

MÁSTER UNIVERSITARIO EN MARINA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***<USO DE CARTAS MULTIVARIABLES
PARA LA MONITORIZACIÓN Y
OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO
DE UNA PLATAFORMA EÓLICA>***

Estudiante <García, Folgoso, Sendoa>
Director/Directora <Gómez, Solaetxe, Miguel Ángel>
Departamento
Curso académico <2019-2020>

Bilbao, 12, Septiembre, 2020>

Resumen

En el presente trabajo se ha intentado mejorar y optimizar el mantenimiento predictivo y detección de fallas de una plataforma eólica offshore. El propósito del trabajo se ha llevado a cabo con la realización de cartas de control multivariantes, utilizando la técnica de T^2 de Hotelling, la que nos permite relacionar y monitorizar todas las variables requeridas.

Para la simulación de las variables del generador eólico offshore se ha utilizado el software Labview, en el cual se han reproducido datos de funcionamiento normalizados y otros realizados con error, para después realizar la comparación mediante la técnica de control multivariante, con la ayuda de un software específico multivariante (QualStat). Esto dio como resultado un gráfico de control en el que se observó la desviación del proceso, respecto a las condiciones ideales del proceso.

Mediante los resultados obtenidos del trabajo se obtuvieron las conclusiones de que la técnica empleada para la monitorización y análisis del proceso aplicado a los generadores eólicos offshore, resultó de gran ayuda para la detección de desviaciones con la visualización de un gráfico, lo que sirve de gran ayuda a la hora de predecir y prevenir fallos y averías en los generadores.

Palabras clave: T^2 Hotelling, cartas multivariantes, monitorización, energía eólica, mantenimiento.

Laburpena

Lan honetan saiatu da hobetzen eta optimizatzen plataforma eoliko offshoreko mantentzeko lanak faila detekzioa eta predikzio bitartez. Lanaren asmoa burutu da kontrol gutun multialdagarriko errealizazioarekin Hotelling-eko T2-etako teknika erabiliz, honek aldagai guztiak erlazionatzea eta monitorizatzea baimentzen du.

Sorgailu eoliko offshorearen aldagaien simulazioa egiteko, Labview softwarea erabili da, non normalizatutako funtzionamendu datuak eta akatsarekin egindako beste batzuk erreproduzitu dira. Gero komparaketa egiteko kontrol multialdakorreko teknikaren bitartez egin da, software espezifikoa multialdakorreko laguntzarekin (QualStat). Honek emaitza bezala eman zuen kontrol grafiko bat non ikusten zen prozesuaren desbideratzea, prozesuaren baldintza idealak kontuan izanda.

Lanetik lortutako emaitzen bitartez, monitorizaziorako erabilitako teknika eta sorgailu eoliko offshoreei aplikatutako prozesuaren analisiaren konklusioak eskuratu ziren. Lagungarria izan zen grafiko bateko bistaratzearekiko desbideratze detekziorako. Horrek balio digu sorgailuetako matxurrak eta akatzak iragar eta aurre ikusteko orduan.

Hitz gakoak: T² Hotelling, gutun multialdagarria, monitorizazioa, energi eólikoa, mantentzeko-lanak.

Abstract

In the present work we have tried to improve and optimize the predictive maintenance and failure detection of an offshore wind platform. The purpose of the work has been carried out with the realization of multivariable control charts, using the Hotelling T² technique, which allows us to relate and monitor all the required variables.

For the simulation of the variables of the offshore wind generator, the software Labview has been used, in which standardized and other error-prone operating data have been reproduced, and then compared using the multivariate control technique, with the help of a specific multivariate software (QualStat). This resulted in a control graph in which the deviation of the process, from the ideal process conditions, was observed.

From the results obtained from the work, the conclusions were obtained that the technique used for monitoring and analysis of the process applied to offshore wind generators, was of great help in detecting deviations with the display of a graph, which is very helpful in predicting and preventing failures and breakdowns in the generators.

Key words: T² Hotelling, multivariable control chart, monitoring, wind power, maintenance.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. CONTEXTO	5
3. ESTADO DEL ARTE	7
4. PARTE TEÓRICA	24
4.1 Energía eólica offshore.....	24
4.1.1 Generadores eólicos offshore.....	26
4.2 Gráficos de control.....	29
4.2.1 Gráficos de control univariantes	41
4.2.2 Gráficos de control multivariantes	56
4.3 Monitorización de los generadores eólicos offshore	63
5. OBJETIVOS	68
6. MATERIALES Y METODOLOGÍA	70
6.1 Materiales utilizados	70
6.2 Metodología.....	71
6.2.1 Simulación de datos.....	72
6.3 Cálculos.....	75
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80
8. CONCLUSIONES.....	88
9. BIBLIOGRAFÍA	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Adquisición de datos SCADA de una turbina eólica.

Figura 2: Organigrama del sistema SCADA de un parque eólico.

Figura 3: Sistema SCADA.

Figura 4: Elementos principales del programa de control de un parque eólico.

Figura 5: Esquema del sistema de control se supervisión y adquisición de datos.

Figura 6: Componentes monitorizados de un aerogenerador.

Figura 7: Elementos del aerogenerador.

Figura 8: Monitoreo de temperatura.

Figura 9: Parque eólico offshore.

Figura 10: Aerogenerador offshore.

Figura 11: Energía eólica offshore.

Figura 12, 13, 14: Componentes de un aerogenerador.

Figura 15: Sistemas de generación y centro de transformación.

Figura 16: Cables interarray.

Figura 17: Diferentes cables para los distintos tramos.

Figura 18: Tipos de cimentaciones.

Figura 19: Plataformas flotantes.

Figura 20: Plataforma tipo SPAR.

Figura 21: Plataforma tipo Semis-Sub.

Figura 22: Plataforma tipo TLP.

Figura 23: Proceso de las gráficas de control.

Figura 24: Campana de Gauss.

Figura 25: Características de la campana de Gauss.

Figura 26: Gráfica Shewart.

Figura 27: Gráfico Cusum.

Figura 28: Gráfico Cusum.

Figura 29: Gráfico Ewma.

Figura 30: Gráfico T^2 de Hotelling.

Figura 31: Sensores de medición.

Figura 32: Metodología para evaluación del indicador de riesgo.

Figura 33: Esquema general de implementación de CMS-FDS en un parque eólico.

Figura 34: Aerogenerador de 2MW.

Figura 35: HDS generado en Labwiev.

Figura 36: Gráfica Q-Q.

Figura 37: Datos simulados con error.

Figura 38: HDS.

Figura 39: Carta de control T2.

Figura 40: Variable 5 comparada con la 1 y la 4.

Figura 41: Variable 5 comparada con la 1, 2 y 3.

Figura 42: Variable 5 comparada con la 1, 2, 3 y 4.

Figura 43: Variable 3 comparada con la 1, 2, 4 y 5.

Figura 44: Variable 3 comparada con la 1, 4 y 5.

Figura 45: Variable 3 comparada con la 1, 2 y 5.

Figura 46: Variable 4 comparada con la 1.

Figura 47: Variable 4 comparada con la 1 y 5.

Figura 48: Variable 4 comparada con la 1, 2, 3 y 5.

Figura 49: Variable 1 comparada con la 2, 3 y 4.

Figura 50: Variable 1 comparada con la 2 y 3.

Figura 51: Variable 1 comparada con la 2 y 4.

Figura 52: Variable 2 comparada con la 1.

Figura 53: Variable 2 comparada con la 1 y 3.

Figura 54: Variable 2 comparada con la 1, 2, 3 y 5.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables generadas por un aerogenerador.

Tabla 2: Valores de una variable.

Tabla 3: Constantes para determinar los límites de control de los gráficos.

Tabla 4: Especificaciones técnicas del aerogenerador.

Tabla 5: Correlación de Pearson.

ACRÓNIMOS

SCADA: Control de supervisión y adquisición de datos.

CMS: Sistema de monitoreo de condición.

WTG: Aerogenerador.

DFIG: Generador de inducción doblemente alimentado.

PMSG: Generador síncrono de imanes permanentes de accionamiento directo.

HSS: Temperatura del cojinete de engranaje.

SNR: Relación de señal-ruido.

HVSG: High Voltage Shore Connection.

AESA: Agencia Española de Seguridad Aérea.

CA: Corriente alterna.

TLP: Tension leg plataform.

UCL: Limite de nivel superior.

LCL: Limite de nivel inferior.

HDS: Histórico set de datos.

ARL: Longitud media de racha.

1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son una serie de alternativas que despertaron en su día mucha ilusión social, pero en las que se ha avanzado de forma moderada, en general, teniendo el reto de desarrollarlas continuamente. Dentro de las energías renovables la energía eólica es la energía renovable más madura y desarrollada. Se trata de una fuente de energía limpia e inagotable, que reduce la emisión de gases de efecto invernadero y preserva el medioambiente utilizando como fuente de energía el viento en los aerogeneradores. En 2017, la energía eólica proporcionó el 4,1% de la producción mundial de electricidad. Sin embargo, en algunas regiones, como Europa y América del Norte, su participación alcanzó niveles tan altos como 9.5% y 5.6%, respectivamente. Los aerogeneradores pueden instalarse tanto en tierra firme como en la mar, denominados como onshore y offshore. Para que la energía eólica marina sea exitosa, el desarrollo de grandes turbinas eólicas con una calificación de más de 10 MW se considera clave para la reducción de costos de las aplicaciones de energía eólica marina. Hoy, las turbinas de 9.5 MW están en operación y una turbina de 12 MW ha sido probada y comienza a operar comercialmente este año. En 2030, podemos ver turbinas de hasta 20 MW. La tecnología de turbinas eólicas se desarrollará aún más utilizando nuevos materiales y control y monitoreo avanzados, lo que la hace completamente competitiva con la generación eléctrica convencional. Las reducciones de costos en flotación en alta mar permitirán desarrollar nuevas áreas geográficas donde la disponibilidad de tierra previamente limitada o la falta de aguas poco profundas obstaculizaron el desarrollo de la energía eólica.[1],[2]

Para este trabajo nos vamos a centrar en los generadores eólicos offshore a pesar de que las variables a monitorizar son prácticamente las mismas que en los generadores instalados en tierra. El mantenimiento y monitoreo de un generador eólico offshore es un tema que depende de muchas variables por lo que ha sido seleccionado como principal aspecto a analizar y estudiar en el presente trabajo. En la actualidad, la gran mayoría de generadores eólicos offshore trabajan con sistemas informáticos de monitorización para mejorar y facilitar el mantenimiento y la detección de fallos en las diferentes partes de los generadores. En el presente trabajo, queremos enfocar la investigación en la monitorización de parámetros de operación de los generadores eólicos. En el último cuarto del siglo XX, la monitorización de cualquier proceso en general y de las turbinas eólicas

concretamente, ha alcanzado tal dimensión, en la cual las casas fabricantes han desarrollado potentes herramientas de adquisición de datos, que ha derivado en un crecimiento de la computarización y monitorización que permite el registro en tiempo real con frecuencias de hasta milisegundos de una gran cantidad de variables. El actual nivel de competencia existente en el sector eólico hace que las empresas locales deban lograr y mantener un alto nivel de calidad en sus productos. Los aerogeneradores se encuentran a menudo en zonas remotas con difícil acceso. El diagnóstico remoto permite limitar las visitas de servicio al mínimo e incluso solucionar problemas en remoto sin comprometer nunca la fiabilidad y detectando posibles errores antes de que se agraven. En el interior de cada turbina hay más de 300 sensores que transmiten más de 200 gigabytes de datos al día a los centros de diagnóstico remoto y los análisis avanzados y la monitorización constante convierten los datos en conocimiento de valor. Esto significa que podemos predecir y prevenir y anticipar tiempos de inactividad, hacer que los parques eólicos se monitoricen en función del estado y ampliar la vida útil de las turbinas.[3]

En este trabajo se pretende mostrar la utilidad del Control Estadístico de Procesos en los generadores eólicos offshore tras la adquisición de datos a través de SCADA, para el desarrollo de un buen mantenimiento. Concretamente, se diseñan gráficos de control utilizando la técnica multivariante T^2 de Hotelling para vigilar de forma conjunta algunas de las variables que se monitorean en los generadores eólicos detectando desviaciones bruscas de un proceso concreto, teniendo también la capacidad de detectar desviaciones progresivas y de baja magnitud, con reducción del número de variables monitorizadas sin pérdida de información relevante del proceso.

2. CONTEXTO

El presente trabajo de fin de máster titulado: “uso de cartas multivariantes para la monitorización y optimización del mantenimiento de una plataforma eólica”, ha sido desarrollado en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, dentro del edificio de Portugalete “Ingeniería Marina”, de la Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Principalmente se basa en la utilización del software Labview para la simulación y monitorización de un generador eólico offshore y la realización de la técnica Hotelling T^2 multivariante para analizar variables de funcionamiento con el objetivo de la mejora del mantenimiento.

3. ESTADO DEL ARTE

En el presente apartado se lleva a cabo la realización de una revisión del estado del arte actual sobre la monitorización de variables en los generadores eólicos offshore. Debido a las grandes cargas variables y las agresivas condiciones de operación, las turbinas eólicas offshore están sujetas a tasas de falla relativamente altas y sus señales de medición que reflejan los parámetros de monitoreo de condición son eminentemente variables y están sujetas a un amplio rango dinámico. A este respecto, mantenerse alejado de averías costosas y llevar a cabo una operación con un rendimiento aceptable requiere la implementación de sistemas avanzados de monitoreo y diagnóstico de condición que se desarrollen específicamente para turbinas eólicas. El análisis de datos nos permite una planificación del mantenimiento inteligente. La clave para crear aerogeneradores inteligentes de verdad está en la monitorización de las variables de funcionamiento de los generadores. Los sensores de las turbinas transmiten continuamente datos a los centros de diagnósticos de las empresas, para que a posterior un modelo digital use estos valores para predecir el estado de cada aerogenerador. Estos modelos examinan el clima, la información de la pieza, los informes de mantenimiento y el rendimiento de modelos similares en la flota global para determinar cuándo y cómo debería revisarse una turbina con días, semanas, meses e incluso años de antelación. Esta capacidad de predicción reduce revisiones de mantenimiento no planificadas y periodos de inactividad, lo que añade semanas de producción rentable. Para la monitorización de las turbinas eólicas es necesario instalar sensores en los aerogeneradores y a través de ellos se tendrá una recopilación de datos históricos en el sector. A través de amplias competencias técnicas combinadas con la experiencia en operación y mantenimiento se detectaran futuras anomalías. El tamaño cada vez mayor de las turbinas eólicas y el movimiento para construirlas en alta mar han acelerado la necesidad de estrategias de mantenimiento optimizadas para reducir los costos operativos. El mantenimiento predictivo requiere información detallada sobre el estado de las turbinas. Debido a los altos costos de los sistemas dedicados de monitoreo de condición basados principalmente en mediciones de vibraciones, el uso de datos del Sistema de Control de Supervisión de Turbinas y Adquisición de Datos (SCADA) es atractivo. SCADA es un acrónimo que significa "Control de supervisión y adquisición de datos".[4]

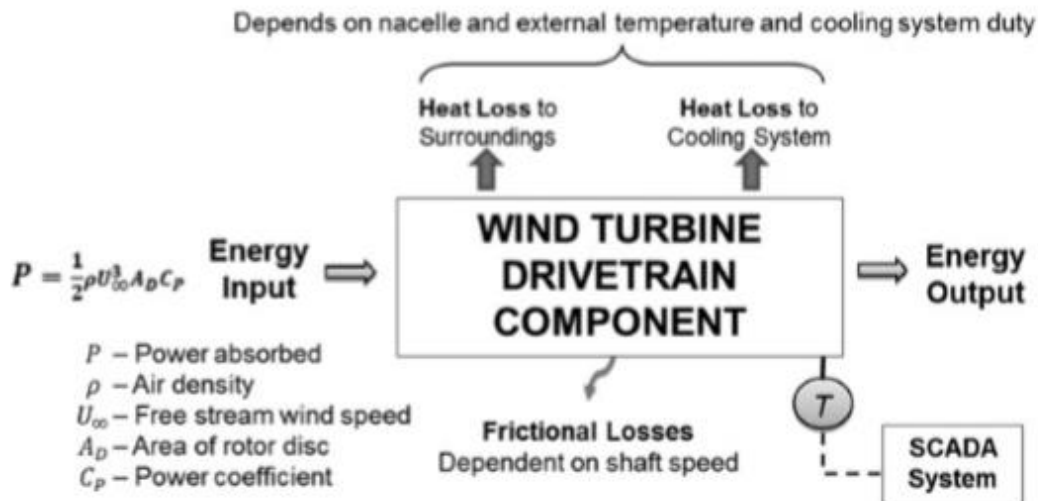


Figura 1: Adquisición de datos SCADA de una turbina eólica.

Es una herramienta fundamental para monitorear y controlar varios parámetros de los aerogeneradores y habitualmente se vende junto con las turbinas. Permite combinar, en un único punto de control, toda la información sobre las turbinas de viento, sirviendo como la interfaz principal entre el operador de la planta eólica y el equipo del parque eólico, enviando señales entre ellas. Las características fundamentales requeridas para un sistema SCADA de un parque eólico son:

1. Integrar en un solo sistema, la subestación y la torre de información meteorológica.
2. Permitir un acceso interrumpido a los datos desde la PC local normalmente ubicada en el edificio de la subestación y desde computadoras remotas.
3. Permitir modificar varios parámetros del sistema de control de las turbinas.
4. Cada protocolo de comunicación utilizado por una parte del sistema debe ser compatible con los demás.
5. Se debe definir una jerarquía clara de todos los usuarios básicamente para garantizar la seguridad de las personas que trabajan dentro de la máquina.
6. Se deben mostrar varios parámetros para cada componente. Normalmente, se requiere al menos lo siguiente:

Aerogenerador: estado (en funcionamiento, listo, en pausa, detenido), potencia (kW), cos ϕ , velocidad (rotor, generador, viento), temperaturas, voltaje y corriente de cada fase, alarmas activas.

Mástil meteorológico: Velocidad y dirección del viento, temperatura, presión, estado de la batería.

Subestación: tensión y corriente de línea, potencia activa y reactiva entregada, estado de alarmas y protecciones.

7. El usuario debe poder cambiar en cualquier momento varios parámetros:

Aerogenerador: inicio y parada de la turbina de viento, uso del sistema de orientación, transferencia de datos de producción.

Subestación: apertura y cierre del interruptor principal.

Se pueden generar varios informes con los datos proporcionados por el sistema SCADA, como la determinación de la curva de potencia, la potencia generada, la disponibilidad de la turbina, estadísticas de fallas, datos de viento (velocidad y turbulencia), potencia activa y reactiva y $\cos\phi$ en la subestación.[5] Los sistemas SCADA recuperan, almacenan y exportan una gran cantidad de datos a una variedad de partes interesadas, todos con diferentes necesidades:

- Centro de operación remoto: deben poder usar la condición de alarma de manera rápida y eficiente, diferenciando la causa raíz de una falla sin estar sumergidos por las alarmas en cascada.
- Monitoreo y diagnóstico remoto: después de la primera intervención desde el centro operativo remoto, deben poder interpretar los datos rápidamente para resolver el problema. Además, los datos históricos de SCADA se pueden usar para validar modelos computacionales o desarrollar nuevos modelos.
- Propietarios de activos: utilizarán la salida SCADA para el cálculo de los ingresos de energía, el cálculo de la energía perdida, etc.

Wind Farm SCADA Architecture

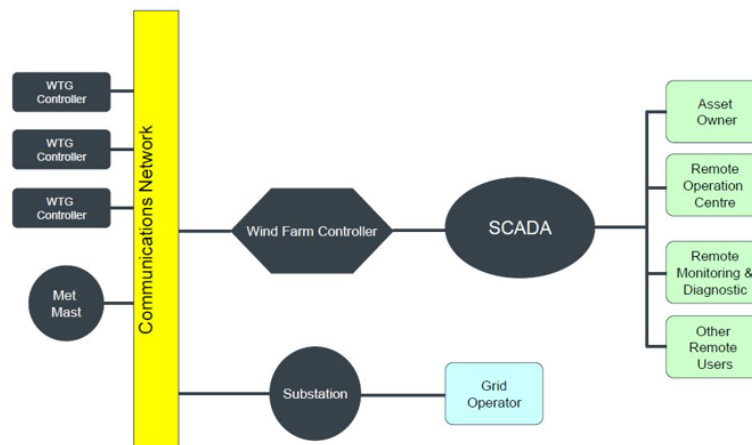


Figura 2: Organigramma del sistema SCADA de un parque eólico.

A través de SCADA se consigue un monitoreo y operaciones remotas en la primera línea de defensa contra problemas emergentes en un parque eólico y es clave para alinear las operaciones con las necesidades del negocio como son la recopilación de alertas en tiempo real de una multitud de sistemas SCADA, de red y de monitoreo del clima. La visibilidad del rendimiento actual de la flota en múltiples tecnologías de turbinas desde ubicaciones geográficamente diversas. A su vez se tiene la visibilidad de los paneles de control donde obtendremos las métricas de toda la flota que resaltan aspectos operativos clave como la producción agregada, la disponibilidad, el factor de capacidad y la conectividad de red y el estado operativo de los activos. Cabe la opción de desglosar la flota y ver el rendimiento actual con vista de flota, vista de parque y vista de turbina. Se tiene un control manual de la turbina, parar, arrancar, reiniciar una turbina única o un parque eólico completo es posible.[6] En general, los registros SCADA son promedios de 10 minutos de valores muestreados de 1 Hz. Sin embargo, el máximo, la desviación mínima y estándar a menudo también se registran. El número de arreglos, paradas y registros de alarmas grabado por el sistema SCADA también se puede ver como parte de CMS (sistema de monitoreo de condición). Vibraciones, nivel de presión de aceite y los estados de filtro también podrían ser registrados por un sistema de aerogenerador SCADA, pero estos son registrados por separado en lo que podría denominarse un CMS "dedicado". El sistema SCADA adquiere datos como los mostrados en la siguiente figura.

Ambientales	Eléctricos	Temperaturas	Control de variables
Velocidad del viento	Potencia activa	Cojinete de la caja de cambios	Angulo de paso
Dirección del viento	Factor de potencia	Aceite lubricante de la caja de cambios	Angulo de orientación del rotor
Temperatura ambiente	Potencia reactiva	Devanado del generador	Velocidad del eje del rotor
Temperatura de la góndola	Voltaje del generador	Rodamiento del generador	Velocidad del generador
	Fase del generador	Rodamiento principal	Velocidad / estado del ventilador
	Frecuencia	Eje del rotor	Estado de la bomba de refrigeración
		Eje del generador	Cantidad de movimientos de orientación
		Anillo colector del generador	Angulo de inclinación y desviación
		Fase inversora	Número de arranques y paradas
		Convertidor del agua de refrigeración	
		Fase del transformador	
		Controlador del eje	
		Controlador superior	
		Controlador del convertidor	

Tabla 1: Variables generadas por un aerogenerador.

Aunque los sistemas SCADA de los aerogeneradores no se han desarrollado específicamente para los fines de CMS, el uso de los datos de SCADA para monitorear la salud de las turbinas se investigaron tan pronto como se optimizó el mantenimiento y se convirtió en una alta prioridad en la industria eólica. El principal desafío radica en cómo interpretar las tendencias dadas la variabilidad en las condiciones operativas de los aerogeneradores modernos. Un cambio en el valor de un parámetro SCADA es en consecuencia, no necesariamente evidencia de una falla. Uno de los enfoques más simples es recopilar datos durante un largo período de tiempo y monitorear las relaciones de los parámetros SCADA y observar cómo cambian con el tiempo.

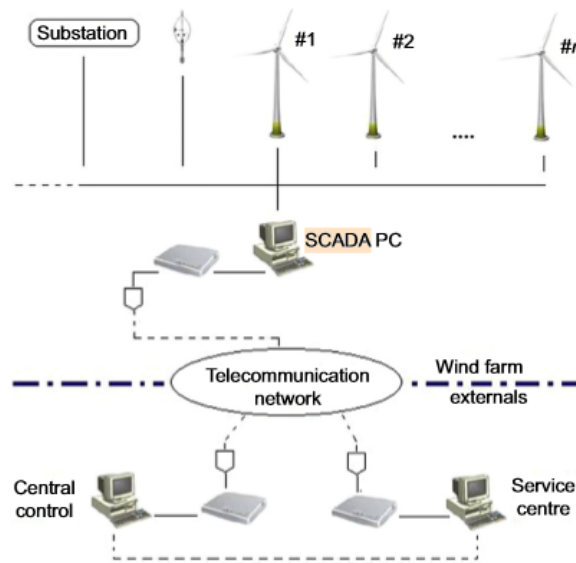


Figura 3: Sistema SCADA.

El estado de la alarma también será monitoreado por el sistema SCADA para fines operativos. Potencialmente, estas alarmas pueden ayudar al operador de la turbina a comprender básicamente la condición de operación de los componentes clave de los aerogeneradores. Sin embargo, en un gran parque eólico, estas alarmas son a menudo demasiado frecuentes para un análisis racional. El sistema SCADA del parque eólico recopila información operativa de algunos subconjuntos de eólicos que podrían utilizarse para realizar algunas tareas básicas de monitorización.[7]

Hoy en día, los parques eólicos pueden ofrecer a los propietarios una forma completamente nueva de abordar las operaciones y el mantenimiento, gracias a la supervisión de la condición y los sistemas de pronóstico avanzados. El monitoreo de condición es una herramienta que ayuda a los propietarios y operadores de parques eólicos a monitorear el estado de los componentes de la turbina y los sistemas eléctricos relacionados. Su propósito es predecir problemas de mantenimiento para que los operadores del sitio puedan realizar reparaciones y reemplazos solo cuando sea necesario para evitar trabajos innecesarios y costosos en la torre. La idea de añadir “inteligencia” en la caja de adquisición de datos o en sensores de turbina puede resultar costosa y aumentar las limitaciones en el almacenamiento y transmisión de datos por lo que se debe de usar sensores y dispositivos electrónicos que reduzcan los costes y estas limitaciones. El mantenimiento basado en la monitorización de la condición se reconoce como el mejor método en las estrategias de mantenimiento, ya que sus características de diagnóstico y pronóstico permiten

evitar fallas catastróficas y programar el mantenimiento oportuno de acuerdo con las estimaciones realizadas sobre la vida útil restante. Actualmente, el viento es la fuente de energía renovable de más rápido crecimiento para la generación de energía eléctrica en todo el mundo. A medida que el número de turbinas eólicas (WT) continúa creciendo, se vuelve más difícil para los ingenieros mantenerlas para una operación confiable. Como muchos WT están situados en torres altas, en la mar, instalados en áreas rurales remotas, expuestos a ambientes hostiles y sujetos a tasas de falla relativamente altas, la inspección y el mantenimiento de los WT requieren un esfuerzo y costo significativos. Para que la energía eólica sea competitiva con la tecnología tradicional de generación de energía, es necesario minimizar los costos de mantenimiento y mejorar la confiabilidad y disponibilidad de WT. Los sistemas de monitoreo de condición (CM) se pueden usar para ayudar a los propietarios / operadores de parques eólicos a lograr este objetivo. El objetivo es adquirir información sobre el estado de las máquinas, lo que puede ayudar a mejorar la eficiencia operativa. El monitoreo de condición proporciona las herramientas para el mantenimiento basado en la condición (CBM), en lugar del mantenimiento periódico basado en el tiempo que se implementa a intervalos de tiempo fijos, independientemente del estado real de la salud de las máquinas. Al adaptar un sistema de mantenimiento basado en la condición, cualquier degradación o fallas incipientes se pueden detectar de antemano, mediante el uso de técnicas de CM, antes de que resulten en fallas costosas. Además, pueden dejarse en funcionamiento turbinas sanas, reduciendo así las interrupciones debido a un posible mantenimiento programado basado en tiempo redundante. La mayoría de las turbinas modernas se fabrican con algún tipo de sistema CM integrado. Estos sistemas típicamente monitorean parámetros de condición tales como temperaturas de rodamientos, aceite lubricante y bobinados. Algunos de los sistemas más recientes también monitorean los niveles de vibración del tren de transmisión. Los datos de todas las turbinas en el parque eólico se transmiten al sistema anteriormente nombrado de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA) con el propósito de monitoreo y análisis. Sin embargo, estos datos se acumulan rápidamente para crear volúmenes grandes e inmanejables que pueden ocultar información útil sobre la salud de componentes específicos de turbinas individuales. La falta de experiencia en cómo se manifiestan las fallas en los datos medidos es el principal desafío que debe superarse.[3],[8],[7][9]

Por lo tanto, sería beneficioso para los operadores si los datos se pudieran analizar e interpretar automáticamente para identificar fallas y fallas potenciales. Esto destaca la razón principal para el uso de técnicas de monitoreo de condición, ya que proporciona los medios para detectar e identificar fallas lo antes posible. El monitoreo de la condición es particularmente beneficioso para los subsistemas como la caja de engranajes, el generador y los rotores y palas, ya que el costo de estos componentes constituye la mayor parte del costo total del WT. El desafío es detectar posibles fallas incipientes por adelantado y aislar e identificar correctamente los componentes defectuosos. En el siguiente esquema se muestra un ejemplo de los elementos principales del sistema de control de un parque eólico:

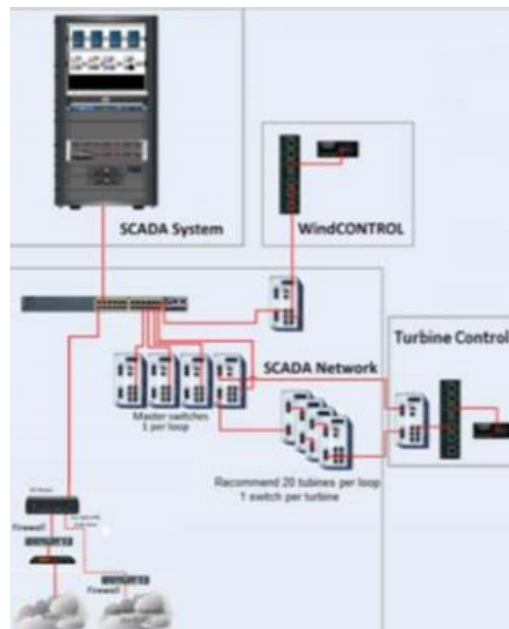


Figura 4: Elementos principales del programa de control de un parque eólico.[2]

El sistema incluye interfaces para operadores basados en entornos web totalmente integrados y flexibles que incluyen un sistema de informes a nivel de parque que permite a los operadores, propietarios y otras partes interesadas monitorizar y analizar el funcionamiento y rendimiento histórico de la planta, los sistemas son capaces de integrar hasta 500 aerogeneradores. Las características de ciber seguridad incluyen la prevención de la transmisión de texto sin cifrar en la red, la prevención de protocolos inseguros como Telnet y FTP, servicios integrados de gestión de identidad a través de la Autoridad de certificación y Active Directory y un

sistema de detención anti-intrusión. Los módulos se centran en aplicaciones específicas, como la recopilación de datos en tiempo real, la recopilación de datos históricos, el archivo, la gestión y notificación de alarmas, las interfaces empresariales y otros requisitos específicos, y pueden implementarse individualmente o como parte de una solución general. La arquitectura abierta del sistema permite a los operadores de plantas eólicas comenzar con un sistema básico de monitoreo, control y reporte, y expandirse según sea necesario para cumplir requisitos de cada momento durante la operación de la planta. El sistema de Control de Supervisión y Adquisición de datos consta de los siguientes elementos: Una red local del parque eólico (“SCADA LAN - Local Área Network”), que es un sistema basado en fibra óptica Ethernet que conecta todos los aerogeneradores (WTG) que componen la planta al rack del sistema de Control de Supervisión y Adquisición de Datos que generalmente se encuentra en el edificio de O&M en tierra. Esta LAN también conectaría el sistema de control opcional a nivel de planta eólica, una subestación (la propia del parque si procede o la del punto de conexión de red) y cualquier otro dispositivo opcional (sistemas/torres de medición, por ejemplo). El sistema de tiempo real que incluye servicios y aplicaciones que recopilan datos de los WTG y los sistemas auxiliares (Control de parque, subestación, sistemas/torres de medición) y los presentan en tiempo real a través de las interfaces del cliente. El sistema de datos histórico, que incluye la base de datos SQL de datos operativos de la planta, los servicios que recopilan los registros históricos (diez minutos) de los WTG y los sistemas auxiliares, así como el servicio de informes para consultar y ejecutar informes generados a partir de estos datos.

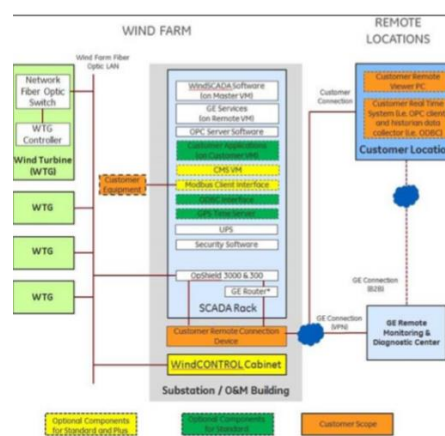


Figura 5: Esquema del Sistema de control de supervisión y adquisición de datos.[2]

Los elementos principales de los generadores eólicos que deben de analizarse incluidas las palas son:

1. El rotor y el eje.
2. La caja de engranajes,
3. Tren de potencia.
4. El generador y sistema eléctrico.
5. Sistema Palas/Pitch.
6. Sistema de control g.
7. Sistema hidráulico.

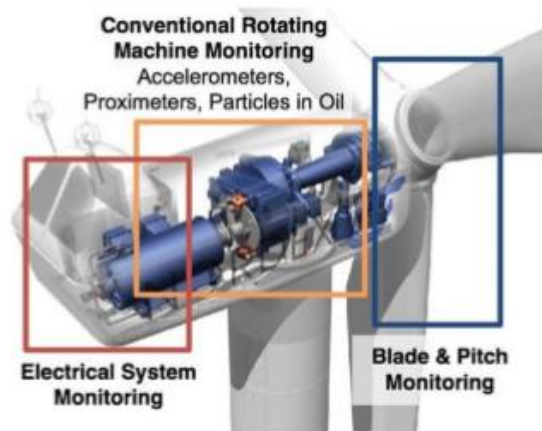


Figura 6: Componentes monitorizados de un aerogenerador.[9]

Estos componentes están inevitablemente sujetos a fallas durante la operación del WT. El desequilibrio de las palas del rotor y la asimetría aerodinámica son dos fallas importantes en el rotor. El desequilibrio de las palas puede deberse a errores y tolerancias de fabricación y construcción, formación de hielo o deformación plástica debido a la fatiga. La asimetría aerodinámica puede ser causada por alta cizalladura del viento y errores del sistema de control. Los errores en el mecanismo para controlar el ángulo de inclinación pueden causar que una inclinación de la cuchilla sea diferente de las otras cuchillas, imponiendo una generación de torque desequilibrada en el eje giratorio, lo que lleva a una asimetría aerodinámica. Las fallas en el rotor y el eje de un WT incluyen desequilibrio del eje, grietas inminentes, fallas en los cojinetes del eje. El rotor y el eje de un WT transmiten energía mecánica variable generada a partir de la energía cinética del viento al generador eléctrico y siempre se considera un componente importante para el monitoreo del estado y la

detección de fallas del WT.[3] Las fallas de las cajas de engranajes de la turbina eólica incluyen desgaste o roturas de los dientes, excentricidad de las ruedas dentadas, fallas de los cojinetes de la caja de engranajes, etc. La caja de cambios tiene una estructura compacta, relación de transmisión fija, gran par motor, carga complicada y estado cambiante en el proceso de funcionamiento. Informa que las cajas de engranajes se consideran altamente críticas para fines de mantenimiento. El sistema de guiñada de un WT controla cómo gira la torre, porque a medida que la dirección del viento gira, la góndola debe ajustarse para enfrentar el viento correctamente. Un sistema de guiñada puede estar sujeto al desplazamiento del ángulo de guiñada y al desgaste o rotura del diente del engranaje de guiñada y tiene una alta tasa de falla en WT. Actualmente, la mayoría de los WT están equipados con un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) o un generador síncrono de imanes permanentes de accionamiento directo (PMSG). Las fallas en los generadores incluyen daños en el rotor del generador, fallas en los cojinetes, fallas en el giro del estator, sobrecalentamiento, etc. La caja de engranajes tiene la frecuencia de falla más alta para DFIG WT. Las fallas de los rodamientos son un tipo típico de fallas en las cajas de engranajes. En WT, el 40% de las fallas están relacionadas con los rodamientos. Por lo tanto, las fallas de los rodamientos tienen una contribución significativa a las fallas totales y al tiempo de inactividad de los WT. A continuación se muestran algunas de las variables, las cuales se monitorizaran en los parques eólicos:

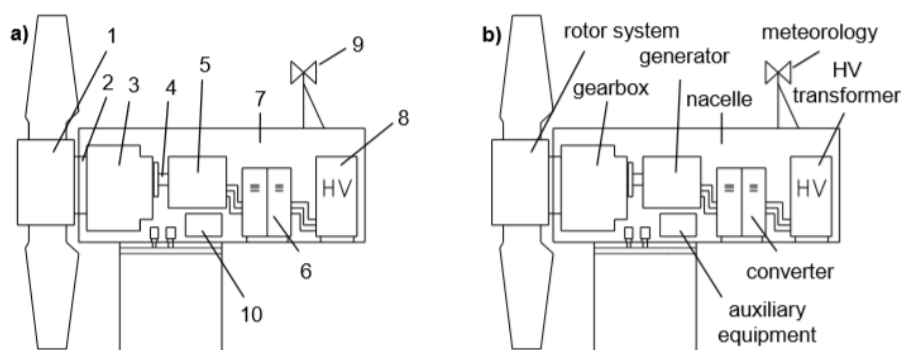


Figura 7: Elementos del aerogenerador.[2]

Posición 1: Temperatura del rotor. Temperatura del controlador del concentrador. Ángulo de inclinación.

Posición 2: Velocidad del rotor.

Posición 3: Temperatura del aceite del engranaje. Temperatura del cojinete del engranaje (HSS).

Posición 4: Velocidad del generador.

Posición 5: Temperaturas de la fase del generador. Temperatura del anillo colector del generador. Temperaturas de los rodamientos del generador.

Posición 6: Corrientes del generador fase 1, 2 y 3. Temperatura del controlador superior. Temperatura del controlador del convertidor. Temperatura de la bobina del estrangulador del convertidor. Temperatura del agua de temperatura del convertidor. Temperaturas de las fases 1, 2 y 3 del inversor del rotor de la rejilla. Temperatura de la fase 1 del inversor de red. Potencia reactiva, potencia activa y factor de potencia.

Posición 7: Temperatura de la góndola.

Posición 8: Temperaturas de las fases 1, 2 y 3 del transformador de alta tensión. Temperatura de la barra de distribución de la red.

Posición 9: Velocidad del viento medida por el anemómetro y sus desviaciones.

De acuerdo con las mediciones del sensor utilizadas, la mayoría de los métodos de monitoreo de condición y diagnóstico de fallas de WT se pueden clasificar en las siguientes categorías: monitoreo de vibración, monitoreo de torque, monitoreo de temperatura, análisis de aceite/desechos, monitoreo de emisiones acústicas, monitoreo de fibra óptica y supervisión de corriente/potencia.

Monitoreo de vibraciones

La mayoría de las fallas generadas en los componentes principales de los WT causan vibraciones. El desequilibrio de pala o eje de un WT genera vibraciones de la góndola en la dirección horizontal, debido a la menor rigidez de la torre de la turbina eólica en esta dirección. Se ha informado que la pérdida de pernos en la raíz de una pala aumentaría la vibración de la góndola de la turbina eólica. Una falla, por ejemplo, picaduras en la superficie o desgaste o rotura de los dientes en una caja de engranajes puede provocar la vibración de la caja de engranajes. Un defecto en el rodamiento puede generar un movimiento radial del rotor y una variación del par del eje en el WT, y consecuentemente la vibración de la góndola de la turbina eólica.

Por lo tanto, los sistemas comerciales de monitoreo de condición WT y detección de fallas emplean principalmente técnicas basadas en vibraciones, que son sofisticadas debido a condiciones de funcionamiento inestables de la turbina. Es un problema extraer firmas de falla WT de tales señales de vibración no estacionarias usando métodos tradicionales de análisis de espectro. El monitoreo de vibraciones ha sido ampliamente estudiado y ampliamente utilizado en aplicaciones industriales. Sin embargo, la principal desventaja del monitoreo de vibraciones es el requerimiento de personal experto para evaluar los datos sobre medición y análisis de vibraciones de turbinas. La interpretación de las lecturas de vibración requiere capacitación y personal especializado incluso para la maquinaria ordinaria que opera en condiciones estacionarias. Teniendo en cuenta las condiciones fluctuantes de carga y velocidad en los WT, es más apropiado que los propietarios / operadores de parques eólicos establezcan un sistema de monitoreo de condición en línea conectado a la web a empresas CM expertas u OEM para obtener un servicio de consultoría sobre predicción de fallas y fallas. El desafío actual en la tecnología CM basada en vibraciones es el desarrollo de sistemas de diagnóstico automático para el aislamiento de fallas detectadas, incorporando características de pronóstico, tales como advertencias de fallas por adelantado y tiempo recomendado para el mantenimiento.

Monitoreo de temperatura

La temperatura abrupta aumenta mientras se encuentra en condiciones normales de funcionamiento, a menudo significa la falla de los cojinetes de la turbina eólica. Por ejemplo, la falta de lubricación conducirá a aumentos bruscos en la temperatura del rodamiento.

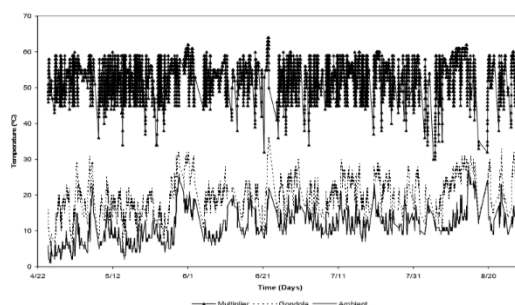


Figura 8: Monitoreo de temperatura.

De manera similar, la temperatura del aceite de la caja de engranajes debe estar en un cierto rango durante las condiciones de operación de la turbina eólica. Por lo tanto, el monitoreo de temperatura puede revelar el estado de salud de los cojinetes y cajas de engranajes de las turbinas eólicas. La principal desventaja del monitoreo de temperatura es que la temperatura medida está determinada por múltiples factores. Las investigaciones muestran que la temperatura del rodamiento depende de la falla del rodamiento, la temperatura ambiente, el calentamiento de la corriente del estator y la velocidad de rotación del generador. Dado que un WT normalmente funciona en condiciones difíciles, la temperatura ambiente cambia con frecuencia. No es suficiente utilizar únicamente la supervisión de la temperatura para la detección de fallas de los rodamientos y la caja de engranajes de los WT.

Monitoreo de torque

Las oscilaciones de par pueden detectarse en una condición de desequilibrio de pala o rotor de WT. La monitorización del par se ha utilizado para detectar las fallas de las palas y rotores de una turbina eólica midiendo el par en el eje del WT. La monitorización de par también se ha aplicado para detectar fallas de cortocircuito en el estator en el generador de un WT. Sin embargo, la complejidad y el costo de usar el monitoreo de torque es alto. Por ejemplo, se debe instalar un transductor de par en el eje para medir el par del eje de la turbina eólica, lo que aumenta la complejidad de la estructura del WT. Por lo tanto, el monitoreo de torque rara vez se usa en la industria eólica.

Monitoreo de aceite

Al analizar la composición, el contenido, el tamaño y la clasificación de las partículas de desgaste en el aceite lubricante de la caja de engranajes y los cojinetes, se pueden evaluar sus condiciones de salud. Este método solo funciona para WT de alta potencia con cojinetes y cajas de engranajes lubricados con aceite. Para los WT cuya lubricación de cojinetes y cajas de engranajes está sellada en su interior, los métodos de análisis de aceite / desechos no son prácticos.

Monitoreo de emisiones acústicas

El monitoreo de las emisiones acústicas, que van desde 1 kHz a 100 MHz, es un método típico para el mantenimiento basado en la condición de los WT. Por ejemplo,

cuando se carga un rodamiento de baja velocidad y el esfuerzo alcanza el límite de la resistencia del material, se producirá un pequeño espacio entre los componentes del rodamiento defectuoso para emitir algo de esfuerzo para mantener el equilibrio energético. La onda de tensión generada por un rodamiento roto puede medirse y aplicarse para detectar la falla del rodamiento de WT. La desventaja del monitoreo de emisiones acústicas es su alto costo. Dado que la frecuencia de la señal de emisión acústica es tan alta, los sensores y el equipo de adquisición de datos son mucho más caros que los utilizados en otros métodos de detección de fallas.

Monitoreo de fibra óptica

El monitoreo de fibra óptica puede detectar múltiples parámetros físicos, por ejemplo, temperatura y tensión. Por lo tanto, se llama cada vez más la atención para aplicar el monitoreo de fibra óptica en la industria eólica. El sistema de sensor de fibra óptica se utiliza para detectar los estados estructurales de las palas de la turbina eólica para el mantenimiento basado en la condición, y para detectar daños debidos a la iluminación. Sin embargo, las fibras ópticas deben montarse en la superficie o incrustarse en el cuerpo de los componentes WT que se monitorean. Por lo tanto, el monitoreo de fibra óptica es más complicado en aplicaciones del mundo real en comparación con otros métodos de monitoreo de condición y detección de fallas.

Monitoreo de corriente / potencia

La monitorización de corriente/potencia utiliza mediciones de corriente y/o voltaje en la WT que han sido utilizadas por el sistema de control del WT. Por lo tanto, no se necesitan sensores adicionales ni equipos de adquisición de datos. Además, las señales de corriente y/o voltaje son confiables y fácilmente accesibles desde el suelo sin interferir con los WT. Se han realizado algunas investigaciones sobre la detección de fallas de rodamientos de WT mediante el uso de mediciones de corriente. Por ejemplo, se han aplicado mediciones de corriente para la detección de fallas en los cojinetes de las turbinas eólicas DFIG y PMSG. Se ha informado que las fallas de las palas de la turbina eólica se pueden detectar con éxito utilizando mediciones de corriente o mediciones de potencia. Además, las mediciones de corriente y potencia se han utilizado juntas para la detección de fallas de desequilibrio del rotor de la turbina eólica y la detección de fallas de la caja de

engranajes. Sin embargo, aún existen desafíos en el uso de señales de corriente y/o voltaje para el monitoreo del estado de la turbina eólica y la detección de fallas. Primero, la información útil en las señales de corriente y/o voltaje tiene estadísticas no estacionarias debido a la condición operativa de velocidad variable de los WT. Es un problema extraer firmas de falla WT de señales de corriente y/o voltaje no estacionarias usando métodos de análisis de espectro tradicionales. Además, los componentes dominantes de las señales de corriente y voltaje son los componentes de frecuencia fundamental. Por lo tanto, la información útil en las señales de corriente y voltaje para el monitoreo del estado de la turbina eólica y la detección de fallas generalmente tiene una baja relación señal/ruido (SNR), lo que dificulta el monitoreo del estado y la detección de fallas.[9]

4. PARTE TEÓRICA

4.1 Energía eólica offshore.

Actualmente el aumento de la eficiencia en el aprovechamiento del recurso eco para la producción de energía eléctrica pasa por la instalación de parques eólicos en las áreas que presentan un mejor recurso energético. Estas áreas de mayor recurso se encuentran en el mar, sino que además se encuentran en profundidades superiores a los 60 metros en las cuales se localiza la mayor parte del recurso eólico marino (un 70% a nivel mundial y hasta un 80% en Europa). Hay una clara necesidad de desarrollar y madurar las tecnologías eólicas marinas de modo que se permita el posterior desarrollo de estas áreas geográficas de mayor eficiencia/recurso y con ello el desarrollo de los proyectos que nos permitirán reducir de manera drástica los costes de finales de producción energética.



Figura 9: Parque eólico offshore.[2]



Figura 10: Aerogenerador offshore. [2]

Tanto es así, que desde la principal asociación eólica mundial WindEurope se viene insistiendo a gobiernos y reguladores de la necesidad de desarrollar políticas e instrumentos de soporte y financiación que permitan continuar en la senda de la mencionada reducción de costes, como se refleja en el reciente “paper/memorandum” publicado por WindEurope en octubre de 2018 “ Floating Offshore Wind Energy, A Policy Blueprint for Europe” fomentando de esta manera tecnología eólica que todos coinciden en señalar como la más eficiente, respetuosa con el medio ambiente también socialmente mejor aceptada. Se espera que la energía eólica juegue un papel cada vez más importante en el escenario energético internacional futuro. Los expertos predicen que esta tecnología podría abarcar el 5 % del mercado energético mundial para el 2020. Las aplicaciones de la energía eólica offshore han estado creciendo a un ritmo vertiginoso por todo el mundo. Los desarrollos de compuestos de fibra de alta tensión estructural, de la electrónica de potencia y de los generadores constituyen las principales contribuciones a este crecimiento. Los resultados de elevar la eficiencia y reducir los costos unitarios de las turbinas eólicas, al mismo tiempo de ser no contaminante del medio ambiente, han llevado a que la generación de energía eólica sea más competitiva que otras fuentes convencionales.



Figura 11: Energía eólica offshore. [2]

4.1.1 Generadores eólicos offshore.

En este apartado se describen los elementos más importantes de los aerogeneradores y de los parques marinos offshore.

Aerogenerador

Es un dispositivo que permite transformar la energía cinética del viento en electricidad, también se denomina turbina eólica. La rápida evolución de la tecnología eólica ha favorecido al aumento de su durabilidad, actualmente, los aerogeneradores tienen una vida media superior a 25 años. Un aerogenerador consta de más de 8000 componentes y que se dividen en varios sistemas. A continuación, se detallan la descripción y el funcionamiento de los más importantes.

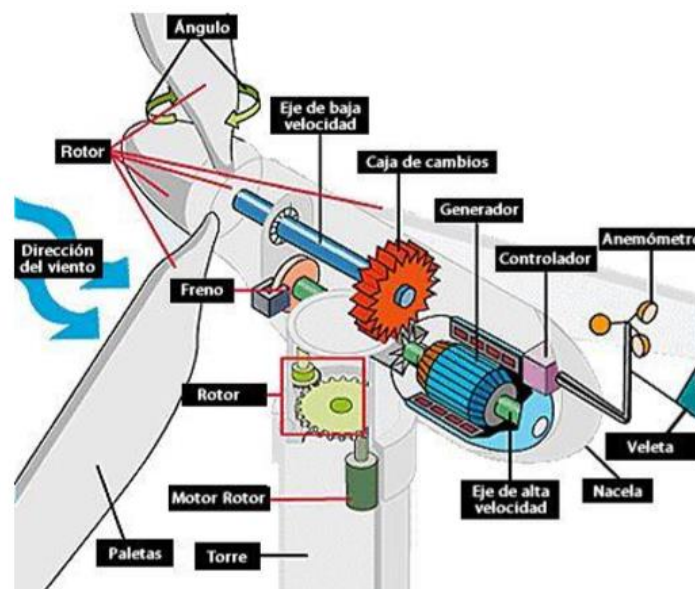


Figura 12: Componentes de un aerogenerador. [2]

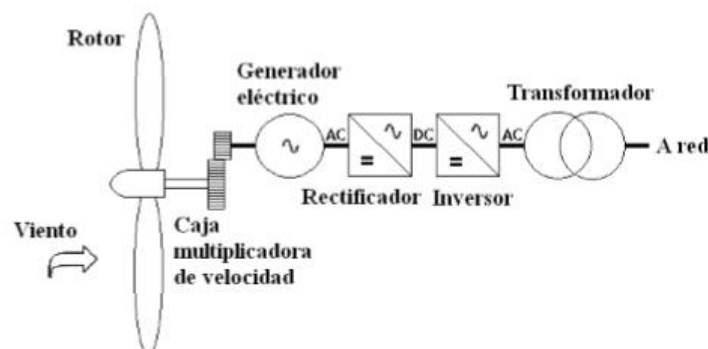


Figura 13: Componentes de un aerogenerador. [2]

- **Rotor:** La velocidad del rotor está regulada por una combinación de ajuste del ángulo de inclinación de la pala y control del par generador/convertidor. El rotor gira en el sentido de las agujas del reloj en condiciones normales de funcionamiento cuando se ve desde una ubicación en contra del viento. El rango completo del ángulo de inclinación de la pala es de aproximadamente 90 grados, con la posición de cero grados con la pala plana en la dirección del viento predominante. Al inclinarse las palas a un ángulo de inclinación de pluma de aproximadamente 90 grados, se logra el frenado aerodinámico del rotor, lo que reduce la velocidad del rotor.

- **Palas:** El rotor del aerogenerador está compuesto por un conjunto de tres palas. El perfil de las palas es variable a lo largo de toda su longitud, disponiendo el perfil más ancho ubicado hacia la raíz de la pala (lado buje) y gradualmente se estrecha hacia secciones transversales más delgadas hacia la punta de la pala. Las palas del rotor están diseñadas aero-elásticamente para maximizar la producción de energía. Las palas están equipadas con innovadores sistemas de protección de sus bordes (“Leading Edge”, fundamentalmente) y los mejores sistemas de protección contra rayos del mercado.

- **Sistema de control del ángulo de paso:** El rotor utiliza un sistema de control de paso (“pitch”) para ajustar el ángulo de inclinación de la pala durante la operación. El controlador de paso activo permite que el rotor de la turbina regule la velocidad, cuando la velocidad del viento está por encima de la velocidad nominal, al permitir que la pala genere pérdidas aerodinámicas correspondientes al exceso de esfuerzo aerodinámico. La energía de las ráfagas de viento por debajo de la velocidad nominal del viento se captura permitiendo que el rotor se acelere. Se dispone de un sistema de alimentación de emergencia para alimentar cada pala con el fin de llevar las palas a posición de frenado de emergencia y apagar la turbina en caso de un corte de la alimentación de red u otra falta grave. Al disponer las tres palas de sistemas de “pitch” independientes, se proporciona una importante redundancia en la capacidad individual de frenado aerodinámico de las palas.

- **Buje:** El buje (“hub”) se utiliza para conectar las tres palas del rotor al tren de transmisión de la turbina. El buje también alberga el sistema de pitch de las palas.

- **Rodamientos de palas:** El rodamiento de giro de la pala está diseñado para permitir que la pala rote alrededor de un eje de inclinación. Los rodamientos del "pitch" de la pala están equipados con engranajes de accionamiento de la cuchilla que permiten orientar las cuchillas. Por otro lado, el rodamiento principal está diseñado para proporcionar soporte y alineación al conjunto del eje de principal del tren de potencia, y para transmitir las cargas ajenas al par de giro desde el rotor hacia a la estructura del bastidor central.

- **Sistema de frenado:** El sistema de "tono" de la pala actúa como el sistema de frenado principal para la turbina eólica. El frenado en condiciones normales de funcionamiento se logra orientando las palas contra la dirección del viento. Solo se requieren dos palas de rotor giradas para desacelerar el rotor de manera segura al modo de ralentí, y cada pala de rotor tiene su propia fuente de alimentación de respaldo para conducir la pala en caso de pérdida de la línea de la red.

- **Sistema de transmisión:** Eje de baja velocidad: Conecta el buje del rotor al multiplicador. El eje contiene conductos del sistema hidráulico o eléctrico, para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos. Multiplicador: Es un conjunto de engranajes que relaciona el eje de baja velocidad con el de alta aumentando la velocidad en este último. También se puede denominar caja de cambios o de engranajes. Eje de alta velocidad: Gira a una velocidad aproximada de 1500 revoluciones por minuto, lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Está equipado con un freno mecánico que se utiliza en caso de emergencia por fallo del freno dinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.

- **Generador:** Generador eléctrico: Su finalidad es transformar la energía mecánica procedente del rotor de la maquina en energía eléctrica. Transformador: Se sitúa en la base de la torre. La electricidad producida en el generador pasa al transformador por unos cables, para ser enviada con la tensión adecuada a la subestación.

- **Sistema de orientación ("yaw"):** El movimiento del "yaw" es proporcionado por un rodamiento colocado entre la góndola y la torre. Los motores del sistema de orientación actúan sobre un engranaje situado en el rodamiento del "yaw", para dirigir el aerogenerador siguiendo la dirección del viento. El controlador opera sobre el "yaw" para alinear la "góndola" con la dirección del viento en función del sensor de la veleta instalada en la parte superior de la góndola. El aerogenerador se registra

en todo momento, la posición y los movimientos del sistema de orientación de la "góndola", y después de una rotación excesiva en una misma dirección, el controlador detienen automáticamente el rotor, desenrolla los cables internos y reinicia la turbina.

- **Torre:** La turbina eólica está montada en la parte superior de una torre de acero tubular. El acceso a la turbina se realiza a través de una puerta en la base de la torre. La torre dispone de ascensor, de plataformas de servicio interno y de iluminación interior. Mediante una escalera se proporciona acceso a la góndola, en la cual también está instalado el sistema de seguridad contra caídas. La torre y sus estructuras son necesarias y adaptadas a los requisitos del emplazamiento en alta mar.

- **Góndola ("Nacelle"):** La "nacelle" alberga los componentes principales del generador de una turbina eólica. El acceso desde la torre a la góndola se realiza a través de la parte inferior de la góndola y desde una plataforma para aterrizaje de helicópteros, ubicado en la parte superior de la góndola.

- **Protección contra rayos (según IEC 61400-24 Nivel I):** Las palas del rotor están equipadas con captadores de rayos instalados sobre las palas. Las turbinas están conectadas a tierra y protegida frente a la caída de rayos. Sin embargo, los rayos son una fuerza impredecible de la naturaleza y es posible que un rayo pueda dañar varios componentes a pesar de la protección contra rayos afectados en la turbina eólica.

- **Sistema de control de turbina eólica ("Scada"):** La turbina eólica puede controlar localmente, pero también puede enviar señales de control desde remoto a través de un Sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), con la posibilidad de ser bloqueado localmente a través del controlador de la turbina. Los interruptores de bloqueo de servicio determinados en la parte superior de la torre evitan que el personal de operación y mantenimiento en la parte inferior de la torre opere ciertos sistemas de la turbina mientras se encuentra personal trabajando en la "góndola". Para anular cualquier operación de la turbina eólica, se pueden activar los botones de parada de emergencia detectados en la base de la torre y en la "góndola" para detener la turbina en caso de emergencia.

- **Anemómetro y veleta:** Se utilizan para medir la velocidad y la dirección del viento. Las señales electrónicas del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectar el aerogenerador cuando el viento alcance 3-4 m/s y para pararlo cuando durante 10 minutos la velocidad del viento exceda los 25 m/s. Las señales de la veleta son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para cambiar la orientación del aerogenerador en contra del viento y variar el ángulo de las palas en función del viento para obtener el óptimo energético.

- **Convertidor de potencia:** La turbina dispone de un sistema “convertidor de potencia completa” de medios de tensión basados en tecnología innovadora para los módulos de potencia y enfriamiento.

- **Transformador de alta tensión e interruptor de potencia:** Mediante un transformador de 66kV y una apartamenta de alta tensión ("Apartamenta de alta tensión - HVSG") se conecta cada turbina al sistema colector, en todos los aerogeneradores del parque entre sí. El HVSG puede ubicarse en la pieza de transición (que conecta la torre con la cimentación) o en la parte inferior de la torre.

- **Balizamiento y color externo:** Los parques eólicos se equipan con un sistema de iluminación y señalización para la aviación mediante la instalación en los correspondientes aerogeneradores de balizas aeronáuticas instaladas en la parte superior de la "góndola". La disposición y características de las balizas cumplidas con las especificaciones y requisitos efectuados por AESA (Agencia Española de Seguridad Aérea), siguiendo las recomendaciones incluidas en su documento "Guía de señalización e iluminación de turbinas y parques eólicos". El esquema de color para las “nacelles”, palas y torres es específico RAL 7035 (gris claro).

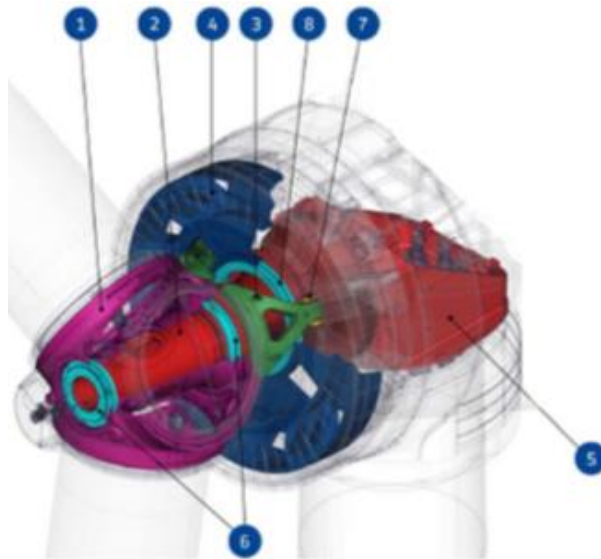


Figura 14: Componentes de un aerogenerador. [2]

1) Hub. 2) Bastidor frontal. 3) Acoplamiento del rotor. 4) Generador. 5) Bastidor central. 6) Rodamientos del hub. 7) Acoplamiento elástico. 8) Rodamientos del generador.

Instalación eléctrica. Descripción.

La energía generada por la turbina en Media Tensión, es transformada por el aerogenerador mediante un centro de transformación alojado en su interior, que convierte esta energía en Alta Tensión. El conjunto de aerogeneradores está unido por un sistema de cables de alta tensión (sistema colector), que es el encargado de conducir la energía producida en cada turbina a tierra. Una vez en tierra, mediante una línea subterránea de alta tensión (línea de evacuación), entregue la energía producida por los aerogeneradores, en el punto de conexión establecida por la compañía distribuidora o transportista.

Sistema de generación y centro de transformación.

Los aerogeneradores son turbinas eólicas offshore de velocidad variable que emplean un generador síncrono de imán permanente ("PMSG & Direct Drive - DD") con un sistema de convertidor de potencia para su conexión a la red. El generador "PMSG" utiliza dos conjuntos de devanados del estator trifásico a una tensión nominal de 3 kV. Cada conjunto alimenta un canal de alimentación independiente del sistema "convertidor de potencia total". Un canal de alimentación del sistema

convertidor de potencia completo constante de un convertidor del lado de la máquina (MSC), un enlace de CC y un convertidor del lado de la línea (LSC). El LSC interconecta el transformador de turbina eólica (“Aerogenerador” -WT) en el lado de media tensión (3 kV). El voltaje de salida del transformador WT en el lado de alta tensión es de 66 kV.

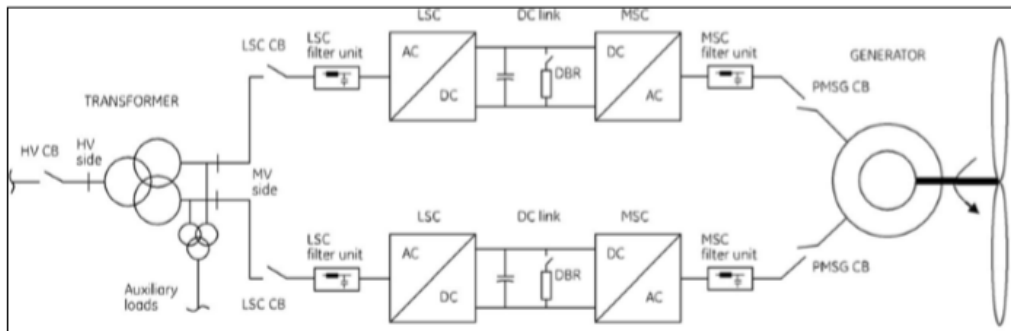


Figura 15: Sistema de generación y centro de transformación. [2]

Cables interarray.

Los aerogeneradores (dada su alta potencia unitaria) se unirán entre sí mediante cables submarinos de alta tensión (66 kV) en corriente alterna (CA), en lo que se denomina sistema "interarray". Por lo general, los cables entre aerogeneradores se diseñarán para su implantación minimice en todos los casos las longitudes de los mismos y con ello se minimice también las pérdidas en potencia de modo que se pueden adaptar la generación producida del PE GOFIO.

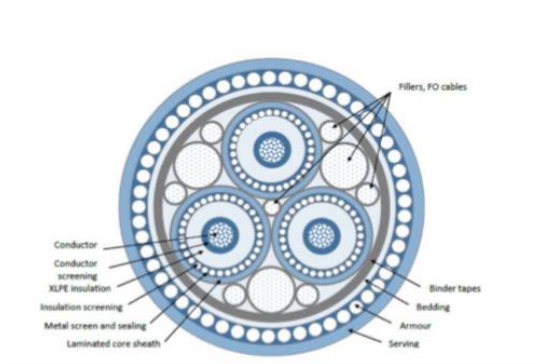


Ilustración 17 - Sección transversal de cable XLPE de tripolar



Ilustración 18 - Cable submarino dinámico (izquierda) y estático (derecha)

Figura 16: Cables interarray. [2]

Cables dinámicos

Dado que existe cierta fluctuación de las estructuras flotantes debido principalmente al movimiento propio del mar, una parte de los cables submarinos estará alguna vez en continuos desplazamientos en distintas direcciones, requiriendo una resistencia a la fatiga superior y un mejor rendimiento mecánico. Esto se obtiene principalmente mediante el uso de armaduras reforzadas y de sistemas de flotación ("módulos flotantes intermedios") que permiten mantener la dinámica del cable en flotación, además de rigidizadores ("rigidizadores de doblez") en la acometida de la cimentación y un sistema de protección ("protección de contacto") en la zona de contacto con el fondo marino. La cubierta exterior se pintará de amarillo para facilitar su reconocimiento debajo del agua.

Cables estáticos

Cables submarinos estáticos para los tramos marinos en los que el cable se encuentra soterrado en el fondo marino, por lo que no sufrirá ningún tipo de esfuerzo o movimiento, más allá del peso propio del terreno que lo cubre.

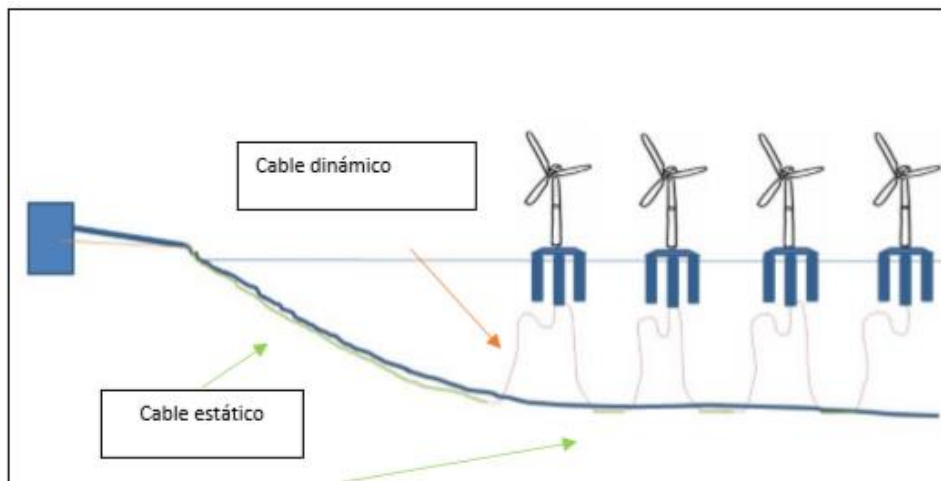


Figura 17: Diferentes cables para los distintos tramos. [2]

Salvo en fondos rocosos, sin recubrimiento arenoso, en los cuales el cable se valora el tendido directamente sobre el lecho marino. En el área de implantación del PE GOFIO se presentan fondos arenosos que permiten el soterramiento del cable a 1,5 metros de profundidad mediante la técnica de "arado a chorro". No obstante, en la fase posterior se realizarán estudios de detalle ("Índice de protección del entierro") para determinar la profundidad final de soterramiento que influirá en el

comportamiento térmico del cableado y, por tanto, en su rendimiento final y si se precisan de sistemas de protección contra la erosión marina.

Tipos de cimentaciones

Los proyectos de energía eólica marina permiten aprovechar todo el potencial del viento en alta mar, donde sopla con mucha más fuerza que en tierra. Sin embargo, su instalación es mucho más compleja. La mayor dificultad reside en la elevación de los aerogeneradores y subestaciones por encima del nivel del mar y su fijación al suelo. Existen diferentes tipos de cimentaciones en función de la profundidad a la que se vaya a instalar el aerogenerador.

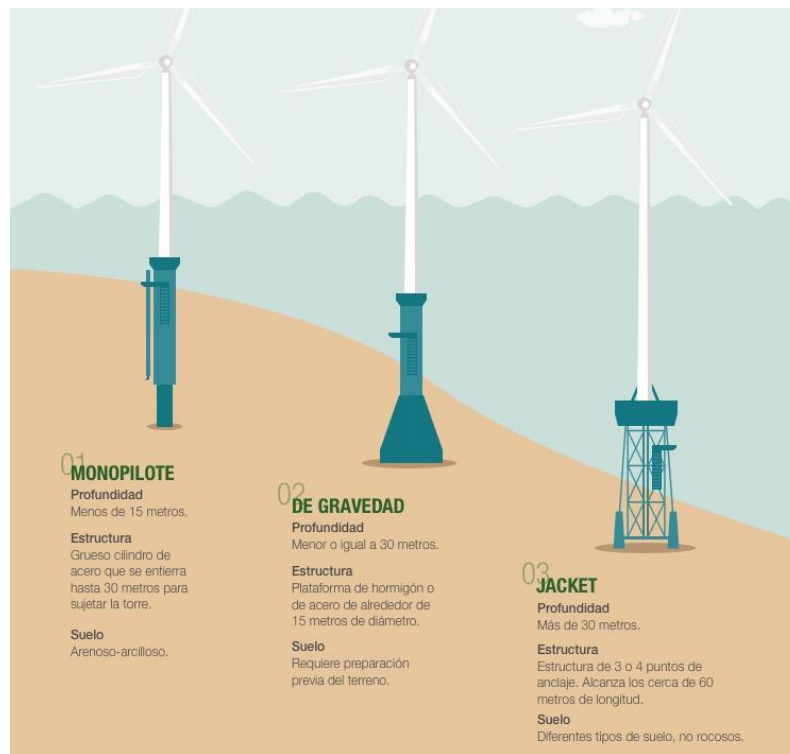


Figura 18: Tipos de cimentaciones. [2]

Monopilotes: Por debajo de los 15 metros de profundidad, estructuras bastante sencillas compuestas por un grueso cilindro de acero que se clava directamente en el fondo del mar. Bajo el suelo marino, llegan a enterrarse hasta 30 metros para poder sustentar la torre.

De gravedad: Para parques que requieren levantar los molinos a 30 metros para superar las olas, consiste en una gran plataforma de hormigón o acero de alrededor de 15 metros de diámetro y un peso que ronda las 1.000 toneladas.

Jacket: A partir de los 30 o 35 metros de profundidad, se deben tener estructuras de soporte y sujeción más complejas. Estos son cimentaciones con una armadura de celosía que incorpora tres o cuatro puntos de anclaje al fondo marino, de forma que aportan más seguridad a la fijación de las torres. En la parte superior, los jackets están rematados por una pieza de transición que lo une con el fuste de la turbina, mientras que las patas tres o cuatro, control del diseño realizado por los ingenieros se fijan al suelo mediante pilotes.

Plataformas flotantes.

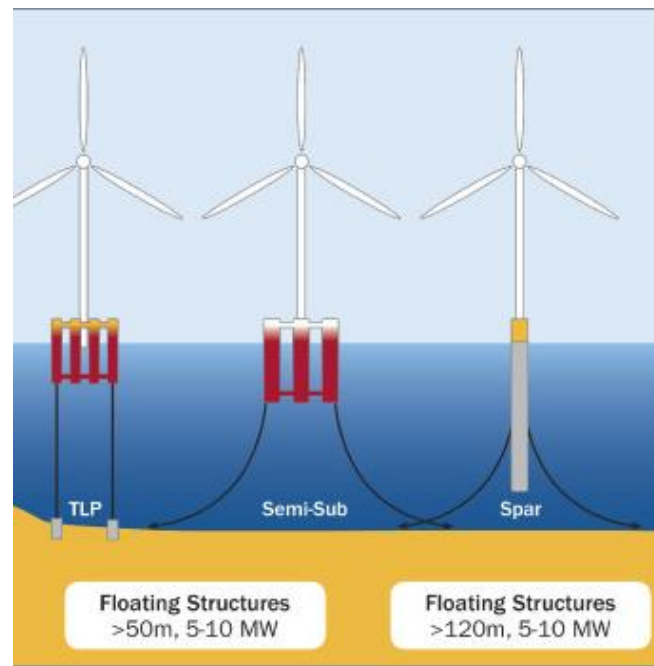


Figura 19: Plataformas flotantes.

Spar: Un cilindro con un plano de área bajo, lastrado para mantener el centro de gravedad por debajo del centro de flotabilidad. La plataforma mantiene su posición debido al empleo de cadenas o tensas líneas de amarre unidas a anclas de succión o de arrastre.



Figura 20: Plataforma tipo Spar.

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tendencia a generar menos movimientos críticos inducidos por el oleaje. 2. Diseño simple 3. Bajos costes en la instalación de líneas de amarre 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Las operaciones en alta mar requieren grandes y pesadas barcazas con potentes equipos de elevación que actualmente solo pueden operar en aguas profundas relativamente protegidas. 2. Necesita aguas más profundas que el resto de tecnologías (100 m aprox.) Consiste en una estructura cilíndrica sumergida en su práctica totalidad.

Semis-Sub: Varias grandes columnas unidas mediante arriostramientos y flotadores sumergidos. Las columnas aportan la estabilidad hidrostática, y los flotadores flotabilidad adicional. Mantiene su posición gracias a líneas de amarre conectadas a anclas de arrastre.



Figura 21: Plataforma tipo semis-sub.

Ventajas	Desventajas
1. Construido en tierra firme o en seco.	1. Tendencia a mayores movimientos críticos inducidos por el oleaje
2. La plataforma completamente equipada puede flotar durante el transporte con calados menores de 10 metros de profundidad.	2. Frecuentemente requieren mayor cantidad de material y mayores estructuras en comparación con otras tecnologías.
3. El transporte a su ubicación final se realiza con remolcadores tradicionales.	3. Fabricación compleja en comparación con las demás plataformas, especialmente con las spar.
4. Puede ser instalado en aguas de profundidades de 40 metros.	
5. Bajos costos de instalación.	

TLP: Hace referencia a las siglas 'Tension Leg Platform' debido a que los cables, a diferencia de la estructura semis-sumergible, están tensionados lo que permite cierto movimiento horizontal pero estabilidad vertical ante las olas y el viento.

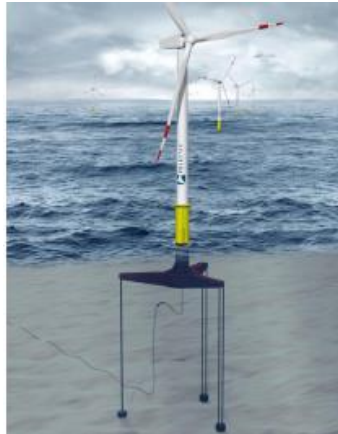


Figura 22: Plataforma tipo TLP.

La parte crítica del diseño reside en el anclaje de los cables al lecho marino, como consecuencia de la tensión a la que están sometidos no todos los fondos serán adecuados para dicho anclaje. Existen varios diseños de estructura TLP que se usan para distintas tareas en alta mar, en función de la estabilidad deseada y las cargas que deba soportar. Son de alta flotabilidad, formada por una columna central y brazos anclados al fondo marino mediante cables tensionados unidos a anclas de succión o perforadas.

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tendencia a generar pocos movimientos críticos inducidos por el oleaje. 2. Bajo peso. 3. Puede ser instalada en tierra firme o en dique seco. 4. Puede ser empleado en aguas de profundidades de desde los 50-60 metros dependiendo de las condiciones oceanicas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Resulta complicado mantener la plataforma estable durante el transporte y la instalación. 2. Dependiendo del diseño, puede ser necesario el empleo de una barcaza de características especiales. 3. Cierta incertidumbre sobre el posible impacto de efectos dinámicos de alta frecuencia en el aerogenerador.

4. Mayor coste de instalación de líneas de amarre.

4.2 Gráficos de control.

Los Gráficos de control son utilizados para poder analizar el comportamiento de diferentes procesos y poder prever posibles fallos en equipos o procesos mediante métodos estadísticos, en este caso serán utilizados en generadores eólicos offshore. Primero se analizarán las cartas de control utilizadas para controlar procesos univariantes, las cuales son más sencillas y fáciles de aplicar como son los gráficos de control Shewhart, los de sumas acumuladas (Cusum) y los de medias móviles exponencialmente ponderadas (EWMA). Después seguiremos con el análisis del control de procesos multivariantes los cuales son más complejos como son los sistemas MCusum y MEWMA y principalmente los gráficos T^2 de Hotelling que son los utilizados para este trabajo.

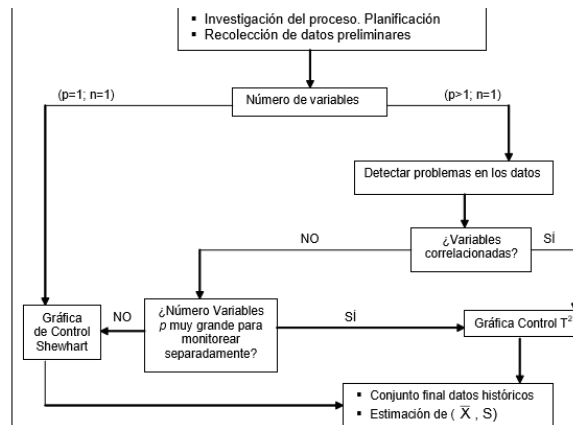


Figura 23: Proceso de las gráficas de control.

Un gráfico de control es un gráfico con tiempo en el eje X y cuyo eje Y muestra la salida de un proceso en particular. El gráfico, junto con los límites de control establecidos a partir de la teoría de la probabilidad, proporciona una pista visual de la estabilidad del proceso. Cuando un punto en el gráfico cae fuera de los límites de control, o cuando se observan ciertos comportamientos anómalos, los operadores pueden ser alertados para investigar o realizar otras acciones. Lo que se trata es de

controlar el proceso con ayuda de reglas de decisión que localicen discrepancias apreciables entre los datos observados y las normas del proceso que se controla. Se dice que un proceso está bajo control estadístico cuando sólo se producen variaciones debidas a causas comunes. En otras palabras el objetivo y razón de ser control Estadístico de Procesos es ayudar a identificar las causas especiales que producen variaciones en el proceso y suministrar información para tomar decisiones. En el grafico se van representando de forma correlativa los valores muestrales con objeto de poder monitorizar el proceso. Se acostumbra a unir los valores representados mediante líneas poligonales para poder visualizar con mayor facilidad la salida de los límites de control, o la presencia anómala de secuencias no aleatorias (rachas). Debe mencionarse que aun cuando todos los valores muestrales se encuentren en los límites de control pueden presentarse secuencias de valores por encima o por debajo de la línea central que indiquen claramente una alteración en el proceso, para ello serán útiles realizar distintos contrastes que permitan detectar estas salidas de control. En general para interpretar los patrones de un grafico de control existen las siguientes pautas.[10],[12].

Tendencias o rachas: Si el desplazamiento de la media o de la variabilidad es paulatino a lo largo del tiempo.

Periodicidades: Son repeticiones cíclicas de alguna de las graficas de control.

Inestabilidad: Consiste en la presencia de grandes fluctuaciones que, en ocasiones, pueden provocar que algún valor caiga fuera de los limites de control.

Sobre estabilidad: Es el fenómeno contrario y se da cuando la variabilidad es menor de la esperada.

De manera más específica se cuentan con diferentes criterios para analizar los gráficos de control y tomar decisiones, por ejemplo, se tiene las reglas de la Western Electric. Estas reglas dicen que una salida de control estaría indicada si ocurre uno de los siguientes casos:

- Un punto cae fuera de los límites 3 sigmas.
- Dos de tres puntos caen fuera de los límites dos sigmas.
- Cuatro de cinco puntos consecutivos se encuentran a una distancia de una sigma o más de la línea central.
- Ocho puntos consecutivos se encuentran al mismo lado de la línea central.

Existe una gran variedad dentro de los gráficos de control los cuales se pueden dividir en dos grupos principales como los de control univariante y control multivariante.

4.2.1 Gráficos de control univariantes

Los gráficos de control univariantes, como su propio nombre indica, se caracteriza por el número de variables monitorizadas de un proceso. En este caso las variables monitorizadas es una, donde se establecen unos límites de control del proceso y se analiza su comportamiento. Bajo el pensamiento de Shewhart fueron desarrollados los primeros gráficos de control, con el propósito de descubrir causas asignables. Estos gráficos fueron diseñados para el control de calidad de procesos de fabricación, pero hoy en día son técnicas de monitorización utilizadas en muchos ámbitos, incluidos los buques, donde su aplicación ayuda a la monitorización de los procesos de la sala de maquinas para la detección, predicción y prevención de fallos y averías. En este apartado, analizaremos los gráficos de control univariantes de mayor aceptación en la industria por su sencillez y efectividad práctica, como son los gráficos de control Shewhart, los de sumas acumuladas (Cusum) y los de medias móviles exponencialmente ponderadas (EWMA). Para esto debemos de recordar antes varios conceptos sobre las graficas de control.[11], [13],

Distribución Normal o Campana de Gauss.

La distribución normal es desde luego la función de densidad de probabilidad “estrella” en estadística. Depende de dos parámetros μ y s , que son la media y la desviación típica respectivamente.

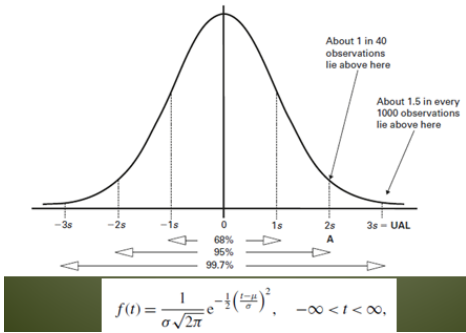


Figura 24: Campana de Gauss.

Tiene una forma acampanada (de ahí su nombre) y es simétrica respecto a μ . Llevando múltiplos de s a ambos lados de μ , nos encontramos con que el 68% de la población está contenido en un entorno $\pm 1s$ alrededor de μ , el 95% de la población está contenido en un entorno $\pm 2s$ alrededor de μ y que el 99,73% está comprendido en $\pm 3s$ alrededor de μ . Dado un grupo de datos organizados en una distribución de frecuencias (o bien una serie de observaciones sin ordenar), pretendemos describirlos mediante dos o tres cantidades sintéticas. En este sentido pueden examinarse varias características, siendo las más comunes:

1. La tendencia central de los datos.
2. La dispersión o variación con respecto a este centro.
3. Los datos que ocupan ciertas posiciones.
4. La simetría de los datos.
5. La forma en la que los datos se agrupan.

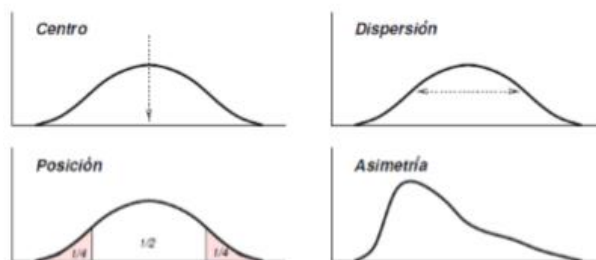


Figura 25: Características de la campana de Gauss.

Estadísticos de tendencia central

Las tres medidas más usuales de tendencia central son la media, la mediana y la moda. En ciertas ocasiones estos tres estadísticos suelen coincidir, aunque generalmente no es así. Cada uno de ellos presenta ventajas e inconvenientes que precisaremos más adelante. En primer lugar vamos a definir los conceptos anteriores.

La media

La media aritmética de una variable estadística es la suma de todos sus posibles valores, ponderada por las frecuencias de los mismos. Es decir, si la tabla de valores de una variable X es:

X	n_i	f_i
x_1	n_1	f_1
...
x_k	n_k	f_k

Tabla 2: Tabla de valores de una variable.

La media es el valor que podemos escribir de las siguientes formas equivalentes:

$$\begin{aligned}\bar{X} &= x_1 f_1 + \dots + x_k f_k \\ &= \frac{1}{n} (x_1 n_1 + \dots + x_k n_k) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i n_i\end{aligned}$$

Si los datos no están ordenados en una tabla, entonces:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n}$$

Uno de los inconvenientes de la media es que es muy sensible a los valores extremos de la variable, ya que todas las observaciones intervienen en el cálculo de la media, la aparición de una observación extrema, hará que la media se desplace en esa dirección. No es recomendable usar la media como medida central en las distribuciones muy asimétricas y si consideramos una variable discreta, el valor de la media puede no pertenecer al conjunto de valores de la variable.

Rango

Una medida razonable de la variabilidad podría ser la amplitud o rango, que se obtiene restando el valor más bajo de un conjunto de observaciones del valor más alto. Propiedades del rango:

1. Es fácil de calcular y sus unidades son las mismas que las de la variable.
2. No utiliza todas las observaciones (sólo dos de ellas);
3. Se puede ver muy afectada por alguna observación extrema;

4. El rango aumenta con el número de observaciones, o bien se queda igual. En cualquier caso nunca disminuye.

Desviación típica o estándar

La varianza no tiene la misma magnitud que las observaciones (ej. si las observaciones se miden en metros, la varianza lo hace en metros cuadrados. Si queremos que la medida de dispersión sea de la misma dimensionalidad que las observaciones bastarán con tomar su raíz cuadrada. Por ello se define la desviación típica, S , como:

$$S = \sqrt{s^2}$$

4.2.1.1 Gráficos shewart

El Dr. Walter A. Shewhart durante su estancia en la compañía Western Electric, ante la necesidad de sustituir los rudimentarios sistemas de calidad de la época, consistentes en el chequeo de productos acabados y sustitución de los defectuosos, se propuso disminuir la variabilidad del proceso, en torno a unos cánones de calidad establecidos. Estableció la idea de que los problemas ocurridos durante un proceso, pueden ser por causas comunes o aleatorias y causas especiales o asignables. Estos gráficos son extremadamente útiles en la implementación de la fase I de SPC, donde es probable que el proceso esté fuera de control y experimentando causas asignables que resultan en grandes cambios en los parámetros monitoreados. Los gráficos de Shewhart también son muy útiles en los aspectos de diagnóstico de traer un proceso rebelde en el control estadístico, porque los patrones en estos cuadros a menudo proporcionan orientación sobre la naturaleza de la causa asignable. Una desventaja importante de un gráfico de control de Shewhart es que usa solo la información sobre el proceso contenido en la última observación de muestra e ignora cualquier información dado por toda la secuencia de puntos. Esta característica hace que el gráfico de control de Shewhart sea relativamente insensible a pequeños cambios de proceso, por ejemplo, del orden de aproximadamente 1,5 segundos o menos. Esta potencialmente hace que los cuadros de control de Shewhart sean menos útiles en problemas de monitoreo de fase II, donde el proceso tiende a operar

bajo control, estimaciones confiables de los parámetros del proceso (como la media y la desviación estándar) están disponibles, y las causas asignables no suelen generar grandes perturbaciones o perturbaciones en el proceso. Por supuesto, otros criterios, como los límites de advertencia y otras reglas de sensibilización pueden aplicarse a los cuadros de control de Shewhart en fase II para mejorar su rendimiento frente a pequeños turnos. Sin embargo, el uso de estos procedimientos reduce la simplicidad y la facilidad de interpretación del cuadro de control Shewhart, y como hemos observado anteriormente, también reducen drásticamente la longitud promedio de ejecución del gráfico cuando el proceso está realmente en control. Esto puede ser muy indeseable en la fase II monitoreo de procesos. Estos gráficos son una visualización gráfica de una característica de calidad que se ha medido o calculado a partir de una muestra en función del número o el tiempo de la muestra. El gráfico contiene una línea central que representa el valor promedio de la característica de calidad correspondiente al estado bajo control. (Es decir, solo hay causas casuales). Otras dos líneas horizontales, llamadas límite de control superior (UCL) y límite de control inferior (LCL), también se muestran en el gráfico. Estos límites de control se eligen de modo que si el proceso está bajo control, casi todos los puntos de muestra caerán entre ellos. Mientras los puntos se trazan dentro de los límites de control, se supone que el proceso está bajo control y no es necesaria ninguna acción. Sin embargo, un punto que se traza fuera de los límites de control se interpreta como evidencia de que el proceso está fuera de control, y se requieren investigaciones y acciones correctivas para encontrar y eliminar la causa o causas asignables responsables de este comportamiento. Es habitual conectar los puntos de muestra en la tabla de control con segmentos de línea recta, para que sea más fácil visualizar cómo la secuencia de puntos ha evolucionado con el tiempo. Incluso si todos los puntos se trazan dentro de los límites de control, si se comportan de manera sistemática o no aleatoria, esto podría ser una indicación de que el proceso está fuera de control. Por ejemplo, si 18 de los últimos 20 puntos se trazan por encima de la línea central pero por debajo del límite de control superior y solo dos de estos puntos se trazan por debajo de la línea central pero por encima del límite de control inferior, sospecharemos que algo está mal. Si el proceso está bajo control, todos los puntos trazados deben tener un patrón esencialmente aleatorio. Los métodos para buscar secuencias o patrones no aleatorios pueden aplicarse a los gráficos de control como ayuda para detectar condiciones fuera de control. Por lo

general, hay una razón por la cual un patrón no aleatorio en particular aparece en un gráfico de control, y si se puede encontrar y eliminar, se puede mejorar el rendimiento del proceso.

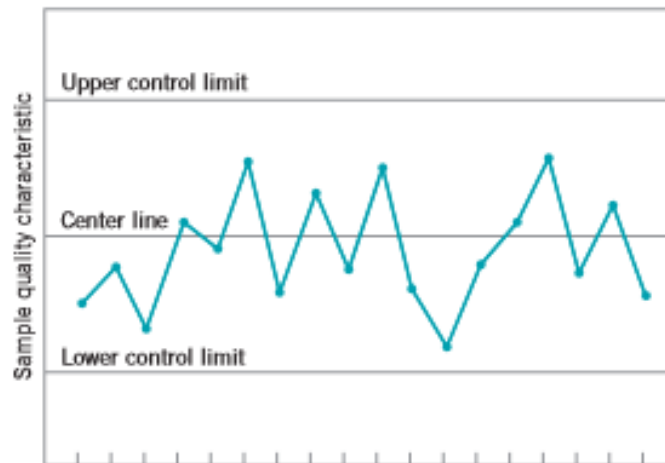


Figura 26: Gráfica Shewart.

Shewart también diseñó los gráficos para controlar la media y la variabilidad del proceso mediante dos gráficos de control, por un lado el gráfico de media rango (X-R) y por otro lado el gráfico de media desviación típica (X-S).

Gráficos X-R

Los gráficos X-R se utilizan para controlar dos parámetros básicos de un proceso: la media y la dispersión. Esta carta se usa cuando los datos se pueden agrupar de una manera lógica. Monitoriza la media de estos grupos y con el rango la variabilidad. La variación entre muestras es pequeña comparada con la variación entre grupos de 4 o 5 muestras y el tamaño de las muestras es conveniente que se mantenga. Para determinar si un proceso está o no bajo control conviene utilizar los dos gráficos conjuntamente. El procedimiento correcto es el siguiente:

Primero se construye el gráfico de rangos (también denominado gráfico de recorridos o gráfico de amplitudes), gráfico R, para comprobar si la variación del proceso está bajo control. Después una vez que la dispersión está en control estadístico se construye el gráfico de medias o gráfico X. Si los parámetros μ y σ son desconocidos, como ocurre en el problema que nos ocupa, hay que estimarlos a partir de la información a muestrear. Para llegar a las estimaciones definitivas, se realizan los cambios oportunos, se eliminan los posibles puntos que estén fuera de

control y se recalculan los límites, hasta conseguir que el proceso esté bajo control. Estimación de μ : El valor estimado de μ se obtiene promediando las medias muestrales disponibles, es decir mediante \bar{X} . Si $X_1, X_2 \dots X_m$ son las medias de las muestras, se toma como estimador de μ la media de las medias:

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_m}{m}$$

Se cumple que $\mu = XE$, por tanto \bar{X} es un estimador insesgado de μ . La línea central del gráfico de control de la media, será el valor \bar{X} . Para poder calcular el límite superior e inferior necesitamos estimar la desviación típica σ . Estimación de σ : Existen varios métodos para la estimación de σ , pero utilizaremos el basado en las amplitudes o rangos de las muestras, definidos como:

$$R = \text{Máx } X_i - \text{Mín } X_i.$$

Para tamaños de muestras pequeñas procedentes de una población normal, la estimación de σ que se obtiene utilizando el rango es prácticamente similar al obtenido con el estimador tradicional S (Grant y Leavenworth 1988: 64). Sin embargo, cuando el tamaño muestral es moderadamente grande ($n > 10$ ó 12) el método del rango para estimar σ pierde eficiencia. Por consiguiente, para muestras de pequeño tamaño, se define:

$$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i$$

Siendo $R_1, R_2 \dots R_m$ los rangos de las m muestras consideradas. Se comprueba que:

$$E(\bar{R}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E(R_i) = d_2 \sigma$$

Por tanto, un estimador de σ viene dado por:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Dicho estimador, es un estimador insesgado de σ puesto que:

$$E(\hat{\sigma}) = E\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right) = \frac{1}{d_2} E(\bar{R}) = \frac{1}{d_2} d_2 \sigma = \sigma$$

A partir de los parámetros estimados se calculan los límites de control para los gráficos X y los gráficos R, tal y como se establece a continuación.

$$\begin{aligned} \bar{X} \pm 3\hat{\sigma}_x &= \bar{X} \pm 3 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} = \bar{X} \pm \frac{3}{\sqrt{n}} \frac{\bar{R}}{d_2} = \bar{X} \pm A_2 \bar{R} \\ &= \end{aligned}$$

$$\frac{3}{\sqrt{n}} \cdot \frac{1}{d_2}$$

Por tanto las líneas de control del gráfico se representan:

$$LSC = \bar{X} + A_2 \bar{R}$$

$$LC = \bar{X}$$

$$LIC = \bar{X} - A_2 \bar{R}$$

Gráficos R Para construir el gráfico R, representaremos gráficamente los rangos de las sucesivas muestras, siguiendo la filosofía general del diseño de los gráficos de control. La media de R se estima por:

$$\hat{\mu}_R = \bar{R} \quad \text{y} \quad \sigma_R \quad \text{por:} \quad \hat{\sigma}_R = d_3 \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Luego los límites de control 3-sigma son:

$$\bar{R} \pm 3\hat{\sigma}_R = \bar{R} \pm 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} = \left(1 \pm 3 \frac{d_3}{d_2}\right) \bar{R}$$

Siendo:

$$D_4 = 1 + 3 \frac{d_3}{d_2}; \quad D_3 = 1 - 3 \frac{d_3}{d_2}$$

Las constantes D_3 y D_4 están tabuladas en tablas. Cuando $n \leq 6$, la constante D_3 es negativa. Por ese motivo en la tabla aparece $D_3=0$ y el límite inferior de control sería $LIC=D_3R=0$. En estos casos el gráfico de los rangos no tiene límite inferior de control. En general, el gráfico de control consta de la línea central y los correspondientes límites inferior y superior:

$$LSC = D_4\bar{R}$$

$$LC = \bar{R}$$

$$LIC = D_3\bar{R}$$

Gráficos X-S:

El funcionamiento de estos gráficos es similar al de los gráficos XR pero cambia el procedimiento para estimar la dispersión. Su utilización se aconseja cuando el tamaño de muestra sea superior a 10. Si se toman m muestras, para cada una se calcula S :

$$S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}} ; \quad \sigma \text{ es: } \hat{\sigma} = \frac{\bar{S}}{c_4} ; \quad \bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i$$

La media del proceso se sigue estimando mediante $\bar{\bar{X}}$, y siguiendo un razonamiento similar a los anteriores se obtienen las siguientes expresiones para el gráfico de control $\bar{X} - S$:

Gráfico \bar{X}

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_3\bar{S}$$

$$LC = \bar{\bar{X}}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_3\bar{S}$$

Gráfico S

$$LSC = B_4\bar{S}$$

$$LC = \bar{S}$$

$$LIC = B_3\bar{S}$$

	<i>n</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{X} - R$	A_2	1,880	1,023	0,729	0,577	0,483	0,419	0,373	0,337	0,308
	d_2	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078
	D_3	0	0	0	0	0	0,076	0,136	0,184	0,223
	D_4	3,267	2,574	2,282	2,114	2,004	1,924	1,864	1,816	1,777
$\bar{X} - S$	A_3	2,659	1,954	1,628	1,427	1,287	1,182	1,099	1,032	0,975
	c_4	0,7979	0,8862	0,9213	0,94	0,9515	0,9594	0,965	0,9693	0,9727
	B_3	0	0	0	0	0,03	0,118	0,185	0,239	0,284
	B_4	3,267	2,568	2,266	2,089	1,97	1,882	1,815	1,761	1,716

Tabla 3: Constantes para determinar los limites de control de los gráficos X-R y X-S.

4.2.1.2 Gráficos Cusum

Esta carta de control se utiliza en la Fase II del control estadístico de procesos, después de haber implementado las cartas X-media&R o X-media&s. Esta carta es sensible a los pequeños desplazamientos fuera de control que se pueden producir pues tiene una sensibilidad que trabaja muy bien hasta por debajo de las 1,5 veces desviaciones estandard. Se supone que para usar esta técnica, previamente el proceso está trabajando ya en control (Fase I). Este tipo de grafico surgieron ante la necesidad de cubrir las limitaciones existentes en los gráficos de Shewhart, por su característica de falta de memoria considerando solo la última muestra obtenida, perdiendo la información provista por las muestras anteriores, y no siendo muy efectivos en la detección de cambios pequeños en el proceso. El grafico de sumas acumulativas o gráficos CUSUM (Cumulative Sum) que basa en el análisis de toda o la mayor parte de la muestra. Para este fin se usa el estadístico sr:

$$s_r = \sum_{i=1}^r (\bar{x}_i - \mu_0)$$

Este estadístico tiene en cuenta las r primeras submuestras para tomar la decisión sobre la muestra r-esima. Considerando todos las diferencias de cada media muestral (x_i) con la media del proceso (μ_0). Si se llama a estas diferencias tal que $d_i = x_i - \mu_0$. La idea del grafico CUSUM es representar las sumas acumuladas de estas diferencias, es decir los valores: $s^1 = d_1$, $s^2 = d^1 + d^2, \dots$, de esta forma en cada instante r se considera también la información histórica de los valores anteriores. Un

desajuste pequeño se irá así acumulando haciendo más fácil su detección. El estadístico de sumas acumuladas adopta la siguiente forma:

$$C_i = \sum_{j=1}^i (\bar{X}_j - \mu_0) = X_i - \mu_0 + \sum_{j=1}^{i-1} (\bar{X}_j - \mu_0) = (X_i - \mu_0) + C_{i-1}$$

Donde i es el número de muestras consideradas, \bar{X}_j es el promedio de la j -ésima muestra y μ_0 es el valor objetivo, normalmente la media global de la variable monitorizada cuando el proceso está bajo control. El gráfico cusum incorpora directamente toda la información en la secuencia de valores de muestra al trazar las sumas acumulativas de las desviaciones de los valores de muestra de un valor objetivo. Por ejemplo, suponga que se recolectan muestras de tamaño $n \geq 1$, y \bar{X}_j es el promedio del j th muestra. Entonces, si μ_0 es el objetivo de la media del proceso, el gráfico de control de suma acumulativa es formado al trazar la cantidad contra el número de muestra i . C_i se denomina suma acumulativa hasta e incluyendo la i -ésima muestra. Debido a que combinan información de varias muestras, los gráficos de suma acumulativa son más efectivos que los gráficos Shewhart para detectar pequeños cambios en el proceso. Además, son particularmente eficaz con muestras de tamaño $n = 1$. Esto hace que la tabla de control de suma acumulativa un buen candidato para su uso en las industrias química y de procesos donde los subgrupos racionales son con frecuencia de tamaño 1, y en la fabricación de piezas discretas con medición automática de cada monitoreo de partes y procesos en línea directamente en el centro de trabajo.

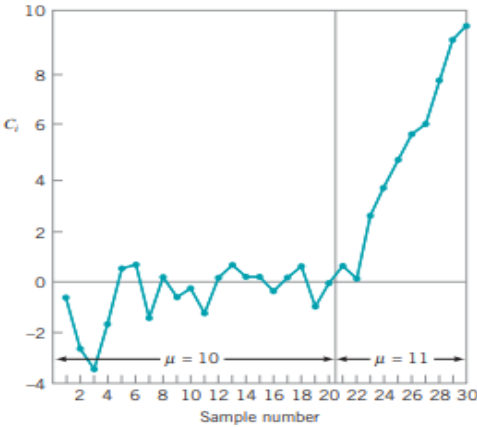


Figura 27: Gráfico Cusum.

Observamos que si el proceso permanece bajo control en el valor objetivo m_0 , la suma acumulativa definido en la ecuación anterior es una caminata aleatoria con media cero. Sin embargo, si la media cambia hacia arriba a algún valor $m_1 > m_0$, digamos, entonces se desarrollará una deriva positiva o hacia arriba en la suma acumulativa C_i . Por el contrario, si la media se desplaza hacia abajo a algún $m_1 < m_0$, entonces un valor hacia abajo o se desarrollará una deriva negativa en C_i . Por lo tanto, si se desarrolla una tendencia significativa en los puntos trazados ya sea hacia arriba o hacia abajo, debemos considerar esto como evidencia de que el proceso significa cambiado, y se debe realizar una búsqueda de alguna causa asignable. Existen dos planteamientos diferentes para establecer los límites de control en este tipo de gráficos: Cusum tabular o algorítmico y mascara en V o V-Mask. De los dos planteamientos, el Cusum tabular es el más recomendado. Ahora presentamos la construcción y el uso de la Cusum tabular. También discutiremos brevemente el procedimiento de la máscara en V e indicaremos por qué no es la mejor representación de un cusum. Ahora mostramos cómo se puede construir una cúspide tabular para monitorear la media de un proceso. Los cusums se pueden construir tanto para observaciones individuales como para los promedios de subgrupos El caso de las observaciones individuales ocurre muy a menudo en la práctica, por lo que esa situación será tratado primero. Más adelante veremos cómo modificar estos resultados para subgrupos racionales. Sea x_i la i -ésima observación del proceso. Cuando el proceso está bajo control, x_i tiene una distribución normal con media m_0 y desviación estándar s . Suponemos que cualquiera de las dos es conocido o que hay una estimación confiable disponible. Estas suposiciones son muy consistentes con aplicaciones de fase II de SPC, la situación en la que el cusum es más útil. Luego lo haremos discuta el monitoreo de s con un cusum. A veces pensamos en m_0 como un valor objetivo para la característica de calidad x . Este punto de vista a menudo se toma en las industrias químicas y de procesos cuando el objetivo es controlar x (viscosidad, por ejemplo) a un valor objetivo particular (como 2000 centistokes a 100°C). Si el proceso se desvía o se desvía de este valor objetivo, el cusum señalará y se realizará un ajuste en algunos variable manipulable (como la velocidad de alimentación del catalizador) para devolver el proceso al objetivo. Además, en algunos casos, una señal de un cusum indica la presencia de una causa asignable que debe investigarse igual que en el caso del cuadro de Shewhart. El núcleo tabular funciona acumulando derivaciones de m_0 que están por

encima del objetivo con una estadística C^+ y derivaciones acumuladas de m_0 que están por debajo del objetivo con otra estadística C^- . Las estadísticas C^+ y C^- se denominan cusums superiores e inferiores unilaterales, respectivamente. Se calculan de la siguiente manera:

$$C_i^+ = \max[0, X_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+]$$

$$C_i^- = \max[0, (\mu_0 - K) - X_i + C_{i-1}^-]$$

Donde los valores iniciales son $C^+ = C^- = 0$, μ_0 es el valor medio de la característica de calidad cuando el proceso se encuentra bajo control, X_i es el valor de la i -ésima observación y K es el valor de referencia. Normalmente, el valor de tolerancia K , es la mitad entre el valor objetivo y el valor fuera de rango que se está interesado en detectar o si la desviación es expresada en desviaciones típicas como:

$$\delta^* = (\mu_1 - \mu_0) / \sigma$$

$$K = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2} = \frac{\delta}{2} \sigma = k \cdot \sigma$$

Los límites de control o intervalos de decisión están dados por:

$$H = h \cdot \sigma$$

Donde, los parámetros k y h son seleccionados para aportar un buen comportamiento del ARL. Estudios desarrollados por numerosos autores, han permitido establecer un valor de k igual a la mitad de la desviación que queremos detectar y valores de h iguales a 4 ó 5, para los que se proveerá un gráfico Cusum con buenas propiedades en el valor de longitud promedio de corrida (ARL) ante pequeñas desviaciones en la media del proceso. Otra forma de analizar el gráfico Cusum, es a través del Cusum V-Mask propuesto por Barnard. Para la representación gráfica de este tipo de Cusum se utiliza el siguiente estadístico:

$$C_i = \sum_{j=1}^i y_j = y_i + C_{i-1}$$

Donde y_i es la observación estandarizada, $y_i = (x_i - \mu_0)/\sigma$. Una máscara en V, es una V de costado que se superpone en el gráfico de sumas acumuladas. El punto de origen de la máscara de V se coloca sobre el último punto de suma acumulada y los puntos anteriores se examinan para ver si alguno cae por encima o por debajo de los lados de la V. Si todos los puntos anteriores se encuentran entre los lados de la V, el proceso se considera bajo control, por el contrario, como en el gráfico representado más abajo, si alguna suma acumulada cae fuera de la V, se sospecha que el proceso está fuera de control. Esta máscara debe aplicarse a cada nuevo punto que se trace en el gráfico Cusum, los brazos de la nueva máscara se consideran una extensión de los brazos determinados anteriormente.

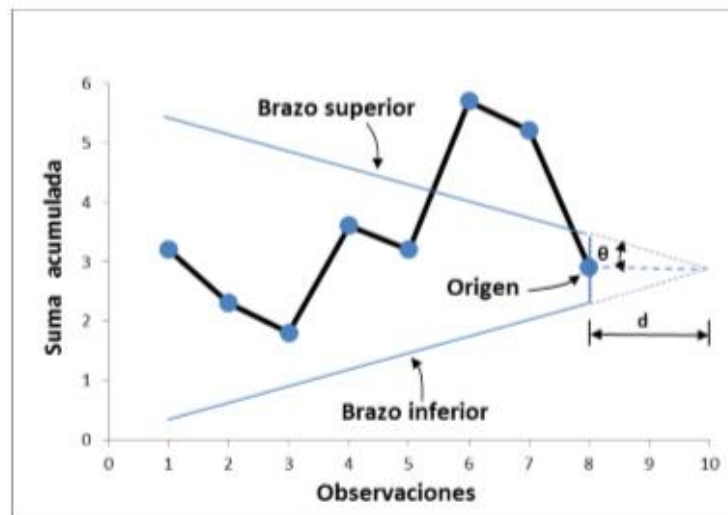


Figura 28: Gráfico Cusum.

4.2.1.3 Gráficos Ewma

Los gráficos EWMA o de “medias móviles ponderadas exponencialmente” se suelen realizar sobre observaciones individuales. También se acumulan observaciones pasadas. La variable representada es un promedio de la observación contemporánea y las observaciones anteriores, donde se da más peso a las informaciones históricas se le denominan media móvil. Utilizan una forma muy propia de hacer medias móviles que consiste en dar un peso a las informaciones históricas que decae exponencialmente con el tiempo.

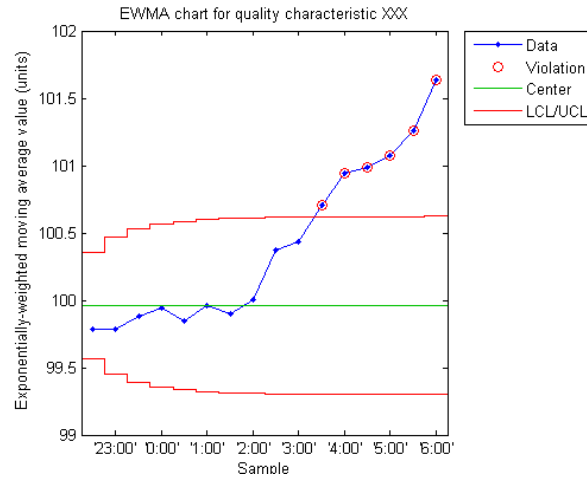


Figura 29: Gráfico Ewma.

El estadístico del EWMA se define como:

$$Z_i = \lambda \cdot x_i + (1 - \lambda) \cdot Z_{i-1}$$

Dónde:

λ : es una constante entre cero y uno que determina el mayor o menor peso que tienen los datos anteriores. Siendo el valor inicial de λ igual que el valor objetivo μ_0 .

X_i : es el promedio de la i -ésima muestra.

Z_{i-1} : es el valor del estadístico EWMA correspondiente al periodo anterior al momento en el que estamos situados. Si las observaciones x_i son variables aleatorias independientes con varianzas σ^2 entonces definió la varianza de z_i como:

$$\sigma_{z_i}^2 = \sigma^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) \cdot [1 - (1 - \lambda)^{2i}]$$

En conclusión, se puede afirmar que los gráficos Shewhart son muy sencillos de utilizar y se comportan muy bien en la detección de cambios grandes, por encima de $1,5 \sigma$, mientras que, ante variaciones menores en el proceso, se hace necesaria la utilización de gráficos como Cusum o EWMA. Ambos gráficos (Cusum y EWMA) tienen un buen comportamiento ante variaciones pequeñas, cuando el cambio comienza a aumentar, el gráfico EWMA tienen un mejor comportamiento, sin

embargo, los cálculos del ARL para este gráfico se hacen muy tediosos y es necesario la utilización de un software especial.

4.2.2 Gráficos de control multivariantes

En la mayoría de casos prácticos, en nuestro caso los equipos de los generadores eólicos offshore, son definidos por varias variables al mismo tiempo, de forma que si alguna de estas variables no se encuentra en su valor óptimo, el equipo o proceso no trabaja a la totalidad de su rendimiento. Los gráficos de control multivariantes se comenzaron a desarrollar por primera vez en 1947 con el propósito de controlar varias variables de forma simultánea, y hoy en día tienen una gran importancia en el control moderno de procesos, ya que los procedimientos de inspección automáticos permiten fácilmente medir un gran número de variables dentro de un mismo proceso. Los gráficos anteriores estudian sólo una característica de calidad, pero es posible que en un proceso de producción sea necesario vigilar varias características simultáneamente, en cuyo caso estamos ante un control multivariante. Una primera posibilidad sería estudiar cada característica de calidad por separado, es decir aplicar gráficos de control para cada variable que se desea controlar. Así, un proceso se juzgaría bajo control cuando cada uno de los gráficos individuales lo estuviera; sin embargo, no es posible controlar las interacciones entre las diversas variables ni la variación a lo largo de tiempo, pues no se tiene en cuenta la información que aportan las covarianzas y su estabilidad. Para solucionar este problema, se dio impulso a técnicas de control multivariado, con las que es posible analizar varias características de la calidad al mismo tiempo. Dentro de estas técnicas multivariantes, por su desarrollo y mayor uso cabe destacar las siguientes: técnicas basadas en distancias (T^2 de Hotelling), MEWMA y MCusum. Los gráficos de control multivariante se aplican en dos etapas conocidas como fase I y fase II. En la primera fase se toma el proceso inicial (datos históricos) y se construyen los gráficos de control preliminares y en la segunda fase se toman muestras para monitorear el comportamiento estadístico del proceso y detectar variaciones en el proceso. [14]

Fase I

La fase 1 también se denomina etapa de inicio, ya que su propósito es desarrollar el conjunto de datos históricos (Historical Data Set), el HDS que define los límites de control o las condiciones operativas de referencia a las cuales se compararán las nuevas observaciones durante la fase 2. Para establecer el HDS, se utiliza un conjunto preliminar de datos, ya que se considera que los datos de este proceso representaban el perfil del proceso bajo las mejores condiciones operativas monitoreadas. Los datos de este proceso se evalúan para la presencia de valores atípicos antes de considerarlos como el HDS. En esta fase, para el cálculo del LSC (Límite Superior de Control), se utilizó la distribución β de $\alpha = 0.05$, valor utilizado en la mayoría de procesos industriales. Límites de control para el vector de medias:

1. Límite superior de control (LSC):

$$\text{LSC} = \frac{(n-1)^2}{n} \beta\left(\alpha, \frac{p}{2}, \frac{n-p-1}{2}\right)$$

Fase II

Una vez desarrollada una línea base de un proceso representativo y condiciones operacionales del HDS, la fase 2 en la construcción de gráficos de control multivariantes consiste en comprobar si una nueva entrada de datos permanece bajo control respecto al HDS. En esta fase, el vector de medias y la matriz de covarianzas son obtenidas desde el HDS para los cálculos de T^2 . El LSC, se determinó por la siguiente expresión:

$$\text{LSC} = \frac{p(n+1)(n-1)}{n(n-p)} F\{\alpha, p, n-p\}$$

Para el cálculo del LSC, se utilizó la distribución F de $\alpha = 0,05$. El nivel de α elegido es el nivel normalmente utilizado en procesos industriales pero este es variable, dependiendo del nivel de restricción del método. Los valores de T^2 que exceden del LSC establecido, son declarados como señales atípicas y esto conduce a que la observación esta fuera de rango con respecto al funcionamiento de operación normal del proceso.

4.2.2.1 Gráfico MCusum

Los cuadros de control de MCUSUM se colocan en dos categorías principales. En primer lugar, se considera que la dirección del cambio (o cambios) es conocida (esquemas específicos de dirección), mientras que en el segundo la dirección del cambio se considera desconocida (esquemas direccionalmente invariantes). Primero presentamos gráficos de control CUSUM, para los cuales suponemos que se conoce la dirección del cambio (o cambios). En él se describe como un proceso normal multivariado p -dimensional puede ser monitoreado usando p gráficos CUSUM univariados para las p variables originales o usando p gráficos CUSUM univariados para los p componentes principales. Este esquema CUSUM univariado múltiple se llama MCUSUM. El MCUSUM emite una señal fuera de control cada vez que cualquiera de los gráficos univariados de CUSUM hace lo mismo. El rendimiento de ARL en un proceso multivariado se estudia en relación con características de calidad independiente y dependiente. Se utiliza el hecho de que los gráficos CUSUM se pueden ver como una serie de pruebas de razón de probabilidad secuencial, para desarrollar un gráfico MCUSUM. Sea x_i la i -ésima observación, que deriva de $N_p(\mu_0, \Sigma_0)$ con un vector medio $p \times 1$ en control μ_0 y una matriz de covarianza-varianza común $p \times p$ conocida. Sea μ_1 el vector de medias $p \times 1$ fuera de control. El CUSUM para detectar un cambio en μ_0 hacia μ_1 puede escribirse como:

$$S_i = \max. [(S_{i-1} + a^t(x_i - \mu_0) - 0.5 \lambda(\mu_1)), 0]$$

Donde $\lambda(\mu_1)$ es la raíz cuadrada del parámetro de no centralidad y en $a^t = [(\mu_1 - \mu_0)^t \Sigma_0^{-1}] / \lambda(\mu_1)$. Este esquema CUSUM señala cuando $S_i \geq H$. Como está claro, este procedimiento CUSUM se reduce a un procedimiento univariado para detectar un cambio en la media de una variable normal. Es decir, toda la teoría disponible para calcular ARL, H y S_0 para un CUSUM normal univariado también se puede utilizar para este CUSUM normal multivariante. También se realiza un procedimiento similar para controlar la dispersión del proceso. El CUSUM para detectar un cambio en la matriz de varianza-covarianza, de la forma $\Sigma_1 = C\Sigma_0$ (C es una constante real), puede escribirse como:

$$S_i = \max [(S_{i-1} + D_i^2 - K), 0]$$

Donde $K = \text{plog}C (C / (C - 1))$ y $D_i^2 = (x_i - \mu_0) \sum_{l=0}^{i-1} (x_l - \mu_0)$. Este esquema CUSUM señala cuando $S_i \geq H$. El gráfico de estos CUSUM en un gráfico común proporciona un gráfico de control de CUSUM de mejor rendimiento para la ubicación. Una señal fuera de control ocurre cuando cualquiera de estos cuatro CUSUM excede el intervalo de decisión h . Los valores de h y k se seleccionan como en cualquier gráfico CUSUM univariante porque cada uno se basa en una sola variable aleatoria que sigue la distribución $N(0, 1)$. Se indica una señal fuera de control cuando MCZ y ZNO exceden un valor umbral establecido para fijar el ARL en control. Se aplicó el monitoreo y diagnóstico de procesos estadísticos multivariados con variables agrupadas ajustadas por regresión. Más adelante se propusieron dos nuevos esquemas multivariados CUSUM. El primer esquema se basa en la raíz cuadrada de la estadística T^2 de Hotelling, mientras que el segundo se puede derivar reemplazando las cantidades escalares de un esquema CUSUM univariado con vectores. Además, se introdujeron dos nuevos esquemas MCUSUM para los casos en que la dirección del cambio se considera desconocida. El primer CUSUM es un CUSUM del escalar D_i , la raíz cuadrada del estadístico D_i^2 , y está dado por

$$S_i = \max[0, S_{i-1} + D_i^2 - k], \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Con $S_0 = 0$, y k elegido para ser $0.5\lambda^2 (\mu_1) + p$. El proceso está fuera de control si el S_i excede un límite de control superior H . El segundo CUSUM propuesto puede construirse definiendo MC_i como

$$\gamma_i = [S_i^t \Sigma_0^{-1} S_i]^{1/2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Donde $MC_0 = 0$, k se elige para que sea $0.5\lambda (\mu_1)$, μ_1 es una media fuera de control especificada

$$D_i = \sum_{l=i-n_i+1}^i (x_l - \mu_0)$$

n_i es el número de subgrupos desde la renovación más reciente (es decir, valor cero) del gráfico CUSUM, formalmente definido como

$$n_i = \begin{cases} n_{i-1} + 1 & \text{if } MC_{i-1} > 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Este gráfico funciona trazando MC_i en un gráfico de control con un límite de control superior de H (H se investiga mediante simulación). Si MC_i excede H , entonces el proceso está fuera de control.

4.2.2.2 Gráfico MEWMA

Los gráficos de Media móvil exponencialmente ponderada multivariable, MEWMA por sus siglas en inglés, son una extensión multivariante de los gráficos EWMA. Estos gráficos al igual que los MC_{Cusum} , nos va a permitir considerar la información contenida en la serie, pero por el contrario, se pierde la independencia entre observaciones. Sea X_i^t la i^{th} de observación p -dimensional. Además, suponga que X_i sigue a $N_p(\mu_0, \Sigma_0)$ con una matriz de varianza-covarianza Σ conocida y un vector medio p -dimensional conocido μ_0 . Lowry propuso un cuadro de control MEWMA de la siguiente manera:

$$Z_i = R x_i + (I-R) z_{i-1} = \sum_{j=1}^i R(I-R)^{i-j} x_j, \quad i=1,2,3,\dots$$

Donde $R = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_p)$ y $0 \leq r_k \leq 1$ for $k = 1, 2, 3, \dots, p$, e I es la matriz de identidad. Si no hay una razón previa para ponderar las observaciones pasadas de manera diferente para las características de calidad p que se están monitoreando, entonces $r_1 = r_2 = \dots = r_p = r$. El valor inicial z_0 generalmente se obtiene como igual al vector medio en control del proceso. Es obvio que si $R = I$, entonces el gráfico de control MEWMA es equivalente al gráfico T_2 . El gráfico MEWMA proporciona una señal fuera de control si $z_i^t \Sigma z_i - z_{i-1}^t \Sigma z_{i-1} > h$, donde Σz_i es la matriz de varianza-covarianza de z_i . El valor h se calcula mediante simulación para lograr un ARL en control especificado. El rendimiento ARL del gráfico de control MEWMA depende solo del parámetro de no centralidad, pero en el caso de que se usen constantes de ponderación desiguales, el ARL depende de la dirección del cambio. Esto significa que el MEWMA tiene la propiedad de la invariancia direccional. La matriz de varianza-covarianza de Z_i se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\Sigma z_i = \sum_{j=1}^i \text{Var}[R(I-R)^{i-j} x_j] = \sum_{j=1}^i R(I-R)^{i-j} \Sigma (I-R)^{i-j} R$$

O cuando $r_1 = r_2 = \dots = r_p = r$

$$\Sigma z_i = (1 - (1-r)^{2i}) r / (2-r) \Sigma$$

A continuación se presenta una aproximación de la matriz de varianza-covarianza \sum_{z_i} para $i+\infty$ como:

$$\sum z_i = r/(2-r)\sum$$

Sin embargo, el uso de la matriz de varianza-covarianza exacta de MEWMA conduce a una respuesta inicial rápida y natural para el gráfico MEWMA. Pueden producirse problemas de inercia con el cuadro MEWMA y se propone el uso simultáneo de un cuadro tipo Shewhart.

4.2.2.3 Gráfico T^2 de Hotelling

Este gráfico propuesto por Hotelling (1947) permite monitorear la distancia estadística entre un vector de observaciones y el vector de medias, para los casos en que se utilizan observaciones individuales. El gráfico de control de T^2 de Hotelling es utilizado habitualmente para controlar simultáneamente varias características correlacionadas que indican la calidad de un único proceso productivo. El gráfico T^2 de Hotelling es una extensión al caso multivariante del gráfico de control Shewart univariante. Utiliza un estadístico que combina la información para la dispersión y la media de las variables que se están analizando. Suponiendo que los datos se distribuyen normal p variada con vector de medias μ_0 y matriz de covarianzas Σ conocidos, la estadística T^2 para la i -ésima observación individual $X_i^t = (X_{i1}, \dots, X_{ip})$ viene dada por:

$$T^2(X_i) = (X_i - \mu_0)^t \Sigma^{-1} (X_i - \mu_0) \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

μ_0 : Es el vector que contiene las medias poblacionales de las características bajo control, el Σ es la matriz de varianzas y covarianzas cuando el proceso se encuentra bajo control, n es el tamaño muestral empleado y X_i el vector que contiene los promedios muestrales observados de las p características analizadas. De esta manera, es posible construir un gráfico de control con solo un límite de control superior (ya que este estadístico es no negativo), el cual se situaría para un nivel de significancia α , en $LSC = X^2(\alpha, p)$ valor que representa el punto porcentual α de la distribución X^2 con p grados de libertad. Como en la práctica se desconocen los parámetros de la distribución del proceso bajo control (centramiento y estructura de

asociación), surge la necesidad de estimarlos a través de una muestra obtenida del mismo proceso, dando origen a la distribución T^2 Hotelling:

$$T^2(\mathbf{X}_i) = (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})^t \mathbf{S}^{-1} \sum^{-1} (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}}) \quad i= 1,2,\dots, n.$$

Donde el valor de medias muestrales viene dado por:

$$\bar{\mathbf{X}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{X}_i,$$

y la matriz de covarianzas muestrales:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{n-1} (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}}) (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})^t$$

El gráfico de control consiste en graficar la estadística T^2 frente al número de observaciones. Sin embargo, dependiendo de si se conocen o no los parámetros de la distribución normal p variada, se considera una distribución diferente a un nivel de significancia α Díaz (2002). Esta distribución, según el caso, permite asociar un límite de control superior el cual se representa en el gráfico de control como una línea recta con la cual se puede indicar si un proceso está bajo control. Esta es una diferencia notable frente a los gráficos de control univariados ya que no tienen importancia el límite central ni el de control inferior debido a que la estadística T^2 por ser cuadrática nunca es negativa. Además, no presenta ningún problema si es muy cercano a cero (indicaría que la observación es muy cercana al vector de medias de las variables). Si la variabilidad de las observaciones en el proceso es natural o común, se presenta un gráfico de control donde cada estadística está por debajo del límite de control superior, se dice entonces que el proceso está bajo control. En caso contrario se dice que el proceso está fuera de control, y se deberá a que la variabilidad de las observación es en el proceso no es natural o presenta alguna causa asignable o especial. [14]

El gráfico de control T^2 se aplica en dos fases que se conocen como fase I y II. En la primera de ellas se toma un conjunto de datos históricos y se construye el gráfico de control T^2 para establecer si el proceso se encontraba bajo control cuando se sacaron n observación es individual es preliminar es y se calcularon los estadísticos \bar{X} y S . El objetivo en la fase I es obtener un conjunto de observaciones homogéneas

bajo control con fin de establecer el límite de control superior para la fase II, el cual consiste en el monitoreo de la producción futura. En ocasiones se le denomina análisis retrospectivo Montgomery (2004).

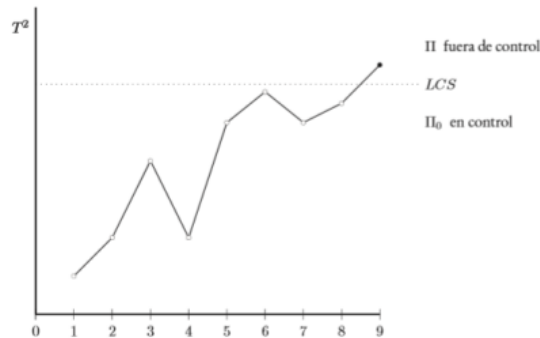


Figura 30: Gráfico T^2 de Hotelling.

4.3 Monitorización de los generadores eólicos offshore

Con objeto de garantizar su disponibilidad y fiabilidad, cada vez hay más técnicas que permiten realizar un seguimiento de la vida de los aerogeneradores. Estas técnicas, usan la información de monitorización continua disponible de la vida de operación, para intentar, tanto detectar y diagnosticar posibles anomalías que puedan acabar en fallos inesperados, como poder así evaluar mejor la condición de los aerogeneradores a corto-medio plazo. El conseguir una mayor disponibilidad de estos equipos, es de esperar que vaya acompañada de una reducción de los costes de explotación y mantenimiento de los parques eólicos. En la actualidad, el mantenimiento que se viene aplicando en los aerogeneradores en operación, típicamente utiliza modelos de mantenimiento preventivo basados en intervenciones a intervalos de tiempo constante, o por número de horas de funcionamiento. Estas estrategias de mantenimiento son las recomendadas por los fabricantes de los aerogeneradores. Sin embargo, éstas no tienen presente la vida real y local de los aerogeneradores, como, por ejemplo, las condiciones meteorológicas locales, posible estrés por sobrecargas, horas trabajadas de forma continua, arranques, etc. Todos estos factores son determinantes para conocer el detalle de la vida real de

cada aerogenerador, y el mantenimiento que realmente necesita. La aplicación del mantenimiento realmente necesario permitirá llevar a cabo una política de inversión óptima en recursos de mantenimiento, y además ayudará a prolongar tanto como sea posible el ciclo de vida del aerogenerador. Los más recientes avances en tecnología de medida permiten el uso de sensores, capaces de monitorizar características relevantes de la condición de salud de componentes industriales.

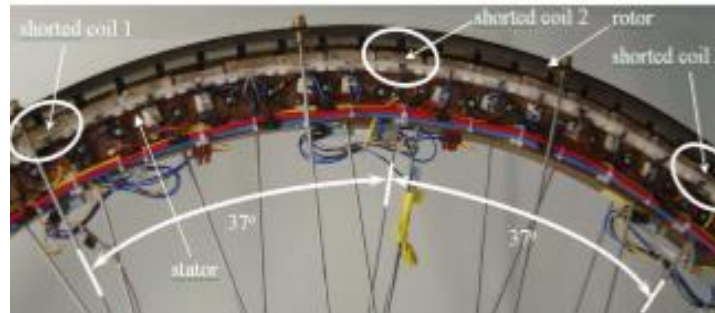


Figura 31: Sensores de medición.

Los aerogeneradores son máquinas que trabajan de forma remota desasistida y que, traen de fábrica un importante número de sensores que, típicamente, son esenciales en el control automático de las diferentes partes del aerogenerador. Estos sensores no sólo son útiles desde el punto de vista de operación, sino que también pueden tener un importante valor en el mantenimiento de la máquina. De hecho, los sensores instalados, más otros que se pueden añadir, podrían usarse para aplicar técnicas de seguimiento de la condición del estado de salud de los aerogeneradores.[7]

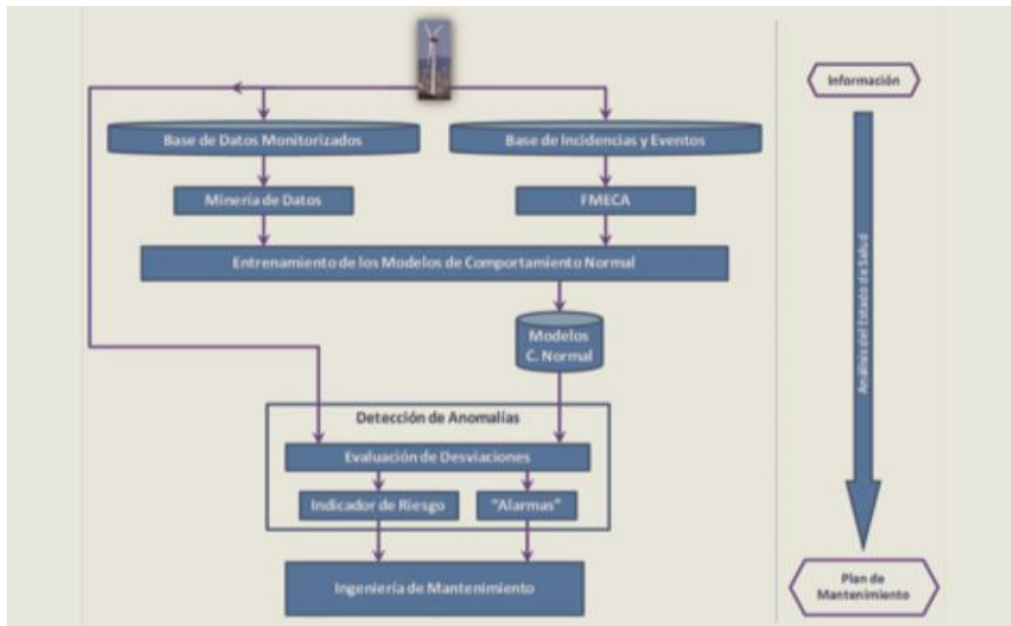


Figura 32: Metodología para evaluación del indicador de riesgo.

Son cinco los componentes fundamentales, y aunque aparecen claramente identificados en el siguiente esquema, en la práctica algunos de ellos pueden estar integrados en un mismo sistema hardware/software. Esta estructura se inspira en el “Modelo de Objeto”. Los componentes principales para la implementación del sistema CMS – FDS son los siguientes.[3]

Red de sensores: Contiene todos los sensores utilizados en el monitoreo, así como las conexiones de estos con los sistemas que controlan la adquisición de los datos. En esta red se encuentran los llamados drivers de hardware, los cuales establecen la configuración de mediciones (sensibilidad de los sensores, filtros, amplificación, frecuencia de muestreo y tiempo) que mejor se adecue a los requerimientos de los algoritmos de procesamiento de señales a aplicar.

Módulo de análisis de señales: Se controla la adquisición de datos. Incorpora algoritmos destinados fundamentalmente a la extracción de indicadores de diagnóstico de las señales medidas (algoritmos de procesamiento de la señal), que puedan representar información útil para la evaluación de la condición o estado del objeto de medición.

Módulo de evaluación o diagnóstico: Contiene algoritmos de diagnóstico, fundamentalmente basados en clasificación estadística.

Red de Comunicaciones: Contiene los elementos asociados a la comunicación entre los diferentes módulos, a la transmisión de datos hacia el aerogenerador y desde este.

Base de Datos: Importante elemento para evitar pérdidas de datos útiles de diagnóstico, así como la realización de estudios de tendencias.

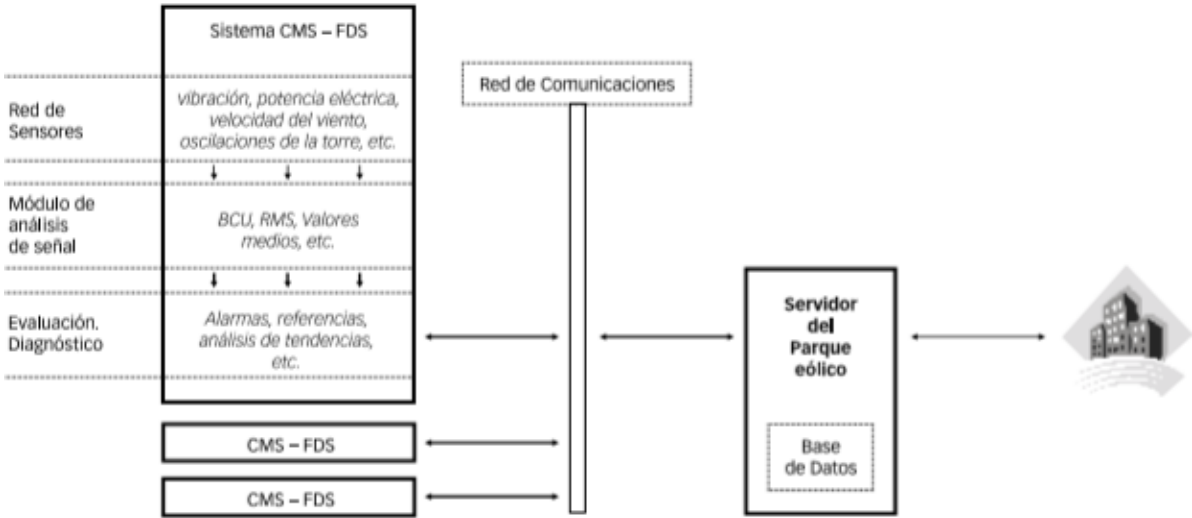


Figura 33: Esquema general de implementación de CMS-FDS en un parque eólico.

5. OBJETIVOS

En la industria existen muchas situaciones donde es necesario el control o monitoreo simultáneo de dos o más variables del proceso productivo para controlar el correcto funcionamiento y realizar un correcto mantenimiento. El objetivo de este trabajo consiste en la implementación de las cartas multivariantes mediante el uso del estadístico T^2 Hotelling en un aerogenerador offshore con la finalidad de mejorar su mantenimiento. Para ello se monitorizan las variables de funcionamiento mediante gráficos de control con el fin de identificar las posibles causas de variación presentes en el proceso.

En la primera parte del trabajo se muestra la filosofía general de la monitorización de las variables de los aerogeneradores y la de los gráficos de control, y se desarrollan brevemente los utilizados en la aplicación práctica posterior. En la segunda parte se diseñan, construyen e interpretan gráficos multivariantes, a partir de los datos relativos del aerogenerador recogidos en el software Labview. A través de este trabajo se busca mejorar el mantenimiento de los generadores eólicos ya que es un tema muy amplio e importante de estudio en el cual puede servir de gran ayuda, mejorando en concreto el mantenimiento predictivo y reduciendo el correctivo.

6. MATERIALES Y METODOLOGÍA

En el presente trabajo, queremos enfocar la investigación en la monitorización de los aerogeneradores en el sector eólico offshore con el fin de mejorar su mantenimiento. Esta sección se basa en el desarrollo de los materiales utilizados a lo largo del trabajo y en la metodología seguida, finalizando con la selección de varias variables de funcionamiento para monitorizarlas mediante gráficos de control de T^2 Hotelling para la detección de fallos en los aerogeneradores.

6.1 Materiales utilizados

Al comenzar la investigación el gran problema que tuvimos fue la disposición de datos reales de una turbina eólica offshore en funcionamiento. Ante este gran problema y sin la disposición de dichos datos para realizar la monitorización, se simularon las condiciones de funcionamiento de un aerogenerador real de 2 MW, después se simularon datos de funcionamiento induciendo varios errores con el fin de generar cambios respecto a los datos anteriormente simulados. A continuación se aplica la técnica de control de T^2 de Hotelling para comprobar la variante de estos datos y poder detectar fallos de antemano con el fin de mejorar su mantenimiento. A pesar de que el aerogenerador seleccionado es del tipo onshore, la monitorización de un aerogenerador offshore se lleva a cabo de la misma manera ya que las variables que se monitorizan son las mismas.

Descripción de la turbina eólica seleccionada



Figura 34: Aerogenerador de 2 MW.

El funcionamiento óptimo de esta turbina eólica se consigue en sitios de vientos medios y altos. Esta turbina obtiene su mejor rendimiento y está diseñada para ubicaciones con condiciones de viento altas y moderadas, aumentando la potencia nominal hasta 2 MW. Este modelo de aerogenerador garantiza una alta producción

de energía y bajos niveles de emisión de ruido, con la combinación de una caja de cambios de tres etapas (dos etapas planetarias y una paralela).

Especificaciones técnicas	
Datos generales	
Diámetro del rotor	75m
Área cubierta por el rotor	4418m²
Velocidad del rotor	9-21 rpm
Potencia nominal	2 MW
Velocidad nominal del viento	12 m/s
Corte a velocidad de viento	3.5 m/s
Relación de la caja de cambios	1:100
Momento total de inercia	5,9·10⁶ kgm²
Numero de polos	4
Velocidad del generador	900-2100 rpm
Inductancia LM	3.0p.u.
Reactancia de escape del estator Ls	0.10p.u.
Reactancia de escape del rotor Lr	0.08p.u.
Resistencia del estator Rs	0.01p.u.
Resistencia del rotor Rr	0.01p.u.
Inductancia de línea	0.1p.u.
Resistencia de línea	0.01p.u.

Tabla 4: Especificaciones técnicas del aerogenerador.

6.2 Metodología

En este apartado, se desarrolla una metodología que será capaz de monitorizar el aerogenerador seleccionado, sin pérdida de información del proceso realizando las medias y desviaciones estándar de las variables de funcionamiento. Para ello hemos realizado gráficos multivariantes con la técnica T² Hostelling en la cual estudiamos datos de funcionamiento de las variables simuladas del aerogenerador seleccionado a través de LabVIEW para poder monitorizar su mantenimiento con la detección de variaciones en los datos.

6.2.1 Simulación de datos.

Antes de diagnosticar las posibles fallas de funcionamiento y garantizar la confiabilidad de la turbina eólica seleccionada, hemos utilizado el software LabVIEW para desarrollar y simular una serie de datos de funcionamiento y también para simular datos producidos como erróneos. Estos datos procesados serán útiles para un sistema automático de diagnóstico de fallas y monitoreo de condiciones. Para ello hemos introducido datos reales de funcionamiento y las características propias del generador.

En las siguientes figuras, se puede observar el histórico de datos generado por Labview, estos datos han sido utilizados como Historical Data Set (HDS). Base de datos los cuales se simulan como funcionamiento correcto del aerogenerador mediante datos creados a lo largo de 7 días, cada 10 minutos, es decir 1008 datos de las siguientes variables.

Las variables controladas son:

- VAR 1: Temperatura del rodamiento trasero (°C).
- VAR 2: Presión del aceite de la multiplicadora (bar).
- VAR 3: La velocidad de giro del generador (rpm).
- VAR 4: La velocidad del viento (m/s).
- VAR 5: Potencia del aerogenerador (MW).

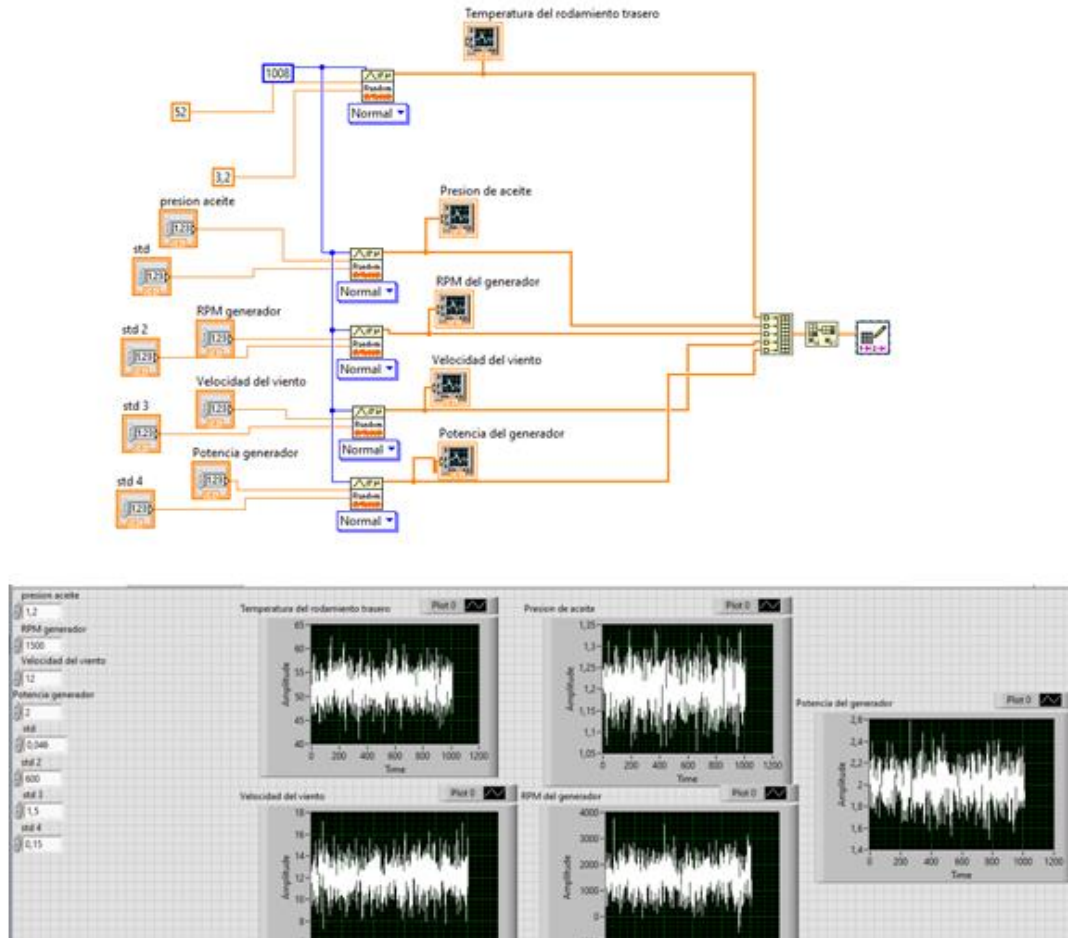


Figura 35: HDS generado en Labview.

A continuación se muestra la correlación existente entre las variables monitorizadas que se desarrolla mediante el sistema de correlación de Pearson. El coeficiente de correlación de Pearson se utiliza para estudiar la relación (o correlación) entre dos o más variables aleatorias cuantitativas en escala mínima de intervalo. Es una medida que nos da información acerca de la intensidad y la dirección de la relación. En otras palabras, se trata de un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente.

	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5
Var1	1.0	0,00287931	-0,00619172	0,00192554	-0,0504787
Var2	0,00287931	1.0	0,0147604	-0,0147942	-0,0076687
Var3	-0,00619172	0,0147604	1.0	-0,0038829	0,0269665
Var4	0,00192554	-0,0147942	-0,0038829	1.0	0,0625587
Var5	-0,0504787	-0,0076687	0,0269665	0,0625587	1.0

Tabla 5: Correlación de Pearson.

A través de este análisis se comprueba que las variables seleccionadas no tienen una gran correlación entre ellas. Con el siguiente diagrama se confirma que se cumple la normalidad multivariable a través del diagrama Q-Q cuartil el cual indica que la distribución de la variable es la misma que la distribución de comparación, por lo que se consigue aproximadamente, una línea recta.

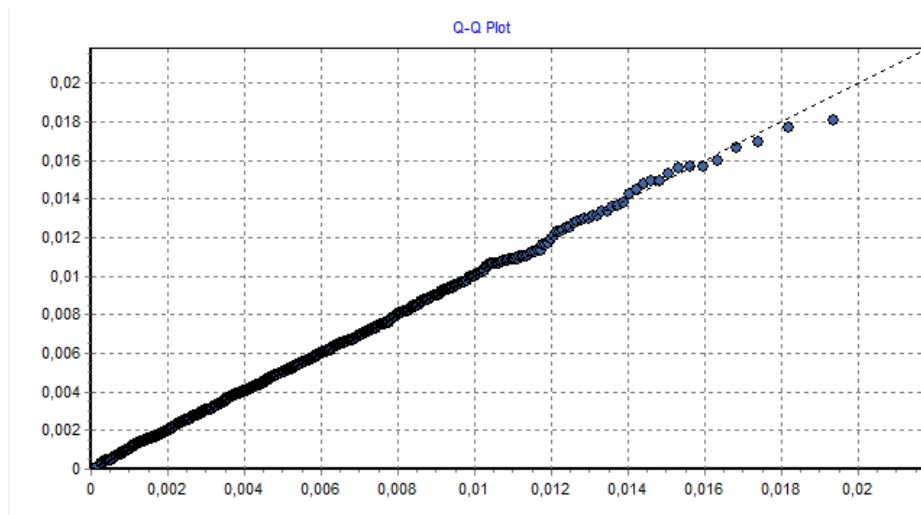


Figura 36: Gráfica Q-Q.

A continuación en la siguiente imagen se muestran los datos simulados con LabVIEW a lo largo de tres días (450 datos) tras haber generado error en dos de las cinco variables, en la presión de aceite de la multiplicadora y en la temperatura del rodamiento trasero. Con estos datos y los simulados anteriormente (Historical Data Set), realizaremos la comparación a través de los gráficos multivariantes con la técnica T^2 Hotelling la cual controla varias variables de forma simultánea. Es aquí donde comienza a ser aplicado lo explicado hasta el momento en el trabajo, la creación de gráficos multivariantes, que mejoren el control de procesos con el fin de mejorar el mantenimiento.

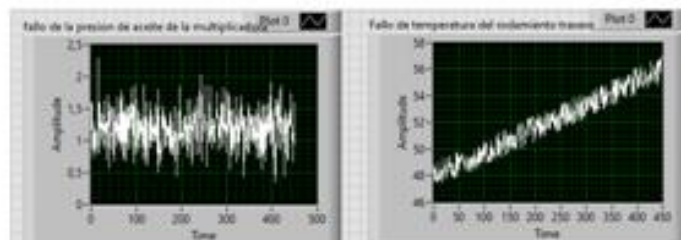
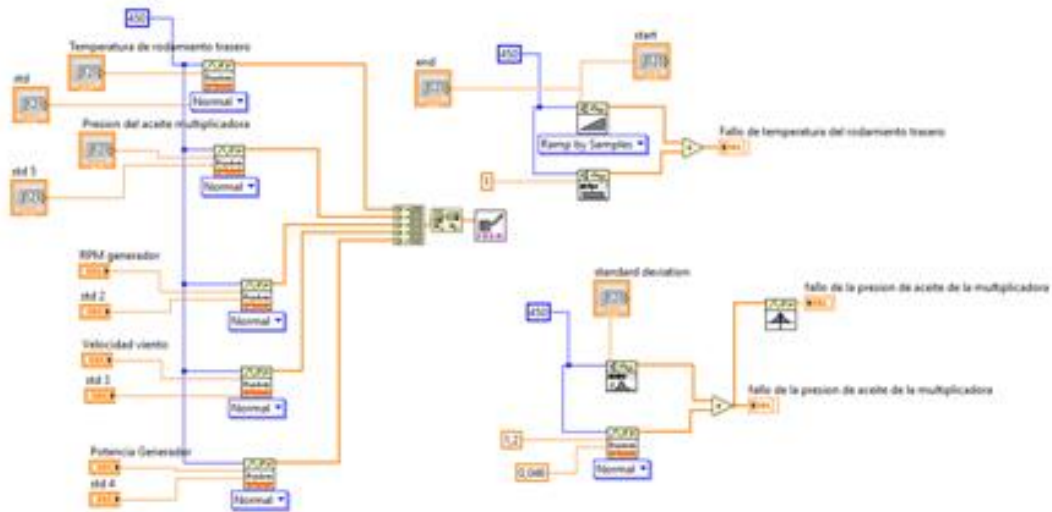


Figura 37: Datos simulados con error.

6.3 Cálculos

Como ya se ha explicado anteriormente para la realización de gráficos multivariantes mediante la técnica T^2 hostelling se deben realizar dos fases. Con esta técnica se comprueba si una nueva entrada de datos, genera cambios bruscos en el proceso, con respecto a la base de datos de histórica (HDS), previamente calculada.

Fase 1:

En esta fase se calculan los valores T^2 , para la nueva entrada de datos, siguiendo la siguiente expresión:

$$T_i^2 = (x_i - \bar{x})'S^{-1}(x_i - \bar{x})$$

Donde:

x_i = Datos preliminares

\bar{x} = Vector de medias

S^{-1} = Inversa de la matriz de covarianza

Podríamos definir esta fase como la fase de purgado para la obtención de la base histórica de los datos de referencia, es decir, creamos el proceso ideal, Historical Data Set (HDS), que define los límites con el que comparar nuevos datos. Para esta fase se toman los datos simulados en labview del aerogenerador seleccionado anteriormente, un grupo de datos preliminares que consideramos de funcionamiento correcto simulados durante 7 días (1008 datos). A su vez en esta misma fase hemos definido un límite de control superior (LSC), con la siguiente ecuación:

$$LSC = \frac{(n-1)^2}{n} \beta \left(\alpha, \frac{p}{2}, \frac{n-p-1}{2} \right)$$

Donde:

p = numero de variables

n = tamaño del conjunto de datos

$\beta \left(\alpha, \frac{p}{2}, \frac{n-p-1}{2} \right)$ = es el α th quantile de la distribución $\beta \left(\frac{p}{2}, \frac{n-p-1}{2} \right)$

$\alpha = 0,001$.

Si el valor de T^2 , el cual fue monitorizado para cada observación, excede el LSC, esta observación es eliminada de la base de datos preliminar. Con las restantes observaciones, calculamos nuevas estimaciones del vector de medias y de la matriz de varianzas y covarianzas. De nuevo se eliminan los outliers detectados y así repetimos el proceso hasta que obtuvimos un set de observaciones homogéneo. Finalmente el set final de datos obtenidos será el HDS, que define el modo de operación normal del proceso monitorizado. A la hora de realizar los gráficos se ha utilizado el programa informático QualStat en el cual nos hemos ayudado para poder graficar los gráficos T^2 de Hotelling. En la primera fase de eliminación de datos

atípicos, se monitorizaron 1008 datos y se salieron del LSC unos datos que se borraron obteniendo así un set homogéneo como el que se muestra en la siguiente figura.

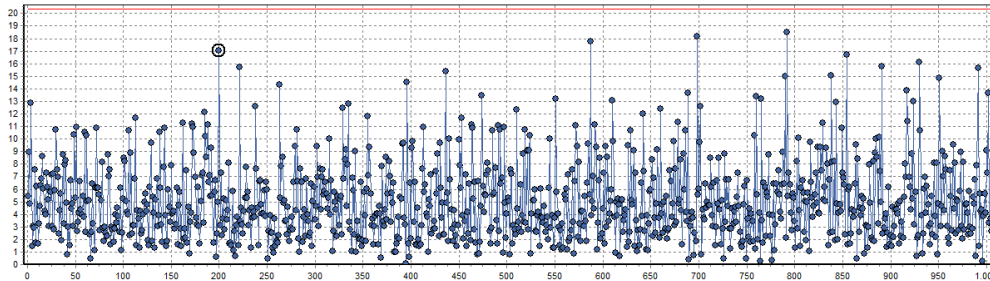


Figura 38: HDS.

Fase 2:

En esta segunda fase hemos realizado la introducción de los nuevos datos generados con error con el fin de analizar si se genera algún tipo de desviación respecto a los datos introducidos en la fase uno, es decir comparamos nuevos datos con el proceso anterior seleccionado como proceso normal. El set de entrada de nuevos datos ha sido conseguido a través de nuestro programa simulado en labview, del cual obtenemos una cantidad de datos de funcionamiento del aerogenerador.

A la hora de calcular los nuevos valores de T^2 hemos utilizado la siguiente ecuación:

$$T_i^2 = (x_i - \bar{x})' S^{-1} (x_i - \bar{x})$$

Donde:

\bar{x} : Vector de medias

S^{-1} : Matriz de covarianzas calculada en el HDS.

x_i : Nuevos datos.

Para el cálculo del LSC se siguió la ecuación:

$$LSC = \frac{p(n+1)(n-1)}{n(n-p)} F_{\{\alpha, p, n-p\}}$$

Donde:

$\alpha = 0.001$.

$p = n^{\circ}$ de variables.

$n =$ tamaño HDS

$\{\alpha, p, n-p\} = \alpha$ th quantile de $\{\alpha, , -p\}$

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados

A través de la carta de control de T^2 de Hotelling fueron monitorizadas 5 variables del funcionamiento del aerogenerador anteriormente seleccionado y se observa a través de ella que una muestra se sitúa fuera del LSC lo que indica que alguna de las variables de funcionamiento monitorizadas anteriormente está sufriendo una desviación, no está trabajando en las condiciones de funcionamiento consideradas normales.

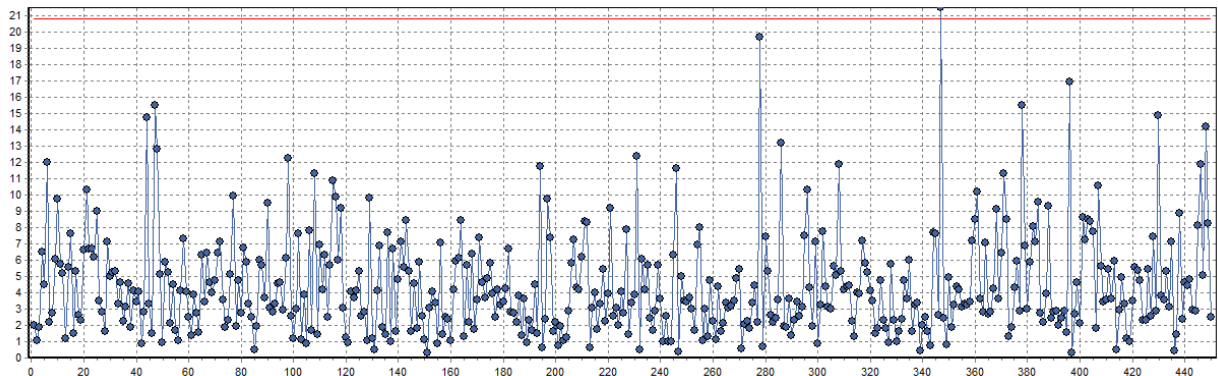


Figura 39: Carta de control T2.

Esta ocurrencia no significa que el aerogenerador este trabajando de forma errónea si no que a la hora de tomar esa muestra el proceso sufrió una desviación de la condición de operación normal. En el caso de seguir monitorizando este mismo proceso y no observásemos reiteradas desviaciones no tendría mayor importancia, pero en caso de repetirse una y otra vez desviaciones similares sería un indicativo de que el proceso del aerogenerador está fallando y habría que averiguar cuál de las variables sería la causa raíz del fallo como se ha realizado en las siguientes graficas.

Primero se analiza la variable numero 5 respecto a las otras variables y se observa que esta variable esta bajo las condiciones de proceso de funcionamiento normal. Con las variables 3 y 4 ocurre exactamente lo mismo. Las variables 1 y 2 son las que presentan fallo al sufrir desviaciones. A continuación se muestran algunas de las graficas realizadas a la hora de averiguar la variable que causa el error.

Variable 5: Potencia del aerogenerador.

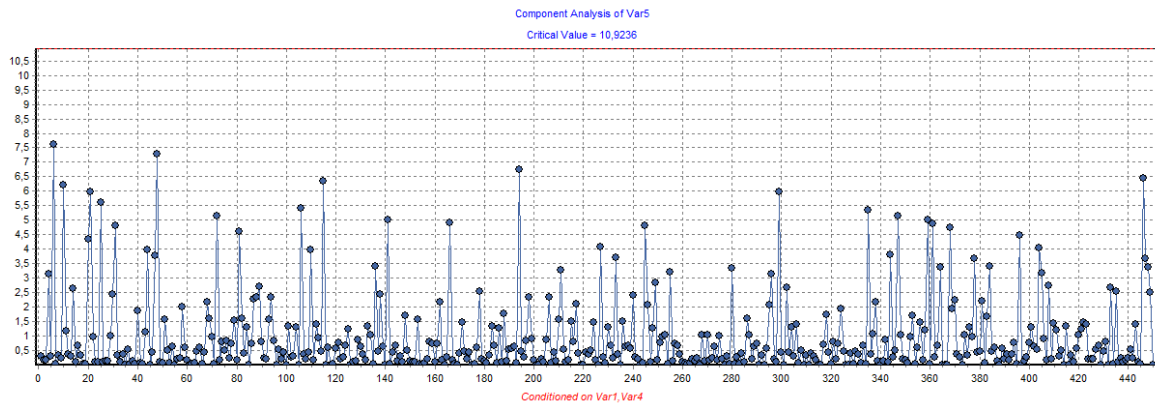


Figura 40: Variable 5 comparada con la 1 y la 4.

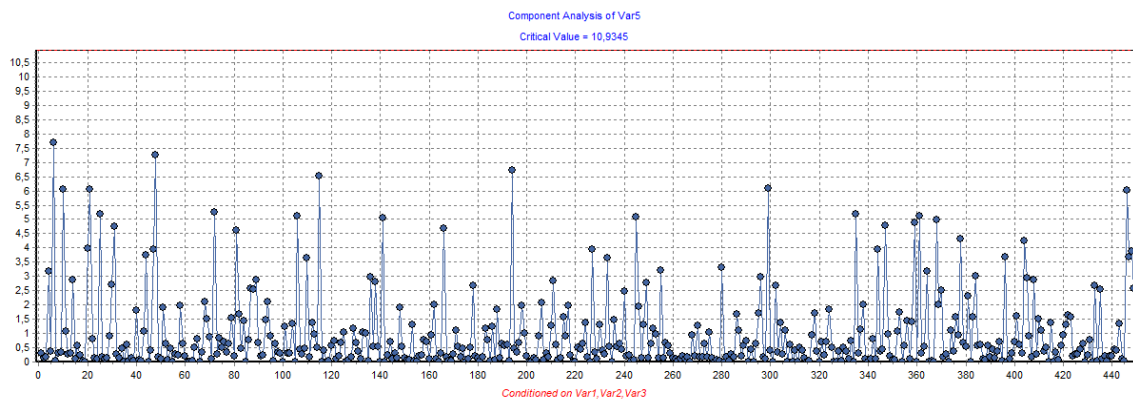


Figura 41: Variable 5 comparada con la 1, 2 y 3.

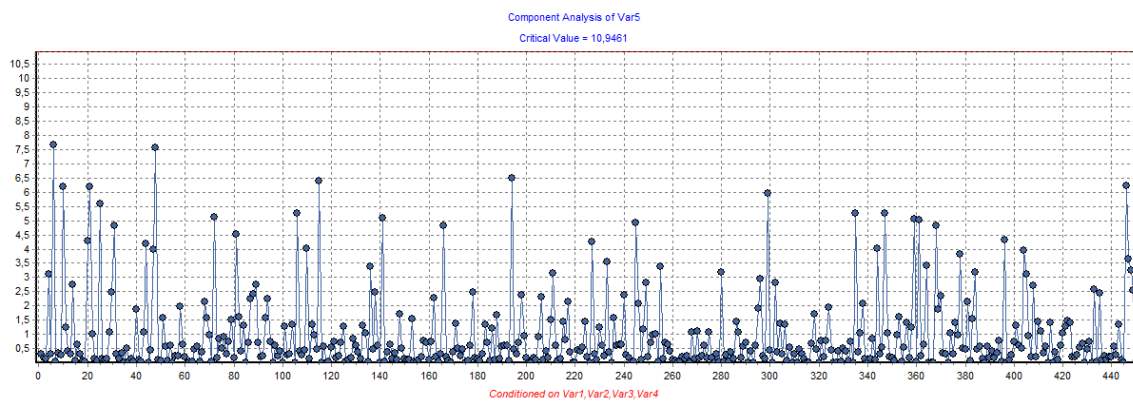


Figura 42: Variable 5 comparada con la 1, 2, 3 y 4.

Variable 3: Velocidad de giro del generador.

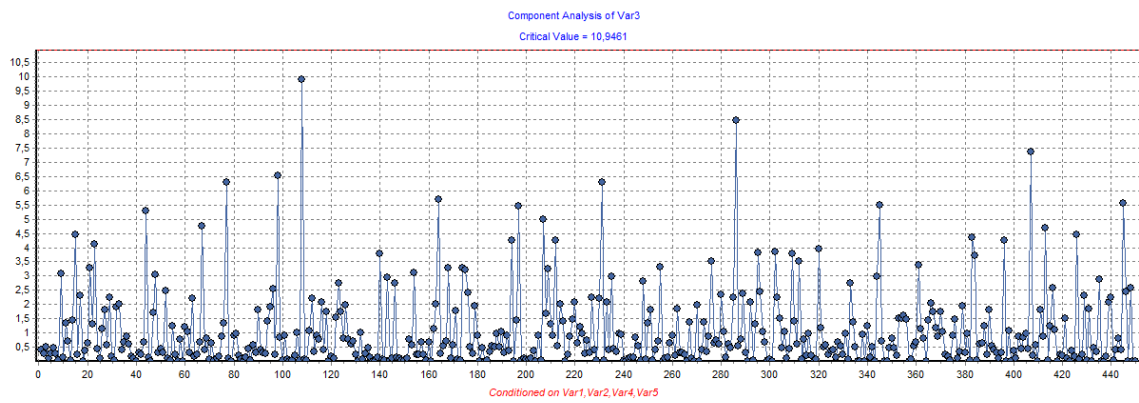


Figura 43: Variable 3 comparada con la 1, 2 ,4 y 5.

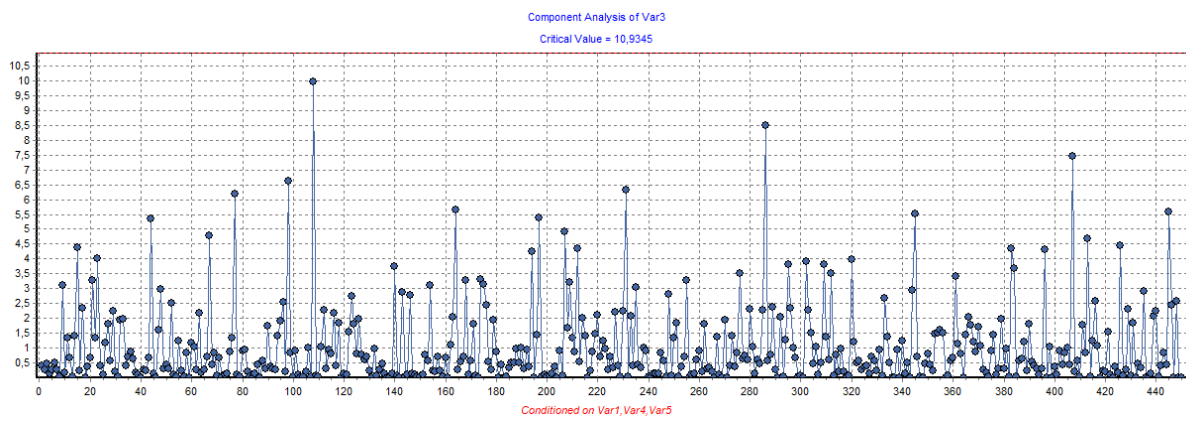


Figura 44: Variable 3 comparada con la 1, 4 y 5.

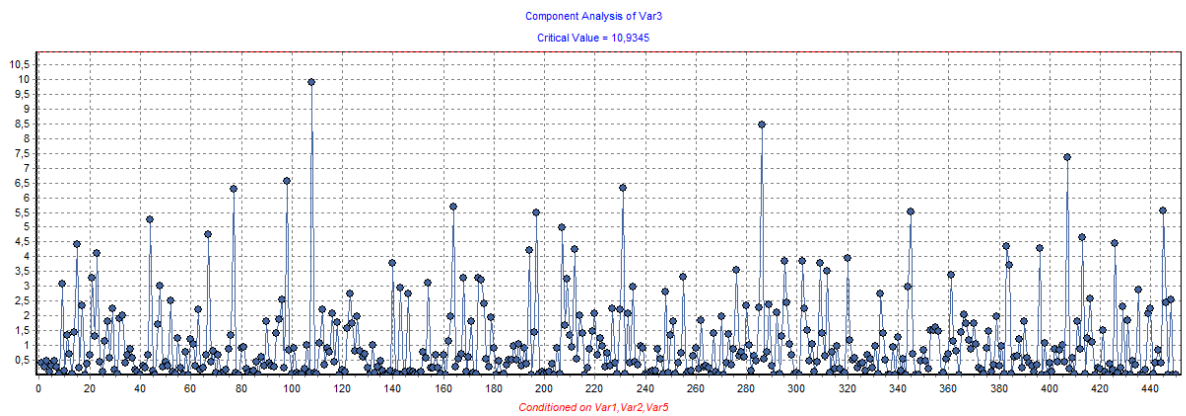


Figura 45: Variable 3 comparada con la 1, 2 y 5.

Variable 4: Velocidad del viento.

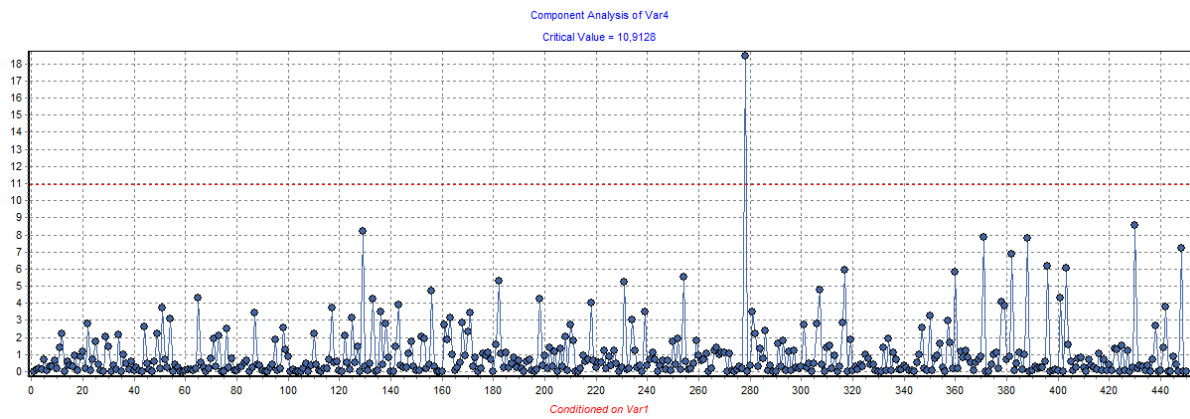


Figura 46: Variable 4 comparada con la 1.

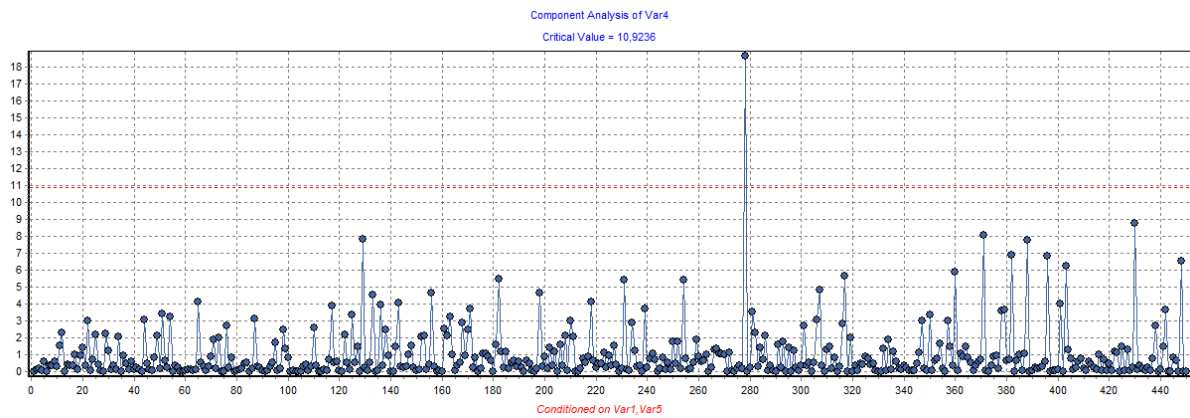


Figura 47: Variable 4 comparada con la 1 y 5.

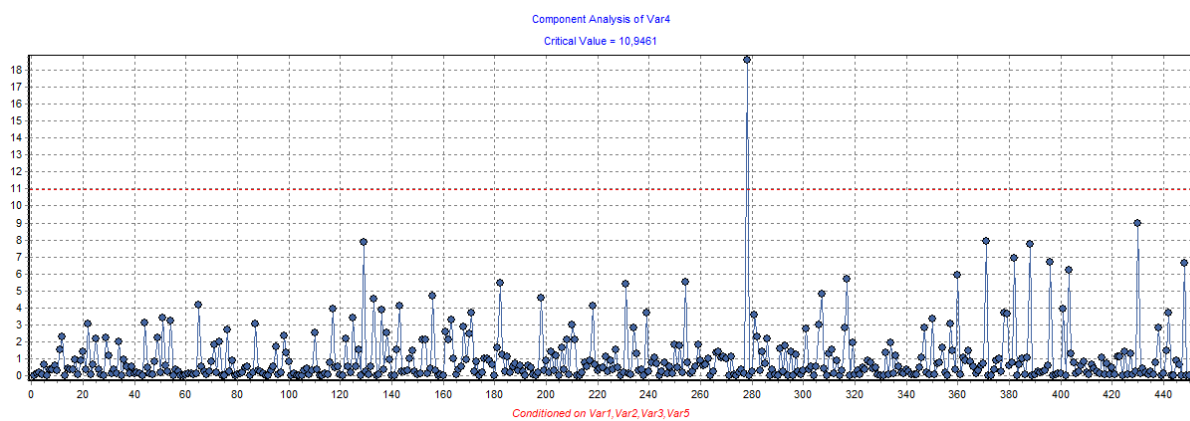


Figura 48: Variable 4 comparada con la 1, 2, 3 y 5.

Variable 1: Temperatura del rodamiento trasero.

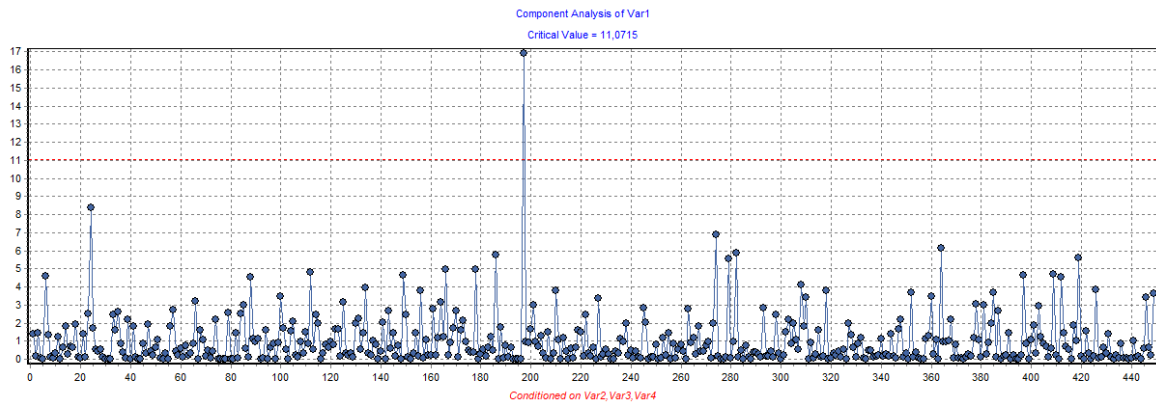


Figura 49: Variable 1 comparada con la 2, 3 y 4.

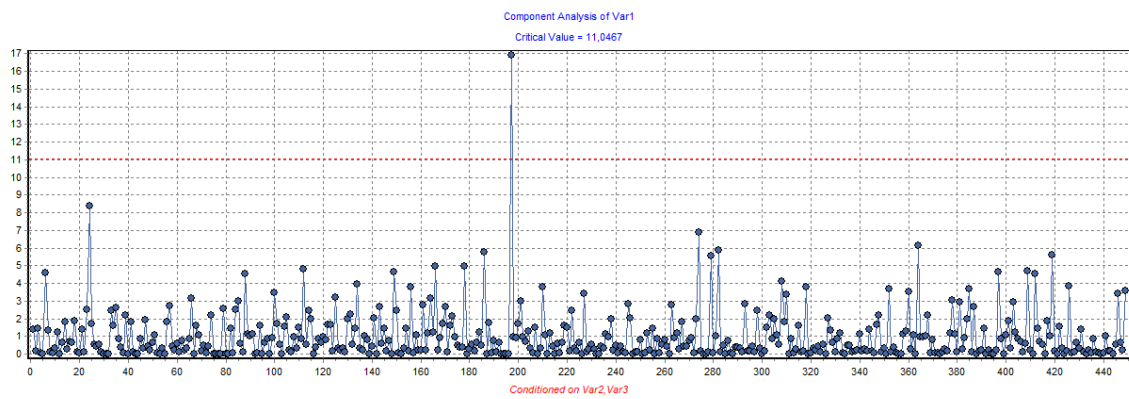


Figura 50: Variable 1 comparada con la 2 y 3.

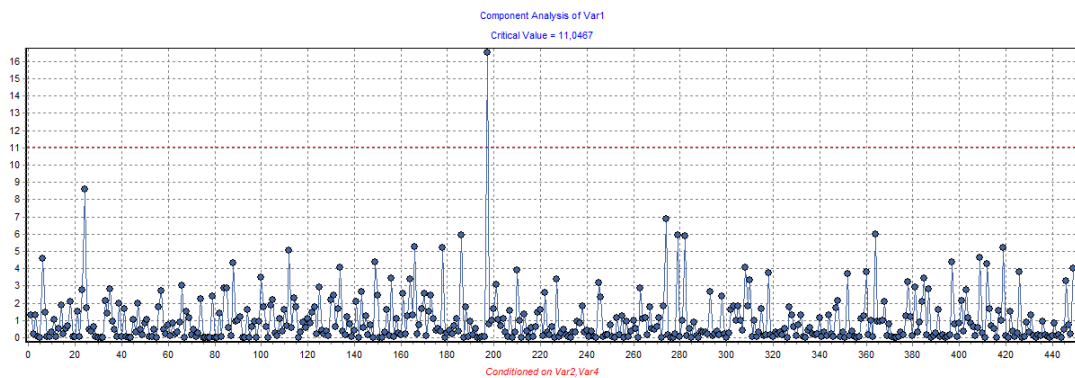


Figura 51: Variable 1 comparada con la 2 y 4.

Variable 2: Presión del aceite de la multiplicadora.

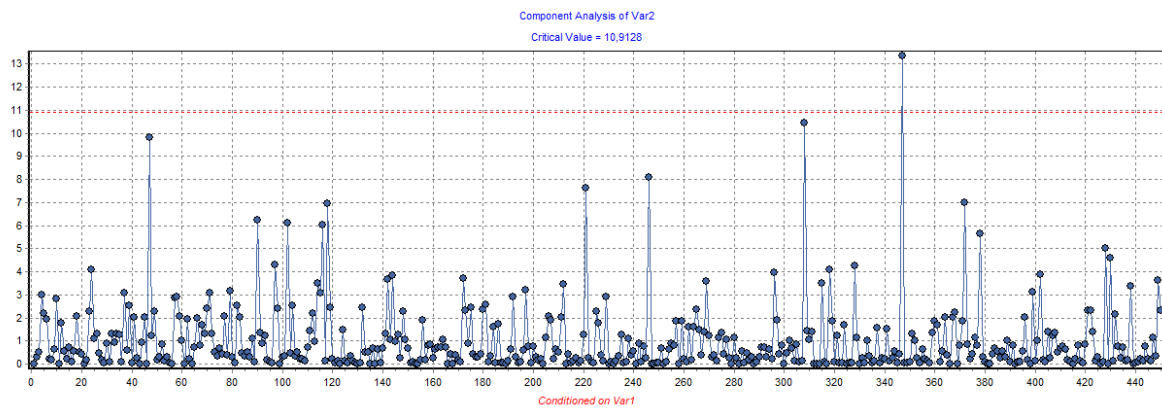


Figura 52: Variable 2 comparada con la 1.

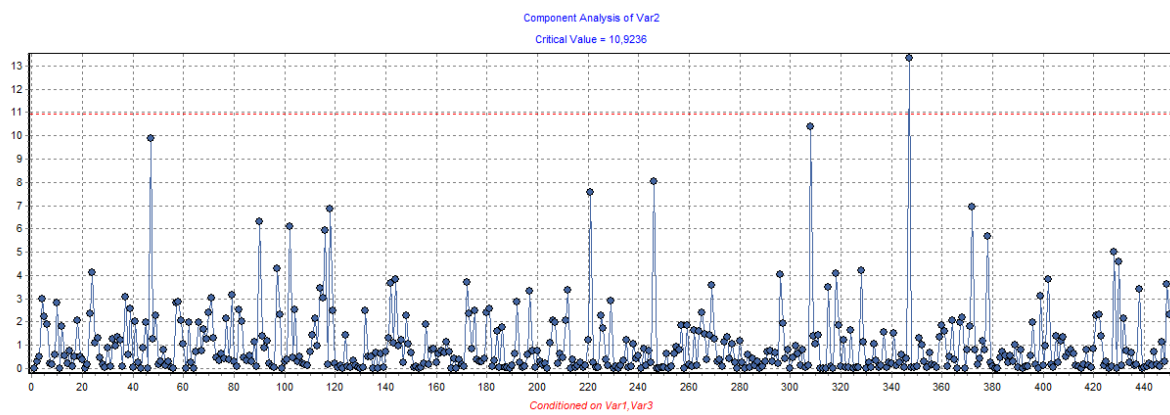


Figura 53: Variable 2 comparada con la 1 y 3.

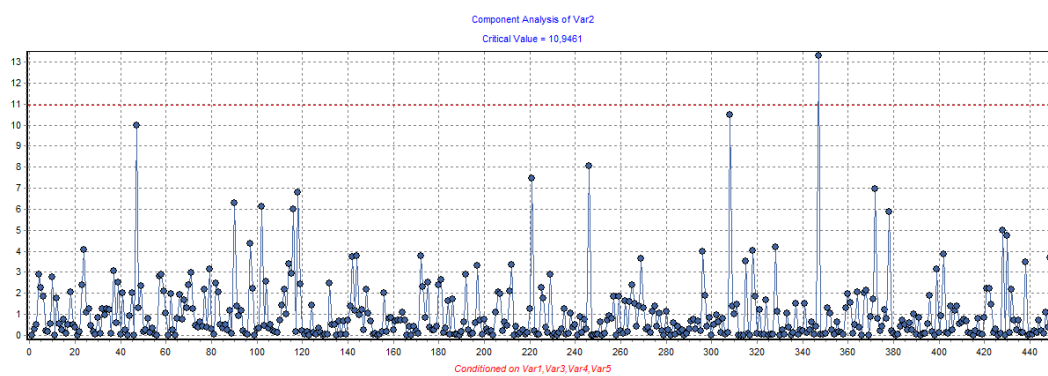


Figura 54: Variable 2 comparada con la 1, 3, 4 y 5.

Por lo tanto con la visualización de los gráficos, descubrimos que es posible detectar, cual o cuales han sido las variables que provocaron la desviación en el proceso. En este caso las variables causantes del error han sido las variables 2 y 4 como hemos podido visualizar en las anteriores graficas, y demuestra lo esperado al producir el error en la simulación inicial de los datos a través de labview.

Discusión

En el mundo de la energía eólica un sector muy importante de cara al buen funcionamiento del sector y aprovechamiento de la energía renovable es el apartado del mantenimiento. Un buen mantenimiento que desarrolle la prevención y detección de fallos en los aerogeneradores es primordial para el buen desarrollo de la energía eólica. Por esta razón la adquisición y tratamiento de datos de funcionamiento de los aerogeneradores es de gran importancia. Para la interpretación de los datos obtenidos en este trabajo se han aplicado los gráficos multivariantes de T2 de Hotelling que nos dio como resultado un grafico que compara un funcionamiento ideal del aerogenerador, con unos nuevos datos obtenidos tras haber inducido un fallo con el fin de demostrar que a través de esta técnica se puede encontrar la raíz de la causa del fallo, evitando de esta manera al denominado mantenimiento correctivo.

Como se ha confirmado en los resultados se obtuvieron graficas de las 5 variables monitorizadas del aerogenerador, y se verifica que los errores introducidos a la hora de generar la simulación de los datos se plasman en los resultados ya que se observa en las graficas como los datos de funcionamiento de dos variables sufren desviaciones del proceso normal. Esta técnica de utilización de graficas multivariantes es de gran ayuda ya que a través de la visualización de varias graficas se puede observar la raíz del fallo del funcionamiento de un aerogenerador antes de que se produzca el fallo.

Las ventajas de estos gráficos multivariantes son la visualización y detección de desviaciones en los procesos de funcionamiento antes de que una variable se desvíe de manera que supere su límite superior o inferior de funcionamiento normal y haga saltar una alarma que en consecuencia desencadene un fallo más grave.

8. CONCLUSIONES

Hoy en día el mantenimiento de los equipos e instalaciones en la industria es un aspecto muy importante, ya que el principal objetivo es garantizar la producción, su calidad y mantener la funcionalidad adecuada de las máquinas aumentando su vida útil para el beneficio en general. Por ello para obtener el máximo beneficio posible es necesario minimizar al máximo los fallos y detenciones innecesarias los cuales generan un aumento del mantenimiento no justificado. El desarrollo tecnológico aplicado al sector industrial sirve de gran ayuda a la hora de reducir el mantenimiento correctivo no deseado. La analítica de datos y el mantenimiento predictivo toman gran importancia a la hora de mejorar un buen mantenimiento el cual sea beneficioso para la industria.

Por lo tanto conociendo la gran importancia que tiene un buen mantenimiento en el sector eólico, de cara a desarrollar un buen funcionamiento de los aerogeneradores podemos sacar las siguientes conclusiones del presente trabajo:

- Un correcto mantenimiento predictivo es primordial para mejorar el funcionamiento de un aerogenerador.

- Con el control o monitoreo simultáneo de dos o más variables del proceso productivo, se controla el correcto funcionamiento y se puede realizar un correcto mantenimiento.

- Comparando los graficos multivariantes frente a los graficos univariantes se obtienen resultados más beneficiosos a través de los cuales es más sencillo detectar un fallo de funcionamiento del proceso, aplicándose al sector eólico y mejorando su desarrollo.

- La implementación de las cartas multivariantes en la monitorización de los aerogeneradores conlleva a una mejora en el mantenimiento predictivo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Edition, "No Title."
- [2] E. N. El, M. A. R. Territorial, D. E. C. Y. El, and T. G. Canaria, "Greenalia wind power gofio," 2020.
- [3] F. Pedro, G. Márquez, A. Mark, J. María, P. Pérez, and M. Papaalias, "Condition monitoring of wind turbines : Techniques and methods," *Renew. Energy*, vol. 46, pp. 169–178, 2012.
- [4] P. Tchakoua, R. Wamkeue, M. Ouhrouche, F. Slaoui-hasnaoui, T. A. Tameghe, and G. Ekemb, "Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges," pp. 2595–2630, 2014.
- [5] M. L. Wymore, J. E. Van Dam, H. Ceylan, and D. Qiao, "A survey of health monitoring systems for wind turbines," vol. 52, no. 1069283, pp. 976–990, 2015.
- [6] K. Kim, G. Parthasarathy, O. Uluyol, W. Foslien, S. Sheng, and P. Fleming, "Use of SCADA Data for Failure Detection in Wind Turbines," no. October, 2011.
- [7] S. Sharma and D. Mahto, "Condition Monitoring of Wind Turbines: A Review," vol. 13, no. 6, 2013.
- [8] K. Fischer, "CONDITION MONITORING OF WIND TURBINES : STATE OF THE ART , USER EXPERIENCE AND RECOMMENDATIONS CONDITION MONITORING OF WIND TURBINES : STATE OF THE ART , USER," no. January, 2015.
- [9] C. Paper, "Condition monitoring of wind turbines : Challenges and opportunities Condition monitoring of wind turbines : Challenges and opportunities," no. June 2015, 2016.
- [10] "Statistical method from the viewpoint of quality control.pdf." .
- [11] I. Grado, "Tema 1 : An ´ alisis de datos univariantes Conceptos fundamentales," pp. 1–45.
- [12] Shewhart, W. A., & Deming, W. E. (1939). Statistical method from the viewpoint of quality control. Courier Corporation.
- [13] Arvelo, A. F. (1998). Capacidad de Los Procesos Industriales: Métodos Estadísticos Exigidos Por Las Normas ISO-9000. Universidad Catolica Andres
- [14] Hotelling, H. (1947). Multivariate quality control. Techniques of statistical analysis.