



# Análisis de la falla de pernos de fijación de las zapatas polares de un motogenerador

## Failure analysis of polar shoes fixing bolts of a motogenerator

Yamira Guerra-Fernández<sup>I</sup>, Urbano Ordoñez-Hernández<sup>II, \*</sup>, Vladimir González-Fernández<sup>II</sup>

I. Empresa Nacional de Mantenimiento a Centrales Eléctricas, EMCE. La Habana, Cuba

II. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Mecánica. La Habana, Cuba

\* Autor de correspondencia: [urbano@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:urbano@mecanica.cujae.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 24 de febrero de 2019

Aceptado: 15 de abril de 2019

### Resumen

En este trabajo se han investigado las causas más probables del fallo de una parte de los pernos de fijación de 5 de las 10 zapatas polares de un generador perteneciente a un sistema motor diésel-generador de 2,5 Mw de potencia. El fallo, por sus características, ocasionó la inutilización del generador. Para investigar la causa más probable de la falla fueron seleccionados pernos que pudieron ser recuperados después de la avería y a los cuales se les realizaron análisis químico espectral, ensayos de resistencia mecánica y dureza HRC, análisis metalográfico y un análisis de las características de la fractura en los pernos dañados.

Mediante el análisis de fallas mecánicas se pudo concluir que la causa primaria del fallo de los pernos de fijación de las zapatas polares del generador se debió probablemente a la pérdida de la pretensión inicial de uno o varios de los pernos, a lo cual contribuyó también la existencia de vibraciones y fuerzas electrodinámicas siempre presentes y que finalmente originaron el aflojamiento de uno o varios de los pernos de 5 de las diez zapatas polares del generador.

**Palabras claves:** sistema electro-energético, fallo de pernos, zapatas polares.

### Abstract

In this work it was investigated the most probable causes of failure of a part of the fixing bolts of 5 of the 10 pole shoes of a generator belonging to a diesel-generator engine system of 2,5 Mw. The failure, due to its characteristics, caused the generator to be rendered useless. To investigate the most probable cause of the fault, some bolts were selected of those that could be recovered after the breakdown, and which were subjected to analysis, mechanical resistance tests and HRC hardness, metallographic analysis and an analysis of the characteristics of the fracture in the damaged bolts. Using the fracture mechanics, it was possible to conclude that the

primary cause of the failure of the fixing bolts of five of the pole shoes of the generator, was probably due to the loss of the initial pretension of one or more of the bolts, to which also contributed to the existence of vibrations and electrodynamic forces that were always present and which finally caused the loosening of one or more of the bolts of five of the ten pole shoes.

**Key words:** electro-energetic system, failure of bolts, pole shoes.

### Cómo citar este artículo:

Guerra Fernández Y, Ordoñez Hernández U, González Fernández V. Análisis de la falla de pernos de fijación de las zapatas polares de un motogenerador. Ingeniería Mecánica. 2019;22(3):156-160. ISSN 1815-5944.

## Introducción

Los Grupos electrógenos (GE) estudiados en este trabajo están constituidos por la combinación de un motor diésel y un generador sincrónico que permiten generar unos 50-60 MW a plena capacidad.

En este artículo se presenta el análisis de la falla catastrófica ocurrida en una unidad motogeneradora que se hallaba en pleno funcionamiento, perteneciente a un grupo electrógeno. El motor Diésel entregaba una potencia de 2.5 Mw cuando funcionaba a 750 rpm. Uno de los efectos más destructivos de la falla fue el desprendimiento de 5 de las 10 zapatas polares del generador, al fallar varios de los pernos que las fijaban al rotor. Fue posible comprobar también que el sistema de protección por sobre velocidad del motor diésel, no había funcionado eficientemente al alcanzar aquel una velocidad de rotación superior a 1400 rpm. Es significativo el hecho de que las 5 zapatas polares restantes a pesar de la avería, permanecieron firmemente fijadas al rotor por medio de sus pernos correspondientes. Por otro lado, no fue posible recuperar todas las piezas que resultaron dañadas por haber sido expulsadas a distancia considerable al ocurrir la falla. De acuerdo con la naturaleza de la avería se hizo evidente la necesidad de concentrar la atención en los aspectos relacionados con los pernos empleados

para la fijación de las zapatas polares al rotor del motogenerador averiado. Desde luego que la realización del proceso de montaje considerando sobre todo el proceso de apriete de los pernos, así como las condiciones de aplicación de la pretensión o precarga, y la frecuencia y calidad de los mantenimientos pudieran haber conducido al fallo por fractura de varios de los pernos.

Es de sobra conocido que los pernos sometidos a cargas de variados tipos sobre todo en ambientes vibratorios, pueden aflojarse y perder la precarga o pretensión, lo que puede dar lugar al fallo del perno por fatiga u otras causas [1, 2]. Los fallos por fatiga, son comunes en las uniones roscadas y otras piezas de máquinas rotatorias como los motores de combustión interna, maquinaria eléctrica etc., siendo la fatiga la más común de todas las causas mecánicas de fallas. Las dificultades propias de los estudios de fractura tienen mucho que ver con las distintas variantes de la fractura que se pueden presentar en función de la gran variedad de combinaciones de esfuerzos posibles.

Por tanto, como objetivo de este trabajo fue la determinación de la ó las causas más probables del fallo catastrófico de los pernos de sujeción de 5 de las 10 zapatas polares de un motogenerador. El efecto de la destrucción fue de tal magnitud que el rotor-generador no pudo ser recuperado.

El Análisis de Fallas Mecánicas es una metodología empleada en el mundo entero desde hace más de 50 años para determinar las causas raíces del fallo de una amplia variedad de equipos mecánicos [3, 4]. Este será en principio el método de análisis empleado para encontrar la causa más probable del fallo de una parte de los pernos de las zapatas polares del generador averiado.

## Métodos y Materiales

### Descripción de la avería

El generador ABB tipo AMG 0900 se averió el en pleno funcionamiento después de 25000 horas de trabajo. Se pudo comprobar que la velocidad del motor diesel se elevó desde 720 rpm (velocidad nominal) hasta casi el doble, al alcanzar durante la avería unas 1400 rpm. Al mencionado equipo diesel se acoplaba el generador sincrónico correspondiente, y sobre el rotor de dicho generador se ubicaban 10 zapatas polares, cada una de ellas fijadas radialmente al rotor mediante 9 pernos del tipo socket, de 24 mm de diámetro x 3 mm de paso y 240 mm de longitud.

A la velocidad mencionada de 1400 rpm del rotor del generador, 5 de las diez zapatas polares salieron despedidas violentamente sin poderse precisar el orden, sufriendo el rotor daños muy severos producto del roce con el estator y probablemente también a causa de los impactos con otras piezas desprendidas, incluyendo una parte de los pernos fracturados. Finalmente se dictaminó que tanto el rotor como el estator eran irreparables por los daños sufridos durante la avería. En las figuras 1 y 2 se muestra el rotor averiado y algunas de las zapatas polares desprendidas junto con varios de los pernos dañados.



**Fig.1.** Vista del rotor y el estator inutilizados **Fig.2.** Zapatas polares desprendidas y pernos dañados

Por otro lado, considerando que la avería estuvo fundamentada en el fallo de los pernos de 5 de las 10 zapatas polares, una parte de ellos fueron sometidos a ensayos físico-mecánicos, metalográficos y a un estudio fractográfico con ampliación limitada (50 x).

### Análisis químico de los pernos que fijan las zapatas polares al rotor generador

El análisis químico se realizó utilizando un espectrógrafo portátil modelo PMI Master Pro, de la firma Oxford Instruments de Alemania. Como Norma de referencia se tomó la DIN 34CrNiMo6 que es la que rige en Finlandia el país de origen del equipo, para el caso de elementos roscados de alta resistencia. En la tabla 1 se muestran los resultados del análisis químico espectral.

**Tabla 1.** Resultado del análisis químico realizado a los pernos seleccionados

Elementos	% C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu
<b>Perno</b>	0,25-0,35	0,2- 0,4	0,4- 0,9	≤0,04	≤0,04	1,3-1,6	0,2-0,3	1,3- 1,6	

### Medición de la dureza Rockwell (HRC)

Para la medición de la dureza HRC, se seleccionaron 3 de los pernos de la zapatas polares que sufrieron posiblemente el mayor daño a consecuencia de la avería, así como 5 pernos más, seleccionados aleatoriamente

de las 5 zapatas que no se desprendieron del rotor. La medición de la dureza HRC se realizó empleando un durómetro AVK de AKASHI, Japón en 3 zonas equidistantes a lo largo de la longitud del perno. En la tabla 2 se muestran los resultados de la dureza Rockwell medida.

**Tabla 2.** Resultado de la medición de la dureza Rockwell

Muestras	A	B	C	Promedio
1	41,3	40,5	40,9	40,9
2	39,8	40,9	40,5	40,4
3	39,8	41,2	41,1	40,7
4	39,4	39,0	38,9	39,1
5	37,5	39,0	39,4	38,6
6	39,9	39,0	39,8	39,6
7	38,9	38,6	38,8	38,8
8	40,1	37,8	38,0	40,9

Observación: A, B y C: puntos equidistantes para medir la dureza

### Resistencia a la tracción de los pernos

En la tabla 3 se muestran los resultados de la resistencia a la tracción de algunos de los pernos no averiados. El ensayo de resistencia a la tracción se realizó en una máquina de ensayo IBERTEST modelo IBMU-4C-1000-DW. Para el ensayo se tomaron pernos de las zapatas que no se habían desprendido producto de la avería.

**Tabla 3.** Resistencia a la tracción de pernos de zapatas no averiadas

No. Muestra	Carga de prueba MPa	Carga de ruptura MPa
1	972	1212
2	964	1228
3	968	1206
4	980	1240
5	958	1198

### Análisis metalográfico

El análisis metalográfico se realizó para comprobar el estado micro estructural de los pernos de fijación de las zapatas polares de la unidad averiada que no habían sufrido daño visible y se encontraban firmemente atornilladas al rotor generador aun después de la avería. Igualmente se prepararon muestras de varios de los pernos destruidos por efecto de la avería. Se empleó el pulido mecánico empleando papeles abrasivos como es usual en el desbaste. Posteriormente las muestras se pulieron con pasta de diamante de 3, 5, y 7  $\mu\text{m}$  y finalmente se atacaron con nital al 3 % para revelar la microestructura. La observación de la microestructura se realizó en un microscopio metalográfico invertido ECLIPSE, MA200 de la firma NIKON, Japón. En la figura 3 se muestra la microestructura de un perno perteneciente a una de las zapatas no expulsadas a consecuencia de la avería y en la 4 se presenta el efecto de la avería en la microestructura de uno de los pernos averiados.



**Fig. 3.** Metalografía perno no averiado. 200 X



**Fig. 4.** Perno averiado. 200 X

## Resultados y Discusión

### Análisis químico

El análisis químico a los pernos se realizó mediante la espectrografía por Rx, empleando un equipo de alta confiabilidad como lo es el antes mencionado. Se pudo confirmar que los materiales metálicos empleados son los recomendados para fabricar elementos de fijación roscados de alta responsabilidad según la Norma DIN34CrMo6, que es la empleada en Finlandia.

## Ensayos mecánicos

No hay discrepancias en cuanto a los ensayos de dureza Rockwell C así como tampoco en los ensayos de resistencia a la tracción (carga de prueba), realizados directamente a los pernos de las zapatas que no fueron destruidas. Los resultados en los dos casos demuestran sin lugar a dudas que los pernos empleados poseían las propiedades mecánicas esperadas después del tratamiento térmico.

## Análisis de la fractura de los pernos

Para el análisis de la fractura se utilizó el perno que mejor mostraba una superficie de fractura con poco deterioro, figura 5. Este mostraba una superficie bien definida aunque presentaba unas pequeñas señales de óxido que no fueron eliminadas para poder preservar casi intacta la topografía de la superficie de fractura [5, 6]. A modo de comparación en la figura 6a se muestra la fractura frágil, (sin señales de fatiga) de un perno de grúa que sufrió una fractura frágil, y en la figura 6b se muestra la información obtenida por microscopia electrónica de barrido MEB.

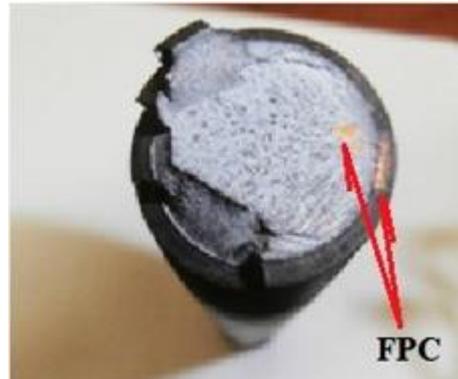


Fig. 5. Fractura frágil de perno recuperado de la avería

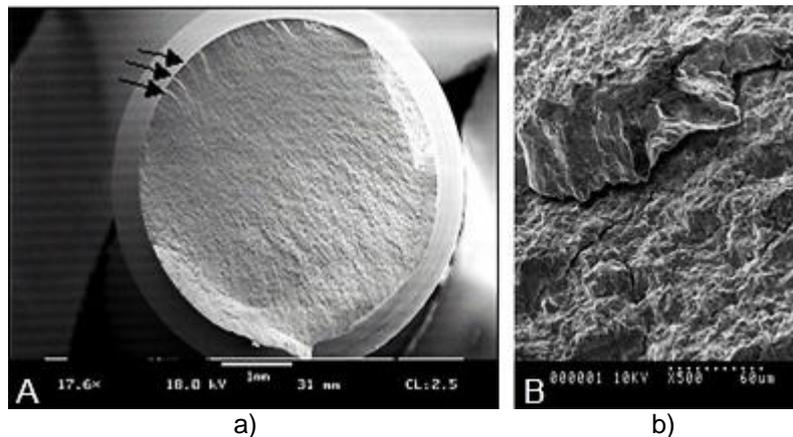


Fig. 6. Fractura frágil de un perno de grúa

En ambas figuras también es notable la ausencia de las señales típicas de la fractura por fatiga, caracterizadas por la presencia de las llamadas marcas de playa normalmente presentes en los casos en que la fatiga es la causa de la fractura [1, 2]. Sin embargo, en el perno recuperado puede notarse sin dificultad la convergencia de las sinuosidades superficiales según un patrón en V dirigida hacia la zona donde aparecen las señales de óxido. Ahí está probablemente el punto de inicio de la fractura frágil que experimentó el perno partiendo de una grieta primaria que después se extendió seguramente a enorme velocidad por la ausencia de deformación, hacia otros hilos de rosca, los cuales como es conocido actúan a su vez como concentradores de tensiones.

La fractura ocurrió de forma súbita y debida al efecto de una sobrecarga en tensión que a su vez fue un producto de la falla del sistema de regulación de la velocidad del motor diesel que accionaba el motogenerador. El valor de la fuerza centrífuga debe haber alcanzado de forma súbita, un nivel probablemente muy cercano al límite de rotura del material y su inicio debe haber comenzado en algún micro defecto de la raíz de uno de los hilos de rosca activos del perno que como ya se mencionó actúan como concentradores de tensiones [7].

El proceso de la fractura parece haber comenzado con el aflojamiento previo y la pérdida correspondiente de la pretensión en algunos de los pernos de las 5 zapatas polares que se desprendieron. Fue imposible determinar el orden en que ocurrió el desprendimiento por el deterioro que sufrieron los restos averiados. La búsqueda de información para la realización del análisis de la falla comenzó más de 2 años después de ocurrida ésta. La información obtenida de algunos de los testigos del evento de falla analizado fue desigual e incompleta.

Todo parece indicar que la fractura fue frágil y originó una grieta inicial en la zona superior derecha de la figura 5 (marcada por la saeta), que se ve ligeramente oxidada. La acción simultánea y combinada de los esfuerzos

cortantes presentes aunque débiles, dio lugar a la rápida extensión de la grieta siguiendo la dirección de los filetes de la rosca que son siempre sitios de concentración de esfuerzos. Lo expresado se confirma también por el hecho de que es un acero aleado y tratado térmicamente, con una dureza superior a los 35-38 HRC con alguna presencia de martensita revenida (troosto-sorbita), en su microestructura de baja ductilidad.

Finalmente se debe realizar un análisis primario de los procesos que posibilitaron el desprendimiento por falla de los pernos de 5 de las 10 zapatas polares del motogenerador. Parece probable que la causa sea el aflojamiento de varios de los pernos de fijación de las zapatas polares y la ausencia de la pretensión inicial, lo cual ha sido objeto de una buena cantidad de trabajos científico técnicos relacionados con el tema [8, 9,10], sin que sea posible determinar el orden en que se produjo el fallo de los pernos y la expulsión de las 5 zapatas polares.

Los desplazamientos relativos y repetidos entre las superficies de contacto debido a un torque aplicado, pueden originar la rotación gradual del perno disminuyendo de hecho el valor de la pretensión lo que a su vez disminuye también la fuerza que mantiene la unión roscada [11, 12].

Para prevenir el aflojamiento espontaneo de una unión roscada hay que eliminar de algún modo el deslizamiento relativo entre los 2 miembros de la unión. Se requiere entonces aumentar la tensión axial con lo cual se incrementa la fricción entre las partes o disminuir el valor de las cargas cíclicas originadas por las vibraciones, las fuerzas electrodinámicas, las cargas de impacto etc.

El último aspecto a considerar es el modo en que se puede evitar el deslizamiento relativo entre los elementos de la unión. Hay que garantizar que el apriete del perno no rebase el esfuerzo de fluencia, con lo que se evita la deformación plástica progresiva y permanente del perno. Se pudo confirmar que el Manual de operación del equipo AME 0180-AME500 recomienda en su página 48, epígrafe 7.4.5: que el rotor completo debe someterse a una revisión exhaustiva una vez por año, incluyendo la comprobación cuidadosa del grado de apriete de los pernos. No existe constancia alguna de que esa recomendación se haya cumplido.

El desprendimiento de la primera de las 5 zapatas debe haber iniciado el proceso de desbalance dinámico del rotor, lo cual aumentó considerablemente el nivel de las vibraciones alcanzando posiblemente el valor de la frecuencia resonante del sistema.

## Conclusiones

El análisis químico realizado mediante análisis espectral por Rx, así como los ensayos de dureza Rockwell y resistencia mecánica demuestran sin lugar a dudas que el acero DIN34CrNiMo6 tratado térmicamente es adecuado para la fabricación de los pernos que fijan las zapatas polares del rotor del grupo electrógeno.

El análisis de la superficie de fractura de un perno, figura 5, con ampliación limitada y mostrando la falta total de marcas de playa, permite concluir que no hubo fatiga en la fractura. La rotura fue provocada probablemente por una sobrecarga en tensión debida al fallo del regulador de velocidad de rotación del motor

Ocurrió posiblemente un proceso de aflojamiento en algunos de los pernos de fijación de las zapatas averiadas, aumentando el nivel de las vibraciones, fuerzas electrodinámicas y otras, lo cual facilitó considerablemente la avería. Se pudo comprobar que algunos de los pernos recuperados habían experimentado cierta deformación plástica que no fue posible medir por la imposibilidad de reunir las partes correspondientes.

## Referencias

1. Barrett. R.T, Fastener Design Manual. USA: Lewis Research Center, NASA; 1990.
2. Zamanzadeh M, Larkin E, Mirshams R. Case studies. Broken wheel bolt. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2015;15(6):803-9.
3. Molaei Sh, Alizadeh R, Attarian M, et al. A failure analysis study on the fractured connecting bolts of a filter Press. Case Studies in Engineering Failure Analysis. 2015;4:26-38.
4. Hudgins A, James B. Fatigue of threaded fasteners. Advance Materials and Processes.2014;172(8):18-22.
5. Arroyo B, Álvarez JA. Análisis de pernos galvanizados de alta resistencia utilizados en torres metálicas. Anales de Mecánica de la Fractura. 2017;34:95-105.
6. Kakirdel A, Drevid Sh. Study of vibration loosening of bolted joints. A review. International Journal for Advance Research in Applied Science and Engineering. 2017;6(Special):988-97.
7. Mantwatkar A, Chavan S. Failure analysis of high tensile industrial fasteners. International Journal of Scientific and Research Publications. 2016;6(3):132-37.
8. Zhiwei Y, Xialei X. Failure. Analysis of Cylinder Engine Head Bolts. Engineering Failure Analysis of Bolts Joints under Vibration Considering the Tightening Process. Shock and Vibration. 2017;3.
9. Chen Y, Gao Q, Guan Zh. Self loosening failure analysis of bolts under vibration considering the tightening process. Shock and Vibration. 2017;3.
10. Ramey G, Jenkins RC. Experimental analysis of thread movement in bolted connections due to vibrations. USA: R.PNAS; 1995.
11. Eccles B. Towards an Understanding of the Loosening Characteristics of Prevailing Torque Nuts. Journal of Mechanical Engineering Science. 2010;2:203-10.
12. Dalal U, Thakur AG. Transverse vibration loosening characteristics of bolted joints using multiple jack bolt nut. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2013;3(3):3-13.

Urbano Ordoñez Hernández. <https://orcid.org/0000-0003-0261-6100>

Vladimir González Fernández. <https://orcid.org/0000-0003-0090-7377>