08]	14
Figura 3. Sistema eólico con rotor a velocidad variable [Villarrubia04]... 21	
Figura 4. Sistema eólico con rotor a velocidad constante [Villarrubia04] 23	
Figura 5. Sistema de cambio de paso [Hau06].....	25
Figura 6. Efecto de las cargas aerodinámicas, gravitacionales e inerciales en el rotor de un aerogenerador de eje horizontal [Hau06]	29
Figura 7. Esquema del mantenimiento basado en la condición (MBC) [Jardine06].....	34
Figura 8. Distribución del porcentaje de fallo en los componentes principales [Hahn05].....	36
Figura 9. Comparación de los componentes de un aerogenerador de acuerdo a sus fallos anuales y a su tiempo de indisponibilidad [Hahn05, UpWindb].....	37
Figura 10. Interrelación entre los proyectos europeos de energía eólica analizados	42
Figura 11. Diferentes perfiles de velocidad medidos por 85 s en el rotor de un aerogenerador	59
Figura 12. Algoritmo de remuestreo angular implementado	61
Figura 13. (a) Espectro antes del remuestreo angular, (b) Espectro después del remuestreo angular.....	63

Figura 14. (a) Espectro antes del remuestreo angular, (b) Espectro después del remuestreo angular con 1 pulso por vuelta, (c) Espectro después del remuestreo angular con 24 pulsos por vuelta	64
Figura 15. Localización de pulsos no uniforme (a) Escala logarítmica, (b) Escala lineal	65
Figura 16. Comparación del algoritmo de remuestreo angular desarrollado en el presente trabajo y el algoritmo presentado en [Fyfe97]	66
Figura 17. Comparación del algoritmo de remuestreo para una portadora de orden 100 y 10 pulsos por vuelta	67
Figura 18. Bancada de pruebas de rodamientos.....	68
Figura 19. Velocidad por vuelta (a) Aceleración de 1 rpm/s, (b) Aceleración de 10 rpm/s	69
Figura 20. Espectro antes y después del remuestreo angular para una señal con aceleración de 1 rpm/s.....	70
Figura 21. Espectro antes y después del remuestreo angular para una señal con aceleración de 10 rpm/s.....	70
Figura 22. (a) Perfil de velocidad, (b) Espectro antes y después del remuestreo angular. Tiempo de medición 55 s, 24 pulsos por vuelta.....	72
Figura 23. (a) Perfil de velocidad, (b) Espectro antes y después del remuestreo angular. Tiempo de medición 180 s, 24 pulsos por vuelta...	73
Figura 24. Bancada de pruebas.....	76
Figura 25. Sensor laser y disco de medición.....	78
Figura 26. Perfiles de velocidad y carga	82
Figura 27. Análisis tiempo frecuencia de una rampa de velocidad del sensor axial paralela.....	84
Figura 28. Resumen del total de datos analizados.....	86
Figura 29. Box-plot para el orden 1X del sensor radial planetaria en función del desequilibrio simulado	88
Figura 30. Gráfica para el orden 709X del sensor axial paralela en función de la velocidad y el desalineamiento	89

Figura 31. Gráfica para el orden 10X del sensor axial paralela en función de la velocidad y el desalineamiento.....	90
Figura 32. Modelo lineal para el orden 2650X para el factor de desequilibrio	92
Figura 33. Resumen del modelado lineal para todas las variables por fallos	93
Figura 34. Resumen variables sensibles por fallos	94
Figura 35. Resumen del modelado lineal para todas las variables por sensor.....	95
Figura 36. Reducción de variables por sensor	96
Figura 37. Resumen variables sensibles por sensor.....	97
Figura 38. Método de diagnóstico	100
Figura 39. Gráfica para el orden 2X del sensor axial planetaria en función de la velocidad y el desequilibrio	101
Figura 40. Evolución del p-valor para el orden 2X bajo condiciones sin fallo y de desequilibrio de nivel D. Duración de la prueba: 48 h	103
Figura 41. Evolución del p-valor para el orden 2X bajo todos los casos de la condición de desequilibrio	104
Figura 42. Evolución del p-valor para el orden planetaria laterales 1X bajo todos los niveles de fallo de engranaje reductora planetaria.....	106
Figura 43. Evolución del p-valor para el orden 478X bajo todos los niveles de fallo de engranaje reductora paralela	107
Figura 44. Evolución del p-valor para el orden paralela central 2X bajo condiciones de fallo de engranaje en etapa paralela. Duración de la prueba: 1 mes.....	108
Figura 45. Variables monitorizadas.....	129

Índice de tablas

Tabla 1. Fallos y técnicas de mantenimiento en aerogeneradores.....	38
Tabla 2. Especificaciones de las reductoras	77
Tabla 3. Especificaciones de los acelerómetros.....	78
Tabla 4. Tipo de defectos de desequilibrio y desalineamiento	79
Tabla 5. Niveles de defectos de engranaje etapa planetaria.....	80
Tabla 6. Niveles de defectos de engranaje etapa paralela.....	81
Tabla 7. Variables monitorizadas.....	85
Tabla 8. Sensores y módulos de adquisición	126

Capítulo 1

1. Introducción y objetivos

El análisis de vibraciones ha sido estudiado e implementado en maquinaria rotativa durante muchos años y está aceptado como una de las principales técnicas para el mantenimiento basado en la condición [Hameed09]. Con el avance de la tecnología, se han desarrollado máquinas más complejas que operan bajo condiciones severas de trabajo, un ejemplo de estas condiciones son aquellas que trabajan bajo condiciones de velocidad y carga variables como es el caso de los aerogeneradores, las excavadoras o los helicópteros [Barszcz09; Blunt06; Combet09; Bartelmus09a, Baydar00, Wu05]. Este tipo de condiciones de trabajo limita en gran medida la aplicación de las técnicas clásicas de diagnóstico basado en el análisis de vibraciones y que se aplican principalmente a los reductores de engranajes.

Los primeros intentos de diagnóstico de fallos en este tipo de máquinas se pueden encontrar en [Bartelmus09b, Bartelmus10], pero tienen la limitación de que sólo trabajan con una variación pequeña de velocidad, basan su estudio solo en las variaciones de carga y el diagnóstico lo basan únicamente en una condición de funcionamiento.

En otros trabajos como [Baydar01, Cempel07, Zimroz11] utilizan técnicas como el PCA y el SVD, estas técnicas trabajan con variables ficticias creadas a partir de variables monitorizadas, estas variables no tienen una interpretación física directa, al contrario que las variables comúnmente usadas para monitorizar equipos (1X, 2X, etc...) que están relacionadas

con un fallo específico.

La investigación inicial en el área de la detección de fallos para maquinaria rotativa se centró en el análisis de vibraciones [Davies98]. Al principio, las características estadísticas de la señal en el dominio del tiempo fueron el principal foco de estudio. Sin embargo, el campo se amplió rápidamente para incluir técnicas como el análisis espectral, el análisis tiempo-frecuencia, el análisis wavelet, las redes neuronales y los modelos matemáticos. Esta área de investigación sigue en constante crecimiento, cada vez que una nueva técnica de procesamiento de señales surge, esta trata de ser aplicada al problema de la detección de fallos, pero debe tenerse presente que cada técnica debe ser acomodada a las necesidades y especificidades de cada sistema mecánico [Samuel05, Wang04].

Para sistemas que trabajan bajo condiciones de velocidad y carga variables uno de los métodos más apropiados para el procesamiento de señales es el remuestreo angular y la metodología del análisis de ordenes resultantes. Sin embargo, estos métodos son sólo el primer paso ya que es necesario analizar la información obtenida y determinar que las variables que están siendo analizadas son las que proporcionan la mejor información para implementar el diagnóstico de fallos. Para la selección de estas variables, en el presente trabajo se presenta un método estadístico basado en un modelo matemático que permite determinar la sensibilidad de cada variable con respecto al fallo y las condiciones de funcionamiento del sistema mecánico.

1.1. Marco de la línea de investigación

El trabajo de tesis aquí presentado se engloba dentro de la línea de investigación sobre mantenimiento predictivo y diagnóstico de aerogeneradores que se desarrolla en el área de Diagnóstico Industrial y

Mantenimiento Predictivo de la Fundación CARTIF. Esta área, tiene una amplia experiencia en el desarrollo de sistemas de diagnóstico en entorno industrial, en el caso de aerogeneradores ha trabajado en colaboración con Iberdrola Renovables [NIa].

En el marco de esta colaboración, se desarrolló un sistema de monitorización y diagnóstico que tenía en cuenta las condiciones de trabajo del aerogenerador (velocidad y carga variables). En paralelo a este trabajo y a la espera de poder contar con históricos de fallos reales se desarrolló el presente trabajo de tesis que perseguía sentar las bases del algoritmo de diagnóstico que debe implementarse en el sistema desarrollado por CARTIF. Para ello, se desarrolló una bancada a escala que contaba con los elementos mecánicos del aerogenerador y que permitiría tanto una verificación del sistema de diagnóstico como una simulación de fallos, imposibles de provocar en un aerogenerador de un parque eólico en funcionamiento.

1.2. Objetivos de la tesis

A continuación se presentan los principales objetivos:

- Establecer el efecto que provocan las variaciones de velocidad y carga en el análisis de vibraciones para lograr una detección fiable de los posibles fallos de carácter incipiente que puedan producirse.
- Desarrollar un algoritmo de remuestreo angular que permita compensar altas variaciones de velocidad y carga en el análisis de vibraciones. Estas variaciones se producen de forma habitual durante el funcionamiento de diferentes máquinas como por ejemplo los aerogeneradores, sometidas a cargas variables.

- Desarrollar una plataforma de test y un software de captura, procesado y análisis, para un sistema de diagnóstico aplicable a aerogeneradores. Dicha plataforma permitirá experimentar bajo condiciones similares de funcionamiento diferentes tipos de defectos.
- Desarrollar una metodología que permita la selección de variables y sensores que son más sensibles a las condiciones de funcionamiento del sistema y a los fallos que presenta.
- Desarrollar un algoritmo que permita realizar una diagnosis y posterior prognosis de los diferentes tipos de fallos, bajo un régimen de funcionamiento de velocidad y carga variable.

1.3. Organización de la tesis

En este capítulo introductorio se presentan las motivaciones que se encuentran en el origen de este trabajo de tesis, así como los objetivos concretos perseguidos durante la investigación llevada a cabo.

En el segundo capítulo se habla de los antecedentes históricos de la energía eólica, de su evolución, ventajas y desventajas. También se hace una breve explicación de que son, como están conformados y de las clases de aerogeneradores que hay según sus dos características principales que son la velocidad y la carga.

En el tercer capítulo se habla de la importancia de la monitorización incluyendo los tipos de mantenimiento, y en particular de la monitorización de la condición de aerogeneradores. También se presenta un estado del arte de los proyectos que se han realizado para optimizar el mantenimiento y mejorar la disponibilidad y rentabilidad de los parques eólicos.

El capítulo cuarto contiene un estado del arte de la investigación realizada en diagnóstico de fallos de máquinas que trabajan bajo condiciones de velocidad y carga variables, principalmente.

En el quinto capítulo se explica el método de remuestreo angular desarrollado para el análisis de vibraciones en condiciones de velocidad variable, este método es una mejora del propuesto en [Fyfe97], además, se presentan algunas pruebas que se le realizaron a este método.

En el capítulo sexto se realiza una explicación de la experimentación que se llevo a cabo para la realización de este trabajo de investigación, se describen los equipos y los procedimientos que se llevaron a cabo para la adquisición de los datos utilizados. Esta experimentación se ha planteado como un paso previo a la validación final del trabajo presentado en este trabajo de tesis en un aerogenerador.

En el séptimo capítulo se presenta una metodología mediante modelos estadísticos para la selección y futura monitorización de las variables y los sensores más sensibles a las condiciones del sistema estudiado y fallos simulados.

En el capítulo octavo se presenta un algoritmo destinado a realizar una diagnosis y posterior prognosis de los diferentes tipos de fallos, basado en la importancia estadística de los niveles de fallo y en las condiciones de funcionamiento del sistema.

Finalmente, en el capítulo noveno se presentan las conclusiones extraídas del presente trabajo de tesis y las líneas de trabajo futuras abiertas a partir de los resultados obtenidos.

1.4. Publicaciones

Durante la realización del presente trabajo de tesis se han desarrollado las siguientes publicaciones:

- *Diagnóstico de fallos Aplicaciones. ISBN: 978-84-614-6570-5.*

Este libro forma parte del Proyecto “Sistemas Embebidos de Bajo Coste para Diagnóstico de Fallos Orientado al Mantenimiento Predictivo” de la red SEDIPRE-CYTED y es el resultado de la colaboración de los grupos que conforman la red que están dedicados a realizar actividades de investigación, en esta ocasión sus esfuerzos están dirigidos al campo del análisis de fallos. Los contenidos aportados a este libro corresponden fundamentalmente a los capítulos 2 y 3 del presente trabajo de tesis [SEDIPRE10].

- *Angular resampling for vibration analysis in wind turbines under non-linear speed fluctuation. Mechanical Systems and Signal Processing. 25 (2011) 2157 – 2168.*

En éste artículo se presenta el desarrollo de un algoritmo de remuestreo angular para ser aplicado en condiciones de alta variabilidad en la velocidad como ocurre en los aerogeneradores. Se presentan ejemplos de su aplicación en señales simuladas, y en señales obtenidas de una bancada de pruebas y de aerogeneradores. Los resultados mejoran la precisión de algoritmos de remuestreo similares ofrecidos por la bibliografía consultada. Los contenidos corresponden fundamentalmente al capítulo 5 del presente trabajo de tesis [Villa11a].

- *Statistical vibration analysis for predictive maintenance of machines working under large variation of speed and load. Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society. Montreal, Quebec Canada*

September 25 – 29, 2011. ISBN: 978-1-936263-03-5.

En este artículo se presenta por medio de un ejemplo de desequilibrio y uno de desalineamiento, que las variables que se deben monitorizar no siempre coinciden con las variables recomendadas por la teoría de análisis de vibraciones. Los contenidos corresponden fundamentalmente a los capítulos 6 y 7 del presente trabajo de tesis [Villa11b].

- *Statistical fault diagnosis based on vibration analysis for gear test-bench under non-stationary conditions of speed and load.* En proceso de segunda revisión en *Mechanical Systems and Signal Processing*.

En éste artículo se presenta una metodología para la selección de variables y un algoritmo de diagnóstico basado en la importancia estadística de los niveles de fallo y en las condiciones de funcionamiento del sistema. Los contenidos corresponden fundamentalmente a los capítulos 6, 7 y 8 del presente trabajo de tesis.

Capítulo 2

2. Energía eólica: antecedentes históricos y tecnología asociada

Casi la totalidad de las energías renovables e incluso la energía de origen fósil provienen del sol. Aproximadamente un 1 ó 2 % de ésta energía es convertida en energía de viento, la energía eólica es la energía producida por el viento [Rodríguez03, Windpower]. Los esfuerzos humanos para hacer un uso útil de la energía del viento vienen desde tiempos ancestrales, su evolución ha pasado de máquinas rudimentarias usadas en los inicios, hasta la sofisticada tecnología de los aerogeneradores de hoy (Figura 1).

Los primeros usos que se le dieron a la energía del viento fueron para la navegación a vela, el regadío, moler el grano, aserrar madera, bombeo de agua, desecar las zonas ocupadas por el mar y más adelante para generar energía. La invención de los molinos de viento tiene un origen remoto y dudoso, se habla que sus orígenes se pudieron dar en Babilonia, Persia, Egipto, China y Oriente Próximo.

Entre los siglos VII y XII aparecieron en Europa los primeros molinos en Holanda, Francia e Inglaterra, eran molinos de eje horizontal, fabricados en madera con un número de aspas variante entre 4 y 8, sus vigas de madera se cubrían con tela o planchas de madera las cuales debían ser orientadas.



Figura 1. Evolución de los aerogeneradores [Escudero08]

En el siglo XVIII las turbinas empezaron a experimentar serias mejoras, se introdujeron los sistemas de potencia y de orientación, pero pronto se abandonó su desarrollo debido a la aparición de motores durante la revolución industrial. Más tarde, en el siglo XIX, y únicamente para su uso en zonas agrícolas, empezaron a surgir las hasta hoy utilizadas,

aerobombas, consideradas una de las aplicaciones más exitosas de la energía del viento. [Escudero08, Mathew06, Creus08]

El inicio de los molinos de viento para generar energía eléctrica se produjo a finales del siglo XIX en Dinamarca, a cargo del profesor Lacour en 1892 y se ha extendido por todo el mundo. Hasta que no se extendieron las redes eléctricas, los molinos de viento que generaban electricidad solo se usaban para abastecer comunidades rurales.

Entre la segunda mitad de los siglos XVIII y la segunda mitad del XIX, los molinos de viento europeos alcanzan su más alto nivel de perfeccionamiento. El desarrollo de los molinos de viento se interrumpe con la revolución industrial y la utilización masiva del vapor y los combustibles fósiles como fuentes de energía motriz por su económico costo.

Fue entre las guerras mundiales cuando aparecieron, como consecuencia de los progresos técnicos de las hélices de aviación, y con ellas los proyectos de grandes aerogeneradores de dos o tres palas, sin embargo, a este tipo de generadores no se les prestó interés hasta la primera crisis del petróleo.

Con la crisis del petróleo se vio la necesidad de reducir la dependencia de los recursos no renovables, esto estimuló el estudio de fuentes de energía alternativas como la energía eólica. Agencias gubernamentales como la NASA en Estados Unidos, se dedican al desarrollo de grandes turbinas de viento, las aplicaciones de las modernas tecnologías, y en especial de las desarrolladas para la aviación, ha dado como resultado la aparición de una nueva generación de máquinas eólicas muy perfeccionadas; también se crearon mapas eólicos que permitieron cuantificar el potencial eólico disponible y se procedió a la agrupación de

estos aerogeneradores en parques eólicos para suministrar la energía generada por ellos a una red eléctrica. [Beltrán00, Johnson01, Molenaar03]

En años recientes, la energía eólica ha aumentado en países como Alemania, Dinamarca, España, el Reino Unido y Holanda, gracias a los incentivos establecidos por la Unión Europea. [Creus08, Beltrán00].

La evolución de la potencia eólica instalada en España ha tenido un crecimiento vertiginoso, en el 2007 España ha liderado junto con EEUU y Alemania la instalación a nivel mundial (10433 MW para los tres países). Ello impulsó al gobierno español a aumentar la meta de potencia eólica que se quería tener instalada en el 2010, que de 13.000 MW ha pasado a 20155 MW. Esto coloca a España como el segundo país europeo con un objetivo tan alto. Desde finales de 1997 con 200 MW instalados, el mercado eólico español ha tenido un crecimiento anual del 30%. En el año 2007 se alcanzaron más de 15.000 MW instalados, cubriéndose el 9,5% de la demanda eléctrica con eólica. La eólica fue la cuarta tecnología del sistema por delante de la gran hidráulica suponiendo casi el 85% de la potencia instalada de energías renovables. [Aeeolica]

La energía eólica es una de las fuentes de energías renovables en la que se dispone de una amplia tecnología, gracias a ello, su explotación es competitiva con las fuentes de energía tradicionales. En resumen, las ventajas y desventajas de la energía eólica son las siguientes:

Ventajas

- Fuente de energía segura y renovable que ahorra el uso de combustibles fósiles y diversifica el suministro energético.
- La instalación es fácil de desmontar y recuperar rápidamente la zona natural utilizada.

- El tiempo de construcción es rápido.
- Beneficio económico para los municipios afectados.
- Instalaciones compatibles con otros usos del suelo.
- Limita la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, no genera residuos líquidos o sólidos.
- No utiliza agua.

Desventajas

- Incapacidad de asegurar un suministro de energía regular o permanente debido a la gran variabilidad y fluctuación tanto en la velocidad como en la dirección del viento.
- Impacto visual ya que cambia el paisaje.
- Impacto sobre la fauna y la flora (migración y nidificación).
- Impacto sonoro por generación de un ruido de baja frecuencia de bajo nivel sonoro, pero constante.
- Puede producir interferencia electromagnética.

Su impacto medio ambiental se produce a escala local, lo que hace que la energía eólica reciba un alto nivel de aceptación social. [Creus08, Villarrubia04]

2.1. Aerogeneradores

2.1.1. ¿Qué es un aerogenerador?

Un generador eólico es una máquina capaz de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica, según el uso que se le dará a esa energía mecánica, se pueden dividir en dos tipos: los aerogeneradores que utilizan esa energía mecánica para el accionamiento de un generador eléctrico y así generar electricidad, o los aeromotores que utilizan directamente esa energía mecánica para el

accionamiento de una máquina. La generación de energía eléctrica es el uso de la energía eólica más importante hoy en día.

En un aerogenerador se producen varios cambios de energía: la energía cinética del viento que se convierte a energía mecánica por medio del rotor, y la energía mecánica que se convierte en energía eléctrica por medio del generador [Escudero08, Rodríguez03, Villarrubia04].

Los principales subsistemas en los que está dividido un aerogenerador son los siguientes (ver Figura 2):

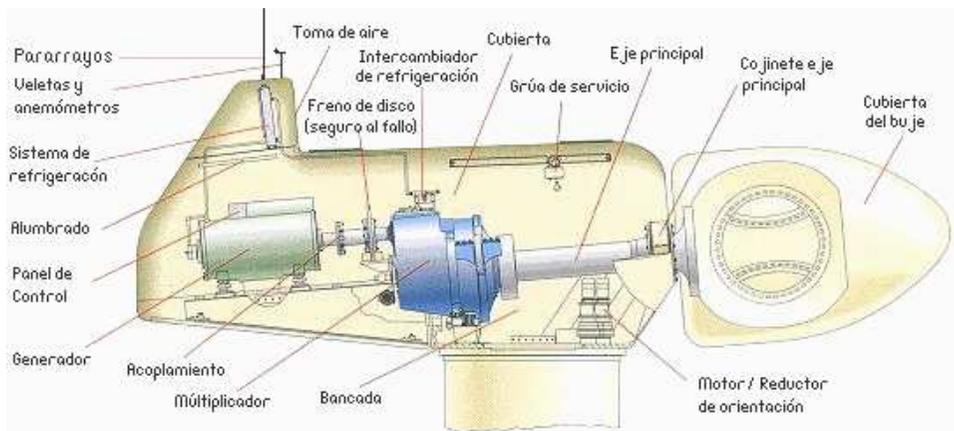


Figura 2. Partes de un aerogenerador [Escudero08]

2.1.2. Subsistemas

Tren de potencia

Su función es convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica.

Rotor

Su función es convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación, son el conjunto de componentes del

aerogenerador que giran fuera de la góndola. Está compuesto por las palas, el buje y la nariz.

Palas: son el elemento del aerogenerador que por aprovechamiento aerodinámico capturan la energía del viento y transmiten su potencia hacia el buje al que están conectadas

Buje: es el elemento de unión entre las palas y el sistema de rotación, ya que este está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador

Cono o nariz: es la cubierta metálica con forma cónica que se encara al viento, y lo desvía hacia el tren motor. Debe tener la forma aerodinámica adecuada para impedir la formación de turbulencias.

Eje de baja velocidad

Es el encargado de conectar el buje del rotor con la multiplicadora y transmitir la energía captada por las palas.

Multiplicadora

Debido a que la velocidad a la que gira el rotor es mucho menor a la que necesita el generador para producir electricidad, se necesita de una multiplicadora, para aumentar la velocidad a la que gira el rotor y así lograr el accionamiento del generador.

La multiplicadora conecta el eje de baja velocidad del rotor con el eje de alta velocidad del generador. Con ella se consigue la conversión entre potencia de alto par torsor, que se obtiene del rotor girando lentamente, y la potencia de bajo par torsor, a alta velocidad, que se utiliza en el generador, se caracteriza por su relación de transformación, definida como la relación entre la velocidad de giro del eje de entrada (lado del rotor) y la del eje de salida (lado del generador eléctrico).

Eje de alta velocidad

Es el encargado del accionamiento del generador eléctrico.

Generador eléctrico

Su función es convertir la energía mecánica de rotación que le entrega la multiplicadora, en energía eléctrica. El generador eléctrico de un aerogenerador, tiene que trabajar bajo niveles de cargas fluctuantes, debido a las variaciones en la velocidad del viento.

Góndola

La góndola encierra en su interior la multiplicadora, el generador eléctrico y los sistemas auxiliares del aerogenerador, dispone de una cubierta de protección y de insonorización de los componentes de la máquina, también, incorpora las aberturas necesarias para lograr una ventilación efectiva del multiplicador y del generador.

2.1.3. Sistemas auxiliares del aerogenerador

Sistema de regulación y control

Este sistema tiene como función, mantener la velocidad de rotación constante y regular, y limitar la potencia eólica aprovechada o recuperada por el rotor.

Cuando la velocidad del viento es menor a la de conexión o mayor a la de desconexión, el sistema de control frena el aerogenerador como medio para prevenir daños.

Para lograr esto, el aerogenerador cuenta con dos tipos de frenos, el freno aerodinámico y el freno mecánico. El primero, frena el aerogenerador por medio del giro del ángulo de las palas, gracias a esto el aerogenerador se detiene de forma suave y segura en unas pocas vueltas, cuando se aplica este freno, el aerogenerador queda en estado de libre giro pero no detenido completamente. El freno mecánico es un freno de disco situado en el eje de alta velocidad del multiplicador, éste, frena completamente el aerogenerador, se usa en caso de emergencia

(fallo del freno aerodinámico) o durante las tareas de mantenimiento, para inmovilización por seguridad.

Sistema de orientación

Este sistema tiene como función orientar el rotor de forma que quede colocado de forma perpendicular a la dirección del viento y así presente siempre la mayor superficie de captación.

2.1.4. Otros sistemas y equipos

Anemómetro

Se utiliza para medir la velocidad del viento

Veleta

Se utiliza para medir la dirección del viento

Sistema hidráulico

Proporciona la potencia hidráulica para los accionamientos del aerogenerador (Palas,...).

Torre

Es la encargada de soportar la góndola y el rotor. Entre más alta sea la torre mayor cantidad de energía podrá obtenerse, ya que la velocidad del viento aumenta con la altura respecto al nivel del suelo.

Cimentación

Plataforma de alta resistencia sobre la cual se dispone el conjunto del aerogenerador [Windpower, Rodríguez03, Villarrubia04, Creus08, Escudero08, Mathew06, Gao06].

2.2. Proceso de generación de la energía

El tren de potencia (rotor, multiplicadora y generador eléctrico) se deja girar libremente (en vacío, sin carga) desconectado de la red hasta que alcanza una velocidad por encima de la de sincronismo.

Cuando esta velocidad se adquiere, se procede a la conexión del generador eléctrico a la red, en este momento, el generador eléctrico comienza a suministrar potencia eléctrica útil.

A medida que aumenta la velocidad del viento, crece la potencia eléctrica. Cuando se llega a la velocidad nominal de viento, entonces el generador alcanza su potencia nominal. A través de los sistemas de regulación y control, se limita la velocidad de giro del rotor a fin de que la potencia eléctrica del generador no sobrepase valores superiores a un 110% de la potencia nominal durante periodos no superiores a unos 10 minutos a fin de evitar sobrecalentamientos del generador que producirían una disminución de su vida útil [Villarrubia04].

Las características principales que diferencian un aerogenerador de una máquina rotativa convencional son sus condiciones de funcionamiento bajo parámetros de velocidad y carga variable. A continuación se explican estas dos características principales.

2.3. Velocidad variable

Hoy en día se espera que las turbinas diseñadas para generación de energía trabajen con un elevado grado de uniformidad en su velocidad de giro y en el par que transmiten para que estas puedan estar conectadas directamente a la red. En el caso de las turbinas eólicas, para que esto se llegara a cumplir, los elementos del tren de potencia, deberían girar a la misma velocidad. En la mayoría de los diseños, la velocidad de giro de

la turbina no corresponde con la velocidad de giro del generador y es necesario incluir una caja multiplicadora.

El excluir la caja multiplicadora del diseño del tren de potencia es una ventaja importante ya que este elemento está sometido a esfuerzos cíclicos que provocan fatiga de sus componentes y reducen su vida útil. Hoy día el empleo de generadores multipolares directamente acoplados, esto es sin caja multiplicadora, es una solución muy prometedora en los diseños de turbinas más modernas. El empleo de éste tipo de generadores multipolares ha sido posible gracias a que este tipo de sistemas funcionan con un tipo de convertidor de frecuencia que permite reducir el número de polos del generador y por lo tanto el diámetro del generador y su peso [Rodríguez03].

Una manera de disminuir las cargas generadas por los esfuerzos de empuje transmitidos por el rotor dada la variabilidad de la velocidad del viento a lo largo del tiempo, es variando la velocidad de giro de la turbina. Cuando la velocidad de giro permanece constante las variaciones de la velocidad del viento se traducen en oscilaciones bruscas del par transmitido, sin embargo cuando la velocidad de la turbina varía, el rotor eólico actúa como un volante de inercia capaz de almacenar parte de la energía mecánica transitoria introducida en el sistema de energía cinética de rotación. Esto hace que se suavice tanto el par transmitido como la potencia eléctrica generada [Rodríguez03, Villarrubia04].

La frecuencia de la red impone la velocidad de giro del generador y a través de la caja multiplicadora, la velocidad de giro del rotor. Por esta razón, el rotor de la eólica debe girar a velocidad sensiblemente constante. Con relación a su velocidad de rotación, se pueden concebir dos formas de funcionamiento para el rotor de un aerogenerador, a

velocidad fija y a velocidad variable, a continuación se explica cada una de ellas [Villarrubia04, Blaabjerg06].

2.3.1. Aerogeneradores de velocidad de giro variable y coeficiente de potencia constante

Se caracteriza porque la velocidad de giro del rotor varia con la velocidad del viento, de forma que el rotor gira más cuando aumenta la velocidad del viento y más lento en caso contrario. Dado que el rotor girará a velocidad variable, la frecuencia de la onda eléctrica también será variable y en consecuencia no podremos inyectarla directamente a la red.

Para poder realizar esta inyección, la interconexión a red se lleva a cabo a través de un sistema rectificador-inversor. El rectificador convierte la señal de corriente alterna de frecuencia variable en una señal de corriente continua y posteriormente el inversor u ondulator vuelve a convertir la tensión continua en alterna pero a frecuencia constante e igual a la de la red (ver Figura 3) [Villarrubia04].

La relación de multiplicación de la caja, en el caso de que exista, permanece constante [Rodríguez03].

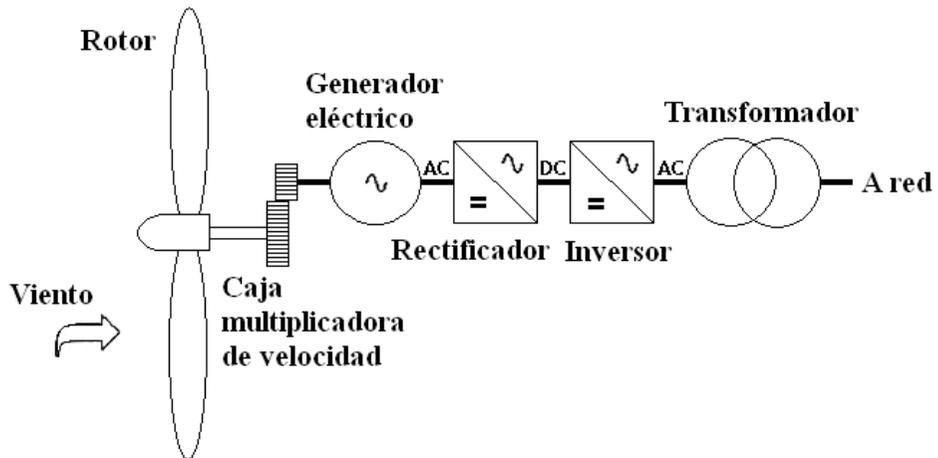


Figura 3. Sistema eólico con rotor a velocidad variable [Villarrubia04]

2.3.2. Aerogeneradores de velocidad de giro fija y coeficiente de potencia variable

Se caracterizan porque la velocidad de giro del rotor se mantiene prácticamente constante e independiente de la velocidad del viento, la velocidad de giro de su generador eléctrico que está directamente conectado a la red es constante, dado que la frecuencia de la red es constante, esto se logra con ayuda del sistema de regulación y control. El sistema de regulación y control tiene como funciones mantener la velocidad de rotación constante y regular, y limitar la potencia eólica aprovechada o recuperada por el rotor. Cuando la velocidad del viento alcanza valores muy elevados que puedan poner en riesgo la integridad de la máquina, este sistema debe ser capaz de detener el rotor y sacarlo fuera de la acción del viento para evitar daños sobre el mismo (ver Figura 4) [Rodríguez03, Villarrubia04].

Al mantener el rotor una velocidad de rotación constante, la velocidad de salida de la caja multiplicadora también lo es y el alternador eléctrico siempre gira a velocidad constante (síncrono) o cuasi-constante

(asíncrono), y de esta forma se garantiza la estabilidad de la frecuencia de la corriente que se inyecta a la red [Villarrubia04].

Los generadores síncronos giran a la velocidad de sincronismo, y los asíncronos giran a esta velocidad cuando están trabajando en vacío y giran aproximadamente a un 1% por encima de esta velocidad cuando están a plena carga. Este estrecho margen de variación de la velocidad no puede considerarse como operación a velocidad variable, ya que para ello se requiere un margen mayor de variación de la velocidad [Rodríguez03].

La ventaja de los sistemas de velocidad variable en cuanto a mayor captura energética a bajas velocidades del viento es compensada por los fabricantes de sistemas de velocidad fija incorporando un generador de dos velocidades. En la mayoría de los casos este generador está constituido por un generador de inducción con dos devanados estáticos: uno de mayor número de polos (menor velocidad) y menor potencia, para aprovechar los vientos bajos, y el otro de menor número de polos (mayor velocidad) y mayor potencia, para aprovechar los vientos altos. En otros casos se utilizan dos generadores distintos. No obstante la forma de operación es exactamente la misma [Rodríguez03, Villarrubia04].

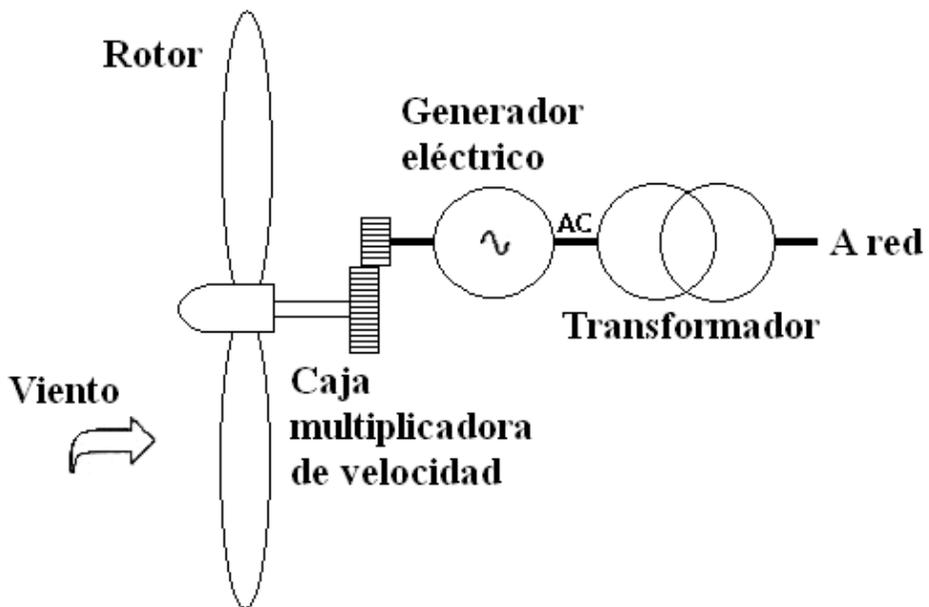


Figura 4. Sistema eólico con rotor a velocidad constante [Villarrubia04]

2.3.3. Comparación entre sistemas de velocidad constante y de velocidad variable

Velocidad constante

- Alta fiabilidad y sencillez
- Baja probabilidad de resonancia estructural
- Sistemas electrónicos simples
- Distorsión armónica mínima
- Menor rendimiento de producción de energía
- Menor coste

Velocidad variable

- Mayor cantidad de energía eléctrica generada y mejor rendimiento
- No hay puntas de par transitorio
- No hay sincronización

- Caja multiplicadora más sencilla y en ciertos casos eliminación de la misma
- Mayor distorsión por armónicos (peor calidad de la onda eléctrica)
- Mayor coste de inversión [Villarrubia04].

Todos los aerogeneradores están diseñados con algún tipo de control de potencia, los dos métodos más utilizados son:

2.3.4. Aerogeneradores de regulación por cambio del ángulo de paso ("pitch controlled")

En un aerogenerador de regulación por cambio del ángulo de paso, el controlador electrónico de la turbina comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento. Y a la inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo.

El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele funcionar de forma hidráulica (ver Figura 5).

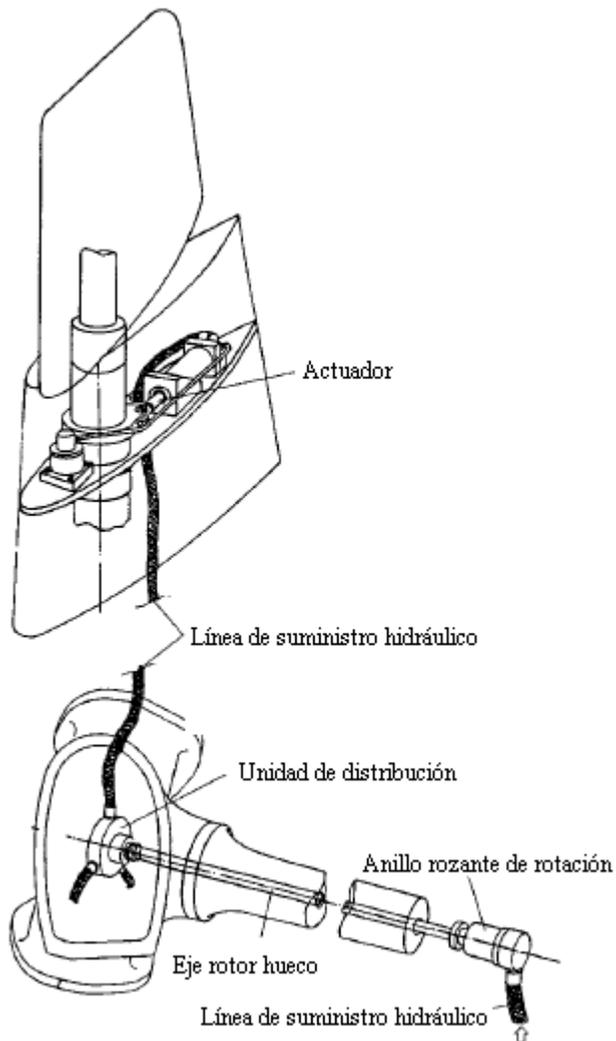


Figura 5. Sistema de cambio de paso [Hau06]

2.3.5. Aerogeneradores de regulación por pérdida aerodinámica ("stall controlled")

Los aerogeneradores de regulación (pasiva) por pérdida aerodinámica tienen las palas del rotor unidas al buje en un ángulo fijo.

Sin embargo, el perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea

demasiado alta, se creará turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza ascensional de la pala actúe sobre el rotor.

La principal ventaja de la regulación por pérdida aerodinámica es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. Por otro lado, la regulación por pérdida aerodinámica representa un problema de diseño aerodinámico muy complejo, y comporta retos en el diseño de la dinámica estructural de toda la turbina, para evitar las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación [Windpower].

En la actualidad los aerogeneradores más utilizados son los de velocidad y paso variable, la tecnología de paso variable permite para cada velocidad de viento adaptar el ángulo de las palas, de modo que se extraiga de forma controlada el óptimo de energía de la corriente de viento. Así, en régimen subnominal, se adapta el paso para extraer el máximo posible de energía, y en régimen de viento superior al nominal, se adapta el ángulo de paso para captar una cantidad controlada de energía, de modo que la máquina produce la potencia nominal de forma controlada y estable hasta la velocidad de corte, es decir, hasta la velocidad del viento por encima de la cual el rotor deja de suministrar potencia al eje motor.

La tecnología de paso variable, además de maximizar la energía obtenida del viento, minimiza las cargas sobre la máquina y permite el empleo de la pala completa como freno aerodinámico.

Los generadores que funcionan con velocidad de giro variable, producen de manera estable a la frecuencia de la red. Por ello son generadores que frente a la red se comportan como síncronos, pero que permiten la generación a velocidades variables de giro del generador, de modo que

en cada régimen de viento la velocidad de giro del equipo sea la óptima para maximizar la extracción de energía del viento.

Con velocidades de giro del generador variable, el sistema de control de potencia es capaz de producir energía eléctrica a la frecuencia de la red (50 ó 60 Hz.). Sólo así resulta posible regular la velocidad de giro y obtener para los distintos regímenes de viento la máxima extracción de potencia, funcionando en condiciones aerodinámicas óptimas y controlando el par soportado por los distintos elementos del equipo [Gamesa].

2.4. Carga variable

Los aerogeneradores están sometidos a cargas y esfuerzos específicos. Debido a la naturaleza del viento, las cargas son altamente variables. Las cargas variables son más difíciles de manejar que las cargas estáticas porque el material sufre fatiga [Hau06].

El diseño de un aerogenerador pasa por conocer el régimen de cargas o esfuerzos al que estarán sometidos todos sus elementos mecánicos (rotor eólico, tren de potencia y torre) tanto en régimen estacionario como en régimen dinámico. En definitiva, el conocimiento de las cargas permitirá determinar las dimensiones y el material de los componentes del aerogenerador de tal forma que las tensiones y deformaciones sobre ellos no superen los límites establecidos [Rodríguez03].

Las grandes estructuras diseñadas son inevitablemente elásticas y la evolución de cargas hace que en el caso de las turbinas eólicas se produzca una compleja interacción entre las fuerzas aerodinámicas y los desplazamientos que aparecen en la estructura de las palas, lo que induce vibraciones y resonancias, y puede producir altas cargas

dinámicas en componentes, así como problemas de inestabilidad [Rodríguez03, Hau06].

El régimen de cargas indicado anteriormente, está provocado por fuerzas cuyo origen puede ser (ver Figura 6):

- **Aerodinámico:** las fuerzas aerodinámicas se deben a la interacción de la velocidad del viento con el rotor eólico. Este fenómeno físico es no estacionario, fundamentalmente debido a la turbulencia atmosférica y además es no lineal ya que las fuerzas de sustentación y arrastre que se producen sobre los perfiles de las palas de un aerogenerador siguen una ley no lineal con el ángulo de ataque de la velocidad del viento. Por otra parte, el carácter aleatorio del recurso eólico introduce una complicación adicional para determinar las cargas de origen aerodinámico.
- **Inercial:** las fuerzas de origen inercial están producidas por el movimiento de la estructura, o el efecto de la gravedad. Así por ejemplo, en las palas de un aerogenerador se producen fuerzas centrífugas debidas al régimen de giro del rotor eólico y fuerzas estáticas causadas por su peso.
- **Estructural:** se entiende por fuerzas de tipo estructural aquellas que se generan por las reacciones de ligadura que producen los diferentes tipos de apoyos. Por ejemplo, son diferentes las fuerzas estructurales que aparecen en un buje rígido o en uno basculante.

Por otra parte, las fuerzas que aparecen en un aerogenerador se pueden clasificar según su duración en: estacionarias, transitorias, cíclicas y turbulentas [Rodríguez03].

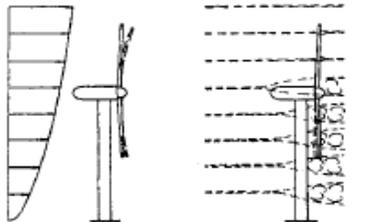
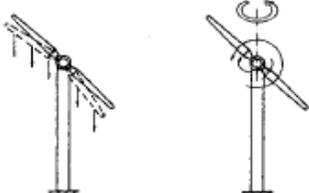
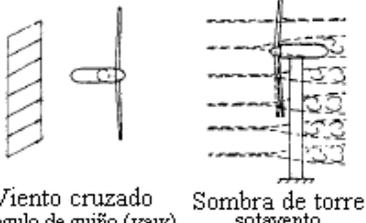
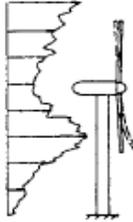
		Fuerzas aerodinámicas	Fuerzas inerciales y gravitatorias
Cargas estables		 <p>Velocidad media de viento estable</p>	 <p>Fuerzas centrífugas</p>
	Cargas cíclicas	 <p>Viento cortante vertical Sombra de torre barlovento</p>	 <p>Fuerzas de gravedad Fuerzas giroscópicas</p>
		 <p>Viento cruzado Sombra de torre sotavento</p> <p>Angulo de guiño (yaw)</p>	
Cargas no cíclicas	 <p>Viento turbulento</p>		

Figura 6. Efecto de las cargas aerodinámicas, gravitacionales e inerciales en el rotor de un aerogenerador de eje horizontal [Hau06]

El diseño estructural de un aerogenerador debe considerar tres diferentes aspectos:

- Los componentes deben ser diseñados para las cargas extremas que se pueden llegar a presentar. Esto significa que el aerogenerador y sus componentes principales deben ser capaces de soportar las velocidades de viento más altas que puedan llegar a producirse.
- La fatiga de los componentes debe ser garantizada para la vida útil de estos, es decir entre 20 y 30 años. El cálculo de esfuerzos para cargas extremas es relativamente fácil, el problema de la fatiga es lo que lo hace más complicado en los aerogeneradores.
- Para tener un comportamiento adecuado en cuanto a vibraciones se refiere, es necesario que la rigidez de los componentes esté cuidadosamente combinada, así como que el dimensionamiento de algunos componentes sea adecuado

Las cargas sobre las palas del rotor se transmiten a los otros componentes y en gran medida determinan la carga de estos. En comparación con estas cargas, las cargas procedentes directamente de los componentes son menos importantes. El análisis sobre las cargas que actúan en un aerogenerador puede concentrarse en el rotor y tratar con ellas como si representaran las de las demás partes [Hau06, Caselitz05].

Capítulo 3

3. Mantenimiento en energía eólica

3.1. Importancia de la monitorización

El objetivo primordial de la implementación del mantenimiento en la industria es aumentar la disponibilidad de los equipos que intervienen en la cadena productiva y con ello aumentar la productividad, reduciendo el número de averías imprevistas y por medio de la detección temprana de fallos aumentar la vida útil de los equipos. A través de la historia, el mantenimiento ha ido ganando más atención por parte de los directivos en las empresas, los cuales lo ven ahora como una posibilidad de inversión con fines de rebajar costos, además, las empresas aseguradoras, cada vez exigen más inversión en sistemas de monitorización como prerrequisito para asegurar equipos de alto coste.

La primera técnica de mantenimiento que se utilizó, fue la del mantenimiento correctivo, la cual solo se limitaba a reparar o sustituir los componentes que presentaban averías. Una técnica de mantenimiento que se usó posteriormente fue la del mantenimiento preventivo, en la cual se establece un intervalo periódico de tiempo para realizar tareas preventivas sin importar el estado de degradación de los componentes, esto con el fin de evitar fallos no programados. Más adelante se empezó a utilizar el mantenimiento predictivo, el cual por medio de sistemas de detección de fallos evalúa los datos que se adquieren midiendo los procesos del sistema con el fin de aislar fallos incipientes en estados de degradación prematuros y así evitar la propagación de fallos y el cambio

de elementos con porcentajes todavía altos de vida útil [Jardine06, Caselitz94, Caselitz02, Heng09].

Dentro del mantenimiento predictivo, se encuentra el mantenimiento basado en la condición (MBC) que es un programa de mantenimiento que recomienda acciones de mantenimiento basadas en la información recolectada a través de la monitorización de la condición. MBC intenta evitar tareas de mantenimiento innecesarias mediante acciones de mantenimiento solo donde hay evidencia de comportamientos anormales de un elemento.

El MBC se compone de tres pasos principales: adquisición de datos, procesamiento de datos y toma de decisiones de mantenimiento. La diagnosis y la prognosis son dos aspectos importantes de un programa de MBC (ver Figura 7).

1. Adquisición de datos (recogida de información) para obtener datos relevantes sobre la salud del sistema. Puede clasificarse en dos tipos principales:
 - Datos sobre eventos: incluyen la información de lo que ha pasado (instalación, fallos, revisiones, etc. y las causas por las cuales ocurrieron), también incluye la información de que se hizo (reparaciones menores, mantenimiento preventivo, cambio de aceite, etc.) de los elementos que componen el sistema.
 - Datos de monitorización: son las mediciones relacionadas con el estado de la condición de los elementos del sistema. Estos pueden ser datos de vibración, acústicos, de análisis de aceites, temperatura, presión, humedad, estado del tiempo o datos del entorno, etc.

2. Procesamiento de datos (manejo de la información): para manejar, analizar, comprender e interpretar mejor los datos o señales recogidos en el paso 1.
 - El primer paso del procesamiento de datos es la limpieza de los datos.
 - El segundo paso es el análisis de los datos. Una variedad de modelos, algoritmos y herramientas están disponibles en la literatura para el análisis de datos, para un mejor entendimiento e interpretación de estos. Los modelos, algoritmos y herramientas usados para el análisis de datos dependen principalmente del tipo de datos recogidos.
3. Toma de decisiones de mantenimiento (toma de decisiones): recomienda políticas de mantenimiento eficientes. Las técnicas para soporte de decisiones en mantenimiento en un programa de monitorización de la condición pueden dividirse en dos principales categorías:
 - Diagnóstico: el diagnóstico de fallos se centra en la detección, aislamiento e identificación de los fallos cuando estos se producen. La detección de fallos es una tarea que indica cuando algo va mal en el sistema monitorizado, el aislamiento de fallos es una tarea que localiza el componente que está fallando e identificación del fallo es una tarea que identifica la naturaleza del fallo cuando este es detectado.
 - Prognosis: intenta predecir la evolución de los fallos o errores. La predicción de fallos es una tarea que determina si un fallo es inminente y estima cuando y con qué probabilidad se puede producir [Jardine06, Heng09, Vachtsevanos06].

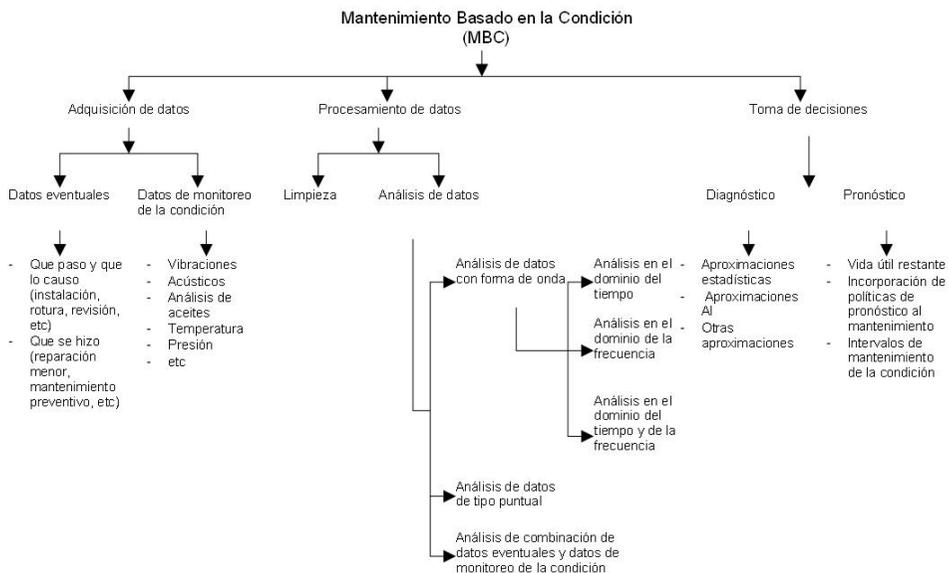


Figura 7. Esquema del mantenimiento basado en la condición (MBC) [Jardine06]

3.2. Monitorización de la condición en aerogeneradores

Los modernos aerogeneradores están diseñados para un tiempo de vida útil de 20 años. Los costos de mantenimiento son bajos al principio de su funcionamiento, pero se van incrementando con el tiempo, al igual que con el incremento de la producción de energía que incrementa el desgaste de los elementos que conforman la turbina. Algunos componentes son más propensos a desgaste que otros, es el caso de las palas del rotor y la multiplicadora, sustituyendo estos componentes, se puede ampliar el tiempo de vida útil de una turbina por un valor menor que el reemplazo de ella en su totalidad, por ejemplo el precio de un nuevo conjunto de palas, de una multiplicadora o de un generador es usualmente del 15 al 20% del precio total de un aerogenerador [Creus08, Windpower, Barszcz09].

Durante la etapa de diseño de un aerogenerador, se tienen en cuenta las operaciones de mantenimiento, el fabricante incluye en el manual de este, el plan de mantenimiento preventivo que debe aplicarse a la máquina, las operaciones de mantenimiento preventivo se realizan una o dos veces al año.

En las tareas a realizar se incluyen inspecciones periódicas del equipo, cambios de aceite y de filtros, calibración y ajuste de los sensores y actuadores, la sustitución de los consumibles (pastillas de freno y juntas) y la limpieza de las palas y de la góndola. El coste de una avería no prevista puede ser muy elevado, por ejemplo, la sustitución de una multiplicadora de una turbina de 1.5 MW es aproximadamente 120.000 €, si se dispone de grúas para el trabajo en el emplazamiento del aerogenerador [Creus08].

Gracias a las nuevas tecnologías, se han llegado a obtener valores de disponibilidad del 95% al 99%, esto significa que en promedio, un aerogenerador solo estará inactivo por reparaciones o mantenimiento una semana al año. Sin embargo, se producen un buen número de fallos no programados de hasta 10 veces por año, resultando en elevados esfuerzos de mantenimientos, pérdidas de producción y elevados costes.

Las averías más frecuentes ocurren en los sensores, el sistema de control y el cableado, los componentes del sistema eléctrico y el sistema de control fallan en promedio cada dos o dos años y medio mientras que un fallo en el tren de potencia en comparación solo ocurre en promedio cada 19 años. Los porcentajes que se presentan en la Figura 8, se basan en el número de fallos imprevistos que se dan en los componentes principales del aerogenerador [Creus08, Hahn05, UpWinda].

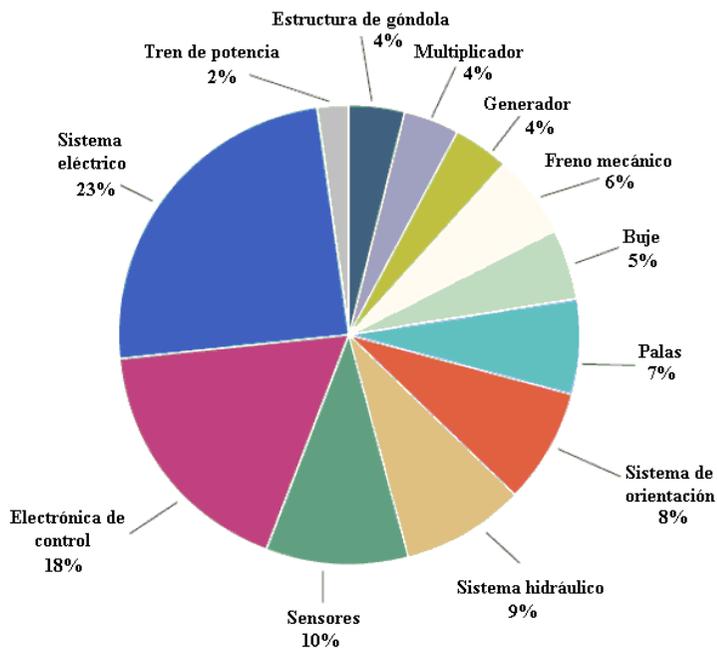


Figura 8. Distribución del porcentaje de fallo en los componentes principales [Hahn05]

No solo son importantes las frecuencias de fallo de los componentes, también se deben considerar los periodos de inactividad del aerogenerador que producen estos fallos y el costo asociado a su reparación y a su indisponibilidad (ver Figura 9) [Hahn05, UpWindb].

Fallos en el multiplicador, en el generador, en el tren de potencia o en las palas son una fuente de gastos considerables debido a que requieren un mantenimiento correctivo no planificado, que puede dejar la instalación parada durante bastante tiempo [Creus08, Hahn05].

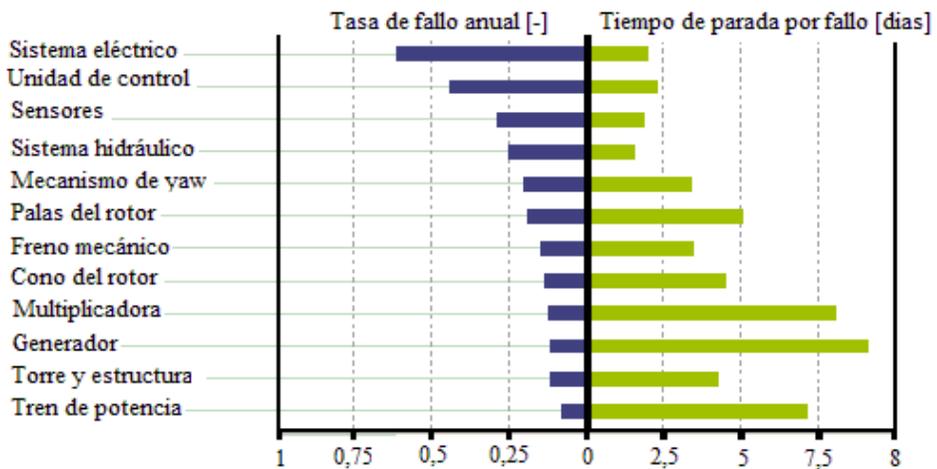


Figura 9. Comparación de los componentes de un aerogenerador de acuerdo a sus fallos anuales y a su tiempo de indisponibilidad [Hahn05, UpWindb]

Para reducir los costes y tiempos de mantenimiento, se ha empezado a implementar en los aerogeneradores el mantenimiento predictivo, este mantenimiento, se basa en el seguimiento del estado y condición de la maquinaria a lo largo de la vida de los equipos [Creus08].

Cuando se aplican técnicas de monitorización en los aerogeneradores, no se debe limitar esto a solo adaptar técnicas existentes, además, se debe tener especial atención, en que un fallo en los sistemas de monitorización (sensores utilizados para ello) nunca debe resultar en una parada para el aerogenerador [Verbruggen03].

En la Tabla 1 se presentan los fallos más comunes que se presentan en los aerogeneradores, y las técnicas de monitorización que se utilizan para detectar estos fallos.

Tabla 1. Fallos y técnicas de mantenimiento en aerogeneradores

	Componente del aerogenerador	Fallo	Técnica de monitorización empleada
Rotor	Palas	Aspereza en las superficies de las palas (suciedad, roturas, hielo)	Análisis de las características de potencia de la turbina y oscilaciones de las palas.
	Rotor	Desequilibrio Asimetrías aerodinámicas	
Tren de potencia	Ejes	Fallos de rodamientos Fisuras	Análisis de vibraciones
	Multiplicadora	Fallos de rodamientos Fallos de engranajes	Análisis de vibraciones Termografía Análisis de aceite
	Rodamiento principal	Fallos de rodamientos	Análisis de vibraciones
Generador	Generador	Fallos de rodamientos Asimetrías eléctricas Sobrecalentamiento	Análisis de vibraciones Termografía Análisis de corrientes

[UpWindc, Verbruggen03, Giao06, Hameed09]

Las técnicas de monitoreo más utilizadas para el monitoreo de aerogeneradores son el análisis de vibraciones, el análisis de aceites, la termografía y la monitorización acústica, entre otros.

La variable más vigilada son las vibraciones. Diferentes tipos de sensores pueden ser utilizados, los acelerómetros son los más comúnmente utilizados, aunque también se pueden utilizar sensores de desplazamiento en los elementos del aerogenerador que giran a baja velocidad. El análisis de vibraciones es la técnica que mayor información aporta sobre el estado de la multiplicadora y el generador, en primer

lugar se deben identificar las frecuencias de funcionamiento de ambos, a la hora de calcular las frecuencias de fallo de los componentes debemos tener en cuenta la velocidad de giro real en cada momento de medida de vibraciones para realizar un análisis correcto [Creus08, Verbruggen03, Giao06, Caselitz96].

Se registran dos tipos de datos de frecuencia, un campo de bajas frecuencias en el que analiza el comportamiento de la estructura del aerogenerador y los elementos giratorios de baja velocidad, y un campo de altas frecuencias que comprende el análisis de los elementos giratorios de alta velocidad [Creus08].

Entre los parámetros que influyen en el deterioro o desgaste de los componentes mecánicos de un aerogenerador están los siguientes:

- El primero que debe examinarse es el tamaño de la turbina. La tasa de fallos aumenta cuando el tamaño de la turbina aumenta, los tiempos de parada decrecen para turbinas de gran tamaño.
- Otro parámetro que influye es el concepto técnico en uso. La influencia de los mecanismos de control (sistema de regulación y control, y sistema de orientación) son un ejemplo para una diferenciación, así como lo son la velocidad variable frente a la velocidad constante, o un generador síncrono frente a uno de inducción. Por ejemplo, el sistema de regulación y control se usa para incrementar la eficiencia y para reducir el estrés en los componentes mecánicos del tren de potencia. Sin embargo, el introducir este sistema equivale a añadir oportunidades de posibles fallos.
- Las condiciones de operación son otro parámetro que influyen. La influencia de la velocidad del viento es un ejemplo de ello.
- La dependencia del tiempo también es un factor importante. La curva de la bañera que divide la vida útil de un sistema técnico en tres partes, se ve afectada por la influencia de la madurez del modelo de

la turbina. Las turbinas que se producen en años posteriores, son capaces de beneficiarse de la experiencia adquirida de previos años de producción [UpWindb].

Según [Flender] existen varios niveles de monitorización de la condición en turbinas eólicas. El nivel 1 se basa en la monitorización de niveles de alarma de parámetros de vibración, el nivel 2 en la monitorización de valores de alarma de parámetros de diagnóstico y en el nivel 3 en el diagnóstico de la condición de cambios que se apoyan en la amplitud del espectro, la envolvente del espectro, cepstrum, análisis de tiempo y procesos especiales.

Lo que la experiencia sugiere y las demandas de las compañías aseguradoras muestran, es que el nivel 3 es el único apropiado para la monitorización de la condición de aerogeneradores de velocidad variable.

Para llevar a cabo una monitorización de la condición de nivel 3 en un aerogenerador de velocidad variable existen varias opciones:

- Fijar la velocidad temporalmente mientras las mediciones de diagnóstico se están realizando.
- Realizar mediciones únicamente cuando las variaciones de la velocidad son pequeñas.
- Los tiempos de medición y las ventanas de medición se reducen con el fin de reducir los efectos del “smearing” en los espectros de frecuencia.
- Mediciones de velocidad y análisis de órdenes de los espectros, permiten tiempos adecuados de medición [Flender].

Como se menciono anteriormente, las características principales que diferencian un aerogenerador de una máquina rotativa convencional son sus condiciones de funcionamiento bajo parámetros de velocidad y carga

variable, es por ello que las técnicas convencionales de procesamiento de señales deben ser modificadas y adecuadas para ser utilizadas en la monitorización de la condición de turbinas eólicas.

3.3. Proyectos que se han realizado para optimizar el mantenimiento y mejorar la disponibilidad y rentabilidad de los parques eólicos

En los últimos años la investigación sobre temas eólicos se ha visto incrementada; dentro este ámbito de investigación, el Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) es uno de los más destacados. El ISET, ha venido adquiriendo experiencia operacional de aerogeneradores desde 1989, y ha hecho parte de diferentes proyectos de mejora de disponibilidad y rentabilidad.

El ISET cuenta con una base de datos (WMEP database) que fue establecida dentro del programa de investigación Alemán de largo desarrollo. Dentro de este programa, los dueños y operadores de turbinas eólicas que reciben financiación del gobierno, están obligados a reportar acerca de producción energética, costos operacionales y todas las mediciones de mantenimiento. En el periodo de 17 años, 193.000 reportes mensuales de operación y 64.000 reportes de mantenimiento y reparación de alrededor de 1500 turbinas eólicas fueron introducidos dentro de la base de datos del ISET [UpWindb].

El ISET ha desarrollado un sistema de monitorización de la condición (CMS) para turbinas eólicas en cooperación con Carl Schenck AG, Alemania. Schenck produce el hard y el firmware de el sistema bajo el nombre de "Vibro-IC", el cual se comenzó a usar en prototipos en la primera mitad de 1997, el CMS probado, está basado en sensores robustos para realizar mediciones continuas y así realizar evaluaciones en línea de los indicadores de fallo característicos mediante el uso de

modernos métodos de procesamiento de señales digitales [Caselitz97, Caselitz99].

A continuación se presentan los principales proyectos europeos que se han realizado en el área del mantenimiento de aerogeneradores (ver Figura 10)

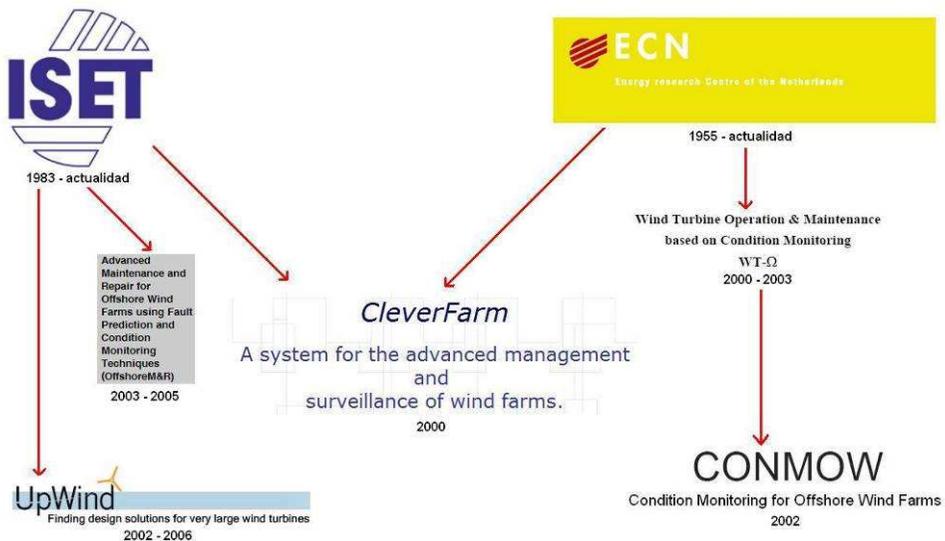


Figura 10. Interrelación entre los proyectos europeos de energía eólica analizados

3.3.1. WT_Ω (WT_OMEGA = Wind Turbine Operation and Maintenance based on Condition Monitoring)

En 1999, el Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) tomó la iniciativa para estudiar más a fondo la aplicabilidad de la monitorización de la condición en turbinas eólicas. Con el apoyo financiero de NOVEM, el ECN ha llevado a cabo el proyecto WT_Ω (WT_OMEGA = *Wind Turbine Operation and Maintenance based on Condition Monitoring*) desde el año 2000 al 2003.

Los objetivos iniciales del proyecto son los siguientes:

- Un estudio sobre la literatura disponible acerca de técnicas de monitorización de la condición, además de seleccionar técnicas aplicables en turbinas eólicas.
- Instrumentación de una turbina eólica y demostración de algunas de las técnicas de monitorización de la condición seleccionadas.
- Identificación de nuevas áreas para futuros desarrollos como nuevos sensores, algoritmos y sistemas de integración.

De la experiencia obtenida durante el proyecto pudieron concluir que:

- Hay un rápido crecimiento en el interés por la monitorización de la condición de turbinas eólicas.
- Están disponibles sistemas basados en análisis de vibraciones desarrollados para otros sectores de la industria.
- La efectividad de los sistemas estándar de monitorización de la condición para turbinas eólicas no está aun demostrada y no es aún evidente.
- Además de las técnicas de monitorización de la condición estándar, hay oportunidad para adoptar disposiciones más especializadas que pueden ser implementadas en los sistemas de control de las turbinas eólicas.
- Las actividades para la adaptación y la verificación de las técnicas de monitorización estándar para turbinas eólicas así también como el desarrollo de funciones especializadas requieren un largo periodo de tiempo.

Aunque la totalidad de los objetivos que se propusieron al inicio del proyecto no se pudieron llevar a cabo, se obtuvo como resultado positivo el que el proyecto terminó con una turbina eólica instrumentada, con lo

cual es posible continuar con la experimentación de la monitorización de la condición por un periodo de tiempo mayor.

A raíz de esto, se decidió iniciar un nuevo proyecto Europeo en monitorización de la condición para parques eólicos ubicados en el mar (CONMOW) [Verbruggen03].

3.3.2. CONMOW (condition monitoring for offshore wind farms)

El proyecto europeo CONMOW (condition monitoring for offshore wind farms) fue iniciado en noviembre de 2002. Un pequeño parque eólico de cinco aerogeneradores fue instrumentado con varios sistemas de monitorización de la condición, además de los sistemas tradicionales de medición. El análisis de los datos de estas mediciones tiene como objetivo desarrollar algoritmos que puedan ser integrados en sistemas SCADA.

Dentro de los trabajos realizados durante la ejecución del proyecto, se desarrolló un algoritmo particular que emplea tanto las transformadas wavelet discretas como las continuas. La máxima amplitud de los coeficientes wavelet son estimados por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT) y el valor RMS.

Durante la elaboración del estado del arte, no se encontraron en la bibliografía ejemplos de aplicaciones satisfactorias de técnicas de monitorización de la condición en turbinas eólicas que prueben que se ha dado un valor añadido [Wiggelinkhuizen07].

3.3.3. The Cleverfarm project

El proyecto Cleverfarm se inició en abril del año 2000, y fue continuado en dos proyectos financiados por la unión europea, el Offshore

maintenance and repair (offshoreM&R), coordinado por el ISET, y condition monitoring for offshore wind (CONMOW), coordinado por ECN.

El proyecto Cleverfarm trataba de abordar temas como la interfaz independiente del vendedor para datos de los parques eólicos. Se establece una alarma en el caso de una emergencia, tratando de usar las mediciones anteriores disjuntas para una mejor predicción de fallos, y dar a los operadores y personal de mantenimiento el acceso en línea a la situación del parque eólico.

El sistema Cleverfarm se desarrolló como una colección de software e interfaces, lo que permitía al usuario obtener un estado completo del parque eólico a través de Internet [Giebel03].

3.3.4. UpWind

UpWind fué un proyecto Europeo financiado por el sexto programa marco de la Unión Europea (6PM). El proyecto apuntaba hacia la energía eólica del mañana, más específicamente hacia el diseño de grandes turbinas eólicas (8-10MW), tanto para parques eólicos ubicados en tierra, como para los ubicados en el mar.

El proyecto pretendía afrontar los desafíos inherentes a la creación de parques eólicos de varios cientos de MW que requieren de los más altos estándares de diseño posibles, un completo conocimiento de las condiciones de diseño externas, el diseño de materiales con resistencia extrema a las relaciones de masas y avanzados sistemas de control y medición orientados a obtener el más alto grado de fiabilidad reduciendo la masa total de la turbina.

Las turbinas eólicas del futuro necesitan la reevaluación de la propia turbina a las nuevas concepciones para hacer frente a los retos del

futuro. El objetivo del proyecto era desarrollar precisión, herramientas de verificación y los conceptos de componentes que la industria necesita para diseñar y fabricar este nuevo tipo de turbinas.

UpWind se centró en las herramientas de diseño para la gama completa de los componentes de la turbina. Se dirigía a la aerodinámica, aero-elástica, diseño estructural y material de los rotores [UpWindb].

3.3.5. Advanced maintenance and repair for offshore wind farms using fault prediction and condition monitoring techniques (OffshoreM&R)

OffshoreM&R fue un proyecto financiado por la comisión Europea, DG TREN bajo el contrato FP5. El proyecto se presupuestó para ser realizado entre enero de 2003 y diciembre de 2005.

En el punto de partida del proyecto, la monitorización de la condición y los sistemas de predicción de fallos apenas habían sido introducidos en el mercado de la energía eólica. La optimización de las técnicas existentes en este campo y el desarrollo de nuevas técnicas es de interés, pero todas estas tienen que ser adaptadas para su uso en turbinas eólicas ubicadas en el mar.

Para llevar a cabo este proyecto, se formó un consorcio de 10 participantes entre los cuales se encontraban fabricantes de sistemas de monitorización de la condición, de herramientas de gestión de parques eólicos y de sistemas de control de turbinas eólicas. También se contaba con la participación de institutos de investigación en energía eólica.

El principal objetivo técnico específico del proyecto era sentar las bases para las estrategias de condición basadas en el mantenimiento y las reparaciones (M&R) para turbinas eólicas ubicadas en parques eólicos

en el mar. Para cumplir con este objetivo, fueron investigadas técnicas existentes de condición del mantenimiento, predicción de fallos, y su aplicabilidad para su uso en turbinas eólicas. Fueron desarrolladas nuevas técnicas específicas para turbinas eólicas ubicadas en parques eólicos en el mar, así como algoritmos para la condición en función del M&R [Offshore].

Capítulo 4

4. Estado del arte del diagnóstico de maquinaria funcionando bajo condiciones de velocidad y carga variables

4.1. Investigación realizada en máquinas que trabajan bajo condiciones de velocidad y carga variables

El análisis de vibraciones ha sido implementado y estudiado en las máquinas rotativas durante muchos años. Con el auge de la tecnología, estas máquinas han llegado a evolucionar a sistemas complejos que trabajan bajo condiciones más severas, un ejemplo de ello son las que están sometidas a velocidades y cargas variables.

Las investigaciones iniciales en el área de la detección de fallos fueron enfocadas en el análisis de señales de vibración. Al principio, como se discute en [Samuel05], las características estadísticas de la señal en el dominio del tiempo fueron el primer enfoque del estudio. Sin embargo, este campo se expandió rápidamente incluyendo el análisis espectral, los análisis tiempo-frecuencia, los análisis Wavelet, las redes neuronales y los modelos matemáticos. Este campo está en continuo crecimiento. Cada vez que una nueva técnica de procesamiento de señales emerge, ésta es aplicada al problema de detección de fallos y debe ser acomodada a las necesidades y características específicas de cada sistema mecánico [Wang95, Baydar01, Blunt06, Mcfadden87, Li05, Bozchalooi08, Resor05].

4.1.1. Sistemas que trabajan bajo condiciones de velocidad variable

Para el análisis de los sistemas que trabajan bajo condiciones de

velocidad variable se ha venido trabajando desde hace muchos años en técnicas que permiten un mejor procesamiento y análisis de las señales emitidas por este tipo de sistemas. En [Mcfadden89] se presenta una teoría de interpolación aplicada al promediado en el dominio del tiempo como alternativa (para el promediado en el dominio del tiempo) cuando no se cuenta con una señal rotacional de referencia. Las experimentaciones presentadas en este trabajo fueron realizadas en una caja de engranajes de un helicóptero. Más adelante en [Mcfadden91], se presenta una técnica que permite calcular los promedios en el dominio del tiempo de la frecuencia de engrane de cada uno de los planetas y del sol en una caja de engranajes epicicloide a partir de la información obtenida de la vibración, procesada por una ventana en el dominio del tiempo cada vez que un planeta pasa por un transductor localizado en el engranaje anular.

En [Fyfe97] se explica cada uno de los pasos que conforman el método del remuestreo angular, haciendo comparaciones en cada uno de estos pasos y dando las mejores alternativas para cada uno de ellos. Más adelante, en [Bossley99] se presenta un método híbrido computarizado para realizar remuestreo angular y lo compara con dos métodos anteriormente propuestos comparando los resultados obtenidos con cada uno de ellos. Los resultados de la simulación mostraron que la precisión del enfoque tradicional puede ser igualada por medio del remuestreo en software de señales de vibración muestreadas asincrónicamente.

En [Bonnardot05] se presenta un método para realizar remuestreo angular usando directamente la señal de aceleración sin la necesidad de una señal de tacómetro. Este método tiene como limitación que solo puede ser utilizado cuando las variaciones de velocidad son pequeñas y se necesitan un número suficiente de armónicos. Este algoritmo estima la

posición angular del eje a través de una demodulación de un armónico de la frecuencia de muestreo.

En [Combet07] se presenta una extensión para el algoritmo propuesto por Bonnardot. En el algoritmo anteriormente propuesto, el armónico utilizado para estimar la posición angular del eje era escogido por ensayo y error. En este artículo proponen una solución para seleccionar automáticamente este armónico. Este método solo requiere un conocimiento aproximado de la velocidad de rotación y el número de dientes de los engranajes. La limitación que presenta este método es que no es apropiado para rampas de velocidad, y es válido solamente para reductoras de una sola etapa.

En 2009, Combet retoma los trabajos realizados anteriormente por Bonnardot y por él mismo y los mejora. En [Combet09] se propone un método original para la estimación la fluctuación relativa a la velocidad instantánea (ISRF) en una señal de vibración medida en un sistema sometido a cargas relativamente altas y fluctuaciones de velocidad, y sin señal de velocidad disponible. Contrariamente a los métodos convencionales basados en la estimación de un componente espectral, el método propuesto para la estimación ISRF no depende de la elección de un componente particular. Sin embargo, no es recomendado para ser usado en casos donde las variaciones de velocidad son muy grandes como lo pueden ser durante una rampa de velocidad.

En 2010, se propone un método alternativo para la condición del mantenimiento de rodamientos basado en la medición de la velocidad angular instantánea, usando nuevamente señales tacométricas [Reanudin10].

4.1.2. Sistemas que trabajan bajo condiciones de carga variable

Las técnicas convencionales de monitorización de vibraciones están basadas en la suposición de que los cambios en las mediciones de la respuesta estructural están causados por el deterioro en la condición de los mecanismos que componen la máquina. Sin embargo, esta suposición no es válida bajo condiciones de carga fluctuante, ya que la carga fluctuante modula la amplitud de la señal de vibración medida y provoca cambios en la velocidad de rotación del sistema. El cambio en la velocidad del sistema provoca una modulación en la frecuencia de las frecuencias características de los elementos mecánicos que componen el sistema [Stander05].

Los métodos de análisis de tiempo frecuencia han sido ampliamente utilizados para la detección de fallos, en [Baydar00] se hace un pequeño resumen de la evolución que han tenido estos métodos y examina la habilidad que tiene uno de ellos, el espectro instantáneo de potencia¹ para detectar fallos bajo condiciones de carga variable en cajas de engranajes helicoidales, para ello realiza pruebas con diferentes valores de carga puntual.

En [Stander02] se realizan pruebas en engranajes no solo para diferentes valores de carga puntual, sino para cargas variables. Utiliza los métodos del seguimiento de ordenes², promediado síncrono³ y Normalización desmodulada de carga⁴ para procesar la señal adquirida y luego utiliza el método de análisis de tiempo frecuencia Wigner – Ville para sacar unos vectores y parámetros estadísticos con los cuales

¹ instantaneous power spectrum (IPS)

² Order Tracking

³ Synchronous Averagin

⁴ Load Demodulation Normalization (LDN)

calcula la distancia de Mahalanobis entre estos vectores y trata de dar un diagnóstico del estado de los engranajes.

Más adelante en [Stander05] se hace una distinción entre la modulación de carga ciclo-estacionaria y la modulación de carga no ciclo-estacionaria. La técnica conocida como promediado en el dominio de rotación⁵ puede suprimir la modulación causada por las condiciones de carga no ciclo-estacionarias pero no puede suprimir la modulación causada por las condiciones de carga ciclo estacionarias.

En el caso de una caja de engranajes, las condiciones de carga ciclo-estacionarias, se refieren a instantes donde la modulación causada por la fluctuación de la carga es estacionaria mientras la rotación del engranaje está siendo monitorizada. En otras palabras, no hay cambio de fase en la modulación relativa a la rotación del engranaje. La fase de modulación para la condición de cargas fluctuantes no ciclo-estacionarias puede cambiar en relación con la rotación del engranaje que está siendo analizado.

Los espectros que resultan de la simulación bajo condiciones de carga fluctuantes de una caja de engranajes, muestran múltiples picos en la región que rodea la frecuencia de engrane. Este fenómeno es conocido como “esparcimiento” de frecuencias⁶ y se debe a la fluctuación en la velocidad que es causada por la fluctuación en la carga.

Por las razones anteriormente mencionadas, los sistemas de monitorización de vibraciones requieren procedimientos de procesamiento de señales que compensen la fluctuación en la velocidad

⁵ Rotation Domain Averaging (RDA)

⁶ Denominado “smearing” en la literatura inglesa

del eje así como la modulación de la amplitud causada por la carga variable [UpWindb].

La fluctuación de la carga en una máquina rotativa provocará una variación en la velocidad de rotación. Esto llevó a Stander y Heyns a utilizar el RDA como una técnica de preprocesamiento antes de aplicar la técnica Load Demodulation Normalisation (LDN). La técnica LDN se utiliza para eliminar la modulación de amplitud causada por la fluctuación de las condiciones de carga. Dado que la velocidad de rotación cambia con los cambios en la carga, la amplificación de la respuesta debido a la transmisión que es una función de la frecuencia de rotación, también cambia. Este efecto modula la señal de vibración medida la cual es una función de la velocidad de rotación del eje y también es eliminada por la técnica LDN.

En futuras investigaciones, Stander y Heyns concluyeron que medir la velocidad angular instantánea por medio de un encoder en el eje con suficiente resolución puede ser usada para monitorizar la condición de fallo de un engranaje deteriorado bajo condiciones de carga fluctuante [Stander06]. Los resultados indicaron una convergencia mucho más rápida de la medición con promediado síncrono mediante la señal del encoder, que la medición a partir de un acelerómetro en la carcasa de la caja de engranajes, porque la vibración tiene que pasar a través de una vía de transmisión antes de ser medida con el acelerómetro.

Por consiguiente, el método promediado en el dominio de fase⁷ fue desarrollado, lo que puede reducir el efecto de la fase de la vía de transmisión en respuesta de la medición a fin de mejorar la repetibilidad y la capacidad de diagnóstico mediante vibraciones bajo condiciones de

⁷ Phase Domain Averaging (PDA)

carga fluctuante. El método se basa en la representación de la señal en función de esta fase, en lugar del ángulo de rotación del eje. Se demuestra que este proceso es mucho más eficiente y requiere menos datos para obtener una representación promedio de convergencia sincronizada de la señal, la cual puede ser utilizada para propósitos de diagnóstico.

Simultáneamente a los trabajos de Stander, [Zhan06] propone un método para detección de fallos bajo condiciones de carga variable basado en un método autoregresivo, enfoca su trabajo en la búsqueda de un indicador cuantitativo y no cualitativo para el diagnóstico.

En [Bartelmus09a], se habla sobre lo importante que es identificar la variación de la carga externa y presenta un método para realizar esta identificación, además, formula la hipótesis de que hay una dependencia lineal entre la carga externa y el parámetro de vibración que está representado por la condición del engranaje, mas adelante en ese mismo año [Bartelmus09b], usa la pendiente de la regresión entre las condiciones de operación y la amplitud de la señal como nueva característica de diagnóstico aplicado a reductoras de grandes excavadoras usadas en minería.

Capítulo 5

5. Remuestreo angular para análisis de vibraciones en aerogeneradores bajo fluctuaciones de velocidad no lineales

Los contenidos del presente capítulo son parte del artículo “Angular resampling for vibration analysis in wind turbines under non-linear speed fluctuation” publicado en la revista Mechanical Systems and Signal Processing [Villa11a]. El objetivo perseguido es el desarrollo y puesta a punto de un método de remuestreo angular que permita ser aplicado a las grandes fluctuaciones de velocidad que pueden encontrarse en diferentes tipos de máquinas como los aerogeneradores que constituyen objeto de estudio en el presente trabajo.

El trabajo que ha sido desarrollado previamente en el campo del remuestreo angular es aplicado a casos en donde las fluctuaciones de velocidad son pequeñas [Bonnardot05, Mcfadden89, Fyfe97, Bossley99, Antoni04].

El método propuesto por [Fyfe97] incluye los siguientes pasos: primero se capturan las señales de vibración y velocidad a intervalos constantes de Δt y luego se remuestrea esta señal para obtener la deseada a incrementos constantes de $\Delta \theta$ basándose en la señal de pulsos.

Para determinar los tiempos de remuestreo, se asume que el eje monitorizado está girando con una aceleración angular constante, el ángulo del eje θ , está descrito por la siguiente ecuación cuadrática:

$$\theta(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \quad (1)$$

Los coeficientes desconocidos b_0 , b_1 y b_2 son hallados por el ajuste de 3 tiempos de llegada sucesivos de la señal de pulsos (t_1, t_2 y t_3), lo cual ocurre a incrementos angulares conocidos. Una vez los tiempos de remuestreo son calculados, las correspondientes amplitudes de la señal son calculadas por interpolación. A continuación, la señal de vibración remuestreada es transformada del dominio angular al dominio de órdenes por medio de una FFT.

La aplicación de este procesamiento de señales al análisis de vibraciones de aerogeneradores es limitada, porque las variaciones en la velocidad angular que se presentan en un aerogenerador son altas y no son predecibles debido a su dependencia del viento. El presente trabajo de tesis presenta una evolución del algoritmo de remuestreo angular propuesto por [Fyfe97] y se aplica a las variaciones de velocidad que usualmente ocurren en aerogeneradores de velocidad variable. Para la implementación de este algoritmo, se cuenta con señales de velocidad que eliminan la necesidad de estimar la velocidad, estimación que se realiza en otros trabajos [Combet07, Combet09].

En la Figura 11 se presentan diferentes perfiles de velocidad, medidos en aerogeneradores de velocidad variable de 850 kW. Las gráficas muestran la evolución de la velocidad angular en el rotor durante 85 segundos (la precisión de la frecuencia equivalente está marcada con un corchete, en este caso $1/85 \text{ s} = 0.01 \text{ Hz}$). Tales variaciones son causadas por la variación en la velocidad del viento como se explicó anteriormente. Para conocer mejor si esta variación puede influenciar el análisis de frecuencia subsecuente, es necesario saber la frecuencia mínima que debe ser analizada y con ello determinar con precisión la

frecuencia deseada. Esta precisión puede ser expresada como la mínima medida de tiempo, y las variaciones de la velocidad durante este tiempo deben ser analizadas para determinar si debe ser empleado el remuestreo angular con el objetivo de eliminar el llamado “esparcimiento”⁸ de las diferentes frecuencias.

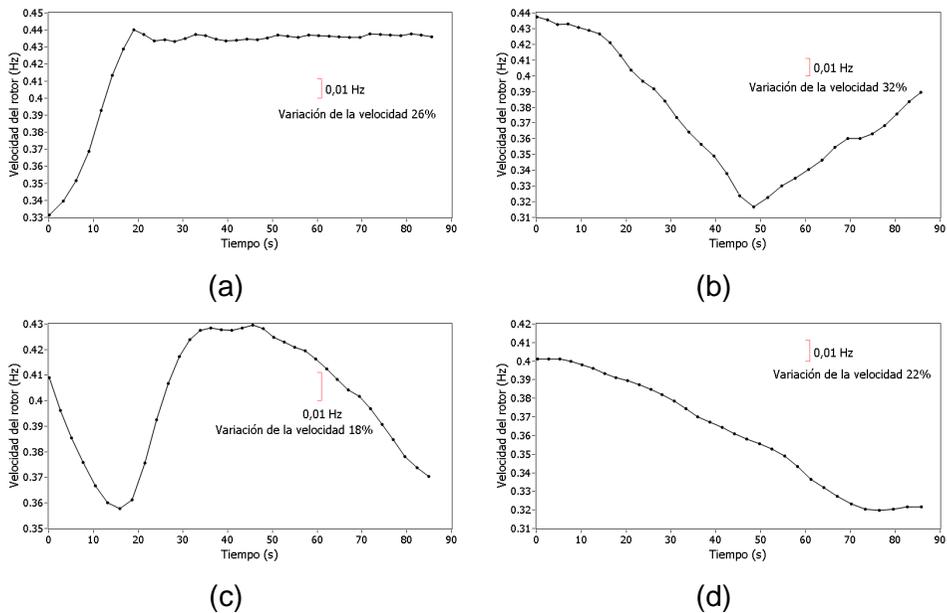


Figura 11. Diferentes perfiles de velocidad medidos por 85 s en el rotor de un aerogenerador

Usualmente, la frecuencia mínima a ser analizada es la frecuencia asociada a la velocidad del rotor. La velocidad mínima del aerogenerador analizado es aproximadamente 15 rpm (0.25 Hz). Entonces, con un mínimo de precisión deseada entre 10 y 20 líneas para esta frecuencia (0.025-0.0125 Hz), los tiempos de medición deben ser entre 40 s y 80 s. Un incremento en precisión hasta 50 líneas debería aumentar a 200 s el tiempo de medición.

⁸ Denominado “smearing” en la literatura inglesa

Con una precisión de 0.0125 Hz (0.75 rpm y 80 s de tiempo de medición), La variación permitida en la velocidad del rotor para evitar el “esparcimiento” debería ser menor que el 5% para la mínima velocidad de 0.25 Hz (15 rpm). Esto se ve claramente del análisis de la figura 11 donde el remuestreo angular se hace necesario si el análisis del rotor es requerido, debido a que la variación en la velocidad es aproximadamente de 5 a 10 veces la frecuencia de precisión (0.0125 Hz). Por otra parte, el hecho de que la velocidad de variación incrementa de forma lineal con el incremento en el orden de velocidad analizado debe ser tomado en consideración.

Debido al hecho de que la velocidad varía considerablemente entre rotaciones consecutivas, se tomó la decisión de usar más de un pulso por revolución, y usar el perfil completo de velocidad en vez del análisis de tres muestras consecutivas como se realiza en el algoritmo presentado por [Fyfe97]. El rotor del aerogenerador analizado posee 24 orificios en el lado de las palas que son usados por el sistema de control del aerogenerador. La medida de velocidad a partir de los pulsos proporcionados por estos orificios, fue usada para desarrollar el siguiente algoritmo (ver Figura 12):

- Estimación de los tiempos de remuestreo $t^*(k \Delta\theta)$, para los cuales hay un incremento angular constante: se realiza una interpolación usando la señal de velocidad en las posiciones angulares $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ de los pulsos por vuelta y los instantes de tiempo en que se producen (t_1, t_2, \dots, t_k) .
- Realizar una interpolación spline de la señal de vibración original $V(t)$ en los instantes de tiempo remuestreados $t^*(k \Delta\theta)$. Los incrementos angulares están tomados para que la señal interpolada tenga el número original de muestras en la posición angular final θ_k .

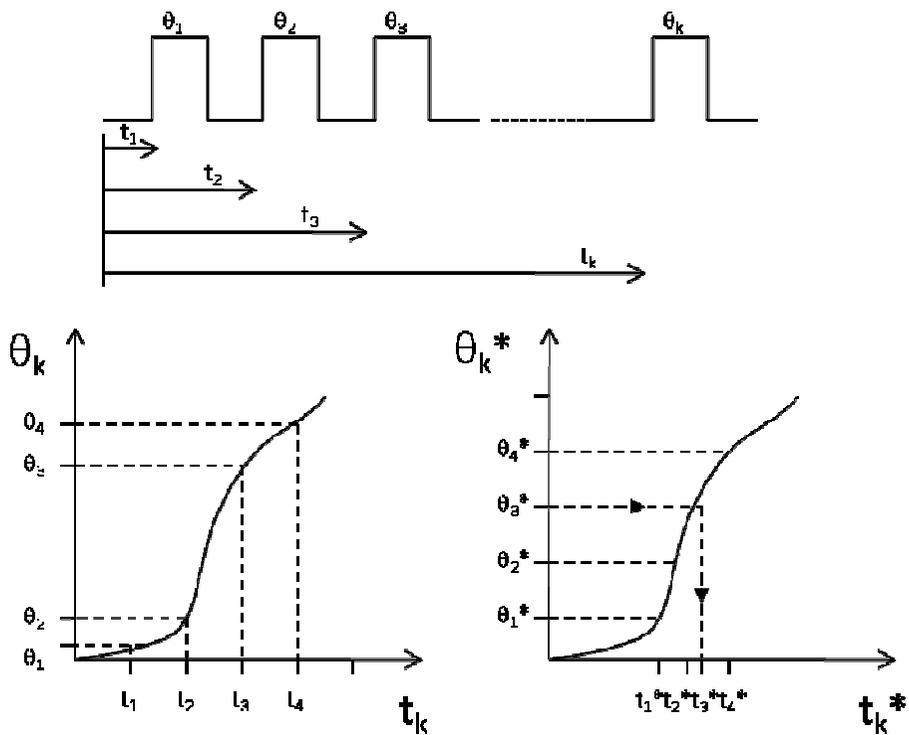


Figura 12. Algoritmo de remuestreo angular implementado

El algoritmo propuesto no fue diseñado para usarse en condiciones de tiempo real sino como un algoritmo de procesamiento de la señal de vibración completa. Además, fue probado de forma sucesiva mediante señales sintéticas que permitieron el ajuste inicial del algoritmo, en una bancada a escala de rodamientos y finalmente en un aerogenerador de 850 kW.

5.1. Pruebas simuladas

Las pruebas simuladas fueron desarrolladas usando señales simuladas con el fin de desarrollar el algoritmo bajo condiciones controladas. Estas simulaciones permiten diferentes condiciones para someter a ensayos el algoritmo desarrollado, como son el método de interpolación, el número de pulsos por revolución y la no uniformidad de los ángulos de la señal de pulsos de velocidad.

El interés de simular la separación no uniforme de los pulsos, es el estudio de los efectos que podría generar un fallo en las mediciones de velocidad como será explicado más adelante. Las señales simuladas consisten en una señal portadora sinusoidal con bandas laterales, la señal es similar a la modulación generada por una caja de engranajes. Tanto la señal portadora como las bandas laterales están moduladas en frecuencia por la variación de la velocidad. La prueba además muestra esta modulación generada usando una variación de velocidad sinusoidal adicional. La ecuación generada está representada en (2) [Bonnardot05]:

$$x(n) = \sum_{m=0}^M X_m [1 + a_m(n)] \cos[2\pi m T f_1(n)n + \phi_m] \quad (2)$$

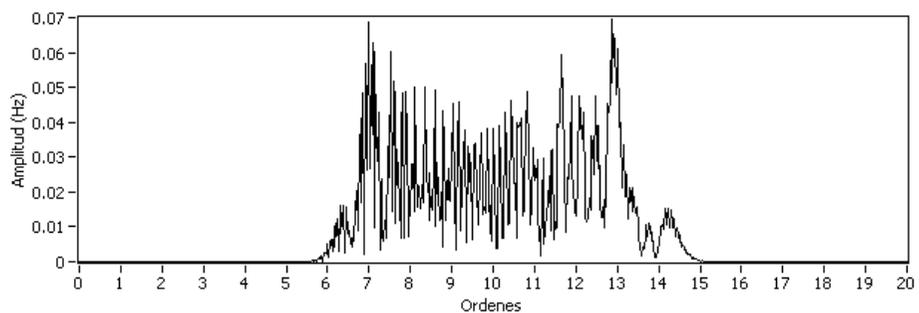
Donde f_1 es la frecuencia de uno de los engranajes, T es el número de dientes, Tf_1 es la frecuencia de engrane, m es el número asociado al armónico de la frecuencia de muestreo, X_m es la amplitud del $(m)th$ armónico, ϕ_m es la fase original y $a_m(n)$ es la amplitud de la función de modulación representada en la ecuación (3).

$$a_m = A_m * \sin(2\pi f_v t) / 2 \quad (3)$$

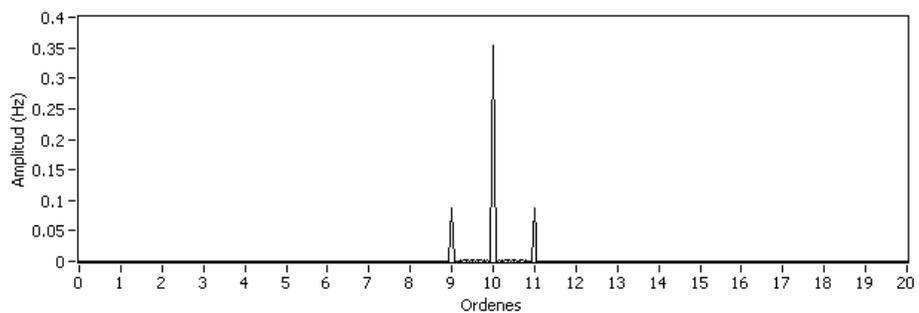
Donde A_m es el promedio de la velocidad y f_v es la frecuencia de variación de la velocidad.

El número de términos en la ecuación anterior por simplicidad es $m=1$ y el término de la función seno $a_m(n)$ tiene la misma modulación de frecuencia que el término coseno de la señal portadora [Bonnardot05].

El objetivo es simular una señal de velocidad con variación y amplitud similares a las medidas en un aerogenerador. Como resultado, y teniendo como referencia el perfil presentado en la Figura 11c, se simula una señal de velocidad con una frecuencia de 0.03 Hz, amplitud 0.25 Hz, media 0.4 Hz y resolución de muestreo de la señal de pulsos por vuelta = 2 kHz para un tiempo de captura de 85 s. La Figura 13(a) presenta el espectro de la señal generada expresado en ordenes (orden portadora = 10 y orden bandas laterales = 1). En la Figura 13(b) se muestra el espectro correspondiente al remuestreo angular usando un pulso por vuelta con el algoritmo presentado en este trabajo.



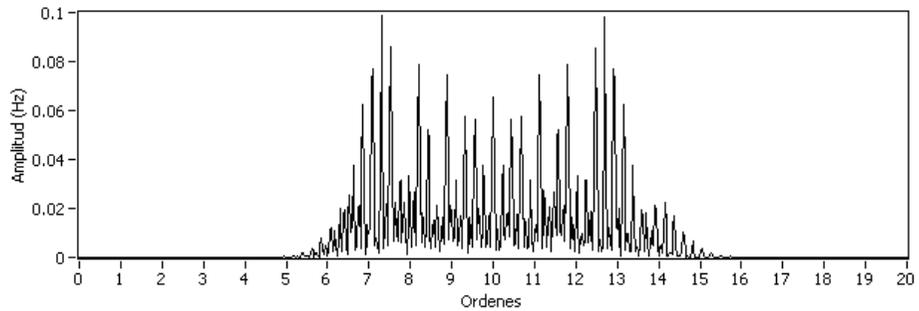
(a)



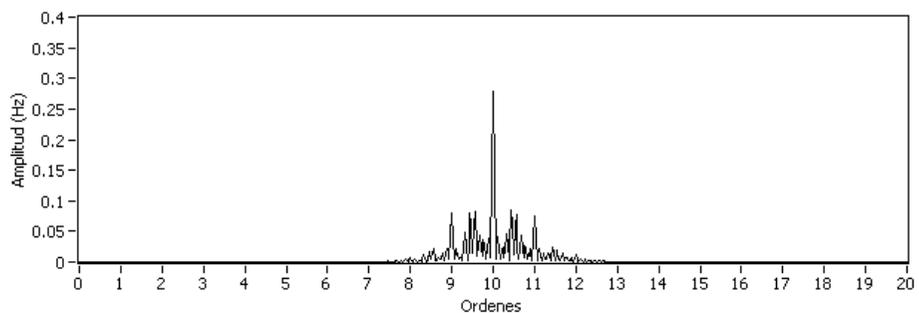
(b)

Figura 13. (a) Espectro antes del remuestreo angular, (b) Espectro después del remuestreo angular

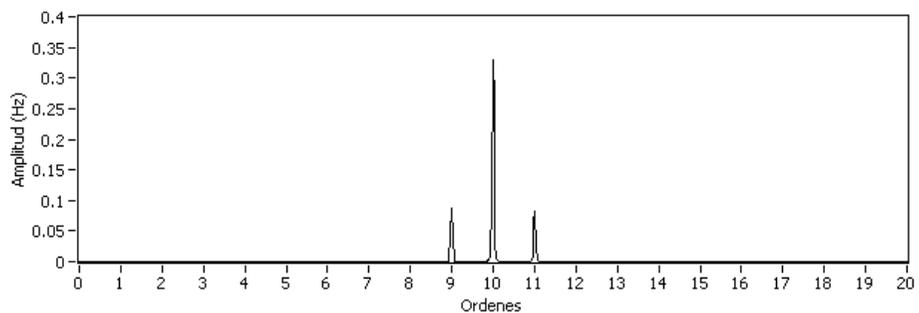
Con el incremento en la variación de la velocidad (velocidad con una frecuencia de 0.09 Hz), el remuestreo angular comienza a crear bandas laterales falsas que solo pueden ser eliminadas con el incremento del número de pulsos por vuelta como se muestra en la Figura 14.



(a)



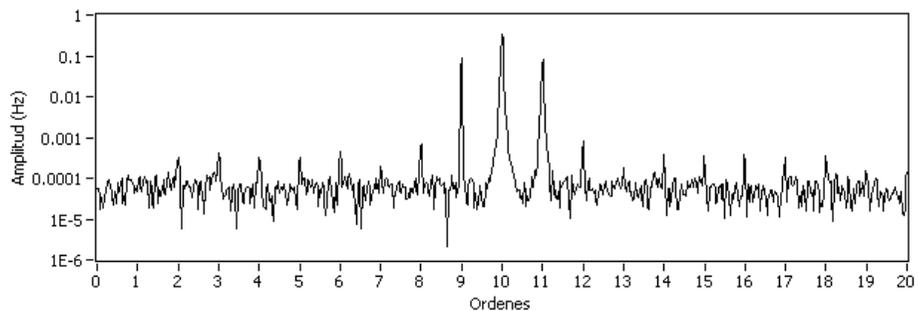
(b)



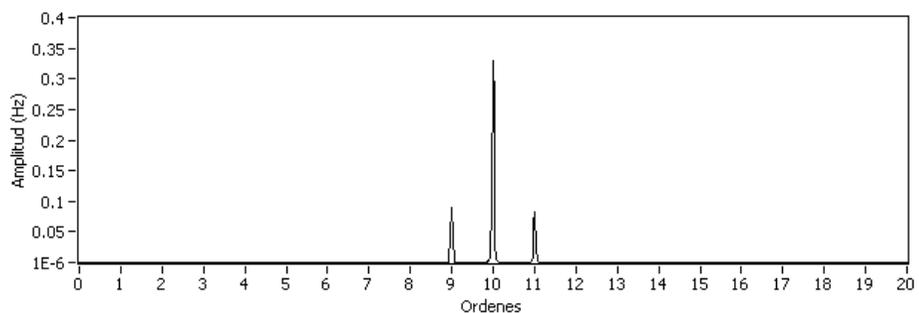
(c)

Figura 14. (a) Espectro antes del remuestreo angular, (b) Espectro después del remuestreo angular con 1 pulso por vuelta, (c) Espectro después del remuestreo angular con 24 pulsos por vuelta

Otro aspecto interesante es probar la no uniformidad en la separación de los pulsos. El interés en este experimento es simular el efecto de un fallo en la medición de la velocidad debido a la discrepancia entre la locación física pulso y la configuración del ángulo uniforme que presupone el algoritmo. Para lograr esto en el algoritmo aquí propuesto se produce una discrepancia en la distancia angular entre pulsos. La Figura 15 muestra que con una desviación de un 1% en la locación angular de cada pulso, el espectro remuestreado muestra bandas laterales de orden 1 en todo el espectro.



(a)



(b)

Figura 15. Localización de pulsos no uniforme (a) Escala logarítmica, (b) Escala lineal

Esto es debido a la discrepancia en la distancia angular entre pulsos que no es precisa. Por otro lado, se debe decir que esto se aprecia solamente

para un espectro en escala logarítmica o con altas variaciones (10% o mayores). Estas bandas laterales se observan mejor con órdenes altas de la señal portadora (100 y mayores). Otro efecto de esta separación no uniforme de los pulsos es que la altura de las bandas laterales resultantes no son exactamente las mismas.

El algoritmo desarrollado en este trabajo ha sido comparado con el algoritmo presentado en [Fyfe97], el cual ha sido desarrollado para una aceleración angular constante. La Figura 16 muestra la comparación de ambos algoritmos para la señal presentada en las figuras anteriormente presentadas. El algoritmo de aceleración constante genera un espectro con bandas laterales ficticias debido a que este algoritmo está validado únicamente para señales de aceleración constante y ese no es el caso de la señal analizada en la Figura 16.

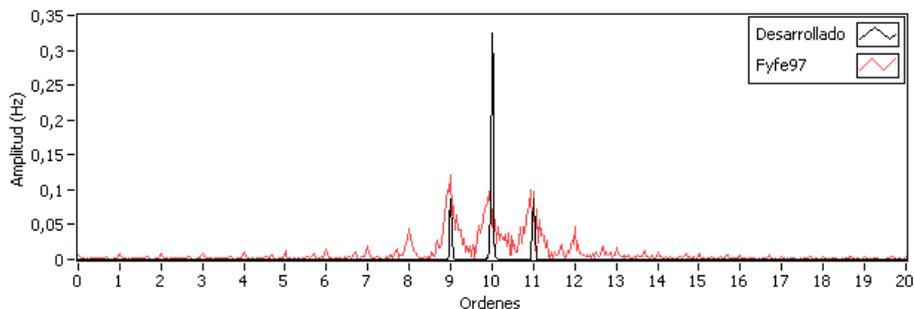


Figura 16. Comparación del algoritmo de remuestreo angular desarrollado en el presente trabajo y el algoritmo presentado en [Fyfe97]

Este comportamiento puede ser mejorado al aumentar el número de pulsos, pero aún así, cuando se trata de la reconstrucción de altas órdenes, suponiendo una aceleración constante el remuestreo puede ser problemático. Como se observa en la Figura 17, donde se comparan los algoritmos para una señal portadora de orden 100 y 10 pulsos por vuelta, es posible verificar los patrones falsos generados simétricamente en las

órdenes de 90 y 110 cuando el algoritmo se basa en la aceleración constante. Estas falsas bandas laterales pueden llevar a generar un diagnóstico incorrecto. El algoritmo presentado en este trabajo resuelve estos problemas como puede observarse en la Figura 17.

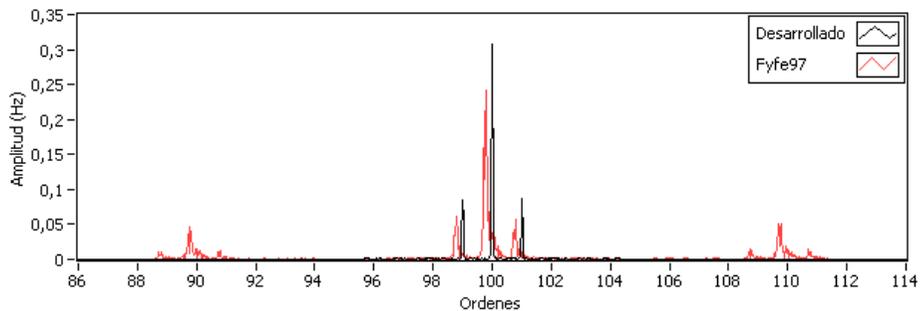


Figura 17. Comparación del algoritmo de remuestreo para una portadora de orden 100 y 10 pulsos por vuelta

5.2. Pruebas en bancadas

Para probar el algoritmo en condiciones reales, el algoritmo propuesto se probó en un banco de pruebas (Figura 18). El modelo PT 500.12 diseñado por Gunt Hamburg [Gunt04], permite la simulación de cinco diferentes tipos de daños en los rodamientos.

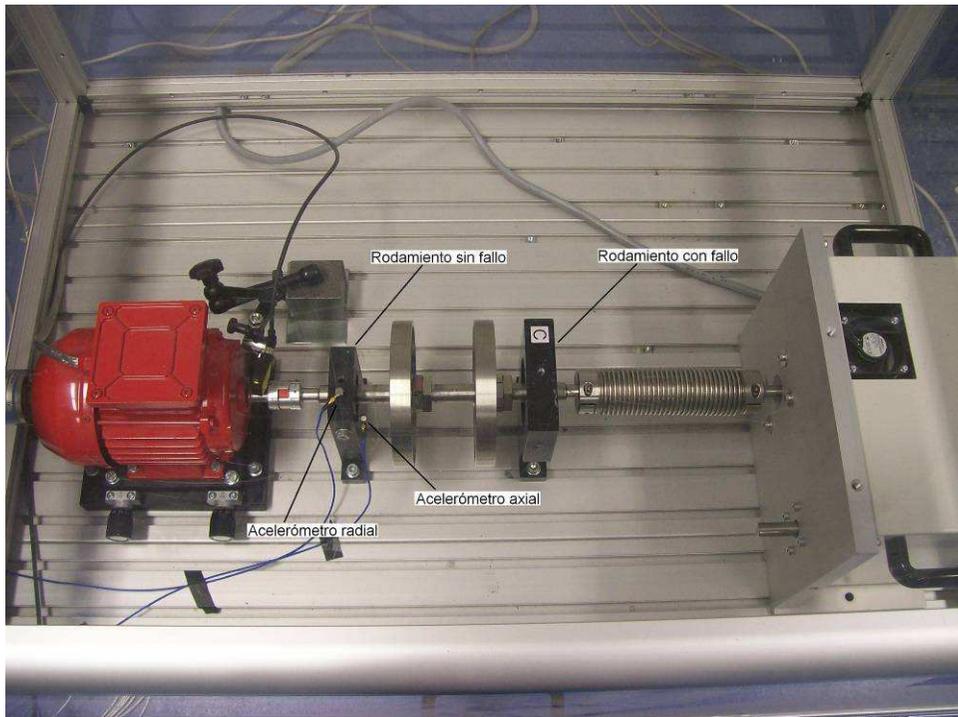


Figura 18. Bancada de pruebas de rodamientos

El sistema cuenta con un motor asíncrono de jaula trifásico, montado en una base que puede ser ajustada para provocar desalineamientos.

Con el fin de simular vibraciones en la unidad base y desarrollar ejercicios relacionados con el desequilibrio y el alineamiento, el sistema cuenta con rodamientos en buen estado y con diferentes tipos de defecto, discos de peso, ejes de diferentes longitudes y varios tipos de acoplamientos. Además, cuenta con un freno que permite realizar estudios de vibraciones en condiciones de carga [Gunt04].

Las pruebas fueron realizadas usando un rodamiento con daño en el anillo interior y diferentes aceleraciones.

Los resultados presentados a continuación, son dos mediciones con diferentes valores de aceleración, pero con igual valor promedio de velocidad 0.787352 Hz (Figura 19).

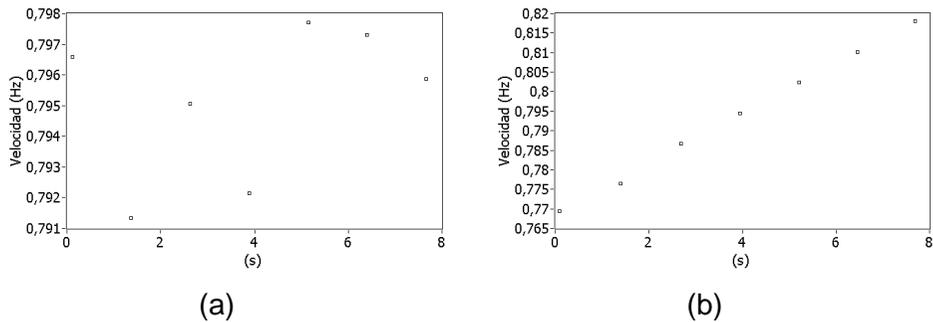


Figura 19. Velocidad por vuelta (a) Aceleración de 1 rpm/s, (b) Aceleración de 10 rpm/s

En el primer caso, donde la aceleración es 1 rpm/s (0.0166 Hz/s), la precisión en frecuencia es 0.0394 Hz (25s de tiempo de medición) en el caso de 20 líneas de frecuencia (para el primer armónico a una velocidad de 47 rpm). Debido al hecho de que la diferencia de velocidad es menor a esta precisión, el remuestreo angular no es necesario para el armónico fundamental. En el caso del sexto armónico y siguientes, el remuestreo angular es necesario porque esta relación ya no se cumple (Figura 20).

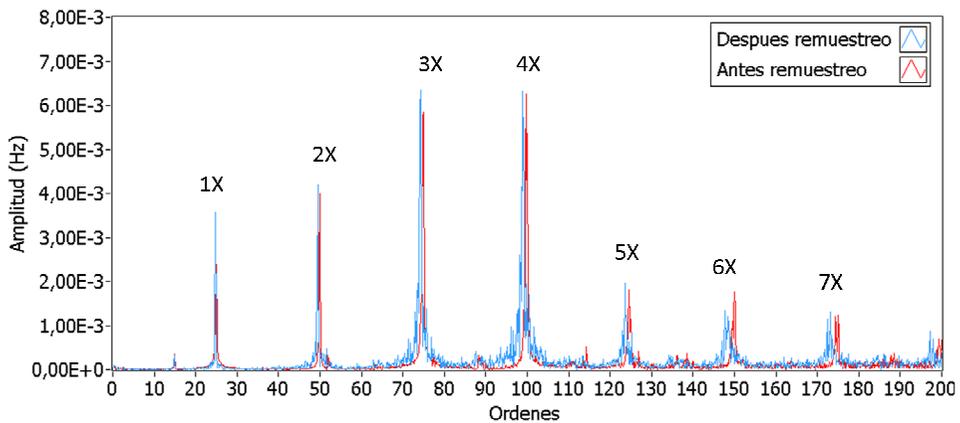


Figura 20. Espectro antes y después del remuestreo angular para una señal con aceleración de 1 rpm/s

En el segundo caso, donde la aceleración es 10 rpm/s (0.1667 Hz/s), la precisión en frecuencia es 0.0394 Hz (25s de tiempo de medición) en el caso de 20 líneas de frecuencia (para el primer armónico a una velocidad de 47 rpm). Debido al hecho de que la diferencia de velocidad es mayor a esta precisión, el remuestreo angular es necesario para el armónico fundamental y también para el resto de los armónicos (Figura 21).

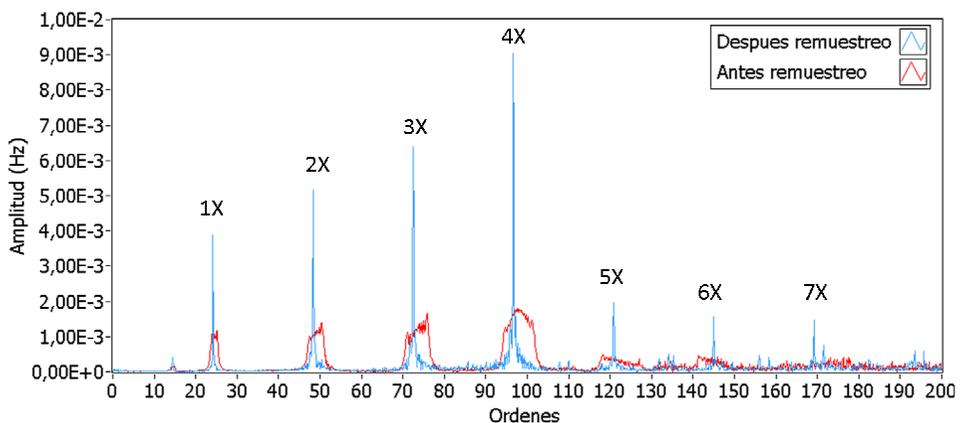


Figura 21. Espectro antes y después del remuestreo angular para una señal con aceleración de 10 rpm/s

5.3. Pruebas en aerogeneradores

Esta sección muestra los resultados del algoritmo de remuestreo angular aplicado a las señales de vibración y velocidad medidas en varios aerogeneradores. Las mediciones de velocidad fueron hechas a partir de los 24 orificios que tiene el eje principal del aerogenerador, los cuales son usados para el control de la máquina. De forma similar, en el eje del generador, las mediciones de la velocidad instantánea fueron llevadas a cabo con 10 tornillos usados para el ensamble del acople flexible que conecta la multiplicadora con el generador.

Ejemplos de perfiles de velocidad medidos en el eje principal son mostrados en la Figura 11 y la necesidad de llevar a cabo un remuestreo angular fue comentada al principio del capítulo. Usando el mismo razonamiento que se explicó al principio de éste capítulo, se llega a la conclusión de que el remuestreo angular para las señales del generador no es necesario, al menos para el primer armónico de la velocidad. En la multiplicadora sin embargo, debido a las velocidades de las diferentes etapas, este remuestreo se hace necesario.

Las figuras 22 y 23 muestran los resultados de aplicar el algoritmo de remuestreo angular a las señales de vibración medidas en el portasatélites de la multiplicadora en el lado del eje lento (Figura 22), y en el eje lento en la entrada de la multiplicadora (Figura 23). Aplicando el algoritmo desarrollado en este trabajo, las mejoras en la precisión con respecto al algoritmo presentado en [Fyfe97], el cual lleva a cabo una aproximación lineal de la aceleración, son fácilmente apreciables.

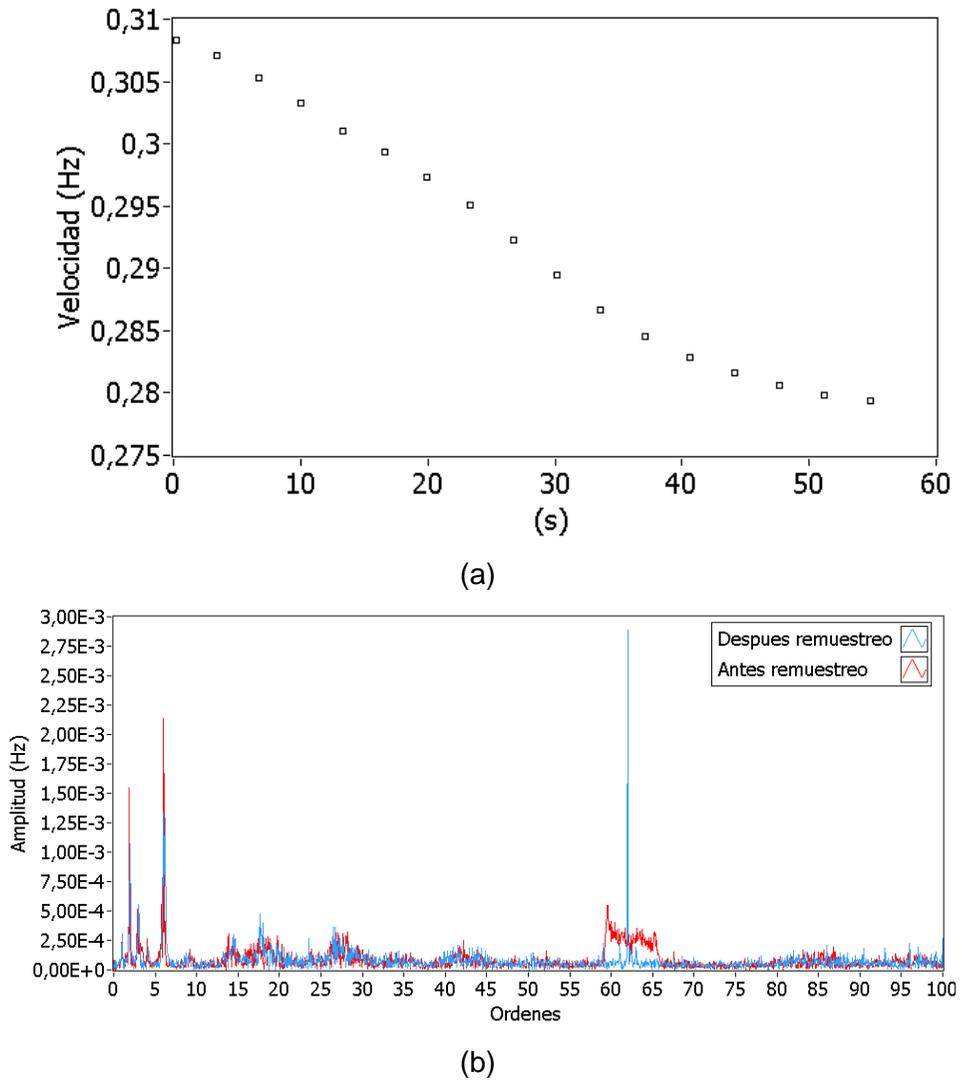


Figura 22. (a) Perfil de velocidad, (b) Espectro antes y después del remuestreo angular. Tiempo de medición 55 s, 24 pulsos por vuelta

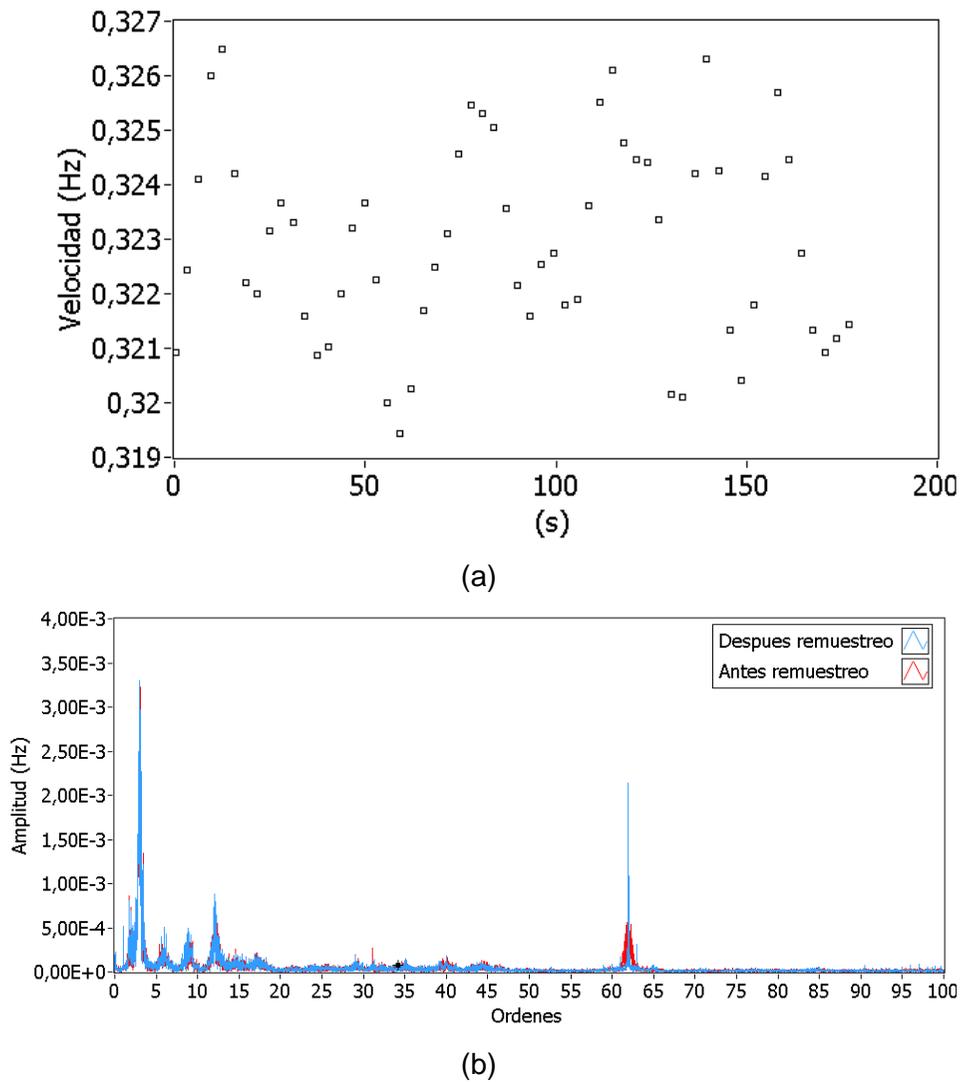


Figura 23. (a) Perfil de velocidad, (b) Espectro antes y después del remuestreo angular. Tiempo de medición 180 s, 24 pulsos por vuelta

Capítulo 6

6. Experimentación en bancada a escala

Los aerogeneradores son máquinas rotativas que tienen un funcionamiento particular debido a la variabilidad de las condiciones del viento a las cuales están sometidos. Debido a ésta variabilidad, los elementos que transmiten la energía del viento hasta que es convertida en energía eléctrica, trabajan bajo velocidad y carga variable lo que dificulta la detección de fallos por medio de las técnicas clásicas de análisis de vibraciones.

En éste capítulo se realiza una explicación de la experimentación que se llevo a cabo para la realización de este trabajo de investigación, se describen los equipos y los procedimientos que se llevaron a cabo para la adquisición de los datos utilizados.

La experimentación presentada a continuación ha sido realizada para simular en un banco de pruebas a escala el funcionamiento de un aerogenerador, simulando de esta forma fallos de forma controlada bajo condiciones de trabajo similares en velocidad y carga. Los tipos de fallos que se han simulado son desequilibrio, desalineamiento en el eje lento, desgaste de los engranajes de la etapa planetaria y desgaste de los engranajes de la etapa paralela.

6.1. Descripción de la bancada de pruebas

Para el ensayo de los diferentes defectos mecánicos se ha construido una bancada a medida a partir de diferentes elementos comerciales.

El lado derecho de la bancada de pruebas mostrado en la Figura 24 está compuesto por un motor eléctrico (en lugar de un generador), una reductora paralela y una reductora planetaria, este set de reductoras representa la configuración y la relación de multiplicación de un aerogenerador comercial que está en el orden de 1:61.

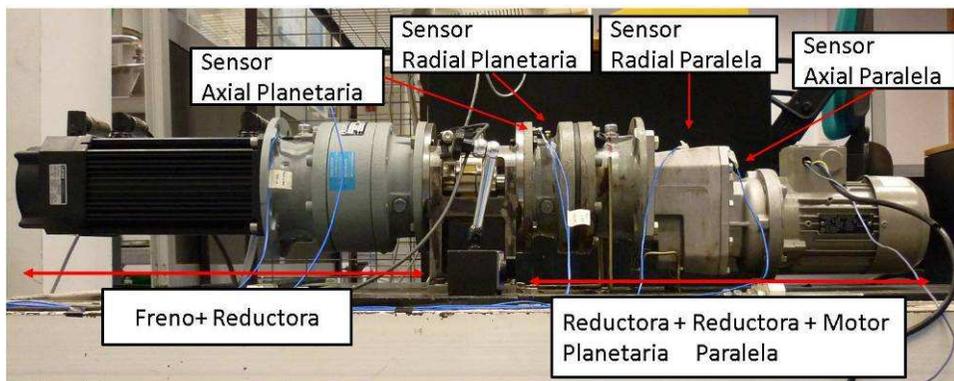


Figura 24. Bancada de pruebas

Para simular la carga variable a la que está sometido el tren de potencia debido a la aleatoriedad del viento se ha añadido un freno a la banda de pruebas. Para el acoplamiento de este freno con la primera parte de la bancada es necesario el uso de una reductora para que el freno pueda proporcionar suficiente par de frenado en el eje lento.

El motor es de tipo asíncrono trifásico de jaula de ardilla, usado en configuración triángulo a 50 Hz. En condiciones nominales de funcionamiento los valores de corriente, velocidad y potencia son 1.82 A, 1370 rpm y 0.37 kW respectivamente.

El freno en condiciones nominales de funcionamiento tiene unos valores de corriente, voltaje y par de 9.1 A, 390 V y 10.8 Nm / 3.9 kW respectivamente.

La configuración de las diferentes reductoras está especificada en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones de las reductoras

Tipo	Ubicación	Relación de reducción	Número de dientes
Paralela	Acoplada al motor	10.3	Piñón = 10 Engranaje = 103
Planetaria de 1 etapa	Acoplada a la reductora paralela	5.77	Anillo = 62 Planetas =24 Sol = 13
Planetaria de 2 etapas	Acoplada al freno	24.6	1 etapa Anillo = 62 Planetas =24 Sol = 13 2 etapa Anillo = 62 Planetas =21 Sol =19

Las especificaciones comerciales de estos componentes se pueden ver en el anexo A.

Para la adquisición de las señales de vibración fueron usados 4 acelerómetros (Tabla 3) distribuidos en las posiciones axial y radial de las reductoras localizadas en el lado derecho de la bancada de pruebas (Figura 24). La corriente del motor eléctrico también fue medida en cada una de sus fases, al igual que la velocidad del eje lento que fue medida con un sensor laser en un disco con 24 orificios (Figura 25). Ésta es la configuración usual que se puede encontrar en un aerogenerador real para la medición de la velocidad en el eje lento, en la cual el paso de los orificios se mide mediante un sensor inductivo.

Tabla 3. Especificaciones de los acelerómetros

Ubicación	Referencia	Rango de frecuencia	Rango de medición
Axial planetaria	ICP 352C65	$(\pm 5\%)$ 0.5 to 10 kHz	± 50 g pk
Radial planetaria			
Axial Paralela			
Radial Paralela			

El sistema de adquisición de datos está formado por equipos de National Instruments, con los cuales se registran los valores de vibración, velocidad y corriente del sistema, y se controla la velocidad del motor. El software utilizado para configurar el hardware es el Measurement & Automation Explorer (MAX) de National Instruments versión 4.5.0f0. Una descripción más detallada tanto del sistema de adquisición de datos como de los sensores utilizados, se puede encontrar en el anexo A.

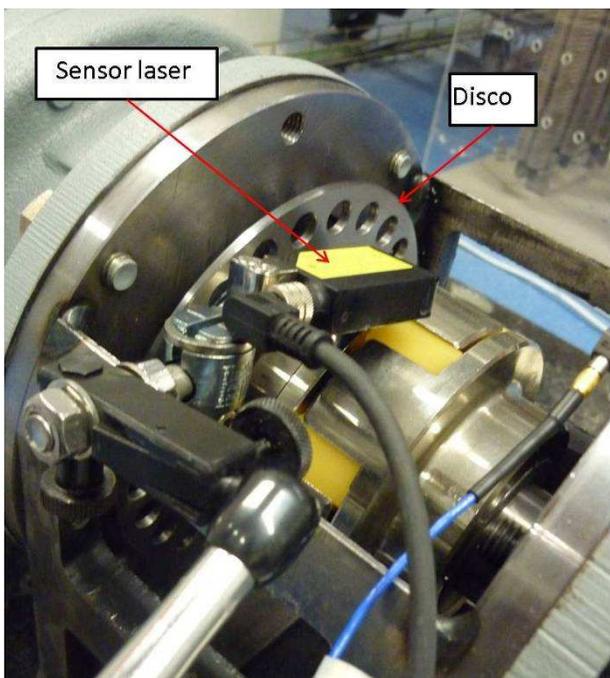


Figura 25. Sensor laser y disco de medición

6.2. Fallos simulados

Los fallos simulados en la bancada de pruebas fueron desequilibrio, desalineamiento en el eje lento y fallo en las dos etapas planetaria y paralela de engranajes, empezando con un valor pequeño del defecto e incrementándolo en cada grupo de nuevas mediciones para simular de esta forma un fallo progresivo. La Tabla 4 presenta los valores de masa de desequilibrio en gramos y su porcentaje equivalente con respecto a la masa total del rotor de la bancada de pruebas, y el espesor de la lámina usada para el desalineamiento y su respectivo ángulo de desalineamiento.

Tabla 4. Tipo de defectos de desequilibrio y desalineamiento

Desequilibrio			Desalineamiento		
Tipo/etiqueta	gr	%	Tipo/etiqueta	mm	°
A	5.79	0.077	A	0.75	0.78
B	9.13	0.12	B	2	1.53
C	19.5	0.26			
D	28.8	0.38			

Así mismo, se abordó el reto de simular fallos en los engranajes. Inicialmente, se trato de provocar un fallo progresivo y natural en los engranajes con los que cuentan las cajas de engranajes, pero no fue posible debido a que los engranajes no están sometidos a cargas muy altas y hubiese tomado un tiempo de experimentación demasiado elevado. Para lograr un fallo evolutivo se optó por provocar fallos discretos manualmente cada cierto número de capturas. La Tabla 5 presenta las imágenes de los niveles de fallo para el engranaje de la etapa planetaria realizados por medio de mecanizado, ataque químico, aplicación de laser o remoción de material por medio de un disco de corte de metal.

Tabla 5. Niveles de defectos de engranaje etapa planetaria

Tipo/etiqueta		Tipo/etiqueta	
Nivel 1 Mecanizado		Nivel 2 Ataque químico	
Nivel 3 Ataque químico		Nivel 4 Disco de corte de metal	
Nivel 5 Laser		Nivel 6 Laser	
Nivel 7 Laser		Nivel 8 Disco de corte de metal	
Nivel 9 Disco de corte de metal		Nivel 10 Disco de corte de metal	

La Tabla 6 presenta las imágenes de los niveles de fallo para el engranaje de la etapa paralela realizados por medio de remoción de material por medio de un disco de corte de metal.

Tabla 6. Niveles de defectos de engranaje etapa paralela

Tipo/etiqueta		Tipo/etiqueta	
Nivel 1 Disco de corte de metal I		Nivel 2 Disco de corte de metal I	
Nivel 3 Disco de corte de metal		Nivel 4 Disco de corte de metal	

6.3. Adquisición de datos y procesamiento

Para garantizar las condiciones de velocidad y carga variable, fueron generados diferentes perfiles para cubrir un rango aleatorio de velocidad entre 1000 y 1800 rpm, y un rango entre 0 y 100% de carga, un ejemplo de estos perfiles se muestra en la Figura 26. Alrededor de 100 capturas fueron hechas para cada rango de velocidad y de carga.

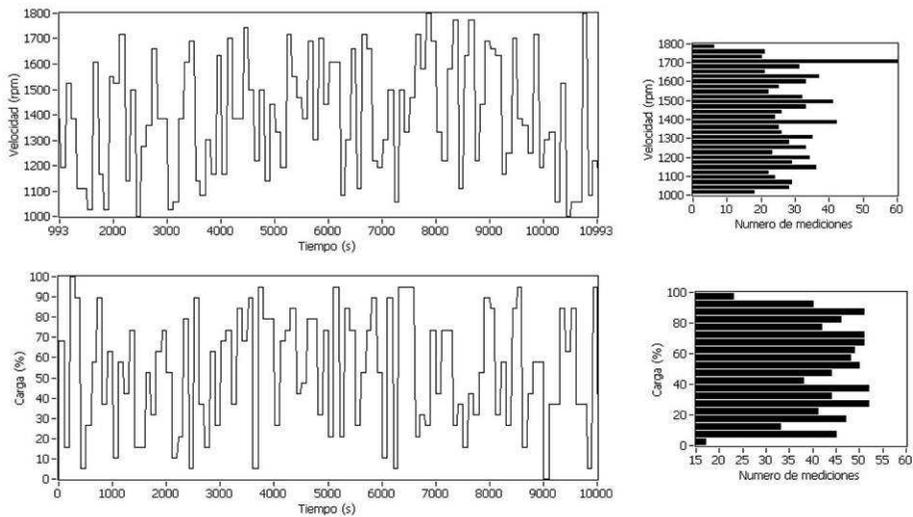


Figura 26. Perfiles de velocidad y carga

Estos perfiles fueron generados para cubrir un día completo de mediciones (24h), con intervalos constantes de velocidad y carga cada 100 segundos, lo que equivale a 864 cambios de velocidad y carga durante esas 24h. Fue escogida una velocidad de 1000 rpm como velocidad inicial para este rango porque esta es aproximadamente la velocidad equivalente cuando un aerogenerador comienza a generar energía conectado a la red. Se realizaron capturas de 72 segundos (para las condiciones de sin fallo, desalineamiento, desequilibrio y fallo en engranajes planetarios) y capturas de 13 segundos (para la condición de fallo en engranajes paralelos) con una precisión de frecuencia equivalente de 0.014 Hz, con cada uno de los cuatro acelerómetros con una frecuencia de 25600 Hz. La señal capturada de velocidad en el eje lento, usada para el remuestreo angular, fue muestreada a una frecuencia de 6400 Hz. Las señales medidas fueron procesadas de forma automática para calcular los espectros de ordenes (de acuerdo al algoritmo de remuestreo explicado en el capítulo 5) y los espectros de frecuencia.

Adicionalmente, fueron realizadas para la condición sin fallo, para las dos condiciones de desalineamiento y para las cuatro condiciones de desequilibrio, mediciones para una rampa de velocidad de 10 a 1800 rpm con una aceleración de 10 rpm/s y tres diferentes condiciones de carga, siendo un total de 21 rampas. El objetivo de estos experimentos fue determinar las frecuencias y ordenes relevantes para el estudio de los fallos. A continuación se detalla este análisis de ordenes realizado.

6.4. Selección experimental de variables

A partir de las rampas de velocidad mediante un análisis de tiempo-frecuencia (Figura 27), fueron determinados los ordenes (líneas oblicuas) y las frecuencias naturales características (líneas horizontales) del sistema detectadas con cada uno de los acelerómetros instalados en la bancada de pruebas.

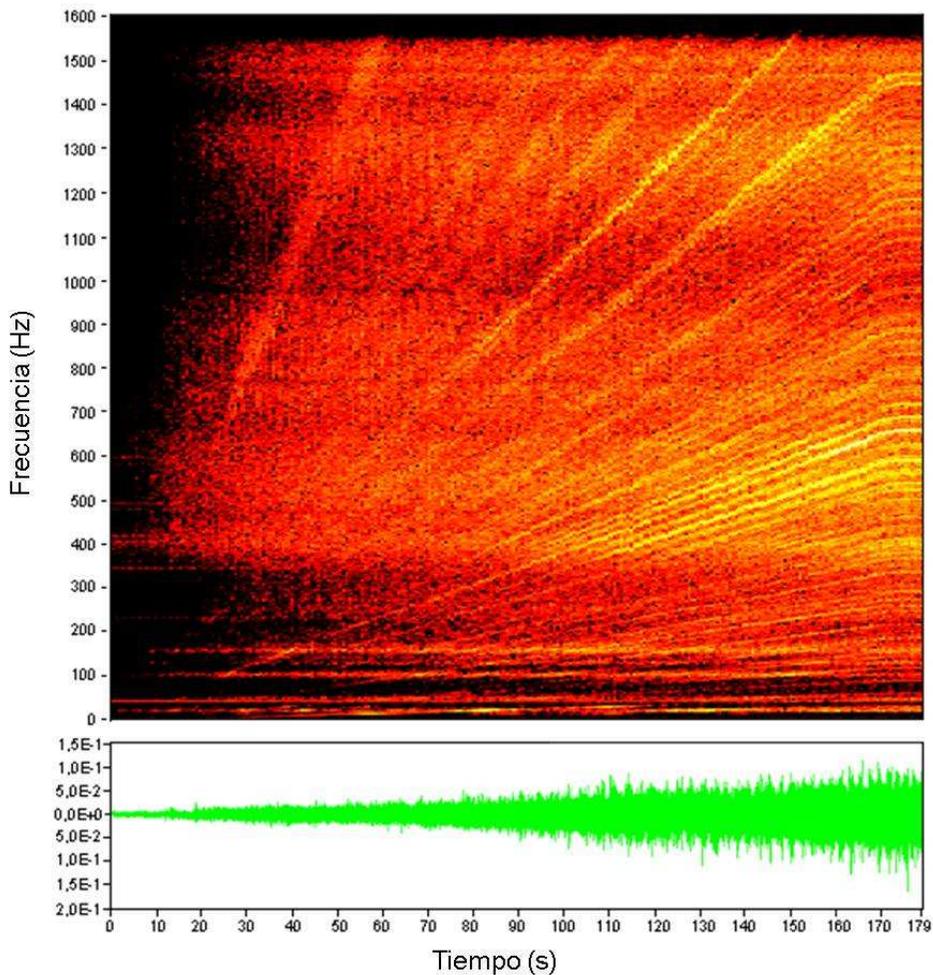


Figura 27. Análisis tiempo frecuencia de una rampa de velocidad del sensor axial paralela

Adicionalmente a estas frecuencias y ordenes calculados experimentalmente, fueron añadidas las siguientes variables: la corriente de las tres fases del motor, los armónicos de orden 1 a 10 de la velocidad del eje lento, un grupo de parámetros estadísticos de análisis de vibración extraídos de la señal en el dominio del tiempo (como la media y la desviación estándar) y los ordenes característicos de fallo para elementos específicos como son los engranajes, resultando finalmente

un grupo de 166 variables (Tabla 7). En el anexo B se recoge el listado de las variables de partida analizadas.

Tabla 7. Variables monitorizadas

Tipo de variable	Número de variables
VARIABLES ESTADÍSTICAS	5
VARIABLES ELÉCTRICAS	4
Ordenes del 1X al 10X	10
Engranajes	12
Ordenes comunes para los 4 acelerómetros	58
Bandas de frecuencia comunes para los 4 acelerómetros	40
Bandas de frecuencia axial planetaria	15
Bandas de frecuencia radial planetaria	4
Bandas de frecuencia axial paralela	10
Bandas de frecuencia radial paralela	8

Este grupo de variables ha sido monitorizado a partir de los espectros de vibración (en ordenes y frecuencia) calculados para cada fallo simulado en la bancada de pruebas. Para el cálculo de los espectros de ordenes, el método de remuestreo angular presentado en [Villa11a] y en el capítulo 5 es aplicado a las señales capturadas para resolver el problema del “esparcimiento”⁹ generado por la variabilidad en velocidad y carga. Después de este procesamiento, la energía de la banda establecida para el pico que corresponde a cada variable es calculada.

En la Figura 28 se presenta un resumen del total de datos analizados. La cantidad de datos correspondientes a los fallos de engranajes es muy superior al del resto de los fallos, debido a que se ha tratado de provocar una evolución progresiva y natural del fallo que finalmente no ha sido

⁹ Denominado “smearing” en la literatura inglesa

posible. Las bajas cargas a las que están sometidas estos elementos mecánicos en la bancada construida, requerirían unos tiempos de experimentación demasiado elevados.

Fallo	Nivel	# capturas	señales	variables	Total x fallo	Total datos
Sin fallo		887	3548	588,968	588,968	
	A	872	3488	579,008	1,133,448	
Desalineamiento	B	835	3340	554,440		
	A	847	3388	562,408	2,264,240	
B	856	3424	568,384			
C	843	3372	559,752			
Desequilibrio	D	864	3456	573,696	30,492,872	
	1	1776	7104	1,179,264		
	2	2608	10432	1,731,712		
	3	2857	11428	1,897,048		
Engranajes planetarios	4	1795	7180	1,191,880	11,018,416	
	5	2292	9168	1,521,888		
	6	564	2256	374,496		
	7	1444	5776	958,816		
	8	1010	4040	670,640		
	9	1056	4224	701,184		
Engranajes paralelos	10	1192	4768	791,488	15,487,800	
	1	6321	25284	4,197,144		
	2	3793	15172	2,518,552		
	3	8618	34472	5,722,352		
	4	4593	18372	3,049,752		

Figura 28. Resumen del total de datos analizados

Capítulo 7

7. Selección de variables de diagnóstico

Los contenidos del presente capítulo y de los capítulos sexto y octavo, son parte del artículo "Statistical fault diagnosis based on vibration analysis for gear test-bench under non-stationary conditions of speed and load" el cual se encuentra en proceso de segunda revisión en la revista Mechanical Systems and Signal Processing.

Debido al gran número de variables que debe ser analizado, es necesario reducirlas para seleccionar aquellas más sensibles a los fallos que se están simulando, también es importante determinar que sensores son los más sensibles para lograr un diagnóstico completo con el menor número de sensores posible. A continuación se presenta el método utilizado para ésta reducción.

7.1. Selección de variables por regresión lineal

En éste primer análisis, el nivel de vibración en todo el rango de funcionamiento de cada variable es comparado para cada uno de los fallos simulados (ver ejemplo Figura 29). Después de éste análisis se puede apreciar claramente que los fallos no pueden ser detectados o separados tomando solo en consideración el nivel de vibración calculado para cada variable.

Este suele ser el enfoque clásico del diagnóstico basado en vibraciones donde se trata de asignar un umbral para los parámetros de vibración bajo condiciones normales de funcionamiento.

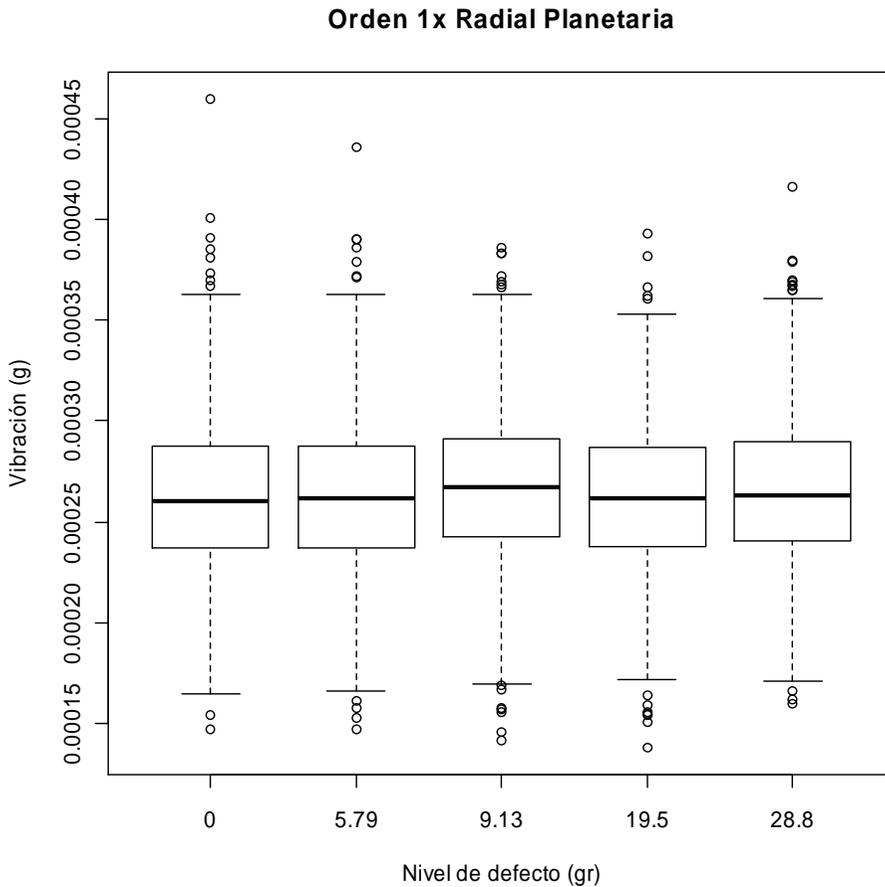


Figura 29. Box-plot para el orden 1X del sensor radial planetaria en función del desequilibrio simulado

Debido a que la velocidad es un parámetro controlado durante el proceso de adquisición de datos, se procede a determinar si cada variable calculada es sensible cuando ésta no solamente depende del fallo sino también de la velocidad. La Figura 30 presenta un ejemplo del defecto de desalineamiento para un intervalo de velocidad (medido en el eje lento de la bancada de pruebas el intervalo va desde 0.28 Hz hasta 0.51 Hz). Los diferentes niveles de defecto (marcados en diferentes colores) pueden

ser distinguidos claramente para un rango de velocidad (desde 0.28 Hz hasta 0.51 Hz).

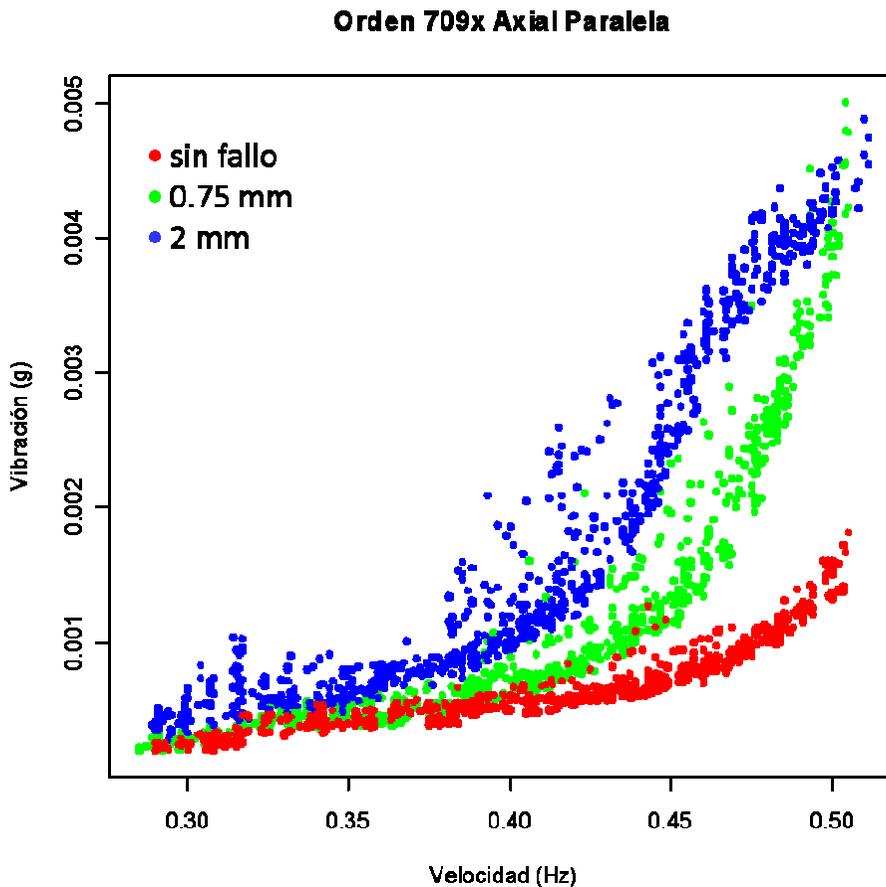


Figura 30. Gráfica para el orden 709X del sensor axial paralela en función de la velocidad y el desalineamiento

Pero ésta distinción no se da en todas las variables de vibración calculadas como se puede apreciar en la Figura 31, correspondiente al orden 10 de la vibración en dirección axial, por eso hay que buscar otros parámetros que ayuden a determinar la diferencia entre datos con y sin fallo.

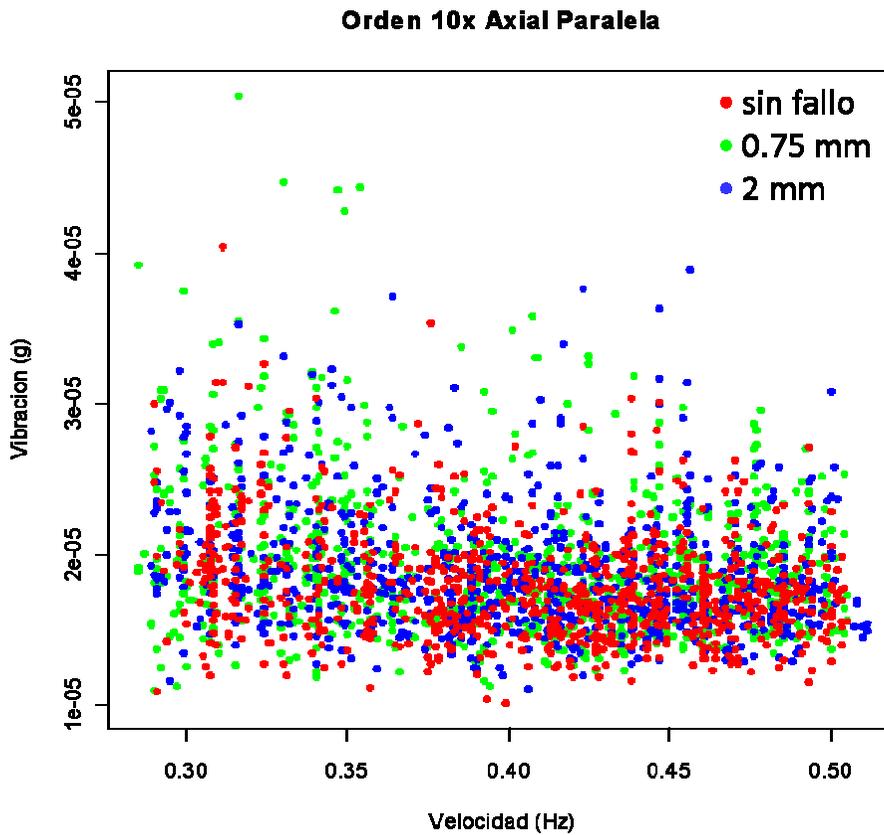


Figura 31. Gráfica para el orden 10X del sensor axial paralela en función de la velocidad y el desalineamiento

Adicionalmente a la velocidad, el nivel de carga es también un parámetro controlado durante los experimentos. Así, la influencia en cada variable es modelada con un modelo de regresión que toma en consideración la velocidad, la carga y una agrupación de factores (una variable cualitativa) que representa el nivel de fallo simulado en cada caso.

La ecuación del modelo es:

$$Y = (b_0 + b_3 F) + b_1 S + b_2 L \quad (4)$$

Donde Y es la vibración dependiente de la velocidad S , la carga L y el nivel de fallo F (ver tablas 4 á 5 con cada uno de los niveles de fallo). El término $b_0 + b_3 F$ es el valor en el origen, que depende del tipo de fallo F , b_1 es la pendiente de la velocidad y b_2 es la pendiente de la carga.

La variable nivel de fallo F , se introduce en la regresión como una variable de tipo *categorica*, que permite separar los datos en poblaciones diferentes para cada fallo y de esta puede averiguarse si los parámetros de vibración analizados son estadísticamente diferentes para cada fallo [Montgomery98, Faraway09].

Analizando la significancia estadística de los diferentes parámetros del modelo, especialmente del nivel de fallo F , se puede estimar que tan significativo puede ser el fallo para la variable analizada. Con el fin de realizar un análisis cuantitativo la significancia estadística se ha codificado con un color (Figura 32). Así, el conjunto completo de las variables calculadas puede ser analizado visualmente para cada uno de los cuatro sensores. En ésta figura se puede observar que las primeras tres filas de la tabla de coeficientes corresponden con el punto de intersección del modelo lineal y las pendientes de los parámetros de velocidad y carga. El resto de las filas corresponde con el nivel de fallo. En la Tabla 4 fueron presentados los cuatro niveles de fallo probados para el desequilibrio (A, B, C y D) y los dos niveles de desalineamiento (A y B).

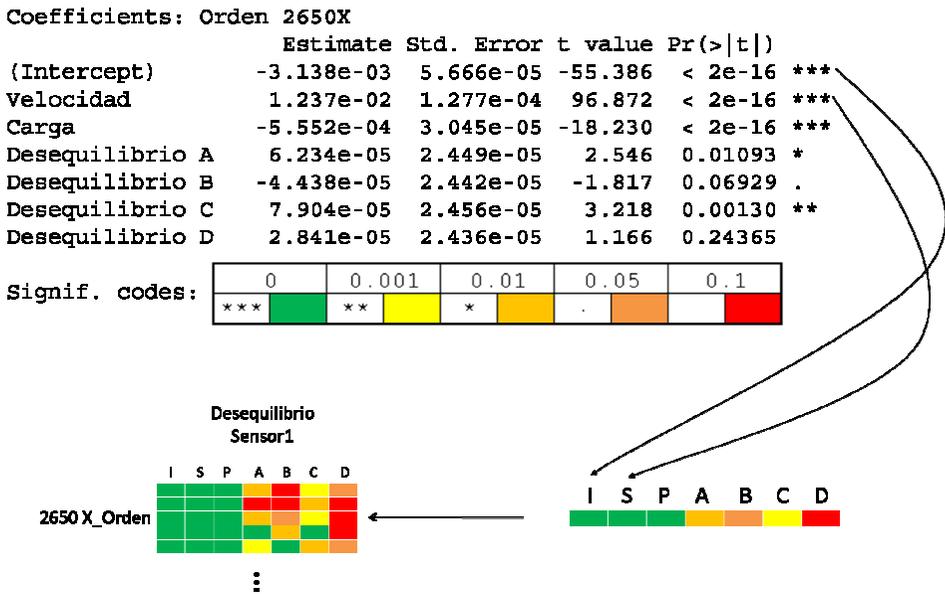


Figura 32. Modelo lineal para el orden 2650X para el factor de desequilibrio

Con el modelado lineal de los parámetros de velocidad, carga y fallo se pueden determinar cuáles variables son más sensibles al fallo y por ello deben ser monitorizadas. Basado en éste análisis, se ha realizado una selección de las variables más significativas para la detección de los fallos. La Figura 33 muestra éste análisis para todas las variables analizadas (166, ver Tabla 7), para todos los sensores utilizados (4) y todos los fallos simulados (4).

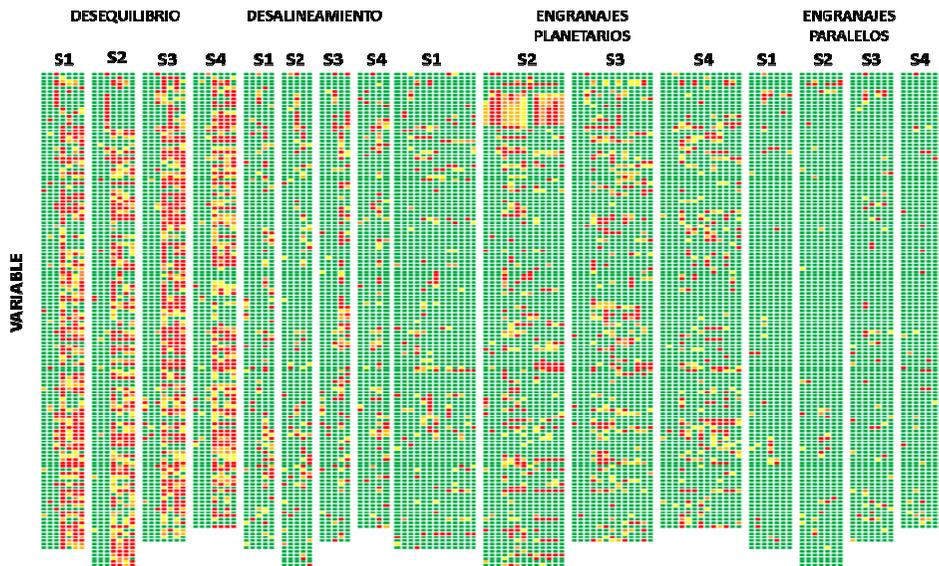


Figura 33. Resumen del modelado lineal para todas las variables por fallos

Donde:

S1: sensor axial paralela

S2: sensor axial planetaria

S3: sensor radial paralela

S4: sensor radial planetaria

De las 166 variables iniciales, para el desalineamiento fueron detectadas 133 variables que son sensibles a los 2 niveles de fallo, para el desequilibrio 45 variables son sensibles a los 4 niveles de fallo, en el caso de los engranajes planetarios 90 variables son sensibles a los 10 niveles de fallo y para los engranajes paralelos 155 variables son sensibles a los 4 niveles de fallo, ver Figura 34.

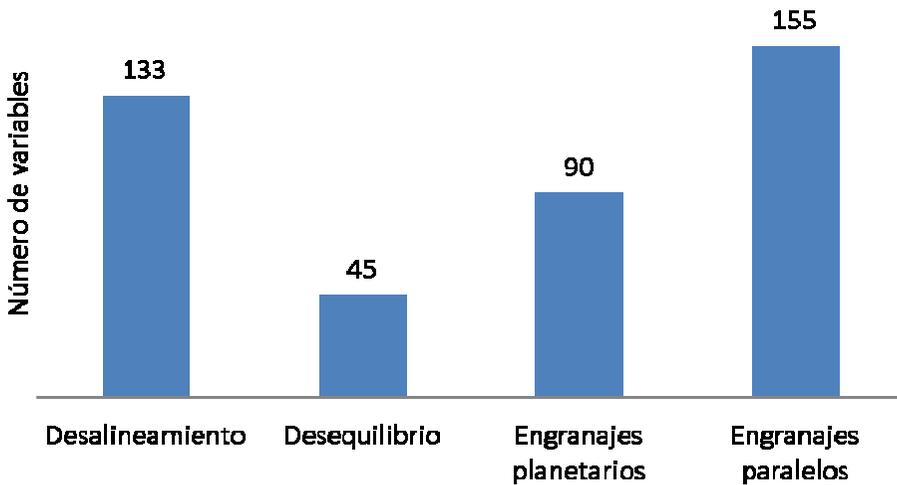


Figura 34. Resumen variables sensibles por fallos

De la selección anterior de variables, puede concluirse que el desalineamiento es más sensible que el desequilibrio y por ello más fácil de ser detectado. La principal razón es que la cantidad de desequilibrio probado es muy pequeño (por debajo del 0.4% de la masa del rotor, ver Tabla 4) y ésta masa de desequilibrio está aplicada a un eje que rota con una velocidad muy baja (menor a 1Hz) como es el caso de la velocidad del eje lento de un aerogenerador.

En el caso del desalineamiento aunque el número de variables analizadas y sensibles es muy alto, para llevar a cabo el diagnóstico se recurrirá al primer y segundo armónicos (ordenes 1x y 2x) en dirección radial y axial que son los parámetros clásicos usados para detectar este tipo de fallo.

En el caso de los engranajes, el fallo en los engranajes en la etapa paralela es más sensible que el fallo en los engranajes en la etapa planetaria y por ello más fácil de ser detectado. La principal razón es que

la velocidad a la que giran estos engranajes es mayor que la velocidad a la que giran los engranajes de la etapa planetaria que puede llegar a ser menor a 1Hz como es el caso de la velocidad del eje lento de un aerogenerador.

En la monitorización de sistemas, lo ideal es adquirir la mayor cantidad de información con el mínimo número de sensores. A continuación se presenta que sensores son más sensibles a los fallos simulados (Figura 35).

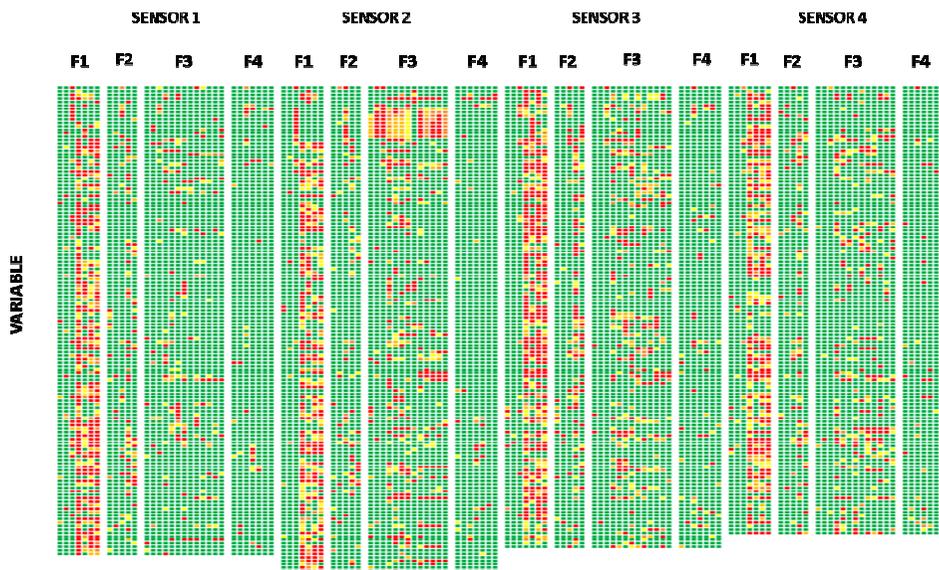


Figura 35. Resumen del modelado lineal para todas las variables por sensor

Donde:

F1: Desequilibrio

F2: Desalineamiento

F3: Engranajes planetaria

F4: Engranajes paralela

En la Figura 36 se presenta ésta reducción de variables de forma numérica para cada tipo de sensor.

Tipo de variable	Número de variables																
	Número variables original	Desequilibrio				Desalineamiento				Engranajes planetaria				Engranajes paralela			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Variables estadísticas	5	1	1	1	1	4	5	4	4	2	1	3	1	5	3	5	5
Variables eléctricas	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ordenes del 1X al 10X	10	4	10	0	1	9	10	6	8	6	0	3	6	7	9	8	10
Engranajes	12	3	1	0	3	5	8	9	8	6	3	5	4	12	9	7	10
Ordenes comunes para los 4 acelerómetros	58	2	8	0	9	31	36	20	33	29	15	15	16	55	57	50	52
Bandas de frecuencia comunes para los 4 acelerómetros	40	3	7	5	1	19	25	13	21	17	5	9	8	33	31	31	34
Bandas de frecuencia axial planetaria	15	0	0	0	0	0	11	0	0	0	3	0	0	0	14	0	0
Bandas de frecuencia radial planetaria	4	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2
Bandas de frecuencia axial paralela	10	0	0	0	0	7	0	0	0	7	0	0	0	6	0	0	0
Bandas de frecuencia radial paralela	8	0	0	2	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	6	0
Total	186	13	27	8	18	75	98	57	74	67	27	35	35	120	123	107	113

Figura 36. Reducción de variables por sensor

De forma descendente los sensores más sensibles a los fallos son sensor 2 (Axial planetaria), sensor 1 (Axial paralela), sensor 4 (Radial

planetaria) y sensor 3 (Radial paralela) como se puede apreciar en la figura resumen (Figura 37) que se presenta a continuación.

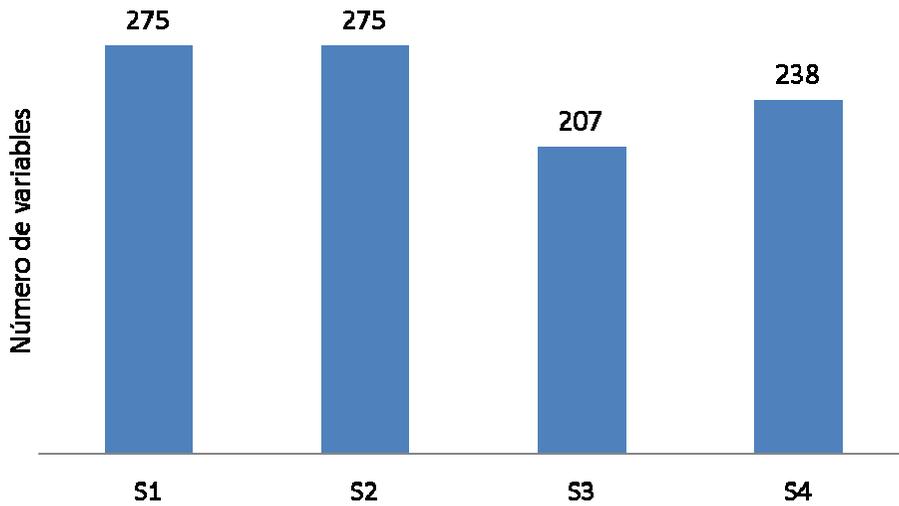


Figura 37. Resumen variables sensibles por sensor

Capítulo 8

8. Diagnóstico estadístico de fallos basada en un análisis de vibraciones bajo condiciones de velocidad y carga variable

En el capítulo anterior se han presentado una serie de parámetros calculados a partir de las medidas de vibración que permiten detectar la aparición de diferentes tipos de fallos bajo condiciones de velocidad y carga variable. En el presente capítulo se presentará un algoritmo destinado a realizar una diagnóstico que facilite una posterior pronóstico de los diferentes tipos de fallos. El objetivo es detectar la aparición del fallo incipiente y predecir su evolución.

8.1. Algoritmo de diagnóstico

El algoritmo de diagnóstico que se desarrollará está basado en la importancia estadística de los niveles de fallo en los modelos lineales de las variables calculadas y en las condiciones de funcionamiento del sistema. La idea detrás de este algoritmo es simular el comportamiento real de una máquina con un fallo en desarrollo y en cómo se puede detectar de forma fiable la aparición de nuevos valores de fallo en las variables seleccionadas. El reto consiste en la detección de estos nuevos valores (como diferentes estadísticamente), bajo una variación no estacionaria de velocidad y carga. Asimismo, se pretende que el parámetro estadístico usado para diferenciar la condición normal de la condición de fallo incipiente permita realizar una predicción de la evolución del fallo y determinar su severidad.

El punto de partida para el algoritmo presentado en la Figura 38 es el cálculo del modelo sin fallos. Después de esto, se añaden progresivamente nuevos valores al modelo etiquetados como valores de fallo. Inicialmente se añadirán valores correspondientes a una situación normal, pero etiquetados como valores de fallo con el fin de comprobar la robustez del método. El resultado es un modelo similar al presentado en la ecuación (4), donde la variable categórica F tiene sólo dos niveles, uno correspondiente a la situación sin defectos y el otro correspondiente a los nuevos valores que pueden representar, o no, una situación defectuosa.

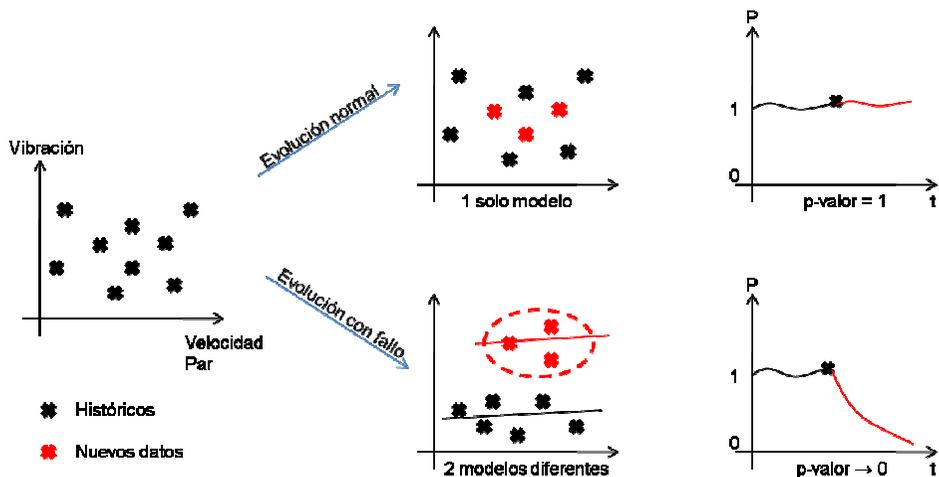


Figura 38. Método de diagnóstico

Con el fin de evaluar si estos nuevos valores corresponden a una situación defectuosa, el nivel de significancia (comúnmente designado como p-valor en estadística) de este parámetro F en el modelo de análisis de varianza debe ser vigilado. Cuando el parámetro F es estadísticamente significativo, su p-valor asociado es muy bajo debido al hecho de que la probabilidad de cometer un fallo en el caso de rechazo de este parámetro también es muy baja. Se trata pues de datos que son estadísticamente diferentes y correspondientes a una situación de fallo.

8.2. Aplicación del algoritmo - desequilibrio

La Figura 39 muestra un ejemplo de la vibración del orden 2X en sentido axial de la reductora planetaria para los diferentes niveles de desequilibrio probados (marcados en diferentes colores). Analizando la Figura 39 los defectos no pueden ser distinguidos o separados claramente. El algoritmo presentado en ésta sección es capaz de diferenciar los valores de operación normal (marcados en rojo) de los valores en presencia de fallo, para las diferentes condiciones de velocidad y carga.

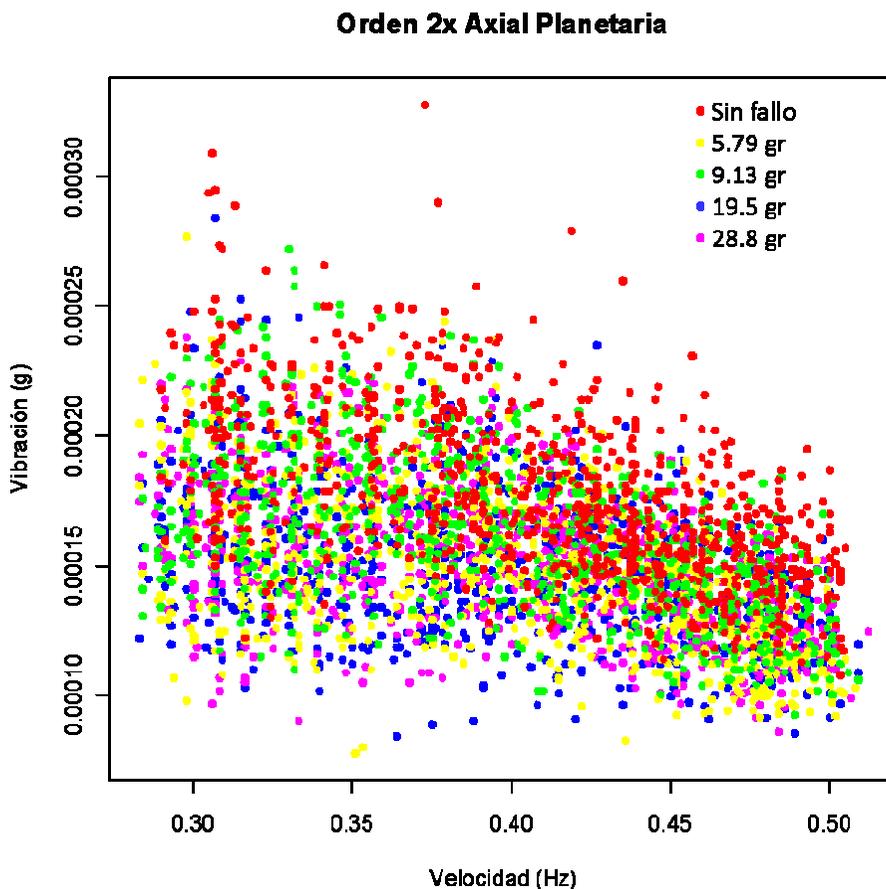


Figura 39. Gráfica para el orden 2X del sensor axial planetaria en función de la velocidad y el desequilibrio

En la Figura 40 se presenta un ejemplo de la evolución de acuerdo al algoritmo presentado en la Figura 38 del nivel de significancia para los parámetros en el modelo lineal que separan los valores normales de los de fallo. Se puede apreciar claramente que cuando nuevos valores correspondientes a una situación defectuosa (desequilibrio nivel D, ver Tabla 4) el nivel de significancia comienza a decrecer y se aproxima a 0. Antes del instante temporal 52, que corresponde a 24 horas de mediciones sin fallo el p-valor es muy alto (y el parámetro asociado no es significativo) debido al hecho de que los nuevos valores que se incorporan al modelo son correspondientes a una situación normal de funcionamiento. Después del instante 52, los valores correspondientes a la situación de fallo llegan al modelo y se convierten en significativos por lo que son muy pequeños. El nivel de significancia sigue aumentando (p-valor cada vez más pequeño) hasta el último instante temporal numerado como 103 que corresponde a 48 horas después del comienzo de la prueba.

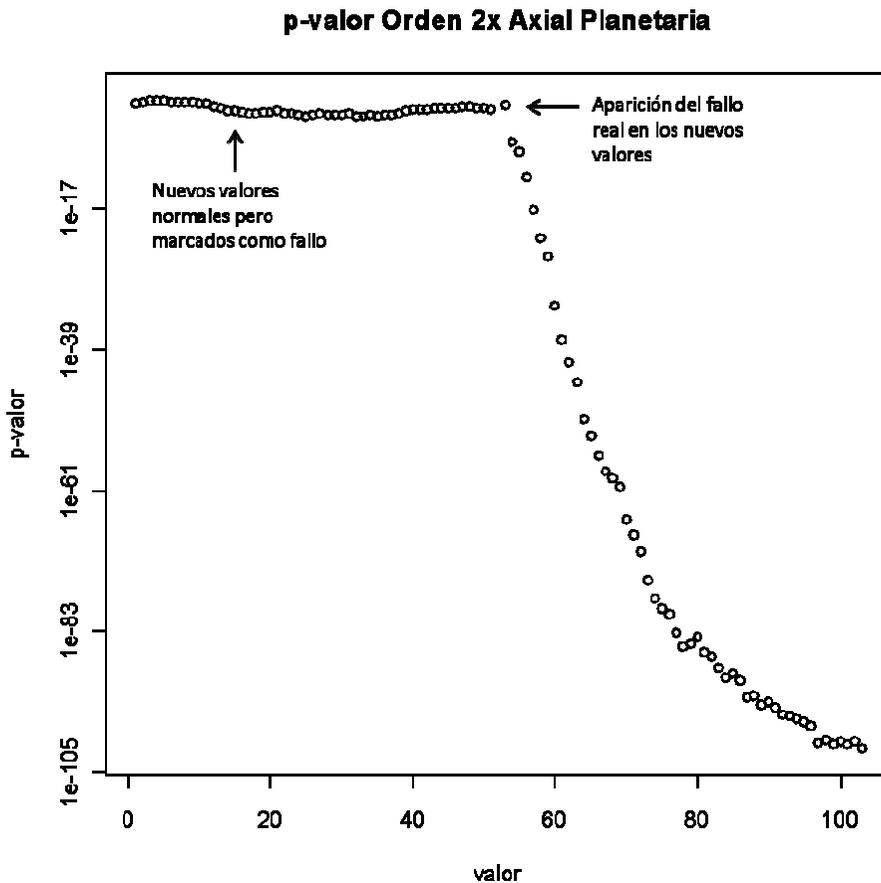


Figura 40. Evolución del p-valor para el orden 2X bajo condiciones sin fallo y de desequilibrio de nivel D. Duración de la prueba: 48 h

Como se comprueba en este ejemplo el parámetro estadístico denominado p-valor puede usarse para la detección del fallo, fijando un umbral adecuado y además permite realizar una predicción fiable de su evolución y por lo tanto del fallo.

En la Figura 41 se presenta un ejemplo de la evolución de este valor de significancia para todos los casos probados de desequilibrio. Se puede observar claramente que cuando los nuevos valores que son usados en

el modelo corresponden a una situación de fallo, los niveles de significancia comienzan a decrecer y se aproximan a 0. El fallo se detecta correctamente en todos los casos de desequilibrio, pero la pendiente de la tendencia del p-valor del fallo no aumenta con la severidad (desequilibrio creciente de masa). Esto se debe a que los valores de masa de desequilibrio que se han utilizado son muy pequeños (menores al 4%) en comparación con la masa total del rotor del banco de pruebas y a que la velocidad de rotación es muy baja (menor a 1 Hz).

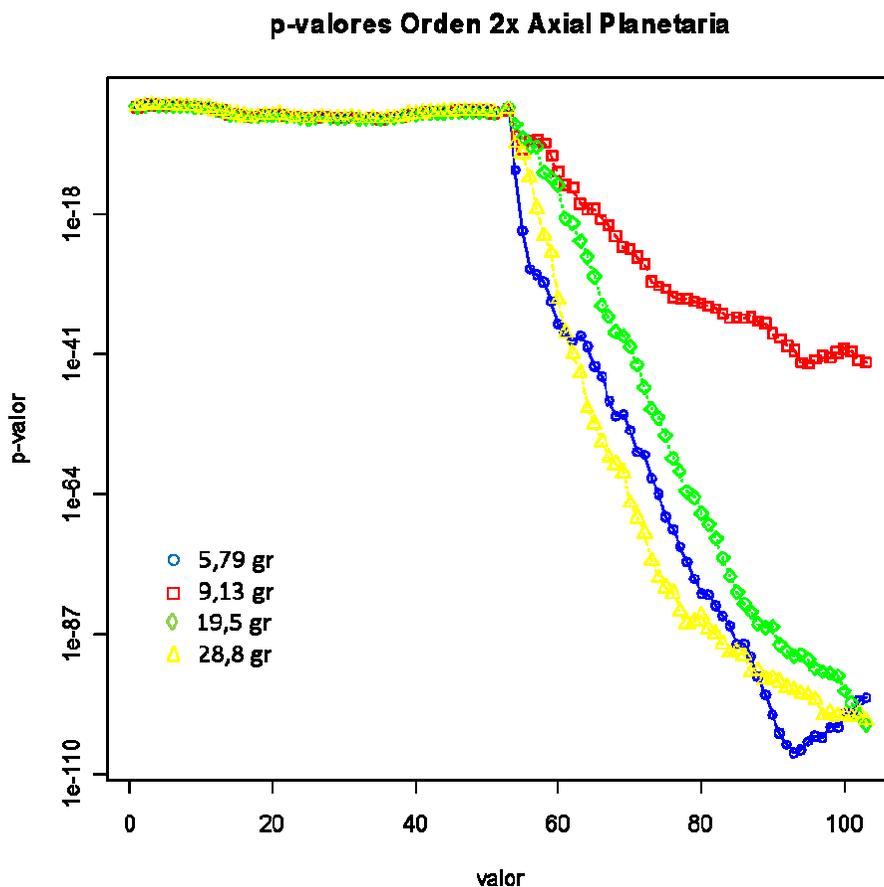


Figura 41. Evolución del p-valor para el orden 2X bajo todos los casos de la condición de desequilibrio

8.3. Aplicación del algoritmo – fallos en engranajes

La experimentación de fallos en engranajes se realizó provocando el fallo de forma discreta, en lugar de esperar una evolución de fallo natural debido a la lenta evolución del mismo.

Para el caso de la caja de engranajes planetaria se provocaron 10 niveles de fallo (ver Tabla 5). A pesar de que todos los niveles son detectados correctamente, no se aprecia un orden lógico de estos (ver Figura 42), esto puede deberse a que la velocidad a la que giran estos engranajes es muy pequeña (puede llegar a ser menor a 1Hz) y por ello el defecto hace contacto muy pocas veces durante la captura. Además, las diferentes intervenciones que se le realizaron al diente del engranaje en estudio fueron muy diferentes entre ellas (mecanizado, ataque químico, aplicación de laser o remoción de material por medio de un disco de corte de metal) y por ello no garantizan un fallo evolutivo.

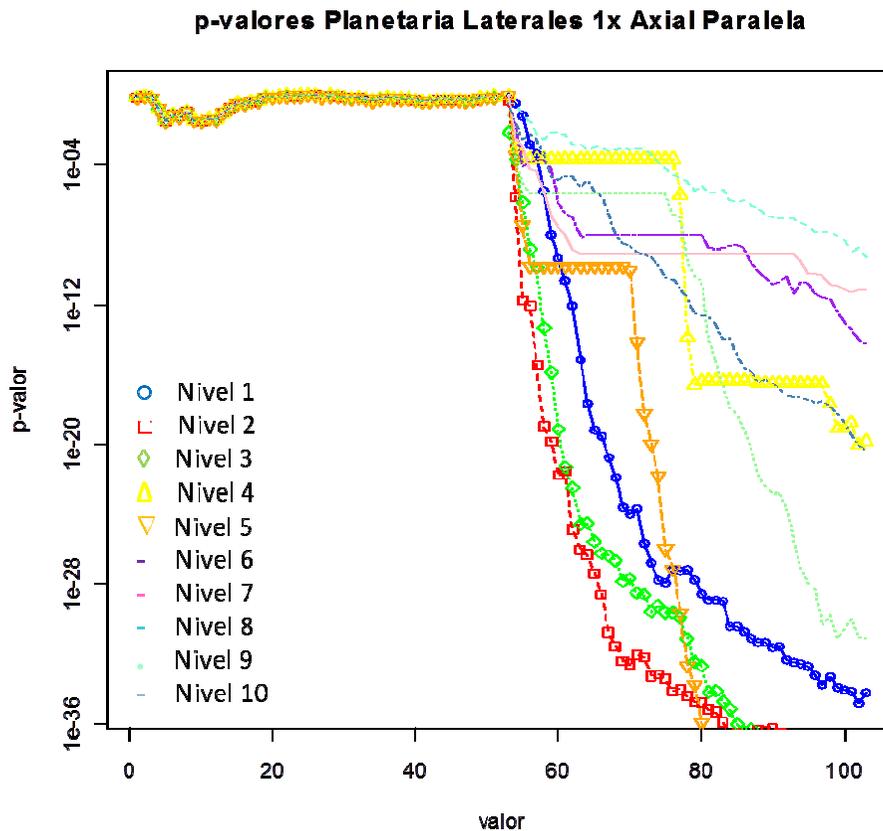


Figura 42. Evolución del p-valor para el orden planetaria laterales 1X bajo todos los niveles de fallo de engranaje reductora planetaria

Para el caso de la caja de engranajes paralela se provocaron 4 niveles de fallo (ver Figura 43). Este fallo es más sensible que el fallo en los engranajes en la etapa planetaria y por ello más fácil de ser detectado. La principal razón es que la velocidad a la que giran estos engranajes es mayor que la velocidad a la que giran los engranajes de la etapa planetaria que puede llegar a ser menor a 1Hz como es el caso de la velocidad del eje lento de un aerogenerador. El fallo se detecta correctamente en todos los casos de fallo de engranaje para la reductora

paralela. Además, la pendiente de la tendencia del p-valor del fallo aumenta con la severidad de este.

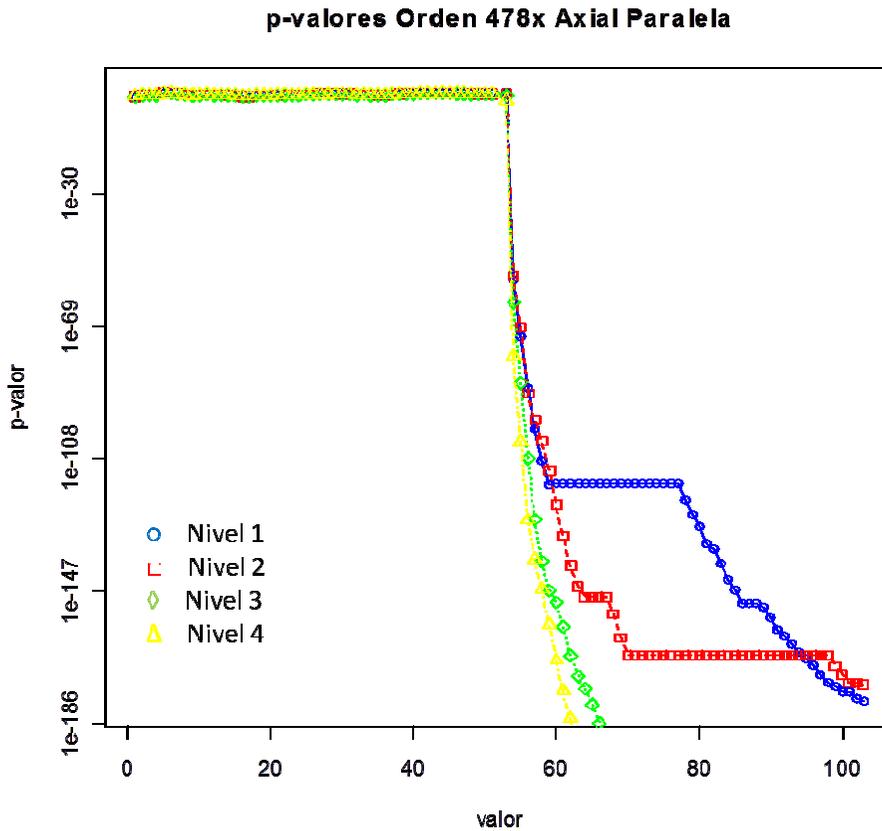


Figura 43. Evolución del p-valor para el orden 478X bajo todos los niveles de fallo de engranaje reductora paralela

En la Figura 44 se presenta un ejemplo de la evolución del nivel de significancia para los parámetros en el modelo lineal. La diferencia del ejemplo presentado en esta gráfica es que se han presentado de forma consecutiva los diferentes niveles de fallo provocados en la etapa paralela y además se ha tomado como situación base el primer nivel de fallo provocado.

Se puede apreciar claramente que cuando nuevos valores correspondientes a una situación defectuosa ingresan al modelo el nivel de significancia comienza a decrecer y se aproxima a 0. Desde el instante temporal 1 al modelo le empiezan a llegar valores con defecto y se ve su tendencia a decrecer, en el instante temporal 17 se aumenta el defecto y se observa un escalón que va hasta el instante temporal 39 donde se aumenta nuevamente el fallo, aquí se observa nuevamente otro escalón que va hasta el instante temporal 79 donde el fallo se hace más pronunciado y por ello el p-valor tiende más a cero.

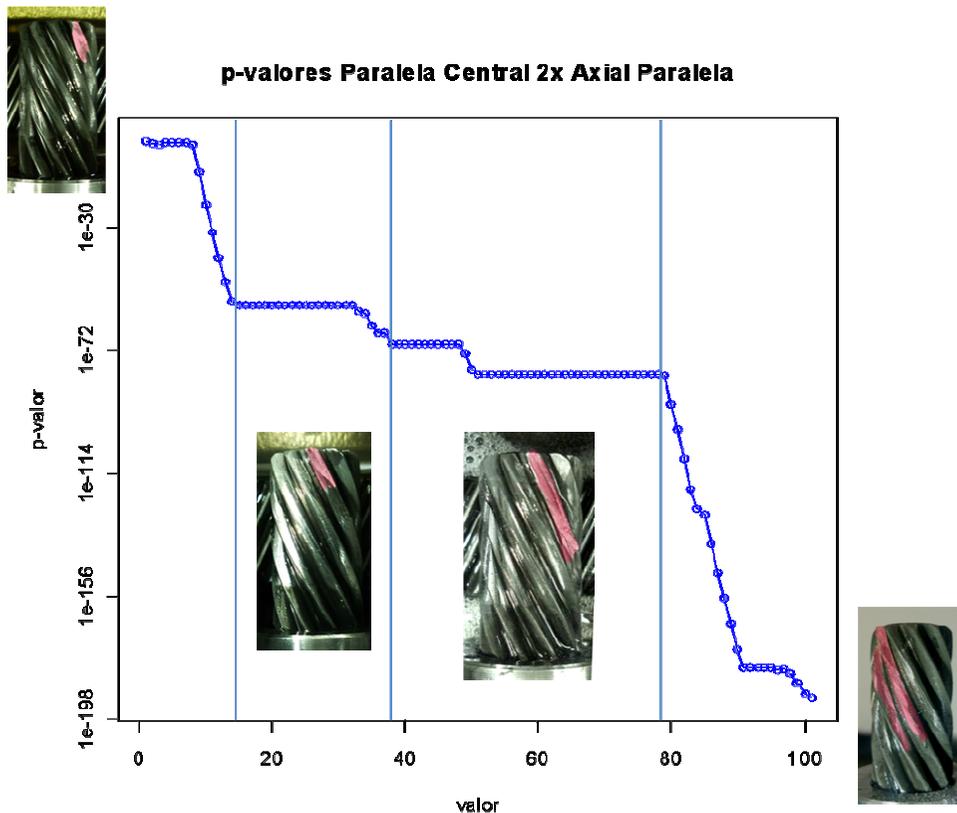


Figura 44. Evolución del p-valor para el orden paralelo central 2X bajo condiciones de fallo de engranaje en etapa paralela. Duración de la prueba: 1 mes

El algoritmo presentado en este capítulo permite realizar una diagnosis de los diferentes fallos a partir de un parámetro estadístico (p-valor). Este valor representa la significancia del parámetro del modelo que separa los datos correspondientes a la aparición de un fallo incipiente. Adicionalmente, este parámetro (p-valor) evolucionará de forma dinámica y podrá realizarse una predicción de su evolución en la realidad. Esta predicción permitirá realizar una estimación del tiempo en el que alcanzará un valor suficientemente relevante como para que el fallo diagnosticado sea irreparable. Esta predicción constituye la base de una prognosis efectiva e imprescindible para llevar a cabo lo que comúnmente se denomina “Mantenimiento Predictivo”.

Esta citada prognosis cae fuera del ámbito del presente trabajo de tesis y será acometida posteriormente a partir de datos reales de evolución de fallo en aerogeneradores.

Capítulo 9

9. Conclusiones y líneas futuras de investigación

En este último capítulo se presentan las conclusiones, resultados y principales aportaciones obtenidas durante el desarrollo de esta tesis. También se indican las líneas de investigación futuras abiertas como consecuencia de los resultados alcanzados.

9.1. Conclusiones

El trabajo de investigación expuesto a lo largo de los capítulos anteriores ha permitido obtener un algoritmo de diagnóstico para diferentes tipos de fallos, bajo un régimen de funcionamiento de velocidad y carga variable. El resultado es que el citado algoritmo de diagnóstico aprovecha las medidas de vibración en todo el rango de operación de la máquina objeto de estudio. Esto permite detectar con una mayor sensibilidad y anticipación fallos que serían difícilmente detectables mediante únicamente un nivel global de vibración en una determinada banda de frecuencia característica. Además, se ha podido compensar el problema del “esparcimiento” de frecuencias¹⁰ producido por altas variaciones de velocidad y carga por medio de un algoritmo de remuestreo angular que mejora los resultados alcanzados por los algoritmos existentes. También se desarrolló una plataforma de test y un software de captura, procesado y análisis, que puede ser utilizado en el diagnóstico de aerogeneradores. Esta plataforma se pudo probar en una bancada a escala en la que se simulaban diferentes fallos y condiciones de trabajo similares a las de un

¹⁰ Denominado “smearing” en la literatura inglesa.

aerogenerador. Con las simulaciones realizadas en esta plataforma se pudo desarrollar una metodología que permite la selección de variables y sensores que son más sensibles a las condiciones de funcionamiento del sistema y a los fallos que presenta.

En este trabajo de tesis se presentó un algoritmo de remuestreo angular adecuado para ser usado en aerogeneradores donde la variabilidad de la velocidad y la carga hacen que el remuestreo sea esencial, especialmente en el eje principal. Los algoritmos de la literatura se basan en el supuesto de que la aceleración es constante o que la variación de velocidad es muy pequeña, lo cual no es cierto para un caso real como los aerogeneradores. La principal mejora del algoritmo propuesto es que aprovecha toda la señal de velocidad, obteniendo con ello más precisión con el remuestreo angular. El algoritmo desarrollado se probó con señales simuladas, con señales del banco de pruebas y con señales reales de vibración y velocidad de aerogeneradores donde se ha comprobado la mejora aportada por el algoritmo respecto a los existentes en la literatura.

También se presentaron los resultados de un análisis estadístico de la vibración aplicado al banco de pruebas trabajando bajo altas variaciones de velocidad y carga. Como las señales son pre procesadas mediante remuestreo angular, los parámetros clásicos de vibración pueden ser utilizados para detectar fallos incipientes, como pequeños desequilibrios y desalineamientos. Se ha comprobado cómo a través de un modelo estadístico de vibraciones que tiene en cuenta el rango completo de trabajo del banco de pruebas (velocidad y carga) como parámetros independientes, se pueden determinar las variables que son más sensibles a estos parámetros y al fallo. Asimismo, se puede reducir el número de variables y los sensores a analizar. Esta reducción es vital de cara a una posterior implantación industrial más sencilla y económica. El

algoritmo de diagnóstico desarrollado y que se basa en la significancia estadística del modelo de fallo presentado, permite realizar una detección temprana de los diferentes fallos simulados. Algunos de estos fallos se encontraban en un estado incipiente como es el caso del desequilibrio. Esta detección de fallos incipiente resulta imprescindible para realizar una posterior estimación de vida útil o pronóstico. El algoritmo de diagnóstico desarrollado sienta las bases para un posterior algoritmo de pronóstico que permita predecir la evolución del fallo.

9.2. Líneas futuras de investigación

A partir de los resultados alcanzados en el presente trabajo se presentan a continuación una serie de líneas que pueden acometerse en un futuro:

- Verificación de las metodologías y algoritmos desarrollados en el presente trabajo de tesis en un aerogenerador de velocidad variable. Por circunstancias ajenas al trabajo de tesis, no se han podido realizar en el marco presente.
- Explicar la influencia en la respuesta modal. En base a experimentación previa, se ha detectado una gran variación en las frecuencias de resonancia bajo condiciones variables de carga (variación de los picos de resonancia con los diferentes grados de carga).
- Integración de medidas de potencia generada. Demostrar si la utilización de las medidas de potencia generada permitirá mejorar la diagnosis mediante el análisis de vibraciones y evaluar la sensibilidad de la potencia como parámetro de detección de averías, con el objetivo de simplificar la infraestructura de sensores necesaria, y evaluar la idoneidad de la potencia generada como principal parámetro de diagnóstico.

- Prueba de modelos no lineales con el fin de comprobar los algoritmos de diagnóstico a partir de variables de diagnóstico con tendencia no lineal. Se deben fundamentalmente a interacciones del régimen variable de trabajo con modos de vibración del sistema mecánico.
- Desarrollar un algoritmo de prognosis, basado en los algoritmos de diagnóstico presentados en el presente trabajo de tesis.

Bibliografía

[Aeeolica] Asociación empresarial eólica. Eólica 2008 anuario del sector: análisis y datos. Disponible en internet en: www.aeeolica.es

[Antoni04] J. Antoni, F. Bonnardot, A. Raad and M. El Badaoui. Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. Mechanical systems and signal processing, 18(2004), 1285-1314, 2004.

[Barszcz09] T. Barszcz and R. B. Randall. Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine. Mechanical systems and signal processing, 23(2009), 1352-1365, 2009.

[Bartelmus09a] W. Bartelmus and R. Zimroz. Vibration condition monitoring of planetary gearbox under varying external load. Mechanical systems and signal processing, 23(2009), 246-257, 2009.

[Bartelmus09b] W. Bartelmus and R. Zimroz. A new feature for monitoring the condition of gearboxes in non-stationary operating conditions. Mechanical systems and signal processing, 23(2009), 1528-1534, 2009.

[Bartelmus10] W. Bartelmus, F. Chaari, R. Zimroz and M. Haddar. Modelling of gearbox dynamics under time-varying nonstationary load for distributed fault detection and diagnosis. European journal of mechanics A/Solids, 29(2010), 637-646, 2010.

[Baydar00] N. Baydar and A. Ball. Detection of gear deterioration under varying load conditions by using the instantaneous power spectrum. *Mechanical systems and signal processing*, 14, 907-921, 2000.

[Baydar01] N. Baydar, Q. Chen, A. Ball and U. Kruger. Detection of incipient tooth defect in helical gears using multivariate statistics. *Mechanical systems and signal processing*, 15, 303-321, 2001.

[Beltrán00] P. Beltrán y A. López. El mantenimiento predictivo en aerogeneradores. Caso práctico: estudio de averías. 4^{to} congreso español de mantenimiento. Barcelona, 2000.

[Blaabjerg06] F. Blaabjerg and Z. Chen. *Power electronics for modern wind turbines*. Morgan & Claypool Publishers, United States of America, 2006. 68 pp.

[Blunt06] D. Blunt and J. Keller. Detection of a fatigue crack in a UH-60A planet gear carrier using vibration analysis. *Mechanical systems and signal processing*, 20(2006), 2095-2111, 2006.

[Bonnardot05] F. Bonnardot, M. El Badaoui, R. B. Randall, J. Danière and F. Guillet. Use of the acceleration signal of a gearbox in order to perform angular resampling (with limited speed fluctuation). *Mechanical systems and signal processing*, 19(4), 766-785, 2005.

[Bossley99] K. M. Bossley, R. J. Mckendrick, C. J. Harris and C. Mercer. Hybrid computed order tracking. *Mechanical systems and signal processing*, 13(4), 627-641, 1999.

[Bozchalooi08] I. S. Bozchalooi and M. Liang. A joint resonance frequency estimation and in-band noise reduction method for enhancing

the detectability of bearing fault signals. *Mechanical systems and signal processing*, 22(2008), 915-933, 2008.

[Caselitz94] P. Caselitz, J. Giebhardt and M. Mevenkamp. On line fault detection and prediction in wind energy converters. *Proceedings of the EWEC'94, Thessaloniki, 1994*. pp. 623 – 627.

[Caselitz96] P. Caselitz, J. Giebhardt and M. Mevenkamp. Development of a fault detection system for wind energy converters. *Proceedings of the EUWEC'96, Göteborg, 1996*. pp. 1004 – 1007.

[Caselitz97] P. Caselitz, J. Giebhardt, M. Mevenkamp. and M. Reichardt. Application of condition monitoring systems in wind energy converters. *Proceedings of the EWEC'97, Dublin, 1997*. pp. 579 – 582.

[Caselitz99] P. Caselitz and J. Giebhardt. Advanced condition monitoring system for wind energy converters. *Proceedings of the EWEC'99, Nice, France, 1999*.

[Caselitz02] P. Caselitz and J. Giebhardt. Advanced maintenance and repair for offshore wind farms using fault prediction techniques. *Proceedings of the EWEC'02, Berlin, Germany, 2002*.

[Caselitz05] P. Caselitz and J. Giebhardt. Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters. *Journal of solar energy engineering*, pp. 253-261, New York, 2005.

[Cempel07] C. Cempel and M. Tabaszewski. Multidimensional condition monitoring of machines in non-stationary operation. *Mechanical systems and signal processing*, 21(2007), 1233-1241, 2007.

[Combet07] F. Combet and L. Gelman. An automated methodology for performing time synchronous averaging of a gearbox signal without speed sensor. *Mechanical systems and signal processing*, 21, 2590-2606, 2007.

[Combet09] F. Combet and R. Zimroz. A new method for the estimation of the instantaneous speed relative fluctuation in a vibration signal based on the short time scale transform. *Mechanical systems and signal processing*, 23, 1382-1397, 2009.

[Creus08] A. Creus. *Aerogeneradores*. 1.^a ed. Ediciones Ceysa, 2008. 273 págs.

[Davies98] A. Davies. *Handbook of condition monitoring techniques and methodology*, Chapman and Hall, UK, 1998.

[Escudero08] J. M. Escudero. *Manual de energía eólica*. 2.^a ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 2008. 477 págs.

[Faraway09] J. Faraway. *Texts in statistical science, linear models with R*. Chapman & Hall/CRC, 2009, 242 pp.

[Flender] WinTControl for the condition monitoring of variable speed wind energy plant. Disponible en internet en: www.flender-cm.com

[Fyfe97] K. R. Fyfe and E. D. S. Munck. Analysis of computed order tracking. *Mechanical systems and signal processing*, 11(2), 187-205, 1997.

[Gamesa] Gamesa. *Aerogeneradores: diseño y desarrollo*. Disponible en internet en: www.gamesacorp.com

[Giao06] V. Giao y A. Ordóñez. Implantación de un sistema de mantenimiento predictivo de averías en el tren de potencia de un aerogenerador. Universidad de Sevilla, 2006.

[Giebel03] G. Giebel, L. Landberg and others. CleverFarm: first results from an intelligent wind farm. EUWEC'03 conference, 16 – 20 june, Madrid, Spain.

[Gunt04] Experiment instructions. Equipment for engineering education. Gunt Hamburg. G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Barsbüttel, Germany, 2004.

[Hahn05] B. Hahn, M. Durstewitz and K. Rohrig. Reliability of wind turbines. Institut für solare energieverorgungstechnik (ISET), Verein an der Universität Kassel, Kassel, Alemania.

[Hameed09] Z. Hameed, Y. S. Hong, Y. M. Cho, S. H. Ahn and C. K. Song. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: a review. Renewable and sustainable energy reviews, 13(1), 1-39, 2009.

[Hau06] E. Hau. Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics. Springer, 2006. 775 págs.

[Heng09] A. Heng, S. Zhang, A C. Tan, and J. Mathew. Rotating machinery prognostics: state of the art, challenges and opportunities. Mechanical systems and signal processing, 23(2009), 724-739, 2009.

[IFM] IFM Electronic. Disponible en internet en: www.ifm.com

[Jardine06] A. Jardine, D. Lin and D. Banjevic. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance . Mechanical systems and signal processing, 20(2006), 1483-1510, 2006.

[Johnson01] G. L. Johnson. Wind energy systems. Electronic edition. Manhattan, KS, 2001.

[Li05] Y. Li, F. Gu, G. Harris, A. Ball, N. Bennett and K. Travis. The measurement of instantaneous angular speed. Mechanical systems and signal processing, 19(2005), 786-805, 2005.

[Mathew06] S. Mathew. Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics. Springer, 2006. 241 págs.

[Mcfadden87] P. D. Mcfadden. Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration. Mechanical systems and signal processing, 3(1), 87-97, 1989.

[Mcfadden89] P. D. Mcfadden. Interpolation techniques for time domain averaging of gear vibration. Mechanical systems and signal processing, 1(2), 173-183, 1987.

[Mcfadden91] P. D. Mcfadden. A technique for calculating the time domain averages of the vibration of the individual planet gears and the sun gear in a epicyclic gearbox . Journal of sound and vibration, 144(1), 163-172, 1991.

[Molenaar03] D. P. Molenaar. Cost effective design and operation of variable speed wind turbines. DUP Science, Netherlands, 2003. 337 pp.

[Montgomery98] D. Montgomery and G. Runger. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. McGraw Hill, 1998, 895 págs.

[NIa] National instruments. Diagnóstico en Línea de Múltiples Aerogeneradores con Acceso Centralizado a Señales y Resultados. Disponible en internet en: www.ni.com/

[NIb] National instruments. Test and measurements. Disponible en internet en: www.ni.com/

[Offshore] Final public report of the EC project Offshore M&R. Disponible en internet en: www.ec.europa.eu

[PBC] PBC Piezotronics. Disponible en internet en: www.pcb.com/

[Renaudin10] L. Renaudin, F. Bonnardot, o. Musy, J. B. Doray and D. Rémond. Natural roller bearing fault detection by angular measurement of true instantaneous angular speed. Mechanical systems and signal processing, 24(2010), 1998-2011, 2010.

[Resor05] B. R. Resor, M. W. Trethewey and K. P. Maynard. Compensation for encoder geometry and shaft speed variation in time interval torsional vibration measurement. Mechanical systems and signal processing, 286(2005), 897-920, 2005.

[Rodríguez03] J. L. Rodríguez; J. C. Burgos y S. Arnalte. Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. Editorial Rueda, S. L., Madrid, 2003. 431 págs.

[Samuel05] P. D. Samuel and D. J. Pines. A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics. *Journal of sound and vibration*, 282, 475-508, 2005.

[SEDIPRE10] SEDIPRE. Diagnóstico de Fallos Aplicaciones. ISBN: 978-84-614-6570-5. 2010.

[Stander02] C. J. Stander, P. S. Heyns and W. Schoombie. Using vibration monitoring for local fault detection on gears operation under fluctuating load conditions. *Mechanical systems and signal processing*, 16, 1005-1024, 2002.

[Stander05] C. J. Stander and P. S. Heyns. Instantaneous angular speed monitoring of gearboxes under non-cyclic stationary load conditions. *Mechanical systems and signal processing*, 19, 817-835, 2005.

[Stander06] C. J. Stander and P. S. Heyns. Transmission path phase compensation for gear monitoring under fluctuating load conditions. *Mechanical systems and signal processing*, 20, 1511-1522, 2006.

[UpWinda] UpWind. Condition monitoring. Disponible en internet en: www.upwind.eu

[UpWindb] UpWind. Comparison of different wind turbine concepts due their effects on reliability. Disponible en internet en: www.upwind.eu

[UpWindc] UpWind. "state of the art" report condition monitoring for wind turbines. Disponible en internet en: www.upwind.eu

[Vachtsevanos06] G. Vachtsevanos, F. L. Lewis, M. Roemer, A. Hess and B. Wu. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems. John Wiley & Sons, inc, New Jersey, 2006. 434 pp.

[Verbruggen03] T. W. Verbruggen. Wind turbine operation and maintenance based on condition monitoring. Final report. 2003

[Villa11a] L. F. Villa, A. Reñones, J. R. Perán and L. J. Miguel. Angular resampling for vibration analysis in wind turbines under non-linear speed fluctuation, *Mechanical systems and signal processing* 25 (2011) 2157-2168.

[Villa11b] L. F. Villa, A. Reñones, J. R. Perán and L. J. Miguel. Statistical vibration analysis for predictive maintenance of machines working under large variation of speed and load. *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*. Montreal, Quebec Canada. September 25 – 29, 2011. ISBN: 978-1-936263-03-5.

[Villarrubia04] M. Villarrubia. *Energía eólica*. Ediciones Ceac, 2004. 323 págs.

[Wang95] W. J. Wang and P. D. Mcfadden. Application of orthogonal Wavelets to early gear damage detection. *Mechanical systems and signal processing*, 9(1995), 497-507, 1995.

[Wang04] W. Q. Wang, M. Golnaraghi and F. Ismail. Prognosis of machine health condition using neuro-fuzzy systems. *Mechanical systems and signal processing*, 18(2004), 813-831, 2004.

[Wiggelinkhuizen07] E. Wiggelinkhuizen, T. Verbruggen and others. CONMOW: Condition monitoring for offshore wind farms. EWEC'07 conference, 7 – 10 may, Milan, Italy.

[Windpower] Danish wind turbines manufacturers association. Guided tour on wind energy. Disponible en internet en: www.windpower.org

[Wu05] B. Wu, A. Saxena, R. Patrick and G. Vachtsevanos. Vibration monitoring for fault diagnosis of helicopter planetary gears. Proceedings of the 16th IFAC world congress, Czech Republic, 2005..

[Zhan06] Y. Zhan, V. Makis and A. K. S. Jardine. Adaptive state detection of gearboxes under varying load conditions based on parametric modelling. Mechanical systems and signal processing, 20(2006), 188-221, 2006.

[Zimroz11] R. Zimroz, and A. Bartkowiak. Investigation on spectral structure of gearbox vibration signals by principal components analysis for condition monitoring purposes. Journal of physics: conference series 305 (2011) 012075.

Anexos

Anexo A

En este anexo se recogen los detalles de los diferentes elementos usados en la bancada (ver Figura 24) así como la información correspondiente a la instrumentación usada en la captura de señales, y los diferentes sensores usados (ver Tabla 8).

- Motor Siemens de 3 fases jaula de ardilla, usado en configuración triángulo a 50 Hz. En condiciones nominales de funcionamiento los valores de corriente, velocidad y potencia son 1.82 A, 1370 rpm y 0.37 kW respectivamente.
- Caja de engranajes planetaria de referencia comercial 300 L 1 5.77 MC P90 ALH Bonfiglioli, perteneciente a la serie 3 de este tipo de cajas de engranajes, con diseño en línea y con una etapa de reducción de 5.77.
- Caja de engranajes paralela de referencia comercial S 30 1 F 10.3 P71 Bonfiglioli, perteneciente a la serie S de este tipo de cajas de engranajes de tamaño 30, con 1 etapa de reducción con una relación de reducción de 10.3, de forma constructiva F y configuración de entrada P71.
- Caja de engranajes planetaria de referencia comercial 300 L 2 MC P90 LH Bonfiglioli, perteneciente a la serie 3 de este tipo de cajas de engranajes, con diseño en línea y con dos etapas de reducción de 24.6.

- Freno Lucas Nüelle, referencia SE2663-6E. En condiciones nominales de funcionamiento los valores de corriente, voltaje y torque son 9.1 A, 390 V y 10.8 Nm / 3.9 kW respectivamente.

Tabla 8. Sensores y módulos de adquisición

<p>Acelerómetro ICP 352C65 e ICP 352C34 (PCB Piezotronics)</p>	 <p>[PCB].</p>	<p>Sensor miniatura (2 gm) de alta sensibilidad</p> <p>Sensibilidad: ($\pm 10\%$) 100 mV/g</p> <p>Rango de medición: ± 50 g pk</p> <p>Rango de frecuencia: ($\pm 5\%$) 0.5 - 10000 Hz</p> <p>Peso: 2.0 g</p>
<p>Sensor fotoeléctrico (IFM Electronic) OJ5058</p>	 <p>[IFM].</p>	<p>Sistema de reflexión directa.</p> <p>Carcasa rectangular de plástico.</p> <p>Conexión por conector.</p> <p>Bloqueo electrónico.</p> <p>Función externa de aprendizaje.</p> <p>Supresión de fondo.</p> <p>Alcance objeto blanco (90% de remisión): 7 – 150 mm</p> <p>Objeto más pequeño detectable: \varnothing 0.8 mm</p> <p>Diámetro de punto luminoso: 0.8 mm</p> <p>Tensión de alimentación: 10 – 30 V DC</p>
<p>NI cDAQ – 9172</p>	 <p>[Nlb].</p>	<p>El NI cDAQ – 9172 es un chasis USB de 8 ranuras diseñado para ser usado con los módulos I/O de la serie C.</p> <p>El chasis NI cDAQ – 9172 es capaz de medir un ancho rango de medidas análogas y digitales I/O y de sensores usando una interfaz USB 2.0 de alta velocidad.</p>

<p>NI 9233 4 canales, $\pm 5V$, módulo de entrada analógica 24 bit IEPE</p>	 <p>[Nlb].</p>	<p>El módulo NI 9233 tiene 4 conectores BNC que proveen conexión para 4 canales de muestreo simultaneo de entradas análogas. Cada canal tiene un conector BNC en el cual se puede conectar un sensor Integrado electrónico piezoeléctrico (IEPE). Este módulo mide las variables de vibración.</p>
<p>NI 9423 8 canales, hasta 30 V, 1 μs, módulo de entradas digitales</p>	 <p>[Nlb].</p>	<p>El módulo NI 9423 provee conexiones para 8 canales de entradas digitales. Cada canal tiene una terminal DI o pin en el cual se pueden conectar voltajes o señales. Este módulo mide las variables del encoder.</p>
<p>NI 9474 8 canales, de 5 a 30 V, 1 μs, módulo fuente de salidas digitales</p>	 <p>[Nlb].</p>	<p>El módulo NI 9474 provee conexiones para 8 canales de salidas digitales. Cada canal tiene una terminal DO o pin en el cual se pueden conectar dispositivos. Este módulo sincroniza las mediciones analógicas y digitales.</p>
<p>NI USB - 6009</p>	 <p>[Nlb].</p>	<p>El NI USB – 6009 provee conexiones para 8 canales de entrada análogas (AI), 2 canales de salida análogas (AO), 12 canales de entrada / salida digitales y 32 (DIO) y un contador de 32 bit con una interfaz USB de full velocidad. Este módulo mide controla el motor.</p>

Anexo B

En la Figura 45 que se presenta a continuación, se recogen las 166 variables que fueron monitorizadas durante los diferentes ensayos.

Las variables comunes para todos los acelerómetros son las que fueron capturadas con los 4 acelerómetros que se utilizaron, estas se componen de 5 variables estadísticas, 10 armónicos fundamentales, 58 ordenes y 40 bandas de frecuencia.

Para los engranajes se monitorizaron 12 variables, 6 ordenes característicos de los engranajes planetarios con los dos acelerómetros ubicados en la caja de engranajes planetaria, y 6 ordenes características de los engranajes paralelos con los dos acelerómetros ubicados en la caja de engranajes paralela.

Algunas variables solo fueron monitorizadas con un acelerómetro:

- Axial planetaria se monitorizaron 15 variables
- Radial planetaria se monitorizaron 4 variables
- Axial paralela se monitorizaron 10 variables
- Radial paralela se monitorizaron 8 variables

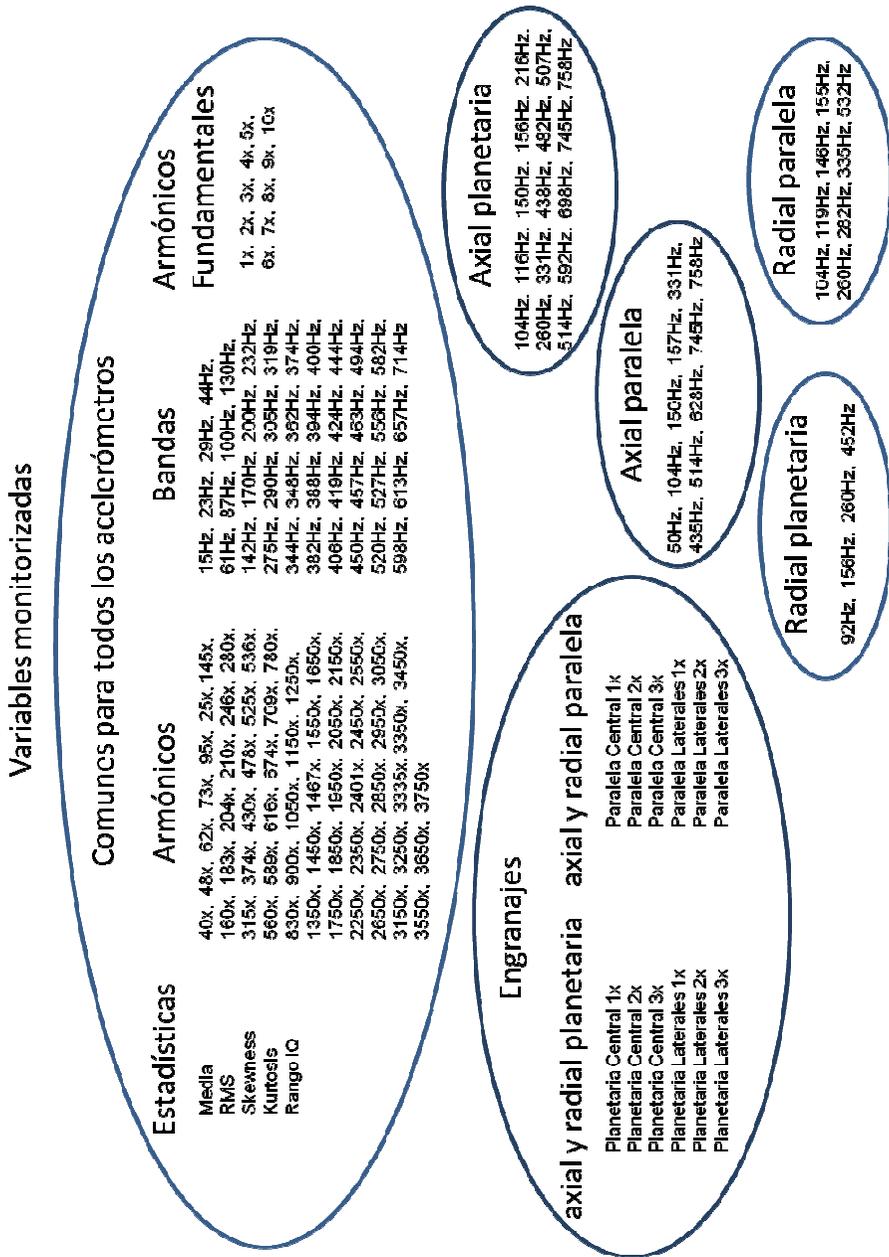


Figura 45. Variables monitorizadas