

Efectos de holgura de una banda trapezoidal de acoplamiento de un sistema electromecánico sobre magnitudes mecánicas y eléctricas

Jorge Iván Ramírez López

Universidad Autónoma del Carmen, Departamento de Ingeniería Electrónica, Ciudad del Carmen
Campeche, C.P. 214115, México

Efraín Ramos Buenfil

Universidad Autónoma del Carmen, Departamento de Ingeniería Electrónica, Ciudad del Carmen
Campeche, C.P. 214115, México

Marco Antonio Rodríguez Blanco

Universidad Autónoma del Carmen, Departamento de Ingeniería Electrónica, Ciudad del Carmen
Campeche, C.P. 214115, México
marblanco73@hotmail.com

Javier Torres Jurado

Universidad Autónoma del Carmen, Departamento de Ingeniería Electrónica, Ciudad del Carmen
Campeche, C.P. 214115, México

Resumen

En este artículo se investiga la holgura de una correa trapezoidal de un sistema de acoplamiento sobre las magnitudes eléctricas y mecánicas de un sistema impulsado por un motor de inducción. Las magnitudes mecánicas en cuestión son la posición angular, la velocidad mecánica sobre los ejes de acoplamiento y sobre magnitudes eléctricas que son la corriente del estator estudiada con el análisis espectral. Para las magnitudes mecánicas se lleva a cabo un análisis transitorio al arranque del motor y para las corrientes del estator se realiza un análisis en estado estable. Los resultados

experimentales se llevan a cabo utilizando un banco de pruebas instrumentado y la condición de libre y bajo falla es considerada utilizando una polea tensora.

Palabra(s) Clave(s): banco de pruebas, diagnóstico de fallas, posición angular, RPM

1. Introducción

Muy a menudo en las plantas industriales los sistemas electromecánicos son elementos críticos que proporcionan la calidad de los productos y garantizan la operatividad en los procesos. La falla de alguno de ellos puede provocar problemas de seguridad o inesperados paros de producción. El desarrollo eficiente de métodos de control para las máquinas eléctricas y transmisión son necesarios para optimizar el mantenimiento.

Estudios recientes [1] se han centrado principalmente en el diagnóstico de los fallas relativas a los motores eléctricos, tales como fallas de rodamientos [2] - [7], fallas de rotor [8] - [11] o fallas de embobinado [12] - [14]. Algunas investigaciones también se han hecho en el monitoreo de las condiciones de elementos de acoplamiento, tales como engranajes [15] - [16], que son partes críticas como la cadena de transmisión de energía. Sin embargo, poca atención se ha puesto al monitoreo del estado de los elementos externos, como las poleas [17].

Las correas trapezoidales o correas en “V” se emplean ampliamente en aplicaciones industriales tales como ventiladores, bombas, compresores, etc. Este amplio uso se debe principalmente a sus beneficios, tales como su alta eficiencia, la no necesidad de ejes de alineación, su tolerancia a la desalineación y su bajo costo [18]. Sin embargo, los sistemas de polea están sujetos a desgaste y fatiga mecánica y por lo tanto puede perder sus propiedades mecánicas. La holgura de la correa es un modo importante de fallas que aumenta el deslizamiento de la correa y por lo tanto acelera el proceso de desgaste del sistema de transmisión. Esto es causado por una pérdida de tensión que puede ser causada por una variación de la distancia entre los ejes del motor y la carga o también por el desgaste de correas y poleas. El peor de los casos, es cuando las bandas se deterioran tanto que pueden provocar graves daños en las poleas, así como

también un deslizamiento crítico entre el motor y la ruptura de las bandas [19] - [20]. En este trabajo se estudia los efectos que la holgura de la banda en un sistema impulsado por un motor de inducción (MI) provoca en cuanto a la corriente armónica y a la velocidad en cada uno de las poleas de transmisión.

Primero, el sistema experimental se compone de un motor de inducción, un sistema de transmisión por correa-polea, una carga y se experimenta los efectos del fenómeno de holgura en las correas. En segundo lugar, se analiza la corriente espectral del motor en condición saludable y en condición bajo falla. Por último, se analiza la posición y velocidad de las poleas para analizar los efectos de la holgura en el estado transitorio tanto para el estado libre de falla y bajo falla.

2. Desarrollo

La infraestructura del banco de pruebas utilizado en este trabajo se puede dividir en dos, la parte mecánica y la parte electrónica.

A. Acoplamiento mecánico

El banco de pruebas está constituido por: un MI jaula de ardilla con un par de polos, potencia y velocidad nominal de 0.55 kW y 1800 rpm respectivamente; un sistema de transmisión compuesto de dos poleas con diámetros de 4 pulgadas y correa trapezoidal con una longitud de 1600 mm; una máquina de corriente continua para emular la carga del MI; una polea tensora con dos posiciones para emular el estado libre de falla y bajo falla. En la Fig. 1 se muestra el sistema experimental.



Fig. 1. Banco de pruebas experimental.

Una de las condiciones necesaria en el banco de pruebas es hacer que las poleas de acoplamiento sean del mismo diámetro lo cual físicamente es imposible por lo que se necesitó compensar la velocidad mediante un offset de velocidad. Otra condición necesaria es lograr un tensado correcto para emular la condición libre y bajo falla dado que una holgura excesiva puede provocar que la correa se salga de las poleas y por otro lado un tensado excesivo provoca calentamiento sobre la correa-polea. Es importante mencionar que también un mala alineación también agrega calentamiento a la correa-polea.

B. Instrumentación electrónica

Para la medición de la corriente del estator del MI se utilizó un punta de prueba de corriente de efecto hall marca FLUKE (80i-110s CA/DC) y su análisis espectral se realizó con la función matemática (FFT) del osciloscopio de marca AGILENT (DSOX2024A). Con respecto a la medición de la velocidad se utilizó dos encoders incrementales marca YUMO (COM-11102) de 1024 pulsos/revolución acoplados en las flechas de la parte trasera de los motores lo cual permite una mejor sensibilidad a la

variación de la posición angular. Las señales de los *encoders* fueron procesadas en el software de LabVIEW® a través de una tarjeta de adquisición de datos DAQ (PCI 6024E) los pulsos de entrada digitales fueron procesados para determinar la posición angular y esta última fue derivada numéricamente para obtener la velocidad. El programa de LabVIEW® muestra gráficamente tanto la posición como la velocidad en distintos gráficos para mejor comparación de las variables en el motor de C.D. y C.A. En la Fig. 2 se muestra el esquemático instrumentado.

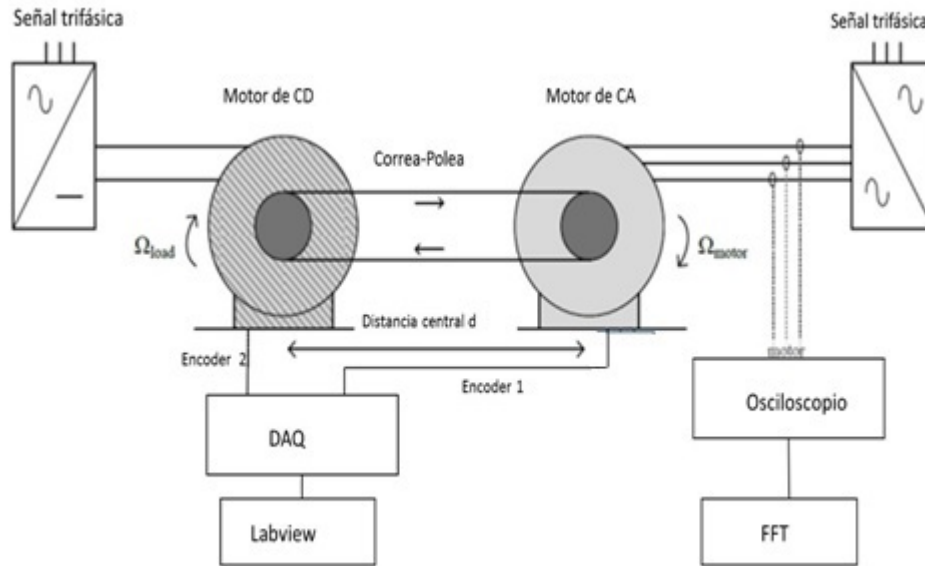


Fig. 2. Esquemático experimental instrumentado.

C. Consideraciones mecánicas

El deslizamiento absoluto de las bandas S_{Ω} se calcula a partir de la velocidad del motor Ω_{motor} y la relación de transmisión R_t a partir de la velocidad de la carga Ω_{load} tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$S_{\Omega} = \Omega_{motor} - R_t * \Omega_{load} \quad (1)$$

Por otra parte, el deslizamiento relativo S_{Ω} se define como:

$$S_{\Omega} = \left(\frac{S_{\Omega}}{\Omega_{MOTOR}} \right) * 100\% \quad (2)$$

Las mediciones se realizaron para dos condiciones de operación con las siguientes características:

Libre de falla: Correa correctamente tensada y alineada según la normatividad BS 3790.

Bajo falla: Correa con ligera tensión, mala alineación, calentamiento excesivo en correas y contaminada con aceite lubricante.

Las correas trapezoidales o correas en "V" trabajan a partir del contacto que se establece entre los flancos laterales de la correa y las paredes del canal de la polea. Tal como se muestra en la Fig. 3.

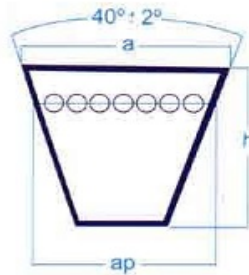


Fig. 3 Correa Trapezoidal.

Donde

a es el ancho de la cara superior de la correa

h es la altura o espesor de la correa

ap es el denominado ancho primitivo de la correa

Las correas trapezoidales trabajan en condiciones óptimas cuando lo hacen a velocidades lineales dentro del rango de los 20-22 m/s. Estas correas no deben trabajar a velocidades superiores de los 30 m/s, dado que la elevada fuerza centrífuga que se

genera terminaría sacando la correa de la ranura de la polea. Por otro lado, si funcionan a velocidades más baja también necesitarían un proceso de equilibrio estático para conseguir un trabajo más óptimo. La longitud de una correa se mide montada sobre poleas y convenientemente tensada. En esta situación la longitud que desarrolla una correa varía en función de la línea de referencia de la sección que se toma para realizar la medición. La longitud primitiva L_p está determina por la siguiente expresión:

$$L_p = 2E + \pi d \quad (3)$$

Así, se denomina longitud primitiva de la correa L_p a la que resulta de realizar la medición de su longitud a la altura del ancho primitivo ap de la sección. Como se muestra en la Fig. 4.

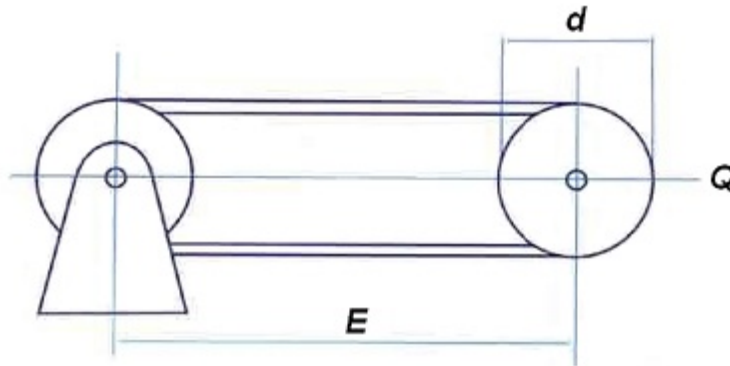


Fig. 4. Tensado de la correa de transmisión.

Donde:

E es la distancia entre ejes de las poleas

d es el diámetro primitivo de las poleas

L_p es la longitud primitiva de la correa

Q es la carga de tensado

Para efectuar correctamente la medición de la longitud primitiva de la correa, ésta debe estar, como ya se ha dicho, convenientemente tensada. Para poder aplicar el tensado a

la correa, las dos poleas sobre las que se monte la correa deben ser una fija y la otra desplazable con el objeto de poder aplicarle a esta última la carga (Q) de tensado. El tensado Q, según la normatividad que el fabricante establece para correas trapezoidales basadas en las normas ISO estas se determinan por la siguiente tabla:

| Sección | Diámetro primitivo (mm) | Longitud primitiva (mm) | Carga Q (N) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------|
| Z | 57.6 | 180 | 110 |
| A | 95.5 | 300 | 200 |
| B | 127.3 | 400 | 300 |
| C | 228.8 | 700 | 750 |
| D | 318.3 | 1000 | 1400 |
| E | 573.0 | 1800 | 1800 |

Tabla 1. Carga según el diámetro primitivo.

Aunque la longitud primitiva de la correa varía en función de qué línea de referencia de la sección se tome. Así, si se toma la cara externa de la sección de la correa como referencia, resultará una longitud nominal mayor que la longitud primitiva, y por el contrario, si se toma la cara interna, entonces la longitud nominal obtenida será menor que la longitud primitiva. Lo anterior introduce cierta incertidumbre que puede disminuir si se consideran dos coeficientes más.

D. Consideraciones electrónicas

Es bien sabido que el análisis espectral es una herramienta para determinar vibraciones [2] aunque las magnitudes de sus armónicos son pequeños. Sin embargo estos patrones llamados también firmas, son claramente bien definidos y característicos más aún si las vibraciones son elevadas. En este sentido, una holgura en las bandas de acoplamiento produce ciertas vibraciones sobre las poleas inyectando un esfuerzo en corriente que puede ser registrado en el análisis espectral en donde se presentan armónicos de baja frecuencia características a los elementos mecánicos.

Los armónicos de baja frecuencia suelen ser atribuidos a las vibraciones de los valeros de los ejes. Por otro lado, la frecuencia atribuida a la correa Fr_{belts} está definida por la siguiente expresión.

$$Fr_{belts} = \left(\frac{\pi D_{driver}}{L_{belts}} \right) * Fr_{motor} \quad (4)$$

Donde

D_{driver} es el diámetro de la polea del motor de C.A

L_{belts} es la longitud de la correa

Fr_{motor} es la frecuencia rotacional de motor

Con respecto a los efectos que presentan las velocidades transitorias de los ejes del motor de C.A. y el motor de C.D. de carga durante la holgura de la correa resultaría evidente observar una cierta variación. Sin embargo, esto solo se puede lograr si la correa perdiera sus propiedades mecánicas de adherencia, lo cual solo se presenta cuando la correa se cristaliza por exceso de temperatura o si la correa es contaminada con algún lubricante.

3. Resultados experimentales

A. Corriente armónica

En la Fig. 6 se puede observar la corriente armónica en condición bajo falla la cual difiere de la corriente armónica en condición libre de falla de la Fig.5. Lo anterior resulta evidente debido a las vibraciones mecánicas de la correa-polea por presentar holgura.

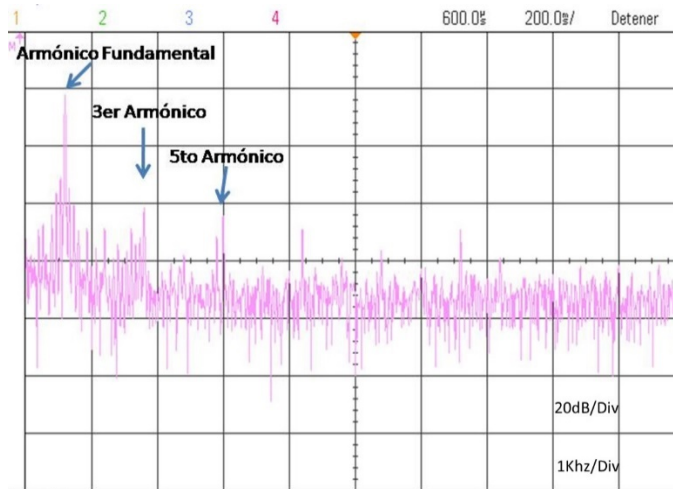


Fig. 5. Corriente armónica libre de falla (correa tensada).

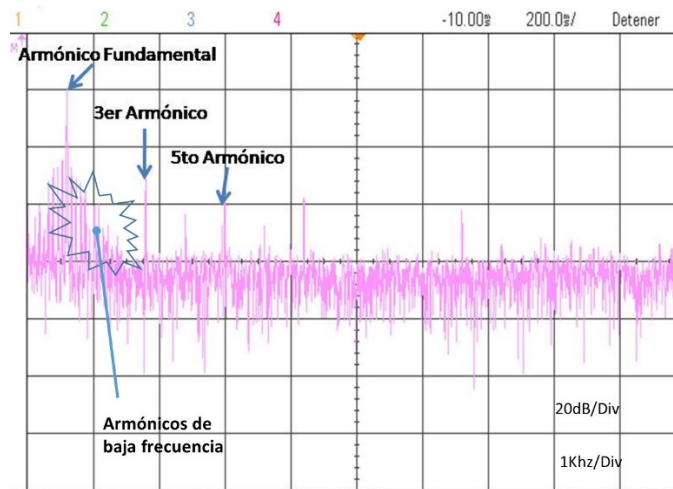


Fig. 6. Corriente armónica bajo falla (correa holgada y lubricada).

B. Velocidad en ejes de poleas de acoplamiento

La diferencia entre las velocidades mecánicas de los ejes en condición libre y bajo falla a plena escala resulta no ser tan evidente (Fig. 7 y 8) Sin embargo, la Fig. 9 muestra un detalle al arranque del motor de C.A. en donde se aprecia que el tiempo de

emparejamiento de la velocidad es de 150 ms correspondiente al 25% de transitorio total de arranque del motor de C.A.

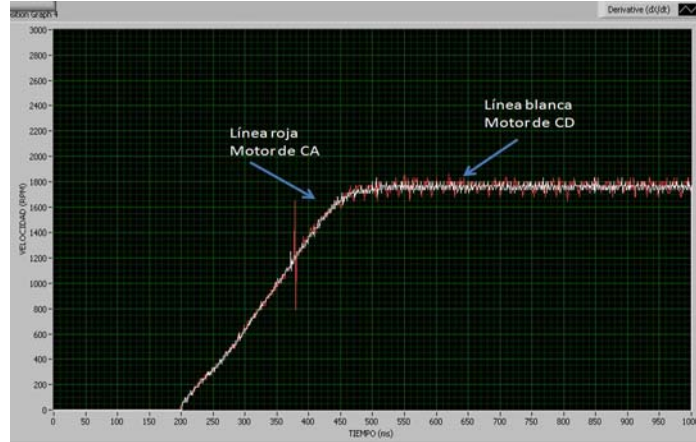


Fig. 7. Velocidad libre de falla (correa tensada).

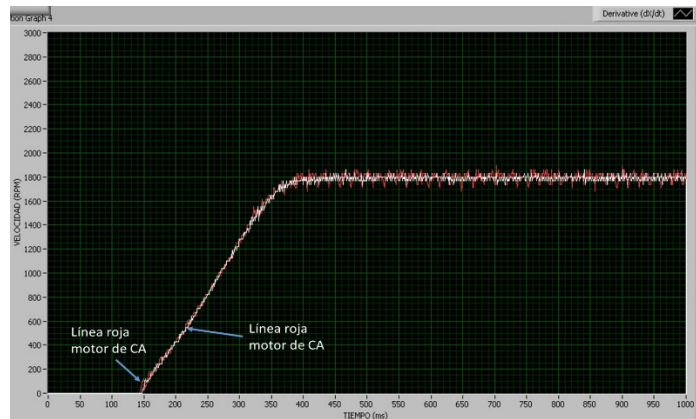


Fig. 8. Velocidad bajo falla (correa holgada y lubricada).

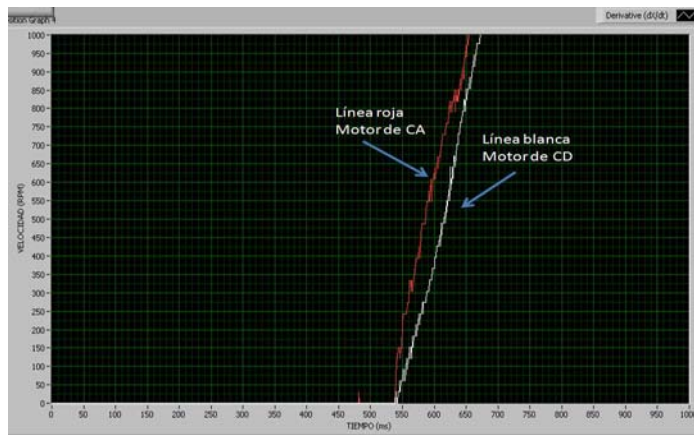


Fig. 9. Detalle de la velocidad bajo falla (correa holgada y lubricada).

C. Posición en ejes de poleas de acoplamiento

La Fig. 10 muestra el transitorio de la posición angular libre de falla en donde, al igual que la velocidad de la Fig. 7, no es posible apreciar alguna diferencia dado que la correa se encuentra correctamente acoplada a las poleas de los motores. Sin embargo, en la Fig. 11 se muestra el detalle de la posición angular en el caso bajo falla en donde se puede apreciar claramente la diferencia de la posición para ambos motores. Esta última gráfica resulta ser de mayor contundencia debido a que la posición es mucho más dinámica que la velocidad.

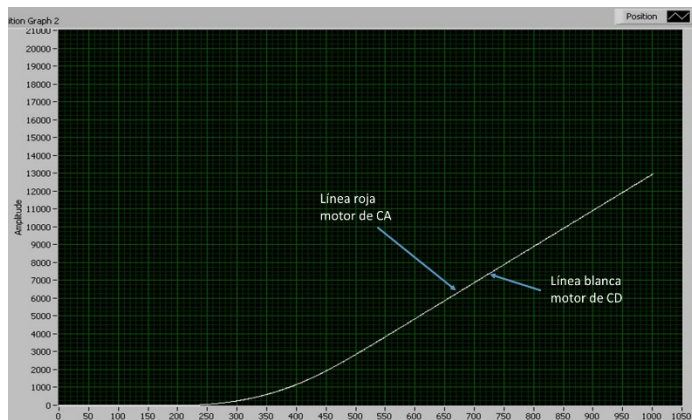


Fig. 10. Posición angular libre de falla (correa tensada).

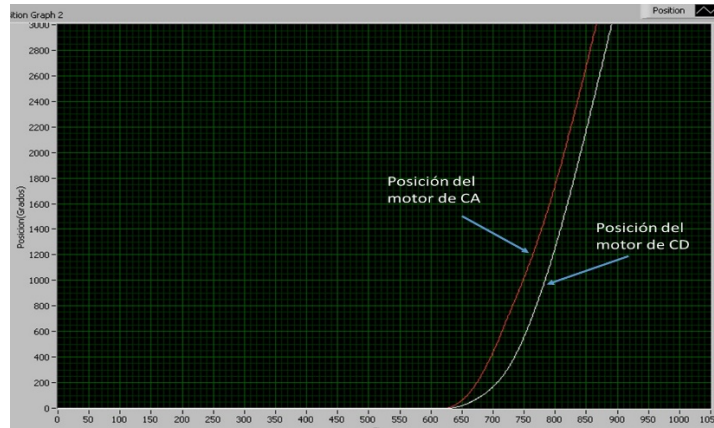


Fig. 11. Detalle de la posición angular bajo falla (correa holgada y lubricada).

4. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado los efectos que provoca la holgura de la correa en cuanto a la corriente y velocidad.

El análisis espectral es realizado durante el estado estable y diferentes mediciones han mostrado frecuencia que son sensibles a las condiciones de holgura de correas lo cual permite diagnosticar la falla dado que la frecuencia armónica es plenamente conocida a partir de los parámetros del sistema correa-polea, el inconveniente es la pequeña magnitud.

Aunque las pruebas de velocidad y posición se llevaron a cabo en estado transitorio, solo durante el arranque del motor es evidente que el diagnóstico puede ser llevado a cabo utilizando una ventana de detección de la posición lo cual puede ser implementado fácilmente por software. Sin embargo las diferencias de la posición pueden ser atribuidas no solamente a la holgura sino también a la cristalización y/o contaminación de la banda por lubricantes.

5. Referencias

- [1] M. Riera-Guasp, J. A. Antonino-Daviu G.-A. Capolino, "Advances in Electrical Machine, Power Electronic and Drive Condition Monitoring and Fault Detection: State of the Art". *Transactions on Industrial Electronics*. No. DOI 10.1109/TIE.2014.2375853.
- [2] A. Picot, Z. Obeid, J. Regnier, S. Poignant, O. Darnis, P. Maussion, "Statistic-based spectral indicator for bearing fault detection in permanent-magnet synchronous machines using the stator current". *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 46. No. 2. June 2014. 424-44 pp.
- [3] T. W. Rauber, F. A. Boldt, F. M. Varejao, "Heterogeneous Feature Models and Feature Selection Applied to Bearing Fault Diagnosis". *Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 62. No. 1. January 2015. 637-646 pp.
- [4] V. C. M. N. Leite, J. G. B. da Silva, G. F. C. Veloso, L. E. B. da Silva, G. Lambert-Torres, E. L. Bonaldi, L. E. de Lacerda de Oliveira, "Detection of Localized Bearing Faults in Induction Machines by Spectral Kurtosis and Envelope Analysis of Stator Current". *Transactions on Industrial Electronics*. No. DOI 10.1109/TIE.2014.2345330.
- [5] A. Soualhi, G. Clerc, H. Razik, F. Rivas, "Long-Term Prediction of Bearing Condition by the Neo-Fuzzy Neuron". *Proc. of SDEMPED*. August 2013. 586-591 pp.
- [6] W. S. Gongora, H. V. D. Silva, A. Goedel, W. F. Godoy, S. A. O. da Silva, "Neural Approach for Bearing Fault Detection in Three Phase Induction Motors". *Proc. of SDEMPED*. August 2013. 566-572 pp.
- [7] M. Delgado, G. Cirrincione, A. G. Espinosa, J. A. Ortega, H. Henao, "Dedicated Hierarchy of Neural Networks applied to Bearings Degradation Assessment". *Proc. of SDEMPED*. August 2013. 544-551 pp.

- [8] H. Razik, M. E. K. Oumaamar, G. Clerc, "A Hybrid Kangaroo Algorithm to Assess the State Of Health of Electric Motors". Proc. Of SDEMPED. August 2013. 43-48 pp.
- [9] A. Soualhi, G. Clerc, H. Razik, "Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor Using an Improved Artificial Ant Clustering Technique". Transactions on Industrial Electronics. Vol. 60. No. 9. September 2013. 4053-4062 pp.
- [10] M. Y. Kaikaa, M. Hadjami, "Effects of the Simultaneous Presence of Static Eccentricity and Broken Rotor Bars on the Stator Current of Induction Machine". Transactions on Industrial Electronics. Vol. 61. No. 5. May 2014. 2452-2463 pp.
- [11] K. N. Gyftakis, D. K. Athanasopoulos, J. Kappatou, "Evaluation of Different Broken Bar Fault Diagnostic Means in Double-Cage Induction Motors with FEM". Proc. of SDEMPED. August 2013. 36-42 pp.
- [12] F. R. Blinquez, C. A. Platero, E. Rebollo, F. Blizquez, "Evaluation of the Applicability of FRA for Inter-Turn Fault Detection in Stator Windings". Proc. of SDEMPED. August 2013. 177-182 pp.
- [13] B. Aubert, J. Regnier, S. Caux, D. Alejo, "Kalman Filter Based Indicator for On-line Inter-Turn Short-Circuits Detection in Permanent Magnet Synchronous Generators". Transactions on Industrial Electronics. No. DOI 10.1109/TIE.2014.2348934.
- [14] K-H. Kim, "Simple Online Fault Detecting Scheme for Short-Circuited Turn in a PMSM Through Current Harmonic Monitoring". Transactions on Industrial Electronics. Vol. 58. No. 6. June 2011. 2565-2568 pp.
- [15] S. H. Kia, H. Henao, G. A. Capolino, "Gear Tooth Surface Damage Fault Detection Using Induction Machine Electrical Signature Analysis". Proc. of SDEMPED. August 2013. 358-364 pp.

- [16] D. Zurita, M. Delgado, J.A. Ortega Redondo, L. Romeral, "Intelligent Sensor based on Acoustic Emission Analysis applied to Gear Fault Diagnosis". Proc. of SDEMPED, August 2013. 169-173 pp.
- [17] F. Gu, Y. Shao, N. Hu, B. Fazenda, A. Ball, "Motor Current Signal Analysis using a Modified Bispectrum for Machine Fault Diagnosis". Proc. of ICROS-SICE International Joint Conference. August 2009. 4890-4895 pp.
- [18] H. Yamashina, S. Okumura and I. Kawai, "Development of a diagnosis technique for failures of V-belts by a cross-spectrum method and a discriminant function approach". Journal of Intelligent Manufacturing. Vol. 7. July 1995. 85-93 pp.
- [19] H. P. Bloch, F.K. Geitner, "Installation and Maintenance of V-belt Drives in Practical Machinery Management for Process Plants". Vol. 4. 1997. 310-328 pp.
- [20] Belt and chain drives in Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, Technical report, Naval Surface Warfare Center. 1998.