

# 19. Pruebas con motor de inducción a variación de frecuencia y carga

C. M. Flores, A. F. Alas, Departamento de Ciencias Energéticas y Fluidicas-UCA

## Resumen

La investigación gira en torno a la respuesta del sistema motor – variador de frecuencia y estudiar los efectos que generan el variador y su aportación al desempeño y trabajo en general del motor. Se investiga, mediante pruebas al sistema en estudio, que los efectos del variador de frecuencia al motor existen y en este trabajo se presentan de manera cuantificada dichos efectos. El trabajo según sus alcances, es la investigación basada en pruebas al sistema motor de inducción trifásico acoplado a un variador de frecuencia, que a variaciones de carga se ejecuta para distintas frecuencias.

Se determina que desde la modificación de la forma de onda de voltaje y una forma de onda de corriente reconstruida generada por el variador se encuentra una diferencia en la eficiencia del motor, que pueden señalarse desde las pérdidas que esta perturbación genera al sistema.

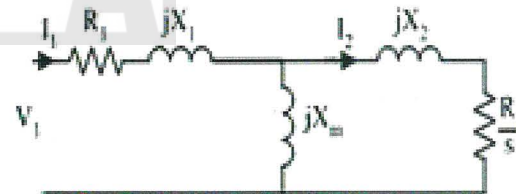
## Palabras claves

Distorsión armónica, eficiencia energética, frecuencia, motor de inducción, temperatura, torque, variador de frecuencia.

## I. INTRODUCCIÓN

Se estudia las causas y efectos de un variador de frecuencia al alimentar un motor trifásico de inducción, que, para una frecuencia determinada se modifica la carga al motor desde el vacío hasta plena carga. Dentro de los efectos que causan mayor cuestionamiento sobre el uso de estos controladores está la distorsión armónica provocada principalmente al motor y que también genera perturbación a la red conectada. Para entender las diferencias de las perturbaciones generadas al motor al ser alimentado con un variador de frecuencia se tiene lo siguiente, un circuito equivalente del motor agrupando las pérdidas del núcleo con las pérdidas de rotación, Fig. 1 modelándose de la siguiente manera cuando está alimentado por la red de distribución:

Fig. 1 Circuito equivalente del motor de inducción jaula de ardilla con la frecuencia establecida por la red.



Fuente: <http://www.ece.ualberta.ca/~knight/ee332/ee332.html>

Pruebas con motor de inducción a variación de frecuencia y carga

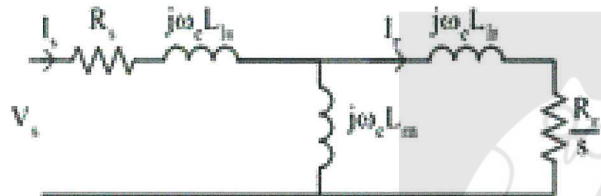


Al escribir el par en términos de la corriente en el rotor se obtiene:

$$\tau = \frac{3 * I_2^2 * R_2}{s * \omega_s} \quad [\text{N.m}] \quad (1)$$

Ahora se muestra el circuito equivalente del motor, Fig. 2 al introducir la modificación de frecuencia:

Fig. 2 Circuito equivalente del motor de inducción jaula de ardilla al modificar la frecuencia.



Fuente: <http://www.ece.ualberta.ca/~knight/ee332/ee332.html>

Y a partir del circuito equivalente se puede escribir el par en función del par los efectos de variar la frecuencia:

$$\tau \approx 3 * \frac{p}{2} * \left( \frac{V_s}{\omega_e} \right)^2 * \frac{\omega_{sl} * R_r}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 * L_{lr}^2} \quad [\text{N.m}] \quad (2)$$

La potencia eléctrica de entrada a un motor y en general a una máquina trifásica de inducción se reconoce con la siguiente fórmula:

$$P_{in} = \sqrt{3} * V_{LL} * I_L * \cos \theta = 3 V_L * I_L * \cos \theta \quad (3)$$

La potencia de salida o la potencia convertida al sistema mecánico es una función de la potencia total transferida y del deslizamiento:

$$P_{conv} = (1 - s) * P_{gap} \quad (4)$$

Por tales razones se medirán todos estos efectos y se mostrará para ambos sentidos de medición del variador de frecuencia: hacia el motor y hacia la red. Se presenta la metodología utilizada para la realización de las pruebas al conjunto motor – variador de frecuencia, algunos resultados y de esto la generación de conclusiones sobre la investigación.

## II. METODOLOGÍA

Para el registro de la mayoría de variables a explorar se cuenta con el equipo medidor de red DRANETZ 4400, con el que se registrará voltajes, corrientes, potencia eléctrica, factor de potencia y la distorsión armónica (THD), y para las pruebas de variación de carga se ejecutan con un dinamómetro de Lab-Volt 8960-12 con el que se ejercerán todas las cargas propuestas (de cero a cien por ciento según la capacidad del motor), y desde el mismo equipo se puede registrar la velocidad que se utilizará para obtener la potencia mecánica real en cada prueba y con ello el cálculo de eficiencia del conjunto Motor-VSD. Se instala un banco de transformadores monofásicos acoplado cada uno a un variac para balancear cada una de las fases conectadas al motor de la fuente de voltaje de Lab-Volt EMS 8821-2 que conecta a la red trifásica que cuenta con 208 V y el motor funciona a 220 V, Fig. 3.

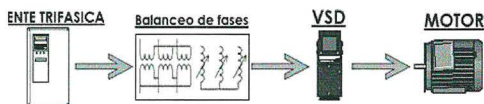
Fig. 3 Montaje de equipo y medidores para realizar las pruebas de variación de frecuencia y carga.



#### A. Inicio de mediciones

Se mide la respuesta del motor sin variador de frecuencia, a la cual se le designa como "huella de motor" y que proporciona información fundamental del desempeño del motor, su trabajo y respuesta en vacío. Se aplica la variación de carga para completar los datos de huella del motor, incrementando escalonadamente el par desde cero hasta su carga nominal (2 N.m) que representará el 100% de la carga que el motor puede entregar. Posteriormente se realizan pruebas a variación de velocidad, es decir, a variación de frecuencia acoplando el sistema en estudio Motor-variador de frecuencia; se designan las frecuencias: 50, 55, 60, 70, 80, 90 y 100 Hz. Una vez establecidas las variables se inician las pruebas según la Fig. 4:

Fig. 4 Esquema del sistema en el que se realizan las pruebas (VSD: variador de frecuencia)



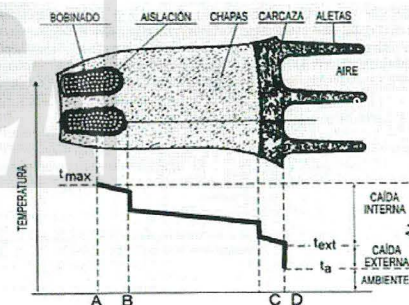
Con el esquema presentado se utilizará la metodología de medición siguiente:

- A la entrada de VSD: en el cual se medirán todos los parámetros del conjunto motor – variador de frecuencia.
- A la salida de VSD: en el que se miden los efectos del variador de frecuencia al motor.

#### B. Medición de temperatura

La temperatura de trabajo normal del motor puede sufrir alguna modificación como respuesta a las variaciones de frecuencia y variaciones de carga. Se necesita cuantificar las variaciones de calor para diferentes frecuencias con las variaciones de carga (al menos tres porcentajes de carga: vacío, 40% y 100%), así obtener las tendencias de temperatura. Se registran las lecturas de temperatura en puntos específicos en el motor como lo muestra en la Fig. 5.

Fig. 5 Esquema de medición de temperatura al interior del motor.



Fuente: "Protecciones para motores", lámina 44, Ing. Enrique Matamoros.

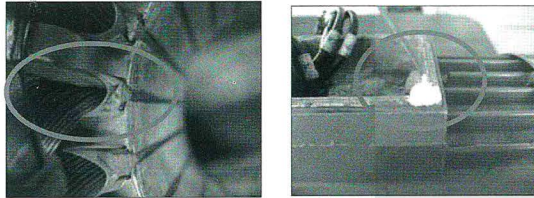
Pruebas con motor de inducción a variación de frecuencia y carga





Para medir la temperatura del motor se necesitan tres referencias, la primera en el embobinado del motor, la segunda en el estator tal y como se muestran en la Fig. 6 y una tercera que será la temperatura ambiente.

Fig. 6 Instalación de termocupas en el motor de inducción para el registro de la temperatura durante las pruebas.



Todas las mediciones se efectúan con el equipo de medición de temperatura HYDRA SERIES II, de FLUKE con termocupas tipo "K".

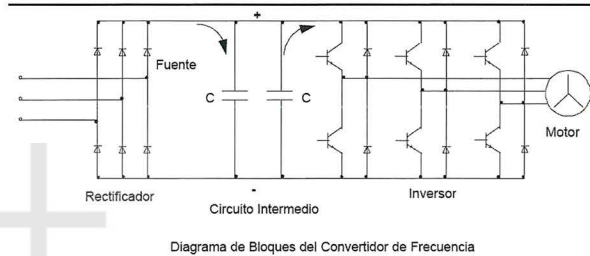
### III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos son mostrados en base a la eficiencia del sistema motor – variador de frecuencia, de igual forma se muestran las distorsiones armónicas que afectaran al resultado de eficiencia.

#### 1) La distorsión armónica

El motor de inducción sometido a una tensión PWM (modulación por ancho de pulso), proveniente de un variador de frecuencia, Fig. 7 estará sujeto a tensiones armónicas (componentes de frecuencia arriba de la frecuencia fundamental).

Fig.7 Diagrama básico de un variador de frecuencia Fuente: WEG Equipamientos Eléctricos S.A



Dependiendo de la modulación PWM empleada, de la frecuencia de conmutación y de otras particularidades del control (en caso que se aplique), el motor podrá presentar incremento de pérdidas y temperatura, incremento de los niveles de vibración y ruido y pérdidas de eficiencia. El resultado de la distorsión de las formas de onda de voltaje y corriente a causa del VSD que recibe el motor son mostradas en la Fig. 8:

Fig. 8 Forma de onda de voltaje y corriente de la red directo al motor sin variador de frecuencia.

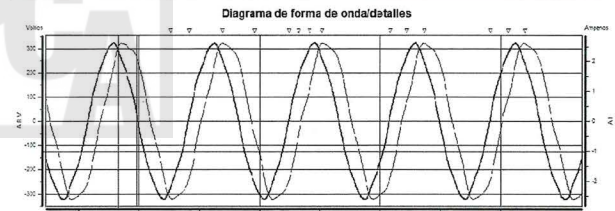
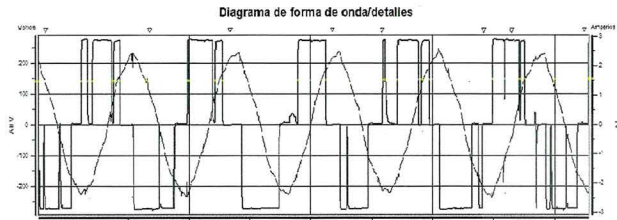


Fig. 9 Forma de onda de voltaje PWM y onda de corriente, efecto del VSD al motor de inducción.



Éstas son las formas de onda con las que se alimenta el motor, sin el variador de frecuencia y alimentación directa de la tensión de red y con los efectos del variador de frecuencia, mostrando las formas de onda tanto de voltaje como para corriente, siendo ésta última una forma de onda reconstruida, Fig. 9.

## 2) Temperatura del motor

Los resultados obtenidos de temperatura son necesarios referenciarlos al esquema de la Fig. 5 y determinar de manera comparativa entre las mediciones los efectos de acoplar un VSD a un motor, como se muestra en el siguiente gráfico.

Se muestra en Fig. 10 gráfico de medición de temperatura y en la Tabla I todas las mediciones de temperatura en el punto máximo, es decir, donde todas las mediciones el motor alcanzó la corriente nominal (2.3 A), para las frecuencias especificadas.

Fig. 10 Gráfico de temperaturas en el motor para corriente nominal medido en el embobinado (A'), estator (B) y temperatura ambiente (C).

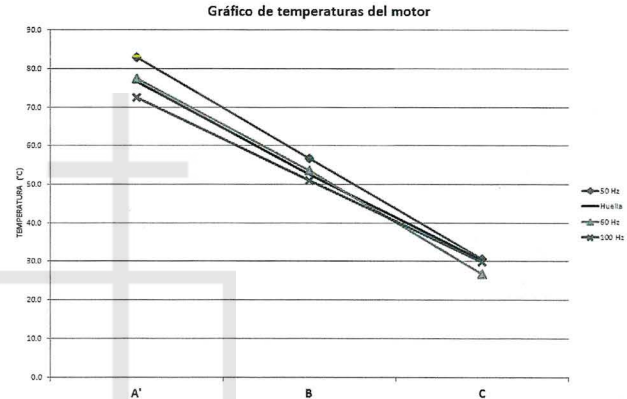


Tabla I. Temperatura en el motor: embobinado, estator y ambiente.

Tabla de temperatura en el motor			
Frecuencia	T° bobinado	T° estator	T° ambiente
50 Hz	83.0	56.6	30.7
Huella	76.6	52.5	30.3
60 Hz	77.3	53.6	26.8
100 Hz	72.4	51.1	30.0

Puede observarse que la temperatura es dependiente de la velocidad de giro del eje al cual está acoplado el ventilador, esto significa que a bajas frecuencias la temperatura del motor aumentará y será necesaria una ventilación auxiliar para evitar un aumento de la temperatura y causar un daño en el barniz del conductor.



### 3) La potencia

La potencia eléctrica se midió de lecturas continuas que generó el analizador de red (DRANETZ) de los parámetros voltaje – corriente. Para los resultados mostrados se realizan las mediciones a la entrada y salida del equipo VSD, siguiendo con el sistema de análisis propuesto:

Fig. 11 Gráfico de potencia eléctrica para 55 Hz a la entrada y salida de VSD

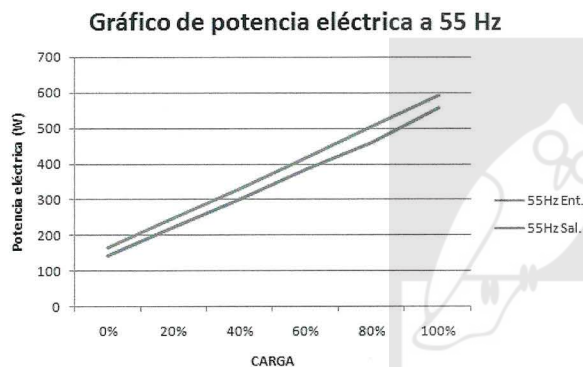


Tabla II. Resultados de medición de potencia eléctrica a 55 Hz.

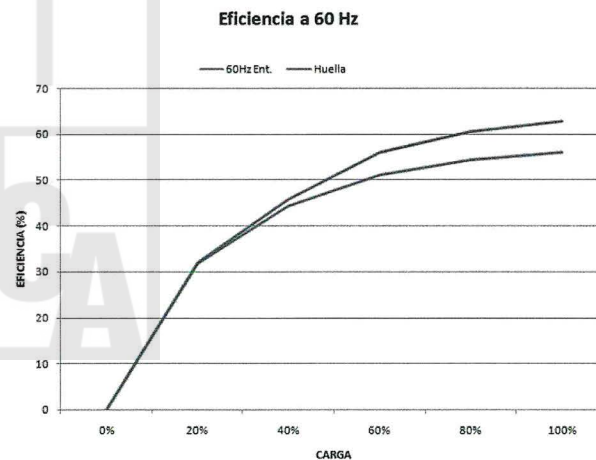
TABLA DE POTENCIA ELECTRICA PARA 55Hz			
CARGA	ENTRADA (W)	SALIDA (W)	DIFERENCIA (W)
0%	166.00	141.42	24.58
20%	250.68	224.08	26.60
40%	331.48	299.00	32.48
60%	418.00	386.12	31.88
80%	505.04	457.98	47.06
100%	592.78	556.38	36.40

De la fig. 11 se nota una diferencia en las mediciones de potencia de entrada y salida y que representa el autoconsumo del VSD y esta diferencia esta presentada en la Tabla II. El promedio de este dato se mantiene constante para cualquier porcentaje de carga y frecuencia de trabajo y oscila en un valor de 32W para nuestro caso de estudio.

### 4) La eficiencia

La eficiencia es la medida de la capacidad de un motor eléctrico para convertir la potencia eléctrica en potencia mecánica útil. El cálculo de eficiencia se hace con la relación de la potencia mecánica entre la potencia eléctrica expresada en porcentaje. A continuación se muestra el resultado de eficiencia de manera comparativa entre la huella (60 Hz sin VSD) y a 60 Hz con VSD:

Fig. 12 Eficiencia sin VSD y con VSD conectado al motor.



Pruebas con motor de inducción a variación de frecuencia y carga



Tabla III: Diferencia de eficiencia para huella y VSD (60 Hz.)

TABLA DE EFICIENCIA PARA HUELLA Y 60 Hz			
CARGA	ENTRADA (%)	HUELLA (%)	DIFERENCIA PORCENTUAL
0%	0.00	0.00	0.00
20%	31.67	31.91	0.24
40%	44.17	45.86	1.69
60%	51.02	55.92	4.90
80%	54.36	60.45	6.09
100%	55.94	62.79	6.85

Según la Fig. 12, puede destacarse que existe una diferencia de eficiencia al alimentar al motor con un variador de frecuencia que sin él y se estima en el rango de 5% a 7% de reducción. Estos valores se presentan en la Tabla III para los diferentes porcentajes de carga del motor.

#### IV. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos se confirma que los efectos del VSD al motor existen y en este trabajo se presentan de manera cuantificada. Según los resultados obtenidos se determina que desde la modificación de la forma de onda de voltaje y una forma de onda de corriente reconstruida, además del autoconsumo del variador, que los fabricantes no estipulan en sus hojas técnicas, se genera una diferencia notoria en la eficiencia del motor, que pueden señalarse desde las pérdidas por perturbación al sistema que genera el variador de frecuencia.

Para la eficiencia del conjunto motor – variador de frecuencia, se puede concluir que el motor de inducción, cuando es alimentado por un variador de frecuencia generador de PWM, tiene su eficiencia disminuida tal y como se muestra en la gráfica, en relación a un motor alimentado por tensión puramente senoidal, debido al aumento en las pérdidas

ocasionado por las armónicas y a otras cargas no consideradas en el sistema como la ventilación de la electrónica de potencia del variador.

Para la temperatura puede concluirse que a menor frecuencia mayor temperatura en el motor debido a las bajas revoluciones influenciando directamente la auto refrigeración y, a mayores frecuencias que la fundamental menor temperatura en el motor por el mismo efecto de auto refrigeración de las aletas predispuestas por diseño.

En general, cuando un motor es alimentado por un VSD, está sujeto a señales de alta frecuencia, calentándose, reduciendo su eficiencia y acortando su vida, por lo que en ocasiones deben sobredimensionarse para soportar estas condiciones o utilizar motores para uso con variadores de frecuencia.

Existen complementos importantes a realizar para algunas o todas las pruebas realizadas, como: el tipo de motor, pruebas a motores de distintas potencias, pruebas para sobrecarga del motor, y, realizar todas éstas pruebas tomando en consideración no solo el estado estable del motor sino investigar lo que ocurre desde el arranque hasta el paro general del motor.

También se recomienda realizar todas las pruebas presentadas con el filtro que el proveedor del variador de frecuencia generalmente recomienda en su kit de venta y compararlo con los cálculos para un filtro diseñado por el propio ejecutor de las pruebas con el fin de comparar los resultados con ambos filtros y en general comparar los resultados de distorsión armónica presentada en este trabajo con datos de distorsión filtrados por ambos sistemas.

#### V. RECONOCIMIENTOS

El autor agradece las contribuciones de E. A. Matamoros y C. M. Flores por su trabajo y apoyo en la versión original de este documento.



## VI. REFERENCIAS

- [1] IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE. Nov/Dec 2011
- [2] Jordan, Howard E. Energy-efficient electric motors and their applications / Howard E. Jordan.-2nd ed.
- [3] WEG Equipamientos Eléctricos S.A.; Jaraguá do Sui – SC. Guía técnica "Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM".
- [4] A. C. Williamson, "The Effects of System Harmonics Upon Machines,"
- [5] P. K. Sen, H. A. Landa, "Derating of Induction Motors Due to Waveform Distortion," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 26, NO. 6, pp. 1102-1107, Nov./Dec. 1990.
- [6] IEEE Power Engineering Society, IEEE Std. 112-1996: IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. New York: IEEE Press, 1991
- [7][http://www.ece.ualberta.ca/~knight/electrical\\_machines/induction/operation/variable\\_freq.html](http://www.ece.ualberta.ca/~knight/electrical_machines/induction/operation/variable_freq.html)
- [8]<http://www.purduecal.edu/cpmi/NSF%20Courses/ECET-212/LABORATORIES/EXPERIMENT12Variablefrequencyoperationofaninductionmotor.pdf>

