

Implementación del ensayo para calcular la eficiencia de un motor de hasta 2,4 kW en función de la determinación de la potencia mecánica en el eje, por medios opto-eléctricos

Maccarone, José L.; Amoresano, Carlos; Osvaldo, Pascual; Gil, Marcelo; Abraham, Abel; Arozamena, Gustavo; Bifano, Lautaro

José L. Maccarone

josmacca@gmail.com

UTN La Plata – Centro CODAPLI – Laboratorio
LEEA – Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Argentina

Carlos Amoresano

UTN La Plata – Centro CODAPLI – Laboratorio
LEEA – Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Argentina

Pascual Osvaldo

UTN La Plata – Centro CODAPLI – TSSE –
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Argentina

Marcelo Gil

UTN La Plata – GyDESO – Departamento de
Ingeniería Industrial, Argentina

Abel Abraham

UTN La Plata – Centro CODAPLI – Laboratorio
LEEA – Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Argentina

Gustavo Arozamena

UTN La Plata – Centro CODAPLI – Laboratorio
LEEA – Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Argentina

Lautaro Bifano

UTN La Plata – Centro CODAPLI – Laboratorio
LEEA – Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Argentina

Ingenio Tecnológico

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ISSN-e: 2618-4931

Periodicidad: Frecuencia continua

vol. 4, e032, 2022

ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 05 Octubre 2022

Aprobación: 06 Octubre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2663014007/>

Resumen: El objetivo de este trabajo es la adaptación e implementación en el Laboratorio de Eficiencia Energética Aplicada (LEEA) de la UTN La Plata, de un novedoso método de medición desarrollado por investigadores de la Universidad de Durham (Reino Unido) y la Universidad Politécnica delle Marche (Italia)¹. Este método permite determinar la potencia mecánica en el eje de un motor eléctrico asincrónico por medios opto eléctricos, y en el LEEA se utilizará para la determinación de la eficiencia energética para distintos estados de carga. Estas pruebas se realizan con equipamiento de la marca De Lorenzo de 2,4 kW perteneciente al Laboratorio de Máquinas Eléctricas. Para determinar la eficiencia energética del motor la metodología se basa en la medición de la potencia eléctrica consumida y la potencia mecánica que eroga un motor eléctrico en su eje. Para medir la potencia eléctrica se utiliza un Registrador Fluke 235 y para obtener la potencia en el eje del motor se mide la deformación torsional que se produce en una varilla metálica que vincula el motor bajo ensayo con una carga mecánica variable en el eje, esta deformación es proporcional al torque. La deformación torsional se obtiene mediante sensores fotoeléctricos ubicados en cada uno de los extremos de la barra metálica. La principal ecuación utilizada es:

$$P_{eje} = K \frac{\Delta t}{t_t^2}$$

en donde:

t_t :Tiempo entre pulsos de una revolución completa medido sobre el mismo sensor, lado motor y Δt : Tiempo entre pulsos lado motor-lado generador

K: es una constante que se determina ensayando la barra de torsión, aplicando un momento torsor conocido y midiendo el ángulo que se deforma.

Los resultados obtenidos hasta ahora (postergados en parte por la Pandemia) se ha enfocado en hallar la constante K.

Como conclusión podemos afirmar que el método es de bajo costo, de sencilla aplicación en el laboratorio LEEA. Los pasos a seguir, establecer una tabla de errores para distintos estados de carga, tomando como patrón de comparación un medidor de torque de clase 0,2.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Palabras clave: Determinación, Eficiencia, Motores Eléctricos, Método opto-eléctrico.

Abstract: The objective of this work is the adaptation and implementation in the Applied Energy Efficiency Laboratory (LEEA) of the UTN La Plata, of a novel measurement method developed by researchers from the University of Durham (United Kingdom) and the Universidad Politécnica delle Marche (Italy). This method allows to determine the mechanical power in the shaft of an asynchronous electric motor by opto electric means, and in the LEEA it will be used to determine the energy efficiency for different load states. These tests are carried out with 2.4 kW De Lorenzo equipment belonging to the Electrical Machines Laboratory.

To determine the energy efficiency of the motor, the methodology is based on the measurement of the electrical power consumed and the mechanical power that an electric motor delivers on its axis. To measure the electrical power, a Fluke 235 power and energy meter is used and to obtain the power in the motor shaft, the torsional deformation that occurs in a metal rod that links the motor under test with a variable mechanical load on the shaft is measured. It is proportional to the torque. The torsional deformation is obtained by photoelectric sensors located at each of the ends of the metal bar. The main equation used is:

where:

$$P_{eje} = K \frac{\Delta t}{t_t^2}$$

Time between pulses of a complete revolution measured on the same sensor, motor side and Δt : Time between pulses motor side-generator side

K: is a constant that is determined by testing the torsion bar, applying a known torque and measuring the angle of deformation.

The results obtained so far (postponed in part by the Pandemic) have focused on finding the constant K.

In conclusion, we can affirm that the method is low cost, easy to apply in the LEEA laboratory. The steps to follow, is establish an error table for different load states, taking a class 0.2 torque meter as a comparison pattern.

Keywords: Determination, Efficiency, Electric Motors, Opto-electric method.

INTRODUCCIÓN

El torque es un parámetro importante en los ensayos de un motor con el cual es posible determinar la eficiencia energética del mismo. La potencia mecánica que eroga un motor es proporcional al producto del torque por la velocidad de rotación. Esta potencia al ser comparada con la entregada al motor nos permite la

determinación del rendimiento del mismo. En el caso de motores eléctricos podemos medir las magnitudes eléctricas y de esa manera saber cuál es la potencia que recibe el motor. Para determinar la potencia mecánica debemos conocer el torque o par mecánico y la velocidad de rotación. Existen diferentes métodos para la determinación del torque, se mencionan alguno de ellos, tales como el método dinamométrico, métodos basados en las propiedades magnéticas que cambian con la deformación, métodos basados en la medida de la torsión del eje.

El método dinamométrico, en su forma más básica, es el llamado freno de Prony, consiste en el frenado por fricción del eje de rotación manteniendo el brazo equilibrado con un peso conocido. La longitud del brazo multiplicado por el peso da el valor del torque. Como variante de este método, algunos realizan el frenado por métodos hidráulicos, o eléctricos. Uno de los que utilizan métodos eléctricos es el sistema conocido como dinamo péndulo. En este caso el frenado se realiza por medio de un generador eléctrico, normalmente de corriente continua, al cual se lo carga y se ubica el peso de manera de mantener el equilibrio. En equilibrio el peso multiplicado por la distancia del mismo al eje del motor (brazo de palanca), da el torque para ese estado determinado.

El método basado en las propiedades magnéticas que cambian con la deformación se basa en la propiedad que tienen los cuerpos de cambiar sus dimensiones bajo la presencia de un campo magnético. En realidad, lo que se aplica en este caso es el fenómeno de magnetostricción inversa, en el que cambia el campo magnético cuando se aplica una fuerza. Varios fabricantes de transductores de torsión utilizan este principio.

El método basado en la medida de la torsión del eje, cuando tenemos un valor de torque en un eje que vincula el motor con la carga, este esfuerzo de torsión produce una deformación en el mismo. Como en el caso anterior el eje es el sensor primario del método. La medida de esta deformación es proporcional al torque aplicado. Este es uno de los métodos que se utilizan en la medida de la potencia que suministra el motor de un barco en navegación. Para este fin existen varias formas de cuantificar esta deformación. Una de ellas por ejemplo es la de instalar galgas extensiométricas (strain gages) sobre el eje y por medio de circuitos electrónicos adecuados valorar el esfuerzo. En este caso se debe interactuar sobre los elementos montados en el eje en rotación, lo que obliga a la utilización de un sistema de vinculación eléctrica con anillos rozantes, solución que puede traer aparejado perturbaciones de las magnitudes eléctricas. Otra forma de vinculación puede ser inalámbrica entre el eje y la estructura fija.

Pero existe otro método de cuantificar la deformación a través medios ópticos mediante sensores que se instalan a lo largo del eje. Este es un método que suele utilizarse en barcos, y existen distintos fabricantes que suministran estos equipos. En algunos casos la medición también puede ser realizada mediante sensores magnéticos.

DESARROLLO

Formulación del problema

Los motores asincrónicos trifásicos de inducción disponibles actualmente en el mercado responden a un tipo determinado en función de su eficiencia, el cual se denomina Clase de eficiencia según la normativa IEC 60034-30, la clase IE1 es la correspondiente a la eficiencia estándar, la clase IE2 es la de alta eficiencia, la clase IE3 corresponde a eficiencia Premium y la clase IE4 a la eficiencia súperPremium². Los fabricantes de motores tienen desarrollado e implementado los requerimientos para los ensayos en sus laboratorios y se los prueba antes de ponerlas en servicio para su clasificación y determinación de los parámetros principales de la máquina. Pero también existen talleres que se encargan de rebobinar y reparar motores de todo tipo y cantidad de años en funcionamiento, estos talleres no cuentan con todos los equipos y elementos para comprobar la eficiencia del motor luego de su reparación. Proponer un método prototipo de laboratorio para el LEEA,

de bajo costo y de cierta simplicidad de equipos para la determinación de la eficiencia de un motor eléctrico trifásico de inducción es el objetivo de este trabajo. Para lo cual el desarrollo consiste en la implementación de un sistema de medida del torque en el eje de salida de un motor eléctrico que no necesita vinculación eléctrica con la parte rotante.

METODOLOGÍA

Descripción del sistema bajo el método de sensores ópticos para la medición del torque en función de la deformación del eje (método en desarrollo)

El método para la determinación del torque se basa en la deformación torsional que se produce en una varilla metálica que vincula el motor bajo ensayo con un generador trifásico que produce una carga variable en el eje. Para la determinación de esta deformación torsional se ubican dos sensores fotoeléctricos, uno a la salida del motor y el otro a la entrada del generador. En condiciones de no carga se debe determinar el ángulo inicial entre las dos señales, el cual se modifica cuando se aplica carga al generador. La detección de los pulsos se realiza, en ambos sensores, por la interrupción mediante un cuerpo opaco que pasa por un detector fotoeléctrico del tipo de ranura. Esto genera sendos pulsos digitales los cuales son adecuadamente condicionados para su procesamiento.

Las siguientes figuras muestran las fotografías del equipamiento utilizado:



Fig. 1 - Vista del generador, eje de torsión, motor y los sensores en cada manchón

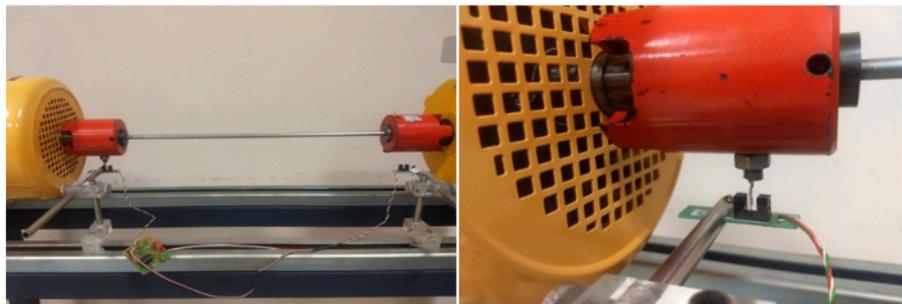


Fig. 2 - Vista del generador, eje de torsión, motor y detalle de los sensores opto-eléctricos en cada manchón

Desarrollo teórico

El ángulo de deformación se determina por la variación del tiempo que transcurre entre el pulso del lado motor y el pulso del lado generador (Δt). Este tiempo depende de la velocidad de rotación de manera que debemos tener en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$\frac{2\pi}{t_t} = \frac{\alpha}{\Delta t}$$
$$\alpha = 2\pi \frac{\Delta t}{T_t}$$

donde:

α : ángulo de torsión medido en radianes

t_t : tiempo entre pulsos de una revolución completa medido sobre el mismo sensor, lado motor, en segundos

Δt : tiempo entre pulsos lado motor/ lado generador, en segundos

Con el valor t_t determinamos la velocidad de rotación.

Si se aplica un par de torsión T en un extremo de la barra circular, y el otro extremo se mantiene fijo, la flecha se torcerá entre los dos extremos a través de un ángulo α . Conforme se aplica el par de torsión, un elemento a lo largo de la superficie externa del eje, inicialmente recto, gira un pequeño ángulo:

$$\alpha = \frac{TL}{JG}$$

donde:

T : par de torsión

L : longitud de la barra

J : momento polar de inercia

G : módulo de elasticidad a cortante

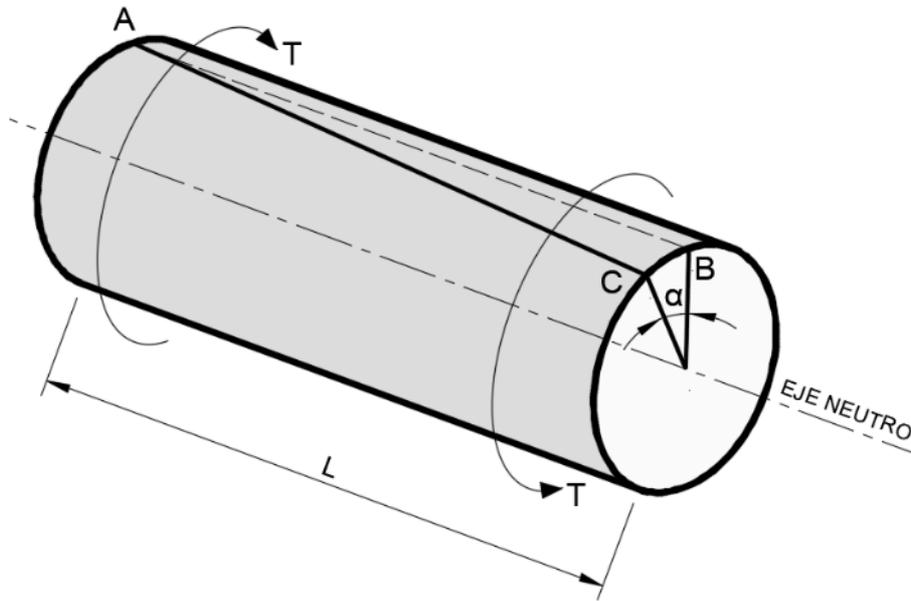


FIG. 3

Vista esquemática del eje de torsión (eje entre el generador y el motor)

De la expresión anterior surge que, el ángulo es proporcional al momento torsor aplicado, dado que las otras magnitudes son constantes para una determinada realización.

De manera que podemos escribir:

$$\alpha = K_T T \quad T = \frac{\alpha}{K_t}$$

Por otro lado, la potencia de salida en el eje del motor es el producto del torque por la velocidad:

$$P_{eje} = T\omega$$

En nuestro caso

$$\omega = \frac{2\pi}{t_t} \quad \text{y} \quad T = 2\pi \frac{\Delta t}{K_T t_t}$$

Por lo tanto:

$$P_{eje} = 2\pi \frac{\Delta t}{K_T t_t} \frac{2\pi}{t_t}$$

$$P_{eje} = K \frac{\Delta t}{t_t^2}$$

donde:

t_t : Tiempo entre pulsos de una revolución completa medido sobre el mismo sensor, lado motor

Δt : Tiempo entre pulsos lado motor/ lado generador

de las expresiones anteriores tenemos:

$$K = \frac{4\pi^2}{K_T}$$

Como vemos en esta última expresión, resta determinar el valor de la constante K. Para ello necesitamos ensayar nuestra barra de torsión aplicándole un momento torsor conocido y midiendo el ángulo que se deforma.

Determinación de la constante K

Para determinar la constante K, primero se debe determinar la constante K_T , para lo cual se parte de la expresión que relaciona el torque en el eje que une el motor con el generador y el ángulo de deformación de ese eje.

$$\alpha = K_T T \quad K_T = \frac{\alpha}{T}$$

Para este fin implementamos la instalación que se muestra en la siguiente figura (foto equipo):



FIG. 4

Vista juego de barras solidaria al eje lado motor con una pesa en la parte izquierda

En la fig. 4 se alcanza a ver un juego de barras solidarias al eje del lado motor. Se observa también una pesa ubicada del lado izquierdo que tiene por finalidad compensar el peso de la barra del lado derecho. La ubicación de esta pesa se hace con el eje libre, es decir que no se fija el extremo del lado de la máquina de freno, liberando el tornillo que se observa en la figura 5.



FIG. 5

Vista del punto fijo en la posición inicial, ángulo $\alpha = 0$ (sin torque y sin deformación)

Luego del equilibrio se fija el sistema del lado del generador en una posición horizontal como se muestra en el esquema de posición inicial. Es decir, se fija el eje del lado de la máquina de freno. Sobre el soporte de las barras se instala un puntero laser, el cual proyectara una marca a una distancia conocida del eje de la barra de torsión (L).

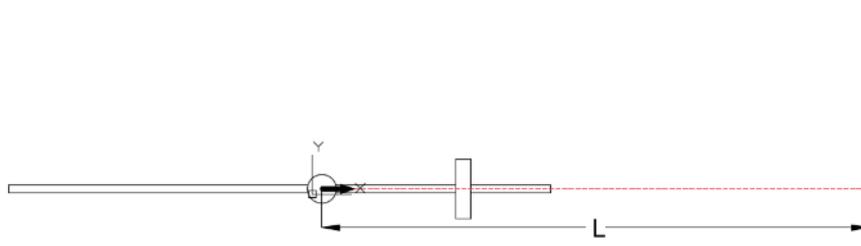


FIG. 6

Vista esquemática de la proyección de la posición inicial a una distancia L desde el eje de la barra de torsión al plano de medición

En la fig. 6 se muestra la posición inicial del sistema donde se proyecta el punto inicial a una distancia L entre el centro de la barra de torsión y el plano de proyección

Y Sobre la barra más larga se instala un peso conocido (P) que a una distancia del eje (A) producirá un momento torsor conocido. Esto produce una torsión de la barra y produce un desvío del puntero laser, obteniendo sobre el plano de proyección la nueva marca para ese estado determinado de carga y torsión, determinando sobre el plano de proyección la altura H, la cual es proporcional al ángulo α y al torque que se produce en el eje de torsión.

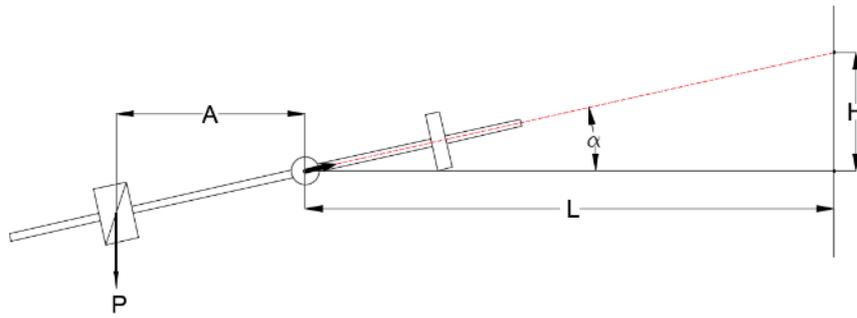


FIG. 7

Vista esquemática de la proyección de la nueva posición del haz de luz a una distancia L desde el eje de la barra de torsión y a una altura H sobre el plano de medición

Esta nueva posición del haz de luz corresponde a la posición del punto sobre el plano de proyección con el momento torsor aplicado, según muestra la Fig. 7

Del último esquema podemos escribir:

$$\tan \alpha = \frac{H}{L}$$

$$\alpha = \text{atan} \frac{H}{L}$$

$$T = P.A$$

Y el ángulo de torsión es proporcional al torque

$$T = \frac{\alpha}{K_T}$$

Reemplazando y despejando la constante tenemos:

$$K_T = \frac{\alpha}{T} = \frac{\alpha \text{atan} \frac{H}{L}}{P.A}$$

Obtenido K_T podemos calcular K

$$K = \frac{4\pi^2}{K_T}$$

Y la potencia en el eje es función de t_t : Tiempo entre pulsos de una revolución completa medido sobre el mismo sensor, lado motor y Δt : Tiempo entre pulsos lado motor/ lado generador, según se muestra en la fig. 8:

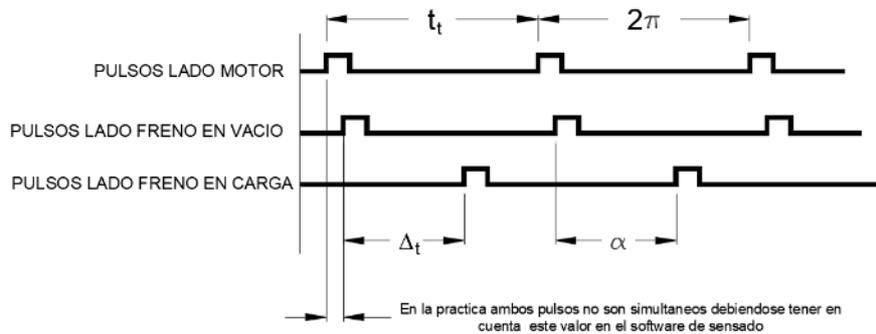


FIG. 8

Tren de pulsos detectados por los sensores optoelectricos en cada manchón

Por lo tanto, habiendo obtenido la constante K, midiendo las diferencias de tiempo de rotación entre extremos del eje de torsión, podemos obtener por la siguiente expresión la Potencia en el eje:

$$P_{eje} = K \frac{\Delta t}{t_t^2}$$

Teniendo la potencia en el eje y midiendo la potencia consumida por el motor se puede obtener el rendimiento del mismo para distintos estados de cargas, realizando las siguientes determinaciones:

1. Potencia en el eje, se determina a través de la medición de diferencia de tiempos de rotación del eje de torsión, dicho tiempo es función de la carga del motor en eje.
2. Potencia consumida por el motor, se determina con algún equipo de medición, en el caso del LEEA se determina con el Registrador Fluke 235.
3. Determinación del Rendimiento del motor, cociente entre la Potencia en el eje y la Potencia eléctrica consumida por el motor.

RESULTADOS

Se procede a la obtención de H y L, adoptando una posición arbitraria transversal a un plano de referencia en este caso la pared del laboratorio, luego se fija el punto o de referencia y con la pesa colocada se determina H, para la obtención de este se realizan 3 mediciones distintas aplicando en un extremo del brazo palanca una fuerza y dejando que este tome posición de equilibrio, según el ensayo realizado notamos que esta varia, por lo tanto, se calcula un promedio.

Con estos dos valores, el de la pesa y su distancia del centro del eje podemos determinar la constante. El ensayo se realizó varias veces en diferentes posiciones obteniendo una dispersión máxima de 5,8 %.

TABLA 1
Mediciones obtenidas y resultado de la dispersión en la determinación de Kt

Posición	L (mm)	H (mm)	P (N)	d (mm)	Sen alfa	Alfa (°)	Kt (rad/N*mm)	Dispersión (%)
Mayor ángulo	2539	571	30	0,4395	0,2249	12,6745	0,01741	5,8 %
Menor ángulo	2919	617	30	0,4395	0,2137	11,9351	0,01640	

Posición de mayor ángulo resultante:

L= 2539mm

H=571 mm

P= 30 N

d= 0,4395 mm

$$\text{sen } \alpha = \frac{571}{2539} = 0,2249 = 12,6745^\circ$$

$$Kt = \frac{\arctg \frac{H}{L}}{P*d} = \frac{0,2212}{30*0,4395*\cos 12^\circ} = 0,01741 \text{ [rad/N*mm]}$$

Posición de menor ángulo resultante:

L= 2919 mm

H=617mm

P= 30 N

d= 0,4395 mm

$$\text{sen } \alpha = \frac{617}{2919} = 0,2137 = 11,9351^\circ$$

$$Kt = \frac{\arctg \frac{H}{L}}{P*d} = \frac{0,2083}{30*0,4395*\cos 11,9351^\circ} = 0,0164 \text{ [rad/N*mm]}$$

DISCUSIÓN

Al momento se realizaron algunas mediciones sobre el esquema implementado observando que los valores obtenidos para la constante Kt tienen una dispersión máxima de 5,8 % en función de diferentes distancias L desde el eje al plano de medición.

El objetivo de este trabajo no es el de obtener errores comparables a los de un laboratorio de ensayo según la normativa IEC 60034-30, pero aún, así el error en la dispersión de un 5,8 % es un valor alto y por ese motivo el grupo de trabajo está enfocado a disminuir dicho error, aplicando otro método de contraste de mejor clase.

CONCLUSIONES

Se puede afirmar que es un método de muy bajo costo por los elementos utilizados para realizarlo y tiene como ventaja que la determinación del par por medio indirecto se realiza sin contacto con el eje en rotación.

Puede ser aplicable en el laboratorio LEEA, es una alternativa práctica a los otros métodos para la determinación de la eficiencia del motor asincrónico si se realiza la curva de errores comparado con un método de mayor precisión.

Actualmente el grupo de trabajo está implementando un montaje para comparar los resultados con un medidor de torque de clase 0,2. De esta manera se seguirá con las pruebas y el desarrollo de los accesorios necesarios para implementar un prototipo en el Laboratorio LEEA de la Facultad Regional de La Plata.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad Regional La Plata de la UTN y al Centro de I+D CODAPLI Departamento de Ingeniería en Energía Eléctrica por el soporte recibido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IEC 60034-30 (2014). Standard on efficiency classes for low voltage AC motors.

Zappalá D., Bezziccheri M., Crabtree C. y Paone N. (2018). Non-intrusive torque measurement for rotating shafts using optical sensing - of zebra-tapes. *Measurement Science and Technology*, 29(6), 065207.

FUENTES CONSULTADAS

Borkowski T., Kasyk L., Kowalak P. (2011). Assessment of ship's engine effective power/fuel consumption and emission using the vessel speed. *Journal of Kones Powertrain and Transport*, 18(2).

Rosa, R., Pujatti F., Silva, L., y Gama R. (2019). Contactless direct torque measurement system for a single cylinder engine transient test cell. *Engineering Research Express*.

Wahlberg R. (2018). *Torque Measurement : A Study on Different Measurement Methods for IC Engines*. Wärtsilä Finland. Bachelor's Thesis Degree programme in Mechanical and Production Engineering, Vasa.

Yang, K., Zhou, X., Liao, S., Li, L., Qin, L. (2012). Design of a Non-Contact Condition Monitoring System for the Fault Diagnosis of Shaft in Marine Propulsion System. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 6, 155-161.

NOTAS

1 D Zappalá (a) , M Bezziccheri (b), C J Crabtree (a) y N Paone (b), (2018).

a) Department of Engineering, Durham University, Durham, United Kingdom

b) Università Politecnica delle Marche, DIISM, Ancona, Italy

2 IEC 60034-30 Normativa IEC sobre motores eléctricos, parte 30 "clases de rendimiento para los motores trifásicos de inducción de jaula".