



TRABAJO TEORICO EXPERIMENTAL

Efectos de la variación de la tensión en el comportamiento del motor asincrónico trifásico jaula de ardilla

On the performance of three phase induction motors with different voltage levels

Laura Collazo Solar¹
Angel Costa Montie¹

¹Universidad Tecnológica de La Habana. La Habana, Cuba
Correo electrónico: collazosolar@gmail.com

[Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: marzo de 2017 Aprobado: junio de 2017

RESUMEN/ABSTRACT

El motor asincrónico o de inducción trifásico es el principal consumidor de energía eléctrica tanto en el sector industrial como en el de los servicios. Debido a esto, es muy importante conocer cómo se ve afectado el comportamiento de este motor cuando su ambiente eléctrico no es aquel para el cual se proyectó. Una de las más importantes variables que evalúan este ambiente eléctrico es la tensión, la cual puede variar en un margen importante. Este artículo pretende analizar cómo reaccionan las más importantes variables de comportamiento cuando hay un cambio en la tensión. Estas variables son: eficiencia, factor de potencia, potencia reactiva, corriente y velocidad. Se utiliza el bien conocido y utilizado circuito equivalente por fase del motor y se un método simple para estimar sus parámetros. Resolviendo el circuito equivalente variando el deslizamiento y para diferentes tensiones es posible determinar estas características de comportamiento y poderlas evaluar. Esta evaluación es importante debido a que en muchas ocasiones, la tensión de operación no es la nominal.

Palabras clave: Motores eléctricos; Motor asincrónico trifásico; Características de comportamiento de motores eléctricos; Comportamiento del motor asincrónico trifásico.

The three phase induction motor is the most important electrical energy consumer in industrial and tertiary sectors. On account of this fact, it is very important to know how the behavior of this motor will be affected when the electrical environment is not the standard one. One of the most important electrical variable to assess this environment is the voltage. This paper is intended to analyze how, when the voltage applied to the motor changes, its most important performance variables react. These variables are: efficiency, power factor, reactive power, current and speed. The well known per phase equivalent circuit of the motor is utilized and a method to identify its parameters in a simple way is described. Solving the equivalent circuit for different voltage values varying the slip, it is possible to construct the performance characteristic of the motor and evaluate its behavior with variable voltage levels. This assessment is very important on account of the fact that, very frequently, the voltage is not the rated one.

Key words: Electric motors; Three phase induction motor; Electric motor performance characteristics; Induction motor performance.

INTRODUCCIÓN

El motor asincrónico trifásico es considerado el motor o accionador industrial por excelencia debido a sus características de confiabilidad, robustez, alta relación potencia/peso y relativamente bajo costo inicial. Esto hace que más del 70 % del consumo de energía eléctrica en las industrias se hace a través de estas máquinas. Puede considerarse entonces que es el convertidor electromecánico más popular y utilizado.

Como enlace entre un sistema mecánico formado por el mecanismo accionado y sus elementos de transmisión, y un sistema eléctrico que casi siempre es la red trifásica de suministro eléctrico a la industria es, por consiguiente, muy importante considerar el efecto que tiene sobre ambos sistemas la variación casual o intencionada de las variables de comportamiento, tanto eléctricas como mecánicas, que tienen que ver con la operación de este motor. Entre estas, la tensión aplicada al estator del motor es una de las más importantes pues puede decirse que casi nunca el motor trabaja en sus condiciones nominales de tensión, a veces por encima y a veces por debajo de la tensión nominal. Aunque la mayoría de las normas internacionales establecen una variación no mayor del 5%, en el análisis que se realiza, se considera una variación máxima de un 10% debido a que existe la posibilidad real de que la tensión en algún punto de la red no cumpla la norma y, además, de esta forma se aprecia mejor la tendencia de las variaciones de la tensión. Estas variaciones afectan de manera significativa, por una parte, al sistema mecánico que recibe la energía mecánica convertida a partir de la eléctrica, y por otra parte, al sistema o red eléctrica encargada del suministro de la energía.

Este trabajo trata precisamente de mostrar, a través de resultados de simulación, el efecto de una tensión diferente de la nominal en las características de comportamiento del motor en función de la potencia entregada por el motor en el eje.

MODELO DEL MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO E IDENTIFICACIÓN DE SUS PARÁMETROS

El modelo en estado estacionario que se utilizó es el conocido circuito equivalente real, que se muestra en la figura 1, [1-3]. En este modelo R_1 y R_2' son la resistencia por fase de los enrollados del estator y el del rotor referida al estator; X_{d1} y X_{d2}' las reactancias de dispersión por fase del estator y del rotor referida, X_m la reactancia magnetizante por fase y R_m la resistencia debida a las pérdidas de acero. El deslizamiento es s y la potencia convertida a la forma mecánica es la que se consume en $R_2'(1-s)/s$. Quiere decir que, para determinar la potencia de salida en el eje es necesario restarle a esta potencia las pérdidas mecánicas y las pérdidas adicionales.

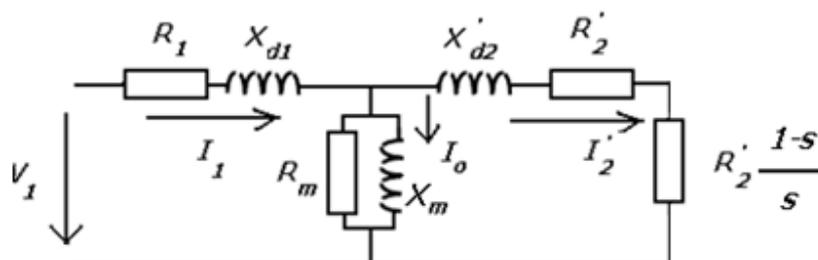


Fig. 1. Circuito Equivalente Exacto del Motor de Inducción por Fase.

Para poder aplicar este modelo, es necesario poder identificar sus parámetros. Para hacerlo, puede aplicarse la norma IEC 60034 – 28[4] que consiste en hacer los ensayos de medición de resistencia del estator, de vacío y de rotor bloqueado, en diferentes condiciones y, a partir de ellos, determinar los parámetros. Sería necesario entonces, disponer de un laboratorio con un equipamiento adecuado.

Para el estudio que se quiere realizar no es necesario el nivel de exactitud que se consigue con estos ensayos y, lo más importante, no es factible económicamente. Por tanto, se utiliza un método, menos exacto, pero mucho más viable ya que se trata de, a partir de los datos de catálogo del motor deducir los parámetros del circuito equivalente. De cualquier forma, la exactitud lograda con este método es suficiente para los resultados que se quiere obtener. El método utilizado se explica en las referencias [4-7]. Se basa en el siguiente algoritmo, que se resuelve con un programa en MATLAB:

1. Se calcula la resistencia del rotor a partir de los valores nominales de potencia, corriente y factor de potencia.
2. Se calcula la reactancia de dispersión total teniendo en cuenta que es inversamente proporcional al par máximo. Se supone que el 40 % de la reactancia pertenece al estator y el 60 % al rotor.
3. Se calcula la corriente de vacío para tensión nominal y con ella la reactancia magnetizante nominal.
4. Se determina la relación tensión/frecuencia y con ella la reactancia magnetizante real en por unidad de la nominal a partir de la característica que se muestra en la figura 2, elaborada a partir de lo explicado en [8]:

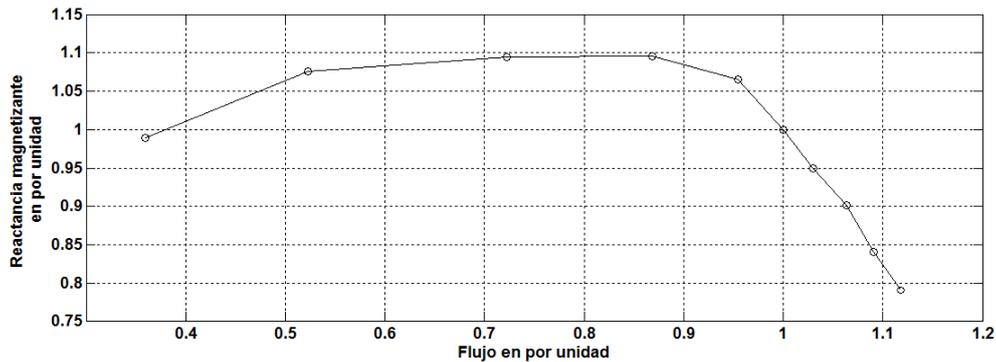


Fig. 2. Característica de reactancia magnetizante en función de la relación V/f o flujo en pu.

- Se calcula la resistencia R_m en función de las pérdidas de acero calculadas como un 20 % de las pérdidas totales [5,6].
- Se calculan las pérdidas mecánicas en condiciones nominales utilizando la ecuación (1) [5,9]:

$$P_{mecn} = k_{fb} \cdot P_n \quad (1)$$

donde k_{fb} es una constante que está dada por la ecuación (2):

$$k_{fb} = 0,5052 \cdot P_n^{-0,3296} \quad (2)$$

siendo P_n la potencia nominal del motor en kW.

- Las pérdidas adicionales p_{adn} se calculan como un 1,8 % de la potencia nominal para motores menores de 100 kW y un 1,5 % de la potencia nominal para motores mayores de 100 kW [10].

DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DE COMPORTAMIENTO CON EL CIRCUITO EQUIVALENTE

Una vez estimados los parámetros, el procedimiento consiste en ir suponiendo diferentes valores de deslizamiento “s” utilizando un lazo que arranque con valores muy bajos y termine con un 150 % del nominal y para cada valor de deslizamiento se calcula (ver figura 1):

- La corriente del estator I_1 determinando la impedancia equivalente total para ese valor de deslizamiento y haciendo $I_1 = abs(V_1/Z_t)$ donde V_1 es la tensión de fase supuesta y Z_t la impedancia total compleja. Se calcula el valor absoluto porque lo que interesa es el módulo de la corriente.
- El factor de potencia fp como el coseno del ángulo de la impedancia compleja Z_t .
- La potencia activa de entrada como: vea la ecuación (3).

$$P_{en} = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot fp \quad (3)$$

La potencia reactiva de entrada como: vea la ecuación (4).

$$Q_{en} = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{1 - fp^2} \quad (4)$$

- La corriente I_2 calculando la tensión en la rama paralela y dividiendo esta tensión entre la impedancia del rotor $Z_2 = R_2/s + j \cdot X_{d2}$. Se toma, por supuesto, el valor modular.
- La potencia convertida a la forma mecánica como: vea la ecuación (5).

$$P_{mec} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot \frac{1-s}{s} \quad (5)$$

- La potencia de salida restando, de esta potencia convertida a la forma mecánica, la suma de las pérdidas adicionales y mecánicas: vea la ecuación (6).

$$P_{sal} = P_{mec} - (p_{mecn} + p_{adn}) \quad (6)$$

- El rendimiento, dividiendo la potencia de salida entre la de entrada: vea las ecuaciones (7 y 8).

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{en}} \cdot 100 \quad (7)$$

Lau Collazo Solar, Angel Costa Montiel

9. La velocidad como:
$$n = n_s \cdot (1 - s) \quad (8)$$

donde: n_s es la velocidad sincrónica en rpm.

Este lazo se hace para la tensión nominal, un 90 % de la tensión nominal y un 110 % de dicha tensión. Los resultados obtenidos se colocan en el mismo gráfico para ser comparados.

Todo este proceso se lleva a cabo utilizando un programa en MATLAB elaborado al efecto.

CASO DE ESTUDIO. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El procedimiento se aplica al motor cuyos datos de catálogo aparecen en la tabla 1, y los parámetros obtenidos por el procedimiento explicado anteriormente, en la tabla 2.

Los resultados obtenidos para los tres valores de tensión se muestran en las figuras (3-7). Después de cada característica, se analiza el resultado correspondiente.

TABLA 1. DATOS DE CATÁLOGO DE MOTOR CASO DE ESTUDIO	
Potencia nominal P_n	22kW
Tensión nominal de línea V_n	400V
Velocidad nominal n_n	3530rpm
Velocidad sincrónica n_s	3600rpm
Corriente nominal I_n	39 ^a
Rendimiento nominal η_n	92%
Factor de potencia nominal f_{pn}	0,88
Par máximo t_{max}	3,2pu

TABLA 2. PARÁMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR CASO DE ESTUDIO	
Resistencia del estator R_l	0,0672 Ohms
Reactancia de dispersión del estator X_{dl}	0,3468 Ohms
Resistencia de pérdidas de Acero R_m	388 Ohms
Reactancia magnetizante X_m	16,47 Ohms
Reactancia de dispersión del rotor X_{d2}	0,5201 Ohms
Resistencia del rotor R_2	0,1153 Ohms
Pérdidas mecánicas nominales p_{mecn}	411,74Watts
Pérdidas adicionales $p_{ad,n}$	396Watts

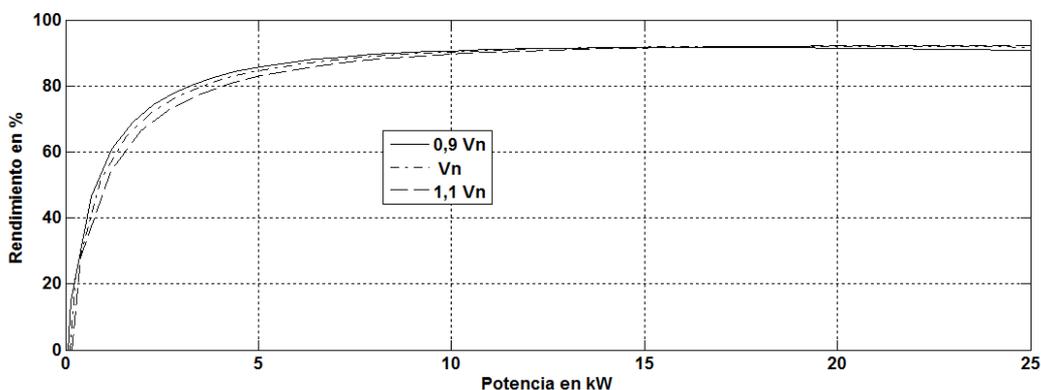


Fig.3. Rendimiento en función de la potencia de salida.

Como puede apreciarse en la figura 3, el rendimiento para valores superiores al 50 % de la potencia nominal (11 kW) prácticamente no varía con la tensión. Ahora bien, cuando el motor tiene muy poca carga (inferior a 5 kW en este caso), el rendimiento es mayor mientras menor es la tensión. Esto se debe a que, para poca carga (potencias pequeñas) las pérdidas

predominantes son las de vacío: de acero y mecánicas. Las de acero aumentan al aumentar la tensión y como el aumento de tensión provoca un aumento de velocidad, también aumentan las mecánicas. Esto quiere decir que, con baja carga, para una misma potencia, hay más pérdidas con tensión más alta y, por tanto, menor rendimiento.

Sin embargo, alrededor de la carga nominal, al aumentar la tensión, el rotor del motor necesita menos corriente para producir la misma potencia de salida (recuérdese que la potencia es proporcional al producto tensión-corriente), esto hace que disminuyan las pérdidas de cobre, tanto del estator como del rotor) al aumentar la tensión, y como las de acero y las mecánicas aumentan, se compensan mutuamente lo que hace las pérdidas prácticamente constantes y, por tanto, el rendimiento también es constante.

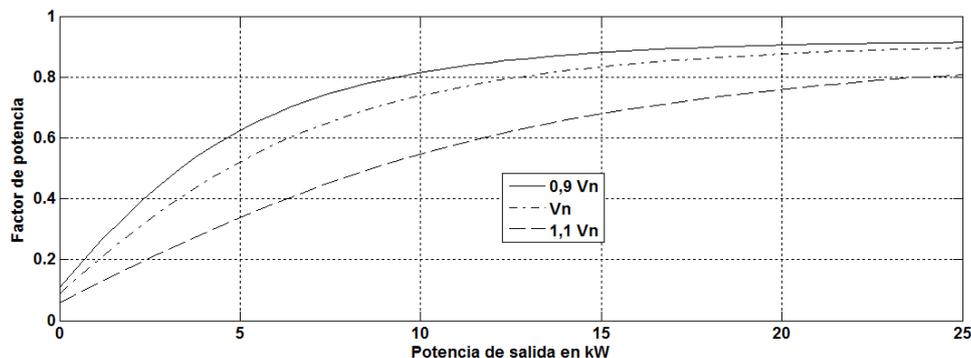


Fig.4. Factor de potencia en función de la potencia de salida.

Como es fácil darse cuenta en la figura 4, el factor de potencia mejora al disminuir la tensión para cualquier valor de carga y su variación es significativa. Para entender porqué sucede esto hay que tener en cuenta que la corriente que toma el motor por el estator tiene, básicamente, dos componentes: la de vacío o magnetizante que está a 90° grados de la tensión y es la que produce el campo magnético de acoplamiento en el entrehierro de la máquina y la de carga que casi está en fase con la tensión y es la que produce el par y la potencia de salida. La primera da lugar al consumo de potencia reactiva y la segunda al consumo de potencia activa.

Para una potencia de salida constante, el consumo de potencia activa es prácticamente constante e independiente de la tensión pues, como se señaló anteriormente, el rendimiento casi no varía con esta variable para cargas superiores al 50% de la nominal. Sin embargo, si se observa el circuito equivalente de la figura 1, se aprecia que al aumentar la tensión aumenta la corriente por la rama magnetizante y, por tanto, la componente en cuadratura de la corriente. Este fenómeno se ve acentuado por el efecto de la saturación del circuito magnético de la máquina ya que, al aumentar la tensión, sin variar la frecuencia, aumenta el flujo y la saturación del circuito magnético y disminuye la reactancia magnetizante aumentando aún más la corriente en cuadratura.

En resumen, al aumentar la tensión, la componente en fase de la corriente no varía y la componente en cuadratura aumenta, esto significa una disminución del factor de potencia.

Este mismo fenómeno explica las características de la figura 5, de potencia reactiva en función de la potencia de salida. Se aprecia claramente el aumento de la potencia reactiva consumida al aumentar la tensión.

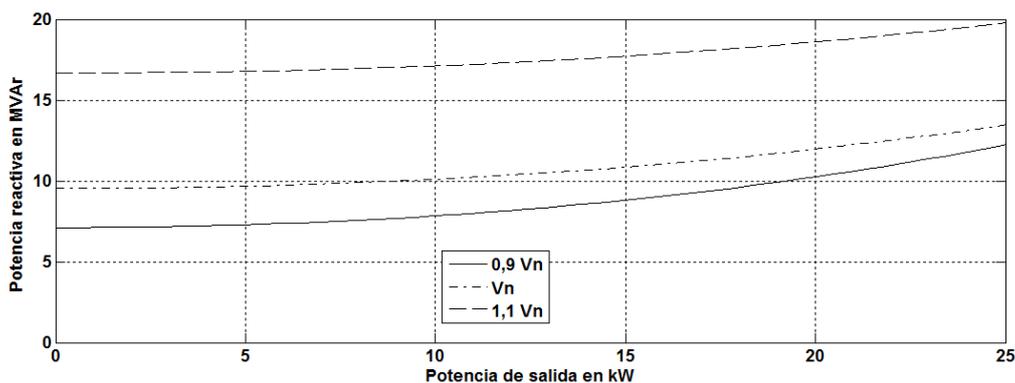


Fig.5. Potencia reactiva en función de la potencia de salida.

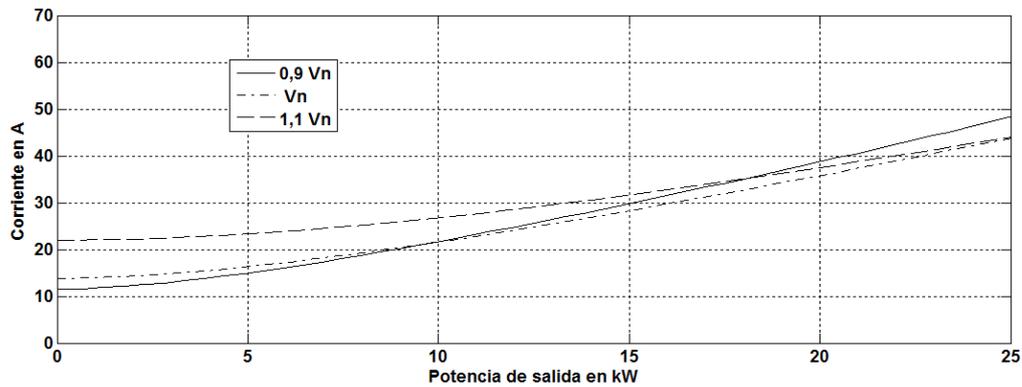


Fig.6. Corriente en función de la potencia de salida.

En la figura 6, se muestra la variación de la corriente en función de la potencia de salida. Para cargas pequeñas la corriente aumenta con la tensión, como era de esperar, ya que aumenta la corriente magnetizante como ya se explicó. Para cargas altas se aprecia que la corriente aumenta al disminuir la tensión. Eso se debe a que, para estos valores de carga, la componente de corriente en fase, que es la que produce el par y la potencia, tiene que aumentar ya que la potencia es proporcional al producto tensión – corriente y la tensión ha bajado. En este caso, esta componente en fase es mayor que la magnetizante y por eso su efecto es mayor

De la figura 7, se aprecia que, en general, la velocidad disminuye con la carga, aunque la variación es muy pequeña. A menor tensión, para la misma potencia de salida, la velocidad es menor. Es conocido que el par es proporcional al cuadrado de la tensión y al deslizamiento, o sea vea ecuación (9).

$$T_{em} = k.V_1^2 .s \quad (9)$$

Esto quiere decir que, si se disminuye la tensión, el deslizamiento tiene que aumentar y, por tanto, la velocidad disminuir.

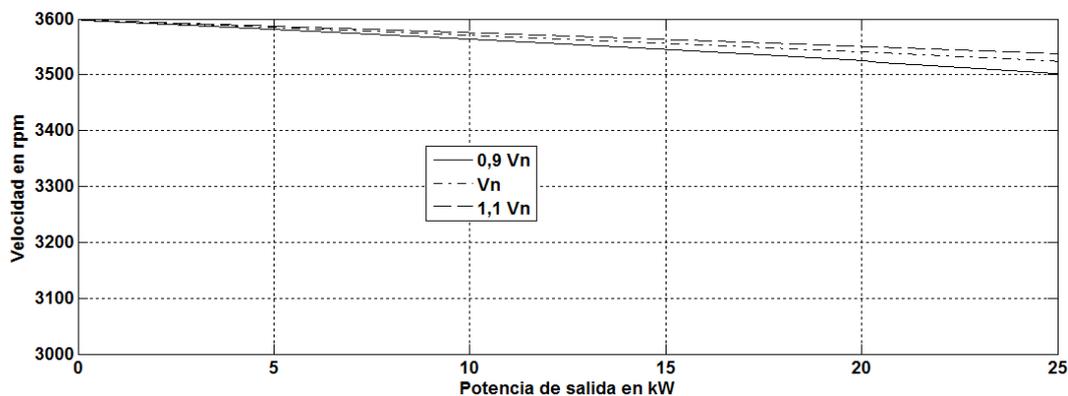


Fig.7. Velocidad en función de la potencia de salida.

CONCLUSIONES

En el trabajo expuesto se han obtenido y analizado las características de comportamiento de un motor asincrónico trifásico, para diferentes valores de tensión a partir de un algoritmo elaborado en MATLAB, mediante las cuales se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. El rendimiento del motor, para una potencia de salida determinada, cuando opera con cargas superiores aproximadamente, a la mitad de la nominal es prácticamente independiente de la tensión. Solo para cargas muy bajas disminuye algo al aumentar la tensión.
2. El factor de potencia y el consumo de potencia reactiva se ven afectados significativamente por la tensión, pues su aumento incrementa el consumo de potencia reactiva y baja el factor de potencia.
3. La saturación del circuito magnético empeora el comportamiento de la máquina, debido a que, cuando la tensión aumenta, la saturación provoca una disminución de la reactancia magnetizante que aumenta aún más el consumo de potencia reactiva. Por el contrario, cuando la tensión baja, aumenta la reactancia magnetizante y disminuye más aún el consumo de potencia reactiva.
4. Para potencias bajas la corriente es mayor con tensiones más elevadas debido al aumento de su componente magnetizante y al bajo valor de la componente de carga. Por el contrario, con cargas cercanas a la nominal esta componente de carga

es la predominante y con un aumento de tensión ella disminuye y disminuye la corriente total. Lo contrario sucede con tensiones bajas.

5. La velocidad, para una misma potencia, siempre es menor para tensiones más bajas pues el par es proporcional al producto del cuadrado de la tensión por el deslizamiento y si baja la tensión tiene que subir el deslizamiento y disminuir, por tanto, la velocidad. Lo contrario ocurre con tensiones más altas.

Por último, es necesario señalar que los resultados y conclusiones alcanzadas con este trabajo son importantes y deben tenerse siempre en cuenta en su aplicación práctica ya que muchas veces se suponen los valores de corriente, eficiencia y factor de potencia que dan la chapa del motor y su catálogo olvidando que estos valores corresponden a la tensión nominal y en los lugares donde se instalan los motores existen muchas veces tensiones diferentes a la nominal de forma continuada.

REFERENCIAS

- [1] D. P. Kothari, I.J. Nagrat, *Electrical Machines*, Editorial Mc Graw Hill, 2014, ISBN 0-07-058377-3. Disponible en : <https://www.gettextbooks.com/isbn/9780070583771/>
- [2] Javier Sainz Feito, *Máquinas Eléctricas*, Editorial Prentice Hall, 2002. ISBN13:9788420533919.
- [3] M. Torrent, *Estimation of equivalent circuits for induction motors in steady state including mechanical and stray load losses*, European Transactions on Electric Power, vol 22, pp 989 – 1015, 2012.[Consultado en febrero del 2016]. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/etep.621/abstract> .ISSN 2050-7038.
- [4] Norma IEC 60034-28 *Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams for three-phase low-voltage cage induction motors*. International Standard Edition 2.0 2012-12-13. ISBN 978-2-83220-553-2.
- [5] Costa A.; Vilaragut M.; *Determinación del comportamiento energético del motor de inducción a partir de sus datos de catálogo y las lecturas de las corrientes del estator*, III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos,Cuba, Abril del 2004.[Consultado en febrero del 2016].Disponible en : https://www.researchgate.net/publication/321978318_DETERMINACION_DEL_COMPORTAMIENTO_ENERGETICO_DEL_MOTOR_DE_INDUCION_A_PARTIR_DE_SUS_DATOS_DE_CATALOGO_Y_LA_LECTURA_DE_LAS_CORRIENTES_DEL_ESTATOR.ISBN 959-257-034-8
- [6] A. G. Siraki, P. Pillay and P. Angers, *Full load efficiency estimation of refurbished induction machines from no load testing*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 28, n. 2, p. 317-326, June 2013. ISSN: 0885-8969.
- [7] Joao Marcondes Correa Guimaraes, et. al. *Parameter determination of asynchronous machines from manufacturer data sheet*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 29, n. 3, Sept. 2014. ISSN: 0885-8969.
- [8] L. Monjo, F. Córcoles, J. Pedra, *Saturation effects on torque- and current – slip curves of squirrel cage induction motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 28, no 1, p. 243-254, March 2013. DOI: 10.1109/TEC.2012.2232672. ISSN: 0885-8969.
- [9] Julio R. Gómez, Percy R. Viego, Daniel Gálvez, Angel Costa, Marcos A. de Armas, *Uso de computación evolutiva en identificación de parámetros del motor asincrónico con desbalance de tensión*. Revista Ingeniería Energética, vol 27, n. 2-3/2006. ISSN 1815 – 5901.
- [10] IEEE Std 112™, *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, Ed. 2004. PDF: ISBN 0-7381-3978-5 SS95211. Disponible en: http://prof.usb.ve/jaller/calificaciones/Std_IEEE_112_2004.pdf