Congr. Int. en Ing. Electrónica. Mem. ELECTRO, Vol. 39, pp. 96-102, Oct 2017, Chihuahua, Chih. México
http://electro.itchihuahua.edu.mx/memorias_electro/MemoriaElectro2017.zip
ISSN 1405-2172

ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS ARMÓNICOS SOBRE LAS VIBRACIONES EN LOS MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

Jalomo Cuevas Jaime, Hernández Haro José Eduardo, Mejía García Jorge Horacio, Sandoval Pérez Sergio
Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán
Maestría en Ingeniería Electrónica
Av. Tecnológico #100, Ciudad Guzmán, Jal. Mex. C.P: 49100
Tel. 01 (341) 575 2050, Fax. 01 (341) 575 2074
jaimejc@itcg.edu.mx, eharo_52@hotmail.com, jhmejia@itcg.edu.mx, chekosur@hotmail.com

RESUMEN.

En este artículo se presenta un análisis y metodología para el estudio de las vibraciones producidas por los armónicos de la tensión de alimentación en los motores de corriente alterna (C.A.). Mediante una metodología de relación de la raíz cuadrática media de voltaje (RMS) contra la distorsión armónica total (THD) de diversas pruebas de arranque, paro y régimen de estado estable con dos variadores de frecuencia. Este análisis tiene como principal objetivo mostrar una metodología eficiente para el análisis de vibraciones mecánicas en sistemas de motor con carga, de forma viable y aplicable tanto en el sector académico como industrial, facilitando así el mantenimiento preventivo de los sistemas rotativos.

Palabras Clave: Voltaje RMS, THD, Armónicos, Sistemas rotativos.

ABSTRACT.

In this paper, an analysis and methodology for the study of vibrations, produced by the harmonics of supply voltage in AC motors are presented. Using a methodology of relationship of the root mean square voltage (RMS) against total harmonic distortion (THD) of various start, stop and steady-state tests with two frequency inverters. This analysis has as main objective to show an efficient methodology for the analysis of mechanical vibrations in systems of motor with load, of viable and applicable form in the academic sector as well as industrial, facilitating thus the preventive maintenance of the rotating systems.

Keywords: RMS voltage, THD, Harmonic, Rotating systems.

1. INTRODUCCIÓN

El motor de inducción trifásico corresponde a una de las máquinas rotativas más eficientes y utilizadas en el sector industrial a nivel mundial. Se compone de un estator que consta de un trio de embobinados de cobre a los que ingresan corrientes trifásicas desfasadas 120° una respecto a la siguiente. Dentro de estos embobinados se localiza el rotor de jaula de ardilla, el cual envuelve al eje rotatorio sostenido y equilibrado por los rodamientos exteriores. El rotor tiene escobillas internas, estas al ser excitadas por los flujos magnéticos del estator, comienzan a girar en sentido antihorario u horario en el caso de que las corrientes fluyan en sentido inverso [1]. El motor utilizado para este trabajo se muestra en la Fig. 1, en donde de izquierda a derecha se aprecia un motor de inducción trifásico de 1600 RPM, acoplado mediante un eje rotatorio a un generador como carga. El sistema también cuenta con un taco-generador que funciona como realimentación y registra la velocidad del motor [2].

Fig. 1. Planta física del motor de inducción.

El motor de inducción presenta perturbaciones que afectan su eficiencia [3]. Pero gracias a métodos implementados a lo largo de los años, se ha conseguido reducirlas. Pero aún sin lograr eliminarlas del todo. La problemática que se presenta en este trabajo consiste en la importancia de saber si es necesario realizar mantenimiento preventivo en el motor antes de que este se vuelva correctivo, debido a dichas perturbaciones. Para ello, se sabe que existen relaciones aceptables con las que las perturbaciones no afectan de forma importante el giro del motor. Para conocer estas relaciones, es necesario realizar pruebas de perturbación de giro, voltaje eficaz y armónicos producidos por la máquina. Sin embargo, dichas pruebas pueden ser costosas por un servicio privado o difíciles de realizar sin equipo adecuado, que por demás también es costoso [4]. Entonces, se plantea la hipótesis de que estos parámetros se pueden conseguir a través de una relación RMS Y THD de las vibraciones mecánicas del motor. Para ello se propone una metodología de dicha relación, a través de Matlab y un analizador de calidad de energía (el cual monetariamente se encuentra al alcance de cualquier compañía). Se realizan pruebas de medición en tres tipos de arranque, paro y de régimen permanente. Con dos variadores de frecuencia diferentes (ABB Powerflex y Danfoss VLT micro). Esto teniendo acoplado un sensor de vibraciones de propiedades piezoeléctricas a la carcasa del motor, cuyas lecturas se registra con un código de Matlab y se hace el análisis de relación a estas vibraciones leídas. Se corroborará la hipótesis de forma simulada y física en condiciones de

laboratorio. Entonces, al aplicar esta metodología a cualquier máquina rotativa y obtener resultados de relación, se sabrá que el motor opera en óptimas condiciones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Modelo matemático y simulación del motor de inducción

Mediante un análisis algebraico de relación de energía, se observa que, infiriendo una ecuación donde intervengan los polos del motor n_p, los enlaces de flujo y corrientes, el torque electromagnético y la velocidad del par, se expresan por:

$$T_e = T_L + Jp\omega_r + D_f\omega_r + \frac{1}{K}\int_{-\infty}^{t}\omega_r dt, \qquad (1)$$

donde T_e es el torque electromecánico, T_L el torque de la carga, $Jp\omega_r$ el torque de inercia, y $D_f\omega_r$ torque por fricción. Analizando las tensiones del motor, se aprecia que se tienen parámetros variantes en el tiempo. Para tratar esto, se hace una transformación a una franja de referencia arbitraria. En un análisis previo se determina que la energía almacenada en el campo de acoplamiento se expresa como:

$$W_f = \frac{1}{2}(I_{abcs})^T([L_{ss}] - L_{ls}[I])I_{abcs} + (I_{abcs})^T[L_{sr}]I_{abcr} + \frac{1}{2}(I_{abcr})^T([L_{rr}] - L_{lr}[I])I_{abcr} \qquad (2)$$

donde $[I]$ es la matriz identidad. Se obtiene la dinámica del motor, y dado que el sistema es balanceado, se produce un modelo no lineal en 2 fases [5]. Al final, algebraicamente se deduce que el modelo matemático se rige por estas cinco ecuaciones:

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\psi_{qr} + n_p\omega_r\psi_{dr} + \frac{R_rM}{L_r}i_{qs} \qquad (3)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = -n_p\omega_r\psi_{qr} - \frac{R_r}{L_r}\psi_{dr} + \frac{R_rM}{L_r}i_{ds} \qquad (4)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{R_rM}{L_r(L_sL_r - M^2)}\psi_{qr} - \frac{n_pM}{L_sL_r - M^2}\omega_r\psi_{dr} - \frac{R_s{L_r}^2 + R_rM^2}{L_r(L_sL_r - M^2)}i_{qs} + \frac{L_r}{L_sL_r - M^2}v_{qs} \qquad (5)$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{n_pM}{L_sL_r - M^2}\omega_r\psi_{qr} + \frac{R_rM}{L_r(L_sL_r - M^2)}\psi_{dr} - \frac{R_s{L_r}^2 + R_rM^2}{L_r(L_sL_r - M^2)}i_{ds} + \frac{L_r}{L_sL_r - M^2}v_{ds} \qquad (6)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3}{2}\frac{n_pM}{JL_r}\left(\psi_{dr}i_{qs} - \psi_{qr}i_{ds}\right) - \frac{1}{J}T_L \qquad (7)$$

donde los flujos del rotor ψ_{qr} y ψ_{dr}, las corrientes de estator i_{qs} e i_{ds}, y la velocidad del rotor ω_r son los estados. La inercia del rotor J, las inductancias del estator y rotor L_s y L_r, la inductancia mutua M, las resistencias del estator y rotor R_s y R_r, y los pares de polos n_p, son los parámetros del sistema. Y las tensiones U_{qs} y U_{ds} son las entradas de control, y se calculan en función de los estados [6]. Para simular este modelado, se parametriza el motor utilizado en las pruebas físicas, el cual se muestra en Fig. 1. La estimación de los parámetros se obtuvo en el laboratorio, a partir de pruebas en vacío y a rotor bloqueado. Los parámetros conseguidos se muestran en la Tabla I.

Tabla I
PARAMETRIZACIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN UTILIZADO

Parámetro	Símbolo	Valor
Resistencia del estator	R_s	14Ω
Resistencia del rotor	R_r	10.1Ω
Inductancia del estator	L_s	$400mH$
Inductancia del rotor	L_r	$412.8mH$
Inductancia mutua	M	$377mH$
No de pares de polos	n_p	2
Momento de inercia	J	$0.01\text{Kg}m^2$

Con base en los parámetros de la tabla 1, se simuló el sistema de ecuaciones (3) – (7). El sistema se alimenta con dos entradas de 180 V desfasadas pi/2 y 377 rad/s, representando coseno y seno respectivamente, y un T_L que va de 0 a 2 en 0.8 seg. En la Fig. 2, se muestran los flujos magnéticos, que se estabilizan en 0.4 Webers. En la Fig. 3, se muestran las corrientes de estator, que después de un sobre impulso se estabilizan en 1.2 A., y finalmente en la Fig. 4, se ve la velocidad angular que se sostiene en 180 rad/seg.

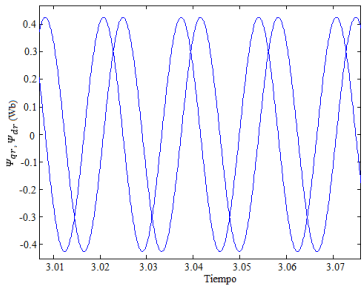

Fig. 2. Flujos magnéticos del rotor.

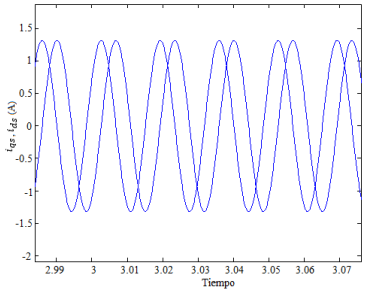

Fig. 3. Corrientes de estator.

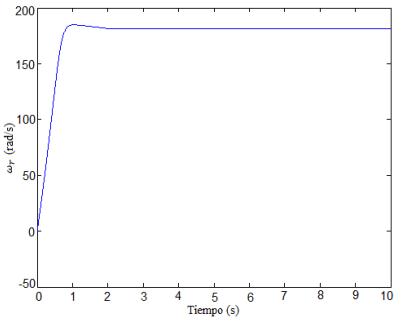

Fig. 4. Velocidad angular del rotor.

3. DESARROLLO DE MEDOTOLOGÍA

3.1. Relación RMS y THD.

La simulación del sistema permite entender el funcionamiento del motor en condiciones ideales, y sobre el diseño de *simulink* se trabajará la simulación de inyección de armónicos al sistema. El THD de una onda se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores RMS de cada armónico, dividido entre el RMS del fundamental [7]. Tal como se muestra en la ecuación (8).

$$THD = \sqrt{\sum (I_n/I_1)^2}, \qquad (8)$$

Donde, n es el orden del armónico y debe ser mayor a 1, e I_1 es el valor RMS del fundamental [8]. Por ende, se sabe que el THD y RMS en una onda están relacionados. Sin embargo, teorizamos que, en una señal de vibración, esta relación se puede obtener de forma simple como se explicará en la Fig. 5. Y al determinar en un motor dicha relación, encontrando valores aceptables, se sabrá que este opera de manera óptima.

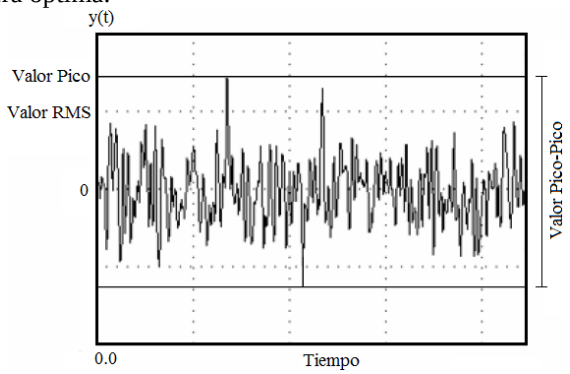

Fig.5. Aproximación de voltaje RMS en una señal.

En la Fig. 5 se muestra un análisis aproximado de un voltaje RMS en una señal [8]. Nótese que el RMS cubre la mayor gama de señal posible. Por ende, cuanto más pico tenga la señal, teóricamente el RMS aumentará proporcionalmente. Para este trabajo, se usa Matlab para la obtención de dicho valor. Para corroborar la relación entre los valores RMS y THD de forma teórica, se hace uso de la simulación de las figuras 2, 3 y 4. El modelo matemático se interpreta de trifásico a bifásico como se explicó en la ecuación (2). Entonces, en la simulación, el modelo es alimentado por dos señales, la primera coseno y la segunda seno, ambas con una amplitud de 180 V, y una frecuencia de 377 rad/s derivados del valor de la inductancia mutua [9]. Para poder simular los armónicos que ingresan al motor, se crea un conjunto de bloques que tienen como objetivo ofrecer una señal senoidal atenuada, múltiplo en frecuencia de la señal de alimentación, que ingresa mediante un punto suma a cada una de las entradas del sistema, estas señales tienen 1/3 de amplitud respecto a la fundamental, con misma fase de su respectiva entrada de referencia, con la diferencia de que poseen una frecuencia de 754 rad/s correspondientes al producto de la frecuencia fundamental. Estas entradas desfasadas simulan un primer armónico. En la Fig. 6 se aprecia la velocidad angular del sistema (Fig. 4) siendo afectada por este primer armónico a los 2 segundos, correspondientes a la entrada del T_L. Mientras tanto en la Fig. 7 se aprecia esta misma perturbación con un acercamiento.

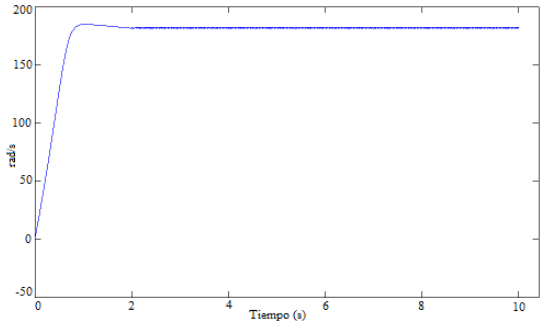

Fig. 6. Velocidad angular con primer armónico.

Nótese el cambio abrupto en la Fig. 7, derivado de este primer armónico.

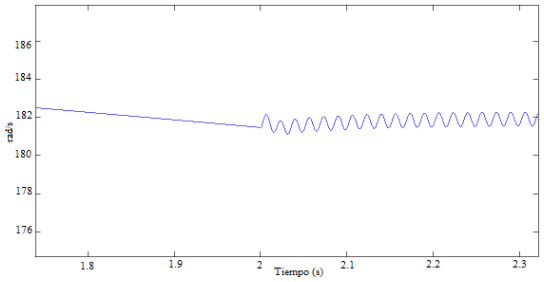

Fig. 7. Punto de aplicación del primer armónico.

Se calculó del valor RMS a través de Matlab, arrojando el valor de 1.775949691520747e+02. La teoría dicta que, si aumenta el armónico, el valor RMS también lo hará. Se agregó otro conjunto de bloques al punto suma de cada entrada al sistema, para simular un segundo armónico. Estos bloques tienen 1/5 de amplitud respecto a la fundamental y mismo desfase que su señal de referencia, pero su frecuencia de 1131 rad/s correspondientes al triple producto de 377 rad/s. Para este

segundo armónico se omite la gráfica de la velocidad angular, puesto que no presenta diferencia visible de la Fig. 6, en cambio en la Fig. 8, se observa la aplicación de este segundo armónico.

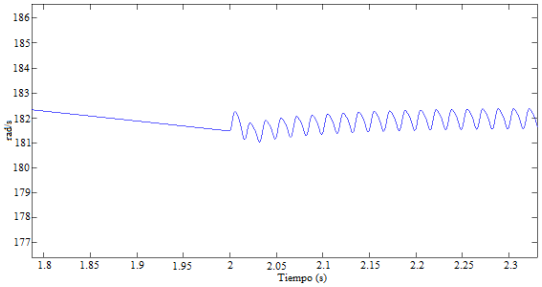

Fig. 8. Punto de aplicación del segundo armónico.

Al igual que con la señal de la Fig. 6, al determinar el valor RMS de la Fig. 8 con Matlab, el valor obtenido es de 1.843461309963494e+02. Tal y como se teorizaba, con la aplicación del segundo armónico, el valor RMS de la señal aumentaría, si bien el aumento no es significativo para perturbar notablemente el motor, es lo suficiente para corroborar de forma teórica nuestra hipótesis, que el valor RMS y el THD de una señal, están directamente relacionados.

3.2. Resultados de pruebas de laboratorio de arranque, régimen permanente y paro.

Las pruebas mostradas a continuación, fueron pruebas físicas realizadas en condiciones de laboratorio. Primeramente, se muestran los arranques proporcionales. Todas las señales de vibración muestran verticalmente los milivoltios de la señal, y verticalmente la duración de la lectura. En la Fig. 9 se muestra la señal de vibración en milivoltios, producida por el arranque proporcional del variador Danfoss, mientras que en la Fig. 10 apreciamos la respuesta del arranque proporcional del variador ABB. Nótese que las señales mostradas corresponden a vibraciones del motor derivadas del variador. Estas señales son codificadas por el sensor piezoeléctrico como voltaje.

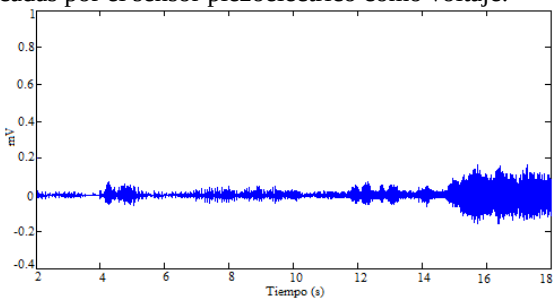

Fig. 9. Vibración generada durante el arranque proporcional con el variador Danfoss VLT Micro.

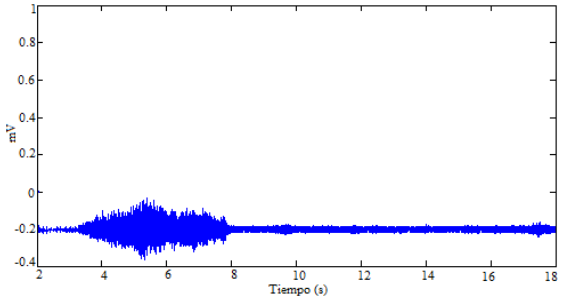

Fig. 10. Vibración generada durante el arranque proporcional con el variador ABB.

El variador ABB tiene la cualidad de ofrecer una respuesta más rápida que el Danfoss, es por ello que en la Fig. 10 se observa perturbación de arranque desde los 3 segundos mientras que en la Fig. 9 se aprecia hasta pasados los 14 segundos. Con Matlab se obtiene el valor RMS de cada señal, consiguiendo valores de 0.02866 y 0.02523 para las figuras 9 y 10 respectivamente. Para determinar el índice de THD de las señales, se usa un analizador de calidad de energía FLUKE 43B. Configurando el analizador en modo "Armónicos", y conectándolo a las fases 1 y 3 del motor, se obtienen las lecturas presentadas en las figuras 11 y 12 correspondientes a las señales de las figuras 9 y 10 respectivamente.

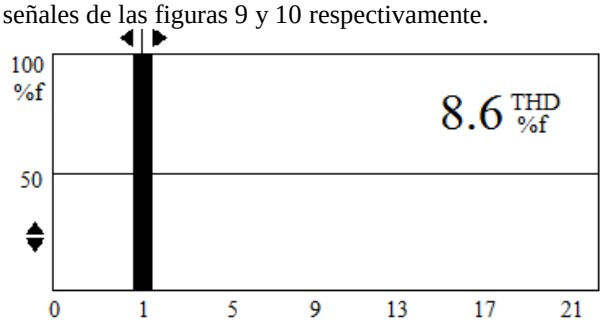

Fig. 11. Lectura armónica de figura 9.

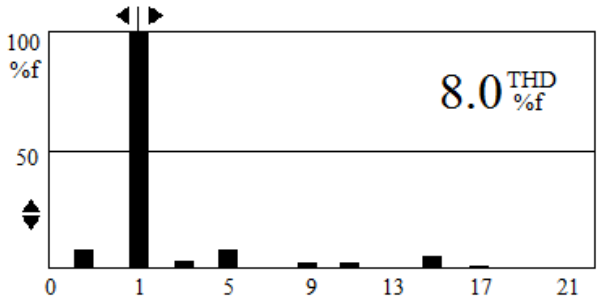

Fig. 12. Lectura armónica de figura 10.

Las figuras de lectura armónica son tomadas del FLUKE 43B durante las pruebas en laboratorio. En las figuras se observa en la parte horizontal, el número de armónicos que contiene la señal, mientras que verticalmente se muestra el espectro de armónicos [10]. Los índices de distorsión, que son la parte principal de estas gráficas, son 8.6 y 8.0

respectivamente, y guardan relación con los valores RMS de las figuras 9 y 10 respectivamente. Las siguientes pruebas son las mediciones en régimen permanente de ambos variadores. En la Fig. 13 se muestra la prueba del variador Danfoss mientras que en la Fig. 14 la prueba del ABB. Para ambas pruebas el código de Matlab se ejecutó 10 segundos después de la puesta en marcha del motor, con la intención de que este se estabilizara y obtener las mejores mediciones.

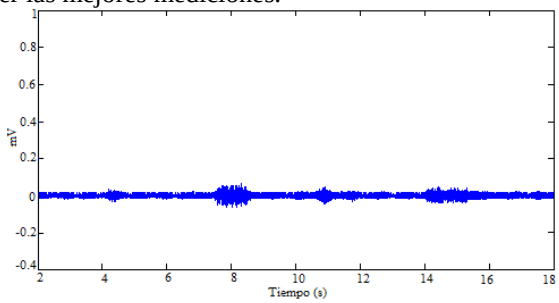

Fig. 13. Vibración generada durante el régimen permanente con el variador Danfoss VLT Micro.

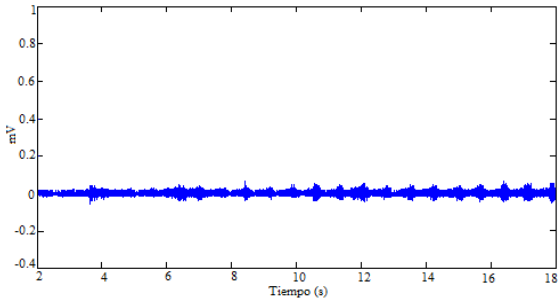

Fig. 14. Vibración generada durante el régimen permanente con el variador ABB.

La mayor diferencia que se encuentra entre los regímenes permanentes radica en que el variador ABB genera una oscilación constante sobre el motor, la cual se aprecia en la Fig. 14. En cuanto a los valores RMS de las señales, con Matlab se consiguen valores de 0.02475 y 0.02357 para las figuras 13 y 14 respectivamente. Nótese que al igual que las pruebas de arranque, se muestra que el variador Danfoss genera un RMS mayor que el ABB, pero al tratarse de régimen permanente, la diferencia es relativamente pequeña. En las figuras 15 y 16 se aprecian las mediciones de distorsión armónica de las figuras 13 y 14.

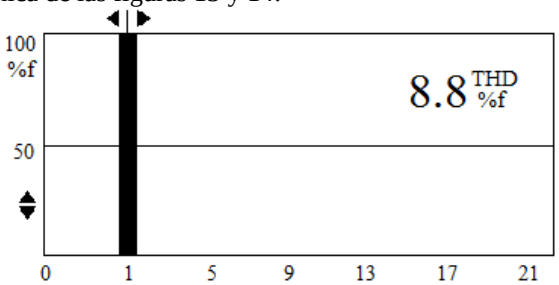

Fig. 15. Lectura de armónicos de figura 13.

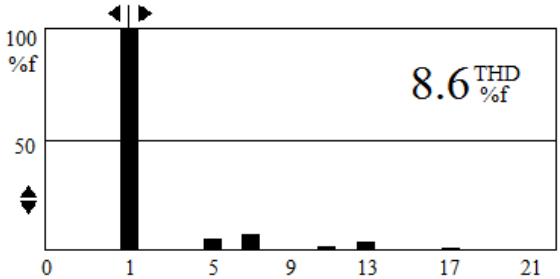

Fig. 16. Lectura de armónicos de figura 14.

Algo muy importante a destacar es que, en las lecturas de armónicos, se presentan más espectros de armónicos en los índices de THD menores. Esto sucede debido a que intervienen muchos factores en la creación de armónicos, y en este caso, el variador ABB genera mayor cantidad de espectros [11]. Pero, se recalca que el dato de relevancia es el índice de THD y no los espectros en sí. Finalmente se muestran las pruebas de paro estático. En la Fig. 17 se aprecia la prueba de con el variador Danfoss, mientras que en la Fig. 18 la prueba con el variador ABB.

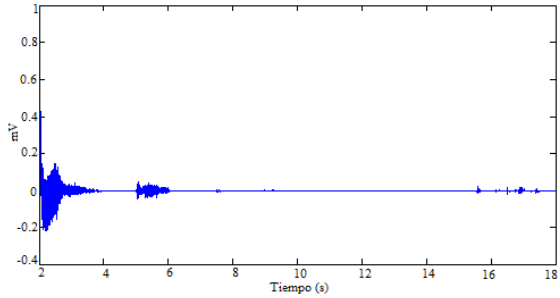

Fig. 17. Vibración generada durante el paro estático con el variador Danfoss VLT Micro.

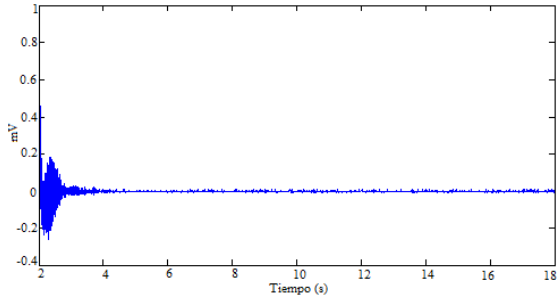

Fig. 18. Vibración generada durante el paro estático con el variador ABB.

Para estas pruebas, se llevó al motor a régimen permanente, se ejecutó el código de Matlab y se activó el paro a los pocos segundos. Los valores RMS fueron de 0.02235 y 0.02112 para las figuras 17 y 18 respectivamente. En las figuras 19 y 20 se aprecian las lecturas de armónicos para los paros.

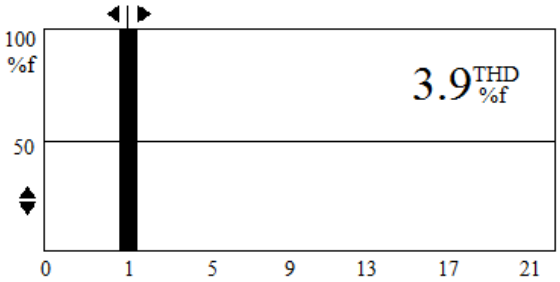

Fig. 19. Lectura de armónicos de figura 17.

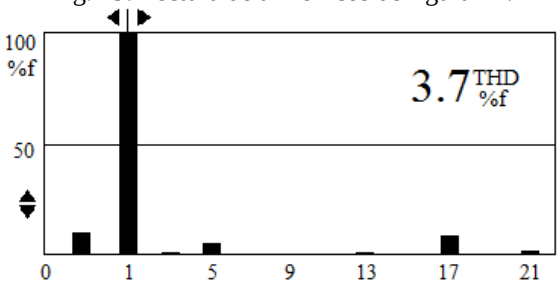

Fig. 20. Lectura de armónicos de figura 18.

En las figuras 19 y 20 se presenta nuevamente la relación con las figuras 17 y 18. Por ende los resultados conseguidos, se pueden resumir a lo mostrado en la Tabla II.

Tabla II
PARAMETRIZACIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN UTILIZADO

Prueba	Danfoss		ABB	
	RMS	THD	RMS	THD
A. Proporcional	0.02866	8.6	0.02523	8.0
R. Permanente	0.02475	8.8	0.02357	8.6
P. Estático	0.02235	3.9	0.02112	3.7

Al analizar la Tabla II, se nota el patrón de índice armónico respecto al valor RMS de cada señal. Este índice está relacionado con el valor RMS de cada prueba. Por lo tanto, tras corroborar nuestra hipótesis de forma simulada en la subsección 3.1, y corroborarlo físicamente en la sección 3.2, se establece una alternativa viable para la ecuación (8), y se consigue así, una metodología eficiente y para el análisis de armónicos en las señales de vibración de los motores de inducción. Aplicando esta metodología, los resultados se pueden comparar con la Fig. 21, donde se aprecian los criterios de severidad de valores RMS de una vibración de acuerdo a la norma ISO 2372 [12].

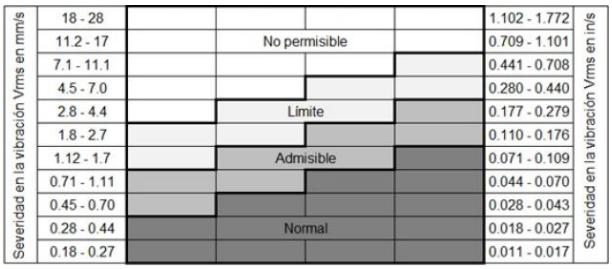

Fig. 21. ISO 2372 de severidad en vibraciones de motores.

4. CONCLUSIÓN.

En este trabajo se comprobó la hipótesis acerca de que el valor RMS y la distorsión armónica se encuentran relacionados en una señal de vibración, esto es, a mayor distorsión armónica, mayor RMS tendrá la señal de vibración. Esto queda demostrado en las simulaciones de la subsección 3.1, y comprobado físicamente en laboratorio en la subsección 3.2. La metodología propuesta para realizar las mediciones utiliza una alternativa eficaz y costeable tanto para el sector académico como industrial. En las pruebas físicas se determinó que los valores RMS no excedían el 0.03, y de acuerdo con la Fig. 21, es un valor adecuado para el óptimo desempeño de la máquina de acuerdo con la teoría de las vibraciones en motores, lo que reafirma la confiabilidad de los resultados obtenidos. Se han omitido efectos como el calentamiento de los rodamientos o la carcasa, que en cierta medida podrían interactuar con los resultados, y que proponen estudios interesantes para ser llevados a cabo en investigaciones futuras [13]. Los procedimientos mostrados presentan una forma viable para monitorear los armónicos en las vibraciones de los motores. De aplicar esta metodología de forma periódica a cualquier motor, al conseguirse resultados similares, se puede concluir que opera correctamente, de lo contrario realizar mantenimiento a la máquina, esto permitiría abaratar los procesos de mantenimiento preventivo y evitar los correctivos.

5. REFERENCIAS.

[1] J. Chapman Stephen, "Máquinas eléctricas" 3ª edición, Mc Graw Hill, pp. 387-395, 410-426, 2000.

[2] Cuevas Jalomo Jaime, Vázquez Tirado Ismael Emmanuel, Chávez Bracamontes Ramón, “Identificación y control del motor de inducción de corriente alterna”, Academia Journals IPT, Vol. 8, no. 1, 2016.

[3] Aller José Manuel, “Máquinas eléctrica rotativas: Introducción a la teoría general”, Universidad Simón Bolívar, Editorial Equinoccio, pp. 193-450, 2007.

[4] Jaime Fonseca Beatriz Adriana, Sánchez Fernández Luis Pastor, “Detección de fallas en motores de inducción, mediante análisis de vibraciones”, IPN, Centro de Investigación en Computación, pp. 13-36, 2006.

[5] Castillo Figueroa Leopoldo, Mejía García Jorge Horacio, "Control por modos deslizantes del motor de inducción", Tesis de maestría en ingeniería electrónica, ITCG, pp. 1-25, 2010.

[6] Marino Riccardo, Tomei Patricio, "Nonlinear control design", University of Rome For Vergata, Prentice Hall, pp. 23-24, 1995.

[7] Mejía Morales Jorge Enrique, Moscoso Lira Fernando Alfredo, "Análisis de vibraciones en motores eléctricos asíncronos trifásicos", Universidad de San Carlos, Guatemala, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, pp. 21-68. 2009.

[8] C. Krause Paul, Wasynczuk Oleg, D. Sudhoff Scott. "Analysis of electric machinery and drive systems", 2nd, IEEE press, 2002.

[9] Rodríguez Arce Pablo, Cañedo Castañeda José Manuel, "Análisis del motor de inducción en el dominio armónico y en el tiempo incluyendo saturación magnética", CINVESTAV, IPN Guadalajara, pp. 20-27, 2012

[10] Donolo Pablo, Bossio Guillermo, De Angelo Cristian, García Guillermo, Donolo Marcos, "Voltage unbalance and harmonic distorton effects on induction motor power, torque and vibrations", Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 140, n. 1, 2016.

[11] Grzegorz Utrata, Andrzej Kaplon, "Spectral inductance of the linear motor-space harmonic analysis", COMPEL, vol. 30, n. 3, 2011.

[12] R. A. Felix, "Variable structure Neural control", Ph. D Dissertation, CINVESTAV, Unidad Guadalajara, Guadalajara, Jalisco México, 2004.

[13] H. Rashid Muhammad, "Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones", 2ª edición, Prentice Hall, pp. Apéndice A, 1995.