

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN MODELO DE CRITICIDAD DEL AEROGENERADOR COMO SOPORTE PARA IMPLEMENTAR PROYECTO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO DE ACTIVOS

Sergio Noguera

Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

Luís Amendola

Dpto. de Proyectos de Ingeniería e Innovación, Universidad Politécnica de Valencia.

PMM Institute for Learning. Valencia, España.

Tibaire Depool

Joan Belisario

PMM Institute for Learning. Valencia, España.

Abstract

This article describes the process used to study the sensitivity about criticality analysis of wind turbine components as supporting to implement a draft maintenance management of assets in the wind power industry. On the basis of data reported in a previous study on the hierarchical structure of criticality of these components, and using five criteria associated with: failure rate, flexibility in operations, effects of failure, repair cost and impact on safety, hygiene and environment, was developed a sensitivity analysis on all components to determine which of the variables corresponding to the above criteria has the greatest impact on the values of previous criticality analysis. Results were obtained using specialized software in numerical methods, and were interpreted tables, charts and graphs generated. We conclude, in light of the results, that the overall effect of the sensitivity on the parameters of the mathematical model of a wind turbine about critical components does not change its previous level of criticality.

Keywords: *Reliability; Criticality Analysis; Sensitivity Analysis*

Resumen

Este artículo describe el proceso seguido para estudiar la sensibilidad en la ecuación matemática de criticidad de los componentes del aerogenerador como requerimiento de apoyo para implementar un proyecto de gestión de mantenimiento de activos en la industria de energía eólica. Partiendo de la base de datos aportados en un estudio previo sobre la estructura jerárquica de criticidad de dichos componentes, y que utilizó cinco criterios asociados con: frecuencia de fallos, flexibilidad en las operaciones, efectos de fallo, coste de reparación e impacto en seguridad, higiene y ambiente; se realizó un análisis de sensibilidad en todos los componentes para determinar cuál de las variables correspondiente a los criterios anteriormente citados tiene el mayor impacto sobre los valores de criticidad previos. Se obtuvieron resultados utilizando un software especializado en métodos numéricos, y se interpretaron las tablas, diagramas y gráficos generados. Se concluye, a la luz de los resultados, que el efecto global de la sensibilidad sobre los parámetros del modelo matemático de criticidad de los componentes del aerogenerador no hace cambiar su nivel de criticidad previo.

Palabras claves: *Confiabilidad; Análisis de Criticidad; Análisis de Sensibilidad*

1. Introducción

La Gestión del Mantenimiento de Activos es una disciplina que requiere la coordinación de áreas de conocimiento tanto técnicas como de gestión, y que consume recursos humanos, físicos y económicos; por lo tanto su enfoque debe ser basado en datos cuantitativos que indiquen: cuándo, cómo, por qué y a cuales activos debe realizarse las tareas de confiabilidad y mantenimiento (Amendola, 2006). La industria de la energía renovable, tal como la eólica, no escapa de esta necesidad por lo que su modelo de Gestión de Mantenimiento de Activos debe tener bases sólidas en cuanto a la definición de la estructura y la criticidad de sus activos, que es el punto de partida de los planes de mantenimiento y confiabilidad.

La jerarquización por componentes aplicando métodos de criticidad verdaderamente enmarcados en el contexto operativo de parques eólicos es el punto de partida para la concepción de actividades de mantenimiento e inspección usando métodos como: IBR (Inspección Basada en Riesgo), ACR (Análisis Causa-Raíz), MCC (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad), OCR (Optimización Costo Riesgo), entre otros, lo cual es primordial en aras de minimizar el número de intervenciones necesarias en un entorno donde los aspectos logísticos suelen marcar la pauta (Amendola, L. & Depool, T. 2007). Además, un análisis de criticidad crea una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, dirigiendo el esfuerzo y los recursos a áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional con base en la realidad. Los criterios con los cuales fue realizado el análisis de criticidad de este estudio están asociados con factores como: seguridad, ambiente, producción, costes de operación y mantenimiento, porcentaje de fallos y tiempo de reparación principalmente. Estos criterios se engloban y relacionan en una ecuación matemática, que es en este caso la función objetivo, que genera la valoración de la criticidad para cada componente evaluado del aerogenerador.

El trabajo se ha centrado en determinar cuan sensibles son los factores que determinan la criticidad de un componente de un equipo aerogenerador, y si existe la posibilidad de que el mismo pueda cambiar su calificación de criticidad, critico o no critico, y en consecuencia estar preparado para cualquier eventualidad. Se realizó un procedimiento sobre la ecuación matemática del valor de la criticidad para dieciocho (18) componentes de un tipo de aerogenerador para determinar cuál de los factores que integran la relación analítica afectan sensiblemente el Valor de Criticidad Original y de esta manera conocer cuales componentes tiene el mayor impacto y cuales revisten consistencia en los valores presentados. Se pretendió con esto identificar los componentes que se consideran sensiblemente críticos para el adecuado funcionamiento del sistema en cuestión como paso previo para apoyar la implementación de un Modelo Confiable de Gestión de Mantenimiento de Activos aplicado en parques eólicos.

2. Caso de estudio

2.1. Operación y mantenimiento de parques eólicos

El área de la energía eólica es una de las que viene experimentando un mayor desarrollo en España (REE). En general, las predicciones de crecimiento eólico en numerosos países son optimistas. La Asociación Europea de Energía Eólica (EWEA) prevé un 10% de generación eólica sobre el total mundial en 2020. Este objetivo se basa en consideraciones económicas, de consumo energético, y en la evolución reciente de la generación eólica y de su tecnología. La tendencia alcista de los precios de las fuentes de energía tradicionales, unida al probable descenso del precio de la energía eólica, favorecen las expectativas de crecimiento. Las expectativas de la EWEA para Europa son 60.000 MW instalados en el año

2010 y 150.000 MW en el año 2020. En Dinamarca el objetivo oficial es aún más ambicioso, un 50% de la generación total en 2030.

Los componentes de un aerogenerador están diseñados para durar unos 20 años. Esto significa que tendrán que resistir más de 120.000 horas de funcionamiento, a menudo bajo condiciones climáticas tormentosas. Si se compara con un motor de automóvil ordinario, éste sólo funcionará durante unas 5.000 horas a lo largo de su vida útil. Los grandes aerogeneradores están equipados de diversos dispositivos de seguridad que garantizan un funcionamiento seguro durante su vida útil.

La operación y mantenimiento de los parques eólicos están supeditados a las estrategias que se empleen. Las condiciones ambientales y la complejidad de las labores de mantenimiento principalmente, representan las mayores barreras para una operación confiable y a bajo coste.

La operación de parques eólicos requiere de sistemas automatizados que ofrezcan una alta capacidad de supervisión y control de instalaciones/procesos en remoto lo cual aporta, a su vez, los siguientes beneficios y ventajas:

1. Reducción de costes ligados a la operación y mantenimiento remoto de instalaciones
2. Mejora de la disponibilidad, derivada de la modernización de las centrales
3. Simplificación operativa como consecuencia de la automatización
4. Homogeneidad en los procedimientos operativos
5. Sistemas de Información en tiempo real con capacidad de almacenamiento masivo de datos históricos e integración de herramientas de explotación de los datos
6. Gestión total del soporte y mantenimiento

En cuanto al mantenimiento, el enfoque de confiabilidad operacional de las instalaciones representa una de las estrategias más importantes en la búsqueda de la mayor rentabilidad del activo, las bajas ratas de fallos esperadas de acuerdo con los diseños pueden variar en condiciones de operación y mantenimiento, Améndola (2006). Con el potencial las técnicas involucradas es posible identificar, durante la recepción y período de garantía de los equipos e instalaciones, precozmente fallos debidos a defectos de diseño en componentes esenciales de los aerogeneradores. Cada día se dedican enormes esfuerzos destinados a visualizar, identificar, analizar, implantar y ejecutar actividades para la solución de problemas y toma de decisiones efectivas y acertadas, que involucren un alto impacto en las áreas de seguridad, ambiente, metas de producción, calidad de productos, costos de operación y mantenimiento, así como garantizar una buena imagen de la empresa y la satisfacción de sus clientes y del personal que en ella labora (Moubray, 1998).

La Confiabilidad Operacional se aplica generalmente en los casos relacionados con:

1. Elaboración / revisión de los planes de mantenimiento e inspección en equipos estáticos y dinámicos.
2. Establecer alcance y frecuencia óptima de paradas de plantas.
3. Solución de problemas recurrentes en equipos e instalaciones que afectan los costos y la confiabilidad de las operaciones.
4. Determinación de tareas que permitan minimizar riesgos en los procesos, instalaciones, equipos y ambiente.
5. Establecer procesamientos operacionales y prácticas de trabajo seguro.

2.2. Análisis de criticidad

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual (González, J.M.; Amendola, L. & Depool, T., 2009).

El análisis de criticidad genera una lista ponderada desde el elemento más crítico hasta el menos crítico del total del universo analizado, diferenciando, en este caso, seis zonas principales de clasificación, como se muestra en la tabla 1. Una vez identificadas estas zonas, es mucho más fácil diseñar una estrategia, para realizar estudios o proyectos que mejoren la confiabilidad operacional, iniciando las aplicaciones en el conjunto de procesos ó elementos que formen parte de la zona de alta criticidad.

Tabla 1. Zonas de criticidad para el análisis

Nivel de Criticidad	Descripción	Rango de Criticidad
1	Criticidad Baja -	1 – 10
2	Criticidad Baja +	11 – 20
3	Criticidad Media -	21 – 30
4	Criticidad Media +	31 – 40
5	Criticidad Alta -	41 – 50
6	Criticidad Alta +	> 50

En el estudio base (González, J.M. ; Amendola, L. & Depool, T., 2009), los criterios para realizar el análisis de criticidad están asociados con criterios como: frecuencia de fallos, flexibilidad operacional, efecto de los fallos, costes de reparación y seguridad/higiene/ambiente. Estos criterios se relacionan con una ecuación matemática, que genera puntuación para cada elemento evaluado. La lista de factores generada, resultado de un trabajo de equipo, permitirá nivelar y homologar criterios para establecer prioridades, y focalizar el esfuerzo que garantice el éxito maximizando la rentabilidad.

Concluida la evaluación, los resultados obtenidos fueron llevados a una ecuación que determina el nivel de criticidad del componente evaluado (ecuación 1) a través de la aplicación del Modelo Metodológico para la evaluación de la criticidad). Para cada una de las variables se ha considerado el valor mínimo y máximo que puede alcanzar la variable, esto genera un rango en el que la variable puede fluctuar, ver tabla 2.

$$CRIT = FREC [(FLEX * EFEC) + COST + SGHA] \quad (1)$$

Donde:

<i>CRIT</i> :	Valor de criticidad
<i>FREC</i> :	Frecuencia de fallos
<i>FLEX</i> :	Flexibilidad de las operaciones
<i>EFEC</i> :	Efecto del fallo
<i>COST</i> :	Costo de reparación
<i>SGHA</i> :	Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente

Tabla 2. Valor de Criticidad para los componentes del aerogenerador

CONJUNTO	DENOMINACIÓN	FACTORES DE CRITICIDAD					VALOR DE CRITICIDAD	RANGO	NIVEL DE CRITICIDAD	CATEGORIA
		Flexibilidad operacional	Efecto del fallo	Coste de reparac	Segur/ Higien/ Ambient	Frecuencia de fallo				
GROUN8	GROUND IT 1500 KW	4	10	1	2	5	215	> 50	6	
ROTORH	ROTOR	4	10	2	2	4	176	> 50	6	
TOP8	TOP IT 1500 KW	4	10	2	2	4	176	> 50	6	
SHIDRA	SIST. HIDRÁULICO	4	10	2	2	2	88	> 50	6	Alta +
SDGIRO	SISTEMA DE GIRO	4	10	2	0	2	84	> 50	6	
MULTIG	MULTIPLICADORA	4	10	2	0	2	84	> 50	6	
GENERA	GENERADOR	4	10	2	0	2	84	> 50	6	
CTAN2	CENTRO DE TRANSFORMACION	4	10	2	2	1	44	41-50	5	
TORRE1	TORRE	4	10	1	2	1	43	41-50	5	
BASTID	BASTIDOR	4	10	1	2	1	43	41-50	5	Alta -
EPRINC	EJE PRINCIPAL	4	10	1	2	1	43	41-50	5	
SFRENADO	SISTEMA DE FRENADO	4	10	1	2	1	43	41-50	5	
CABLEA	CABLEADO	4	10	1	2	1	43	41-50	5	
TRANSM	TRANSMISIÓN	4	5	2	0	1	22	21-30	3	Media -
MAMBIE	MEDIDAS MEDIOAMBIENTALES	4	4	2	0	1	18	11-20	2	Baja +
MONTAC	MONTACARGAS	4	1	0	8	1	12	11-20	2	
NACELL	NACELLE	4	1	1	0	2	10	1-10	1	Baja -
POLIPA	POLIPASTO	4	1	1	2	1	7	1-10	1	

2.3. Descripción de los factores de criticidad

González, J.M. ; Amendola, L. & Depool, T. (2009), establecen una descripción de los criterios tomados como factores para evaluar la criticidad de los componenetes:

1. Flexibilidad Operacional: Se analiza si la función del equipo puede ser realizada por otro renglón del sistema o equipo. En este factor se verifica si el equipo tiene un equipo SPARE individual, un equipo SPARE compartido o si no tiene equipo SPARE.
2. Efecto del Fallo: Este factor evalúa el efecto del fallo del componente/equipo sobre el aerogenerador, sobre otros equipos o sobre el Parque eólico.
3. Coste de Reparación: Este factor se refiere a los costes directos e indirectos de las reparaciones más impactantes que dieran a lugar para el componente/equipo evaluado, tomando en consideración la frecuencia de ocurrencia de las mismas.
4. Seguridad y Ambiente: Este factor se refiere al impacto del fallo del componente evaluado en materia de Seguridad Higiene y Ambiente, como por ejemplo: accidentes en humanos (muerte o lesiones) y/o contaminación (derrames o emisiones).
5. Frecuencia de Fallos/Confiabilidad: Este factor se establece con base en la experiencia y datos tomados de la operación y mantenimiento de parques eólicos con equipos en servicio. La frecuencia de fallos se revisará cuando el equipo obtenga su propia historia. En todo caso, el periodo mínimo a ser considerado es de 1 año.

2.4. Análisis de sensibilidad

Un análisis de sensibilidad explica cual de las variables importan más en una decisión (las más críticas) examinando el impacto de cambios razonables en asunciones del caso-base o función objetivo. El análisis de la sensibilidad es útil para encontrar la variable que tiene poco impacto en la decisión final, tratándolas de forma determinística (Moreno-Jiménez, 1998). El análisis de sensibilidad se lleva a cabo por una serie de iteraciones para tantos cambios en el vector de pesos de los criterios como se considere necesario hasta tener un panorama que permita sacar conclusiones sobre los resultados obtenidos (Morales, G. (2007).

Existen básicamente dos tipos de análisis de sensibilidad: análisis determinístico y análisis probabilístico de variables. Según Morales (2007), es muy importante esta distinción pues si no se tiene, puede llevar a errores de interpretación al momento de realizar un análisis de sensibilidad sin distinguir qué tipo de análisis es el que se realiza realmente.

En este caso, el análisis de sensibilidad determinístico se realiza sobre el modelo de criticidad, ya que no contiene variables inciertas y tiene por objeto determinar cuál de todas las variables de dicho modelo, tiene el mayor impacto sobre el valor de criticidad previa de los componentes del aerogenerador.

2.5. Metodología para el analisis de sensibilidad de la criticidad de los componentes

El proceso metodológico específico de este estudio tomó como insumo datos de los valores de criticidad de los componentes de un equipo aerogenerador a los cuales se les aplica un análisis de sensibilidad para medir el grado de incertidumbre de dicha predicción de criticidad sobre la base del nivel de incertidumbre de las variables intervinientes y las características del modelo. Así el proceso se resume en tres pasos:

1. Identificar las variables de impacto sobre la función objetivo e indicar el Rango de Criticidad pre-establecido, valores: bajo y alto, para la variación del valor base de los factores para cada componente.
2. Ingresar datos para el proceso de cálculo iterativo con el software especializado, y obtener los reportes de resultados: tablas de variaciones y gráficos varios.
3. Analizar e interpretar resultados.

2.5.1. Identificación de las variables de impacto e indicar el Rango de Criticidad

Las variables que se muestran a continuación, son las que generan un impacto, respecto al peso que tomará el Valor de Criticidad, esto quiere decir que el cambio en los valores de las variables que se muestran a continuación va a generar cambios en dicho valor. También se tiene que indicar que el Rango de Criticidad pre-establecido, para cada factor, por ejemplo como se muestra en la tabla 3, fluctúa entre números enteros, por lo que:

1. Existe un valor menor probable, para que las variables que generan incertidumbre tomen un valor menor; se toman dos puntos por debajo.
2. Existe un 50% de probabilidad para que las variables que generan incertidumbre tomen un valor mayor o menor al medio o base.
3. Existe un valor mayor probable, para que las variables que generan incertidumbre excedan a su valor base; se toman dos puntos por encima.

Tabla 3. Rango de fluctuación de las variables que generan incertidumbre respecto del variable Valor de Criticidad, caso GROUND8.

GROUND8	VALOR BAJO	VALOR BASE	VALOR ALTO
Flexibilidad operacional	2,0	4,0	6,0
Efecto de fallo	8,0	10,0	12,0
Coste de reparación	-1,0	1,0	3,0
Seguridad/Higiene/Ambiente	0,0	2,0	4,0
Frecuencia de fallo	3,0	5,0	7,0
CRITICIDAD	215		

2.5.2. Procesamiento con el software especializado y obtener reportes de resultados

Con el apoyo del software "Precision Tree: Decision Analysis Add-In for Microsoft Excel", se ingresó para cada componente los valores: base, bajo y alto de la criticidad, con lo que se generaron tablas de variaciones y gráficos varios. Para cada conjunto considerado como "crítico", se generó un Diagrama de Tornado como el que se muestra en el ejemplo de la figura 1. Este diagrama permite observar cómo afecta el cambio de cada una de las variables mostradas, en la Tabla 4, al Valor de criticidad; se identifican las variables más importantes que generan incertidumbre y que por lo tanto deben de considerarse al momento de tomar una decisión.

La sensibilidad que se realiza permite identificar cuáles de estas variables contribuyen en mayor medida a la variación del Valor de Criticidad. Esto lo realiza el software a través del reemplazo de los valores medios, por los valores bajo y alto que se especifica en la Tabla 3, en el modelo matemático y luego calcula el Valor de Criticidad asociado a este nuevo valor. Cada barra en el gráfico representa a cada variable, y que ha cambiado en las iteraciones del modelo. La barra demuestra el cambio total del Valor de Criticidad, considerando un punto central desde el cual comienza a cambiar la variable analizada. Cuanto más larga es la barra, mayor es el impacto del cambio de la variable involucrada, y cuan significativo es su impacto en el modelo matemático.

3. Resultados

Como ejemplo de resultado se muestra, para el conjunto que se ha denominado GROUND8, el diagrama de tornado, figura 1, y se acompaña por la tabla 4 con los porcentajes de variación. En este caso se observa que la variable de mayor impacto en la Criticidad del Conjunto es la Frecuencia de fallos, seguida por la Flexibilidad Operacional y, en menor afectación, el Efecto de Fallo.

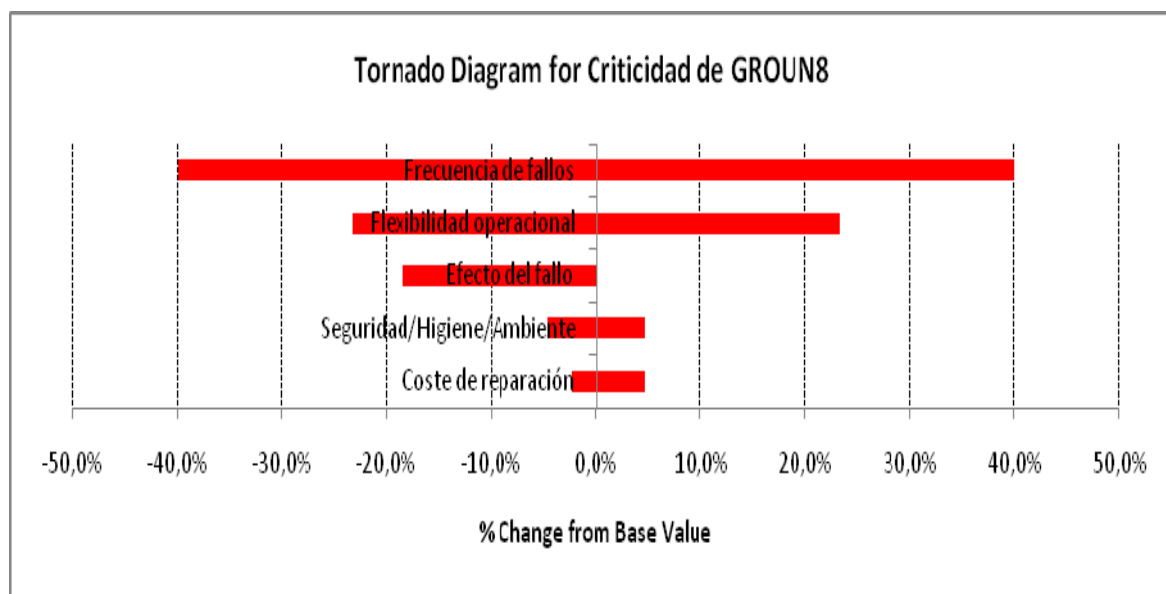
Tabla 4. Porcentajes de variación alrededor del Valor Base reflejados en el Diagrama de Tornado para el GROUND8.

Name	-%	+%	tot%
Coste de reparación	-0,023255814	0,046511628	0,069767442
Seguridad/Higiene/Ambiente	-0,046511628	0,046511628	0,093023256
Efecto del fallo	-0,186046512	0	0,186046512
Flexibilidad operacional	-0,23255814	0,23255814	0,465116279
Frecuencia de fallos	-0,4	0,4	0,8

De acuerdo al diagrama de tornado obtenido y la tabla de apoyo se identifican las variables que generan mayor incertidumbre. Aquí se puede apreciar que las variables que van a estar explicando la variación del Valor de Criticidad, son cinco y se indican a continuación:

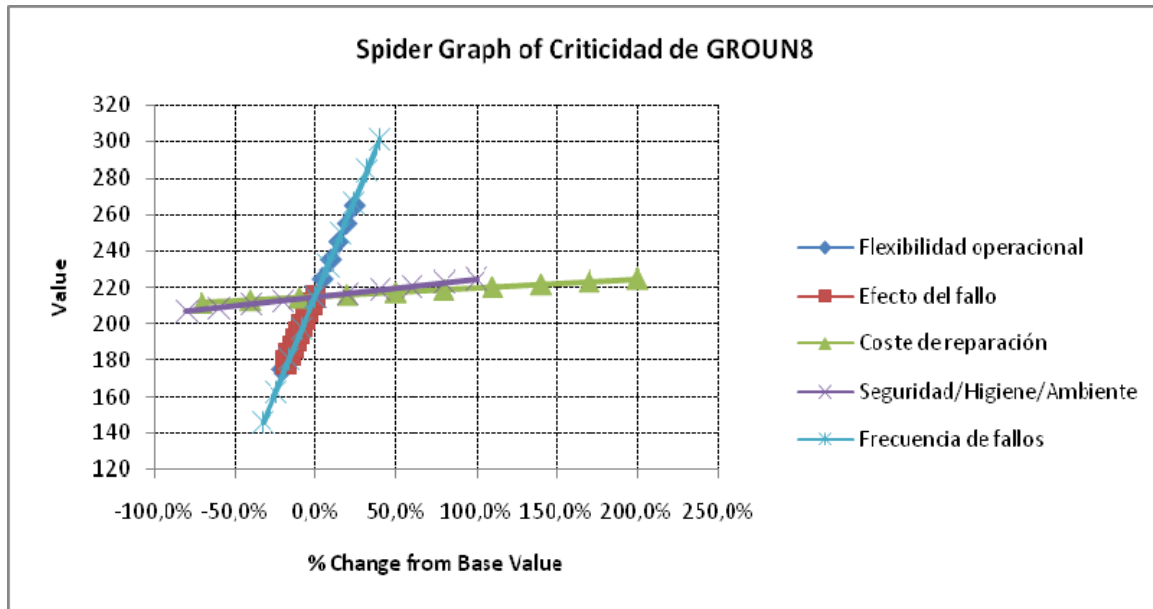
1. La Frecuencia de fallos; con esta variable hay que tener mucho cuidado porque por sí sola explica el 80,0% de la variación del Valor de Criticidad.
2. La Flexibilidad operacional; es la segunda a prestar atención porque explica el 46,51% de la variación del Valor de Criticidad.
3. El Efecto de fallo; explica un 18,6% de la variación del Valor de Criticidad cuando su valor varía en un solo sentido, es decir cuando disminuye su valor.
4. El impacto de la Seguridad/Higiene/Ambiente y el Coste de reparación; explican, cada una, menos del 10,00% de la variación del Valor de Criticidad.

Figura 1. Diagrama de Tornado para Evaluar la Criticidad del GROUND8



Por otro lado, también se genera para cada componente un gráfico de la araña para un análisis unidireccional de la sensibilidad. Este gráfico resume el efecto de cada variable del modelo matemático en el cambio de la función objetivo, en este caso el Valor de Criticidad a analizar, este se muestra en la figura 2.

Figura 2. Gráfico de Araña para Evaluar la Criticidad del GROUND



En la gráfica 2 se crea una línea para cada variable en su rango de cambio. Esta línea demuestra que la cantidad de cambio del valor inicial del valor base se refleja como causa por cada valor probado para las variables que cambian. Cuanto más inclinada es la línea, representa un mayor impacto en el Valor de Criticidad, y por lo tanto es más significativa esta entrada en el modelo. Veamos para el caso del GROUND como se destacan las mencionadas líneas.

Interpretando el gráfico de la figura 2 se puede observar que las líneas más inclinadas, con mayor pendiente, son las correspondientes a la frecuencia de fallos, el efecto de fallo y la flexibilidad operacional representan un mayor impacto en el Valor de Criticidad para el GROUND, su rapidez de cambio es mayor al haber variaciones y por lo tanto son las entradas más significativas en el modelo matemático de criticidad.

Por otro lado, en la tabla 5, quedan establecidos los valores, mayor y menor, correspondientes al total de las variaciones. Así, para la frecuencia de fallos se tiene que adquiere un valor de 301, que es un 40% del valor inicial o base, que es en este caso 215. Igual ocurre con la flexibilidad operacional que pasa a 265, desde 215, lo que representa un 25% de variación.

En general, los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad de la variable VALOR DE CRITICIDAD respecto a los cinco factores que conforman el modelo matemático de criticidad, dispuestos en tres términos, muestran que el Valor de Criticidad solo es sensible para el parámetro resultante del múltiplo: frecuencia de fallos (FREC), flexibilidad operacional (FLEX) y efecto del fallo (EFEC). Aún cuando este miembro de la ecuación de criticidad hace sensible el valor de criticidad de los componentes, el factor FREC es el que a criterio del modelo inicia de criticidad el de mayor ponderación y está presente en los otros dos términos, lo que compensa globalmente una posible variación de los valores previos de criticidad.

Tabla 5. Variación alrededor del Valor de Criticidad para el GROUND

Flexibilidad operacional		Efecto del fallo		Coste de reparación		Seguridad/Higiene/Ambiente		Frecuencia de fallos	
-0,2	175	-0,18	179	-0,7	211,5	-0,8	207	-0,32	146,2
-0,15	185	-0,16	183	-0,4	213	-0,6	209	-0,24	163,4
-0,1	195	-0,14	187	-0,1	214,5	-0,4	211	-0,16	180,6
-0,05	205	-0,12	191	0,2	216	-0,2	213	-0,08	197,8
0	215	-0,1	195	0,5	217,5	0	215	0	215
0,05	225	-0,08	199	0,8	219	0,2	217	0,08	232,2
0,1	235	-0,06	203	1,1	220,5	0,4	219	0,16	249,4
0,15	245	-0,04	207	1,4	222	0,6	221	0,24	266,6
0,2	255	-0,02	211	1,7	223,5	0,8	223	0,32	283,8
0,25	265	0	215	2	225	1	225	0,4	301

Respecto a la explicación anterior se tiene:

$$CRIT = (FREC * FLEX * EFEC) + FREC * COST + FREC * SGHA \quad (2)$$

Donde:

CRIT:	Valor de criticidad
FREC:	Frecuencia de fallos
FLEX:	Flexibilidad de las operaciones
EFEC:	Efecto del fallo
COST:	Costo de reparación
SGHA:	Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente

Interpretando el reso de tablas y graficos generados se ha encontrado que respecto a la categoría de criticidad alta a criticidad media, la variación de los factores: frecuencia de fallo, flexibilidad operacional y efecto de fallo, tienen mayor incidencia en la sensibilidad de la ecuación respecto al resultado de criticidad. El resto de los factores: Costo de reparación e impacto por seguridad/higiene/ambiente, por el contrario se convierten en variables de menor incidencia respecto al valor de criticidad. Se obtuvo y se interpretó, para cada componente, las tablas que muestran los valores del valor base de los factores y su variación, con lo que resultan los diagramas de araña y de tornado, y el gráfico de rapidez de variación por cada factor.

El resultado del Análisis de Sensibilidad para los componentes de Criticidad Alta (GROUND, ROTORH, TOP8, SHIDRA, SDGIRO, MULTIG, GENERA, CTRAN2, TORRE1, BASTID, EPRINC, SFRENADO, CABLEA) a Criticidad Media (TRANSM), muestra que estos componentes configuran su criticidad basandose principalmente en tres de los parámetros: frecuencia de fallos, flexibilidad de operación y efecto de fallo. Para todos estos

componentes, el gráfico de araña muestra que estos tres parámetros determinan tres líneas rectas solapadas y de mayor pendiente que el resto de factores. Esto indica que la rapidez de cambio del valor de criticidad solo depende de estos tres indicadores. Por su parte, el diagrama de tornado muestra que al variar con valor más bajos y más altos los valores base de los tres parámetros mencionados el valor de criticidad es sumamente sensible respecto al efecto que generan el resto de los factores.

El resultado del Análisis de Sensibilidad para los componentes de Criticidad Baja (MAMBIE, MONTAC, NACELL, POLIPA), muestra que estos también configuran su criticidad basándose principalmente en tres de los parámetros: frecuencia de fallos, flexibilidad de operación y efecto de fallo. Para todos estos componentes, el gráfico de araña muestra que estos tres parámetros determinan tres líneas rectas no solapadas y de mayor pendiente que el resto de factores. En comparación con el grupo analizado anteriormente dichas pendientes se muestran ligeramente menos inclinadas. Esto indica que la rapidez de cambio del valor de criticidad también sigue dependiendo de estos tres factores indicadores. Por su parte, el diagrama de tornado muestra que al variar con valor más bajos y más altos los valores base de los tres parámetros mencionados el valor de criticidad es visiblemente sensible respecto al efecto que generan el resto de los factores.

4. Conclusiones

Este artículo se ha centrado en describir e identificar cuan sensibles son los factores que determinan la criticidad de un componente de un equipo aerogenerador, y si existe la posibilidad de que el mismo pueda cambiar su calificación de criticidad, crítico o no crítico, y en consecuencia estar preparado para cualquier eventualidad. Así, en el marco del equipo en estudio y sus componentes, y considerando los datos proporcionados por el estudio preliminar de análisis de criticidad que sirvió de base, se concluye que, para los dieciocho componentes en estudio, la sensibilidad de la criticidad se evidencia mayormente en tres factores, el primero: frecuencia de fallos, seguido luego por: flexibilidad operacional y efecto de fallo. Respecto a los factores: coste de reparación y seguridad y ambiente, no se registraron variaciones que los permitieran valorar.

Se obtuvieron resultados acerca del desempeño de las variables de interés que permitieron evaluar el comportamiento del sistema en diferentes situaciones de acuerdo al modelo de análisis de criticidad. En este caso, el hallazgo a través de los resultados obtenidos en los gráficos resultantes del análisis de sensibilidad evidencia que el Valor de Criticidad solo es sensible para el parámetro resultante del múltiplo: frecuencia de fallos (FREC), flexibilidad operacional (FLEX) y efecto del fallo (EFEC). Además, por ser el factor FREC el más ponderado a criterio del modelo de criticidad que se utilizó como base, el efecto global de esa característica de sensibilidad de ese factor sobre los otros parámetros del modelo matemático de criticidad no hace cambiar el nivel de criticidad previo de los componentes del aerogenerador.

5. Referencias

- Amendola, L. (2006). Modelo de Confiabilidad Humana en la Gestión de Activos. Revista Calidad. p10-16. Valencia: Asociación Española de la Calidad.
- Amendola, L. (2006). Gestión de proyectos de activos industriales. Valencia: Editorial UPV.
- Amendola, L. y Depool, T. (2007). Validación de un modelo de confiabilidad humana con el apoyo de expertos en una empresa de manufactura. Revista Ingeniería y Gestión de Mantenimiento. Nº 53. p 37-42. Madrid: Reed Business Information.

- Comisión Europea. Propuesta de directiva del Parlamento Europeo y del Consejo Relativa a la Promoción de la Electricidad Generada a partir de Fuentes de Energía Renovables en el Mercado Interior de la Electricidad, Mayo 2000.
- Dirección General de Política Energética y Minas. Registro de productores en régimen especial. Technical report, Ministerio de Economía. Disponible en <http://www.mcyt.es/productores>.
- European Commission, Directorate-General for Energy. Wind Force 10: A Blueprint to Achieve 10% of the World's Electricity from Wind Power by 2020. Wind Energy — Clean Power for Generations.
- European Wind Energy Association. Wind Energy in Europe. Disponible en <http://www.ewea.org>.
- Foley, J. y Gutowski, T. (2008). The Impact of Reliability on Wind Turbine Life. Cycle Analysis. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment 2008. EE.UU.
- González, J.M.; Amendola, L. & Depool, T. (2009). Modelo de Criticidad Operacional en Generadores de Parques Eólicos. XII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Zaragoza, 2008. pp 2331-2340. España: AEIPRO.
- Morales, G. (2007). Estructura de Análisis de Decisiones para la Evaluación económica de Proyectos Petroleros bajo Condiciones de Incertidumbre y Riesgo. UPIICSA XV, VI, 43 2007. p-9. México.
- Moreno-Jiménez, J. et al. (1998). Validez, Robustez y Estabilidad en Decisión Multicriterio. Análisis de Sensibilidad en el Proceso Analítico Jerárquico. Revista R.Acad. Cien.Exact.Fis.Nat. Vol. 92, No 4, pp 387-397. España.
- Moubray, J. (1998). Reliability Centered Maintenance RMC II, Tercera edición. Londres: Editorial Biddles Ltd, Guildford and King's Lynn.
- Quinn, R. (2005). Maestría en gestión de organizaciones. Madrid: Díaz de Santos.
- Red Eléctrica de España. Red de Transporte de Energía Eléctrica de España. Disponible en http://www.ree.es/sistema_electrico/pdf/boletin_mensual/peninsular/ene2010.pdf.

Agradecimientos

Deseo expresar públicamente mi agradecimiento a la empresa PM&M Institute for Learning, España, por su valioso apoyo y por permitirme tomar parte en las labores de investigación de campo como parte de su consultoría en Iberoamérica.

Correspondencia

Sergio José Noguera Gotopo
Phone : +34 626 445 867
e-mail: sernogo@posgrado.upv.es; snoquera@uc.edu.ve

Luis José Amendola
e-mail: luiam@dpi.upv.es

Tibaire Depool
e-mail: tibaire@pmmlearning.com

Joan Manuel Belisario Alonso
e-mail: joan@pmmlearning.com