

## “APLICACIONES DEL MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN DE FALLAS y CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA ENERGÍA EÓLICA”

Miguel Milanés<sup>1</sup>, Néstor Rodríguez<sup>1</sup>, Nicolás Scenna<sup>2</sup>.

Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería -CAIMI-

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Rosario -

Zeballos 1346, 2º Piso S2000BQB – Rosario – Tel: +54 341 4484909 – Interno 144– e-mail: mhmilanes@yahoo.de

### RESUMEN:

La industria de las turbinas eólicas ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, denotado en la instalación de parques eólicos en lugares cada vez menos asequibles. Teniendo en cuenta dicho marco de referencia, el análisis de la confiabilidad de los sistemas de conversión eólica en sí, definiendo los componentes, sus posibles modos de fallas y sus potenciales efectos y consecuencias es un factor relevante de estudio.

Se desarrolla un algoritmo que sea capaz de calcular mediante los parámetros de las funciones de falla de cada componente la confiabilidad y la disponibilidad del sistema en estudio

El objetivo es aplicar los métodos de análisis de fallas, cualitativos y desarrollar modelos matemáticos basados en la teoría de la confiabilidad para analizar las principales características de una turbina eólica.

**Palabras clave:** energía eólica, FMEA, confiabilidad, disponibilidad.

### INTRODUCCIÓN

Es bien conocido el actual problema energético mundial como consecuencia del alto impacto que la industria del petróleo tiene en la matriz de generación eléctrica y medios de transporte en nuestra sociedad, además los recursos provenientes del petróleo son inestables y conducentes a generar controversias político-económicas críticas en algunas economías regionales. Sin lugar a dudas no nos debemos olvidar del actual desastre ecológico, del que estamos siendo testigos estas últimas décadas, por el incremento de los gases de efecto invernadero como consecuencia del consumo desmedido de combustibles fósiles (MetOficce, 2012).

Como consecuencia de esto y de otros factores socio-económicos, en los últimos años se ha producido un crecimiento exponencial en el desarrollo de las energías renovables, esto se evidencia en la capacidad instalada mundial (Cader, 2009). La tecnología eólica es completamente amigable con el medio ambiente ya que no contribuye al efecto invernadero y reduce sustancialmente el consumo de combustibles fósiles.

En Argentina la situación energética no difiere mucho de la global, nuestra matriz energética es intensamente dependiente de los combustibles fósiles pero a pesar de esta realidad nuestro país presenta una situación única de abundancia de recursos energéticos renovables. Esto nos da la posibilidad de poder diversificar la matriz energética en este sentido y lograr así también disminuir la sujeción actual a los combustibles fósiles, asegurando además un futuro más sustentable.

Actualmente la componente de Energía Eólica en el sistema interconectado nacional no representa mayores problemas en la integración al mismo. A futuro, la matriz energética Argentina incrementará la proporción del aporte de las Energías Renovables al SADI (Sistema Argentino de Interconexión) en forma apreciable. Esto plantea nuevos desafíos tecnológicos y metodológicos ya que las incipientes tecnologías renovables deberán coexistir con las actuales creando un escenario no convencional tanto desde la óptica de los operadores como para los sistemas de distribución y transmisión de la energía.

El desarrollo de modelos de confiabilidad y detección de fallas tipo FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) para los sistemas eólicos representa un tema clave de estudio para los actuales lineamientos en materia energética en nuestro país, además es de extrema relevancia en sistemas offshore debido a las características propias de accesibilidad de estos parques eólicos (Karaki, 2004).

<sup>1</sup>Investigador CAIMI-UTN-FRRo

<sup>2</sup>Investigador Principal CONICET-CAIMI-UTN-FRRo

La evaluación de los sistemas eólicos por medio de índices de confiabilidad ha sido abordada por diversos investigadores. El trabajo (Hill, 2008) (Santoso, 2005) expresa la clara necesidad de mejorar el diseño, calidad de operación y mantenimiento de las turbinas eólicas con el fin de optimizar la confiabilidad de un sector energético en pleno crecimiento. De este trabajo se desprende también un estudio de minimización de costos de mantenimiento en las turbinas eólicas. Se concluyó que resulta importante construir una base de datos que permita cruzar datos entre distintas granjas eólicas sus resultados de funcionamiento y operatividad con los datos producidos por los fabricantes de turbinas eólicas y generar así un patrón de recursos que permita optimizar todos los sistemas involucrados, de tal forma de optimizar el diseño de las futuras turbinas. Los modelos utilizados fueron los de tipo de bloques RBD (Reliability Block Diagram) y los de árbol de eventos en conjunto con modelos físicos-matemáticos aproximados para la evaluación cuantitativa de la confiabilidad del sistema (Barbati, 2008).

(Taboul, 2004) plantea la importancia del desarrollo de modelos de confiabilidad en los crecientes sistemas eólicos. Dichos modelos integran plataformas de análisis de confiabilidad y optimización, ya que ambas características determinan la disponibilidad de cualquier sistema. Estas herramientas permiten obtener indicadores con niveles de detalle y fidelidad no obtenidos en modelos matemáticos anteriores, logrando así identificar los puntos más relevantes de estudio y mejora. Los conceptos generales de la teoría de confiabilidad del sistema permitirían mejorar aún más los sistemas de planeamiento en fuentes con características estocásticas (M. Carolin MAbel, 2011).

(Arabian-Hoseynabadi, 2010) presenta un análisis donde se aplicó FMEA a una turbina eólica de 2 MW, sistema de velocidad variable y control de pitch, con caja de 3 velocidades tipo, y posteriormente compararon los resultados con datos extraídos de campo. Con la información recabada desarrollaron una herramienta predictiva que les permitió inferir las posibles fallas de una turbina pero esta vez con un generador sincrónico. Este trabajo arrojó como resultado que los modos de falla inferidos en la turbina sincrónica a partir de los datos obtenidos en la turbina asincrónica fueron muy similares a datos luego cotejados en campo. La turbina con generador sincrónico presentó niveles de confiabilidad mayores que la máquina con generador de inducción ya que se redujeron los modos de falla en la primera como consecuencia de la falta de la caja de velocidad y otros elementos mecánicos introducidos en el sistema. La metodología puede ser útil para optimizar la confiabilidad en las turbinas eólicas especialmente las offshore (Jesse Andrawus, 2009).

Precisamente, en este trabajo se profundiza explícitamente la aplicación de un método tradicional para identificar las fallas y caracterizar los distintos modos y posibles efectos de los mismos. Su tratamiento sentaría antecedentes en nuestro ámbito académico con sus implicancias en su posterior aplicación en el ámbito de la industria.

## METODOLOGÍA

En general las turbinas eólicas son de diversos tipos con diferentes configuraciones en su estructura pero existen componentes básicos que son comunes en todos los tipos de máquinas. En las Fig. N°1 y Fig. N°2 se muestran ejemplos típicos de dos turbinas industriales tipo asincrónico y sincrónico propiamente dicho y sus principales componentes.

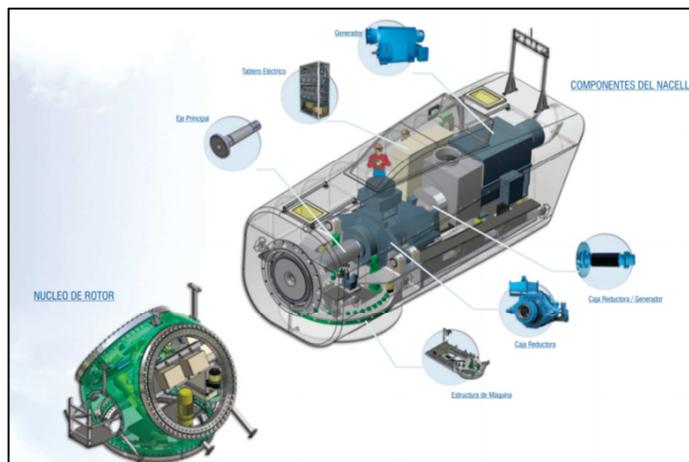


Figura N° 1 NRG Patagonia

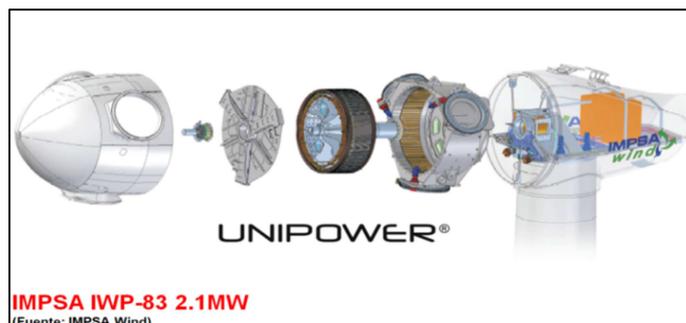


Figura N° 2 IMPSPA

Desde el punto de vista del método de *Detección de Fallas y Análisis de Efecto* denominado FMEA por su acrónimo en inglés Failure Modes and Effects Analysis, es una herramienta que nos permite estudiar los distintos componentes que pertenecen a un sistema para su evaluación ante determinadas condiciones de trabajo o modos.

Se lleva a cabo la construcción de una lista de todos los sistemas principales como un bloque, y luego se trabaja por bloque cada subsistema que lo forma. Junto con un equipo multidisciplinario de profesionales (Mecánicos, Operación y Control, Materiales, Programación, etc.), ver Fig. N°3.

Un breve resumen de las principales partes:

- Rotor (Palas / Hub)
  - Palas: perfil aerodinámico, compuestos de fibra, 2 o 3 palas
- Estructura
  - Góndola: soporta rotor, se orienta con el viento
  - Torre: tubular de acero, hormigón, retícula, etc.
  - Fundación: hormigón
- Mecanismos / Accionamientos
  - Yaw, Pitch, Tren de transmisión – Generador
- Sistema Eléctrico
  - Convertidor, Transformador, Interruptores, Servicios Auxiliares

Se identifican las fallas asociadas a cada componente y se sugieren acciones correctivas cuando sean apropiadas. También se sugieren las salvaguardas de protección como medida para contrarrestar los efectos de las fallas (Yannick Degeilh, 2011).



Figura N° 3 Metodología

Dentro de este contexto, para analizar los modos de fallas y las consecuencias derivadas de un sistema de generación eólica y su integración a redes convencionales, resulta evidente que se deberá optimizar la herramienta que permita identificar metodológicamente los distintos modos de fallas, su evaluación cualitativa mediante una adecuada matriz de riesgos, así como las protecciones existentes previstas en el diseño del sistema y las modificaciones necesarias al diseño, si correspondiera (Jesse Andrawus, 2009).

Al efectuar la modelización de un sistema a partir del punto de vista de la confiabilidad cualquier sistema (parque eólico o máquina en particular) se analiza partiendo de diagramas de bloques en los cuales se utilizan disposiciones serie/paralelo para representar la interacción de los subsistemas o componentes de la máquina (Rausand, 2004). Los diagramas lógicos de bloque indican cómo cada componente interactúa con el resto en relación a los modos de fallas definidos para el sistema. Un ejemplo simplificado se representa en la Fig. N° 4.

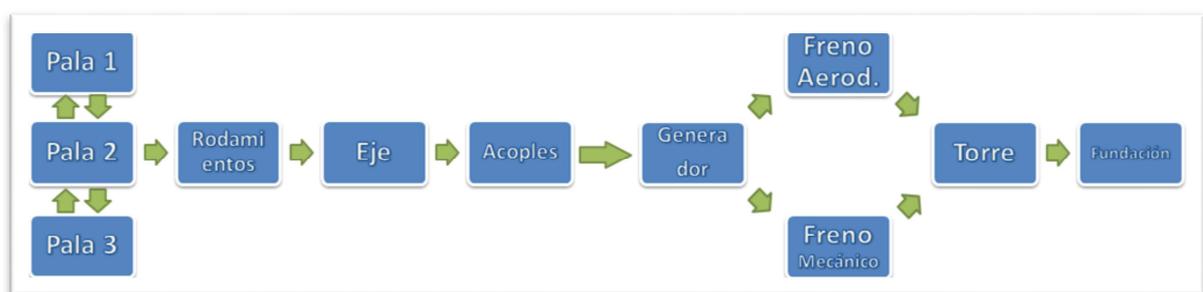


Figura N° 4 Esquema en bloques del sistema

Dada la Función Confiabilidad de sus componentes, el cálculo del conjunto surge de considerar el arreglo serie/paralelo del sistema. Aquí podemos realizar una primera consideración. Es posible calcular la función Confiabilidad y la función Disponibilidad. La primera contempla solo un proceso a primera falla, mientras que la segunda contempla el proceso de falla-reparación-falla.

La configuración serie es probablemente el modelo mas simple. En una configuración serie todos los subsistemas deben operar correctamente si se requiere que funcione el sistema. Bajo la hipótesis de independencia en los sucesos de los eventos;

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad 1.$$

Donde  $R_s$  es Confiabilidad del sistema y  $R_i$  la de los componentes.

Igualmente, para un sistema en paralelo (admitimos la hipótesis de independencia) tenemos:

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad 2.$$

Componiendo los valores serie/paralelo se obtiene la confiabilidad (disponibilidad) del complejo en función del tiempo.

La forma o topología del acople de diferentes componentes puede tener una enorme importancia en la determinación del nivel de confiabilidad de un equipo complejo. Así, también es un instrumento importante en el análisis y prevención de fallas.

La Disponibilidad Media inherente para cada componente  $i$  se define como sigue:

$$A_i = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MDT_i} = \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \quad 3.$$

Siendo, MTTF (del acrónimo en inglés): Mean Time To Failure y MDT (del acrónimo en inglés): Mean Down Time, adoptando independencia entre fallas y distribución exponencial para ambos.

Homológamente al análisis anterior, en sistemas en serie tenemos que:

$$A_s = \prod_{i=1}^n A_i \quad 4.$$

Y para sistemas en paralelo:

$$A_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i) \quad 5.$$

Por ejemplo, a continuación se evalúa la confiabilidad de una turbina eólica basándonos en la configuración de la Fig. N°4. Los componentes a considerar son las palas, rodamientos, eje, acoples, generador, sistemas de frenos aerodinámico y mecánico, y la caja de engranajes. Cada sistema antes mencionado forma parte de un bloque y cada bloque es considerado en serie o paralelo según la función específica del mismo en el sistema general. Los datos de los parámetros de la confiabilidad por cada parte se obtuvieron de los trabajos de (Hill, 2008) y (K. Smolders, 2010).

Se ha desarrollado un algoritmo de cálculo que permite realizar el trabajo algebraico mediante el uso de hipermatrices, Fig. N° 5; este diseño brinda una plataforma de análisis de confiabilidad completamente funcional y capaz de utilizar grandes volúmenes de datos de entrada. En esta etapa inicial el programa realiza los cálculos de confiabilidad especificando los datos de entrada de las distribuciones de fallas de los componentes considerados y el horizonte de tiempo en estudio. En un trabajo posterior se ampliará el alcance a cálculos de disponibilidad, incorporando en el tratamiento los tiempos de reparación.

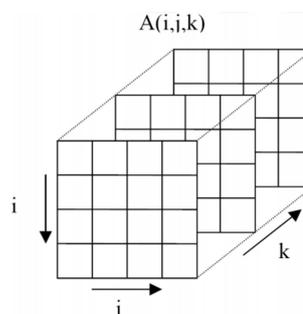


Figura N° 5 Esquema de matrices

En nuestro caso de estudio sabemos que una de las principales ventajas para justificar el cambio tecnológico (sin caja) en las turbinas eólicas se fundamenta en una menor cantidad de partes móviles, reduciendo esto las probabilidades de falla en el sistema mecánico de transferencia de energía. La Fig. N°6 representa la confiabilidad entre los sistemas de generación con y sin caja de engranajes aplicando el algoritmo desarrollado en función de los parámetros de falla de cada componente.

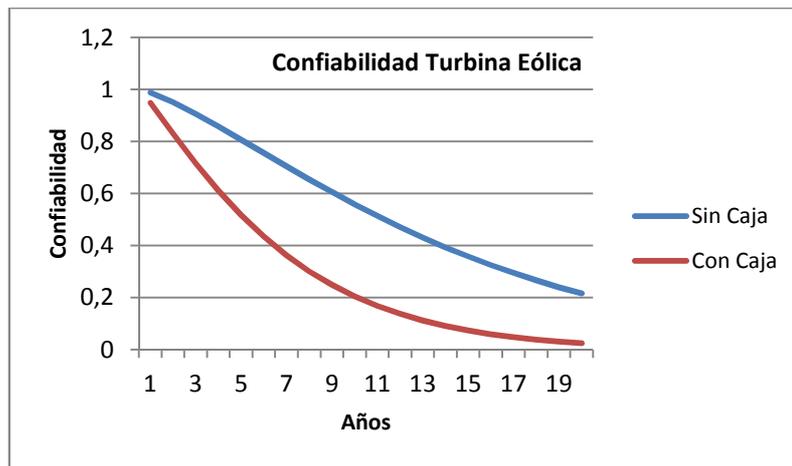


Figura N° 6 Confiabilidad con y sin caja de engranajes.

## CONCLUSIÓN

En un próximo trabajo, se presentará un modelo capaz de calcular la confiabilidad del sistema, en un período de tiempo estimado por el usuario y de visualizar los modos de fallas más recurrentes y sus principales características por tipo, sus niveles de intensidad y posibles formas de mitigarlo. Además, al incorporar datos de tiempos de reparación se calculará la curva de disponibilidad en función del tiempo.

## REFERENCIAS

- Arabian-Hoseynabadi, H., Oraee, H., Tavner, P.J. 2010.** *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind*. s.l. : Electrical Power and Energy Systems., 2010.
- Barbati, Luca. 2008.** *WTG Reliability Model Specifications*. s.l. : Relex, 2008.
- Cader. 2009.** *White Paper*. 2009.
- Hill, Roger, Jennifer Stinebaugh, Daniel Briand. 2008.** *Wind turbine Reliability: A database and Analysis*. s.l. : Sandia National Laboratories, 2008.
- Jesse Andrawus, John Waton, Mohammed Kishk. 2009.** *Wind Turbine Maintenance Optimisation: principles*. s.l. : Robert Gordon University, 2009.
- K. Smolders, H. Long, Y. Feng, P. Tavner. 2010.** *Reliability Analysis and Prediction of Wind Turbine*. s.l. : European Wind Energy Conference, 2010.
- Karaki, R., y R Billinton. 2004.** *Cost-effective wind energy utilization for reliable power supply*. s.l. : IEEE, 2004.
- M. Carolin Mabel, R Edwin Raj, E. Fernandez. 2011.** *Analysis on reliability aspects of wind power*. 2011.
- MetOffice. 2012.** MetOffice. [En línea] 20 de Marzo de 2012. [Citado el: 20 de Marzo de 2012.] <http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2011/2011-global-temperature>.
- Rausand, Marvin. 2004.** *System Reliability Theory*. s.l. : Wiley, 2004.
- Santoso, C. D'Annunzio S. 2005.** *Wind Power Generation Reliability Analysis and Modeling*. s.l. : IEEE, 2005.
- Taboul, Sameer Vittal and Michel. 2004.** *Performance and reliability analysis of wind turbines using Monte*. s.l. : Elsevier, 2004.
- Yannick Degeilh, Chanan Singh. 2011.** *A quantitative approach to wind farm diversification and reliability*. s.l. : Elsevier, 2011.

## ABSTRACT

Wind energy has experienced an exponential growth over the past few years. Taking into account both a growing green market because of better economic status for wind energy power and an incipient lack of conventional fuels, the wind power industry is becoming a crucial issue in the contemporary world.

Nowadays a huge percentage of wind turbines is installed at non easily reachable areas and a future offshore developing will make the theory of reliability have an impact on wind energy industries since the wind projects' managers have a greater interest in bigger and more efficient machines.

Argentina features natural resources of wind energy in many places with almost no direct impact on people, but there are long distances between potential areas and areas of consumption.

The overall aim of this work is to optimize tools such as FMEA (Failure Mode Effects Analysis) and the theory of Reliability because they are an important characteristic in onshore investments and they are mandatory in offshore projects, due to the availability and the significant operations and maintenance resources needed in those systems.

Keywords: wind energy, FMEA, reliability, availability.