

Curvas de motores trifásicos de inducción de dos polos

Two-pole three-phase induction motor curves

Presentación: 26 y 27 de octubre de 2022

Omar D. Gallo

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional San Francisco
odgallo@gmail.com

Diego M. Ferreyra

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional San Francisco
dferreyra@sanfrancisco.utn.edu.ar

Resumen

Este trabajo es una fracción de una investigación que incluye valores de funcionamiento y curvas de motores de inducción de varias potencias y polaridades de un mismo fabricante.

Consiste en mostrar y analizar brevemente las curvas características de algunos motores de dos polos obtenidas mediante la resolución, por software, de un modelo del circuito equivalente tradicional cuyos parámetros son variables linealmente con la velocidad.

Las curvas corresponden a impedancias, corrientes y sus ángulos, momentos y pérdidas, para todas las velocidades, desde el arranque hasta vacío y para los tamaños constructivos IEC 71 y 315. Se observan y comparan sus formatos y se obtienen conclusiones al respecto.

Palabras clave: Motores de inducción, Circuito equivalente, Curvas de motores eléctricos

Abstract

This work derives from part of an ongoing research including operating values and curves for induction motors of different powers and pole numbers produced by a given manufacturer. It consists of showing and briefly analyzing the characteristic curves for some two-pole motors obtained by solving, by means of a software, the model for the traditional equivalent circuit, its parameters being linearly variable with the speed. Said curves refer to the impedances, currents and their angles, torques and losses, for all the speeds from standstill to no-load operation and for IEC sizes 71 and 315. The curve shapes are compared, and conclusions are then obtained regarding them.

Keywords: Induction motors, Equivalent circuit, Electric motor curves

Introducción

Este trabajo es una fracción de una investigación que se está realizando, mediante la aplicación de un software, para motores de 380 V, 50 Hz desde el tamaño IEC de 71 mm hasta 315 mm de altura de eje y cuyos fundamentos ya han sido publicados (Gallo, Ferreyra, 2021).

Como en tal investigación se refiere, el circuito equivalente convencional de un motor asincrónico trifásico (Fig. 1) es una excelente herramienta, que simplifica y modeliza los fenómenos electromagnéticos y se usa para obtener los valores de funcionamiento de la máquina (Fraile Mora, 2008: 259-334; Chapman, 2005: 380-431; Liwschitz-Garik y Whipple, 1974: 177-209).

Referencias de la figura 1 (valores por fase)

V_f : tensión aplicada, V

I_f : corriente de la rama primaria, A

$R1, jX1$: resistencia y reactancia del primario, W
 I_{mf} : corriente de la rama derivada, A
 I_{2f} : corriente de la rama secundaria; A
 E_c : tensión de salida (sobre la carga), V
 Los parámetros de la rama secundaria son los de un rotor trifásico, reducidos al estator

E_f : caída de tensión en la rama derivada, V
 R_m, jX_m : resistencia y reactancia de la rama derivada, W
 $R2, jX2$: resistencia y reactancia del secundario, W
 R_c : resistencia de carga, W

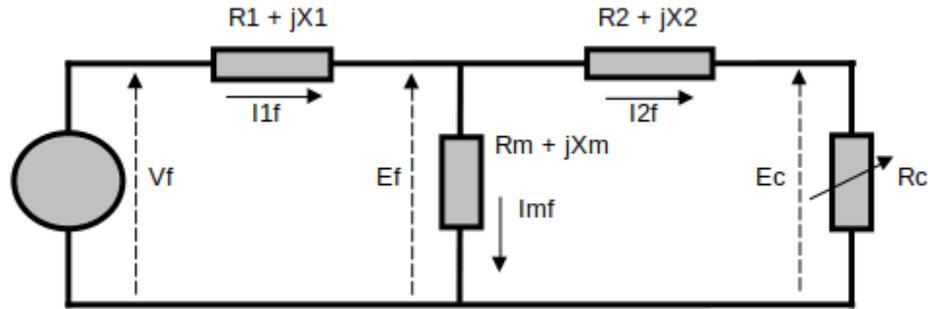


Fig. 1. Circuito equivalente convencional de un motor trifásico de inducción

A fines de lograr estos resultados, deben ingresarse los datos nominales del motor y los obtenidos de los ensayos a un software en Python (Python S.F., 2021; González Duque, 2019), el cual, a partir de resistencias y reactancias variables, devuelve finalmente las curvas de variación de todos los parámetros del circuito entre las velocidades de arranque y la de vacío.

Tales curvas son de gran importancia para ser tomadas como referencias en el diseño inicial de motores, el ajuste dimensional de prototipos e incluso para adelantar resultados aproximados de los ensayos (Juha Pyrhönen et al., 2008; Corrales Martín I y II, 1976).

El objetivo básico de este trabajo es mostrar, analizar y comparar brevemente una muestra de diversas curvas de motores de 380 V, 50 Hz y 2 polos, obtenidas por software, entre el menor y el mayor tamaño y elaborar algunas conclusiones al respecto.

Existen innumerables trabajos publicados referidos a este tema (Sale et al., 2018; Wengerkievicz, 2017) y también gran cantidad de software libre que lo aborda desde diferentes ópticas (PyPI, 2022, Jabbar, Yeo, 2000); lo que aquí se pretende es aportar otras alternativas útiles para el estudio y desarrollo de máquinas de inducción.

Desarrollo

Una vez logrado el buen desempeño del software y su confiabilidad de respuesta, el trabajo de desarrollo consistió en el archivado de los datos logrados y la interpretación y análisis de las curvas.

El buen desempeño y la confiabilidad del software fueron comprobados mediante repetición de pruebas con distintas polaridades y tamaños, usando diferentes coeficientes de pérdidas y leyes de variación de impedancias. La gran cantidad de datos arrojados exigió un minucioso esfuerzo para determinar y corregir los errores y mejorar la devolución.

La interpretación y análisis de curvas consistió primeramente en un examen visual de ellas, una verificación de su formato, acorde a los estudios bibliográficos existentes, su continuidad y su concordancia con los datos numéricos logrados. Posteriormente se efectuó una identificación de máximos y mínimos, en función de la velocidad y algunas comparaciones entre motores de distintos tamaños.

Los datos usados corresponden a motores industriales, de eficiencia equivalente a $IE1$ actual (Norma IEC, 2014; norma IRAM, 2022) y de una marca (aquí designada “AAA”) que estuvo presente en el mercado nacional durante muchos años. Los tamaños constructivos estudiados son, en mm de altura de eje: 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280 y 315 de los que solo se expondrán en este trabajo, por razones de espacio físico, los tamaños 71 y 315, que se consideran admisibles por poseer distintos diseños mecánicos y eléctricos y abarcar todo el rango de potencias estudiadas.

Resultados

Debe aclararse especialmente que estas curvas son el resultado de aplicar diversas hipótesis simplificadoras en la resolución del circuito equivalente, por lo que se aceptan solo como referenciales; no necesariamente coinciden con las curvas de los motores obtenidas a partir de ensayos físicos.

La Fig. 2 muestra, para los tamaños mencionados, las resistencias por fase de las tres ramas del circuito de la Fig.1, en función de la velocidad. Los valores de la resistencia $R1$ del primario y la R_m de la rama derivada, dados a 25 °C, se

estiman constantes para cada motor y en todas sus velocidades. La resistencia $R2$ del secundario, tiene una suave pendiente, resultante de la pequeña diferencia entre entre sus valores de arranque y nominal.

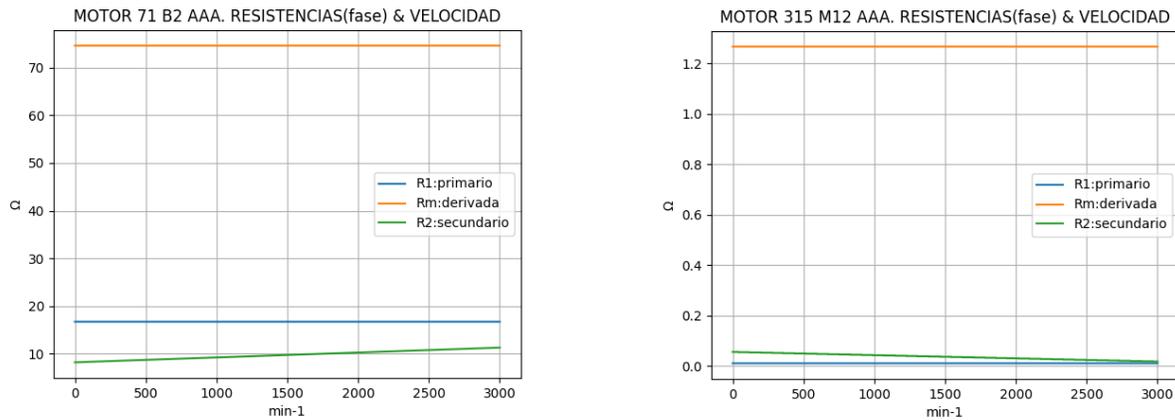


Fig. 2. Curvas de resistencias

La Fig. 3 muestra las reactancias e impedancia total del circuito en función de la velocidad, que este modelo se suponen también de variación lineal entre el arranque y vacío. La impedancia Zt total del circuito presenta un formato algo distinto en el tamaño 71, debido a las diferencias más pronunciadas entre $X1$ y $X2$. La reactancia Xm derivada siempre crece con valores muy mayores a las otras.

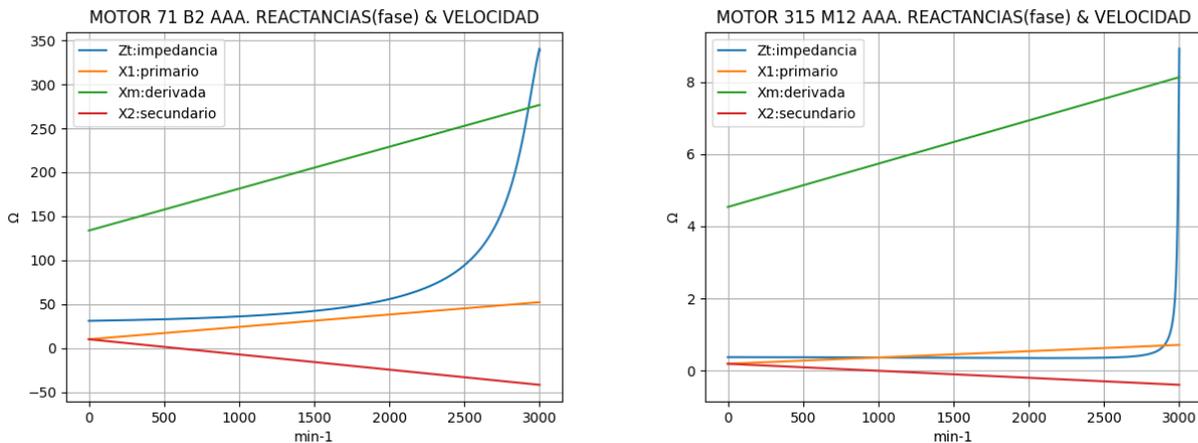


Fig. 3. Curvas de reactancias e impedancia total

En la Fig. 4 se muestran las curvas de momentos y corrientes en función de la velocidad, que son las más utilizadas para el diseño del motor y sus aplicaciones industriales. Se observan las diferencias en las formas de los momentos en el eje M_{ej} y de sus valores relativos de mínimos y máximos, producidos seguramente por configuraciones distintas de las barras del rotor. La corriente $I2f$ del secundario en los dos casos comienza siendo menor que la del estator $I1f$ y luego la supera ligeramente; esto es producto de las hipótesis aplicadas en el circuito. La corriente de la rama derivada I_{mf} , siempre más reducida que las otras, presenta una escasa variación.

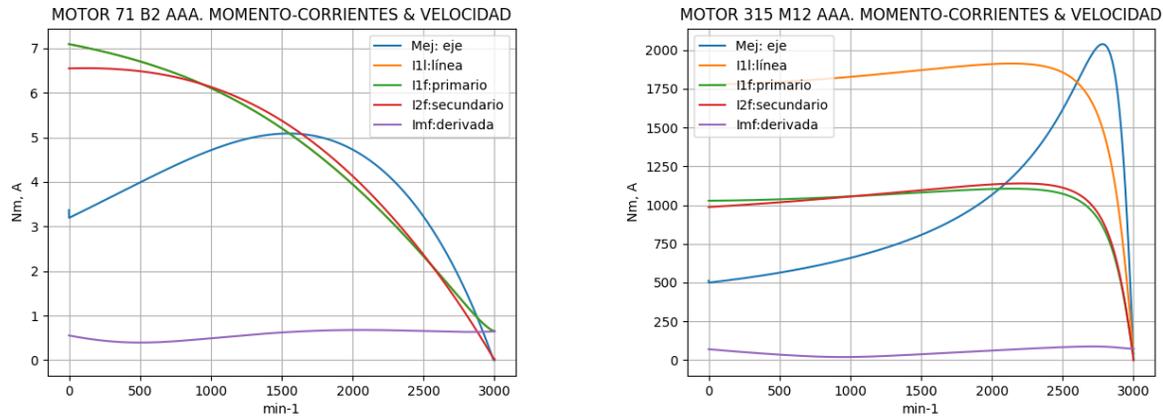


Fig. 4. Curvas de momentos y corrientes

En la Fig. 5 se observan los ángulos entre las corrientes de las ramas del circuito y la tensión de alimentación. En ambos casos, el ángulo de la corriente primaria $I1f$ acusa un valor negativo con un mínimo pronunciado; el de la $I2f$ secundaria es de pendiente más regular, mientras que el de la Imf de la rama derivada presenta valles muy notables, lo que es propio de este modelo, relacionado con la variación de reactancias de las tres ramas del circuito, y el valor de $I2f$ que supera a $I1f$ en la misma zona.

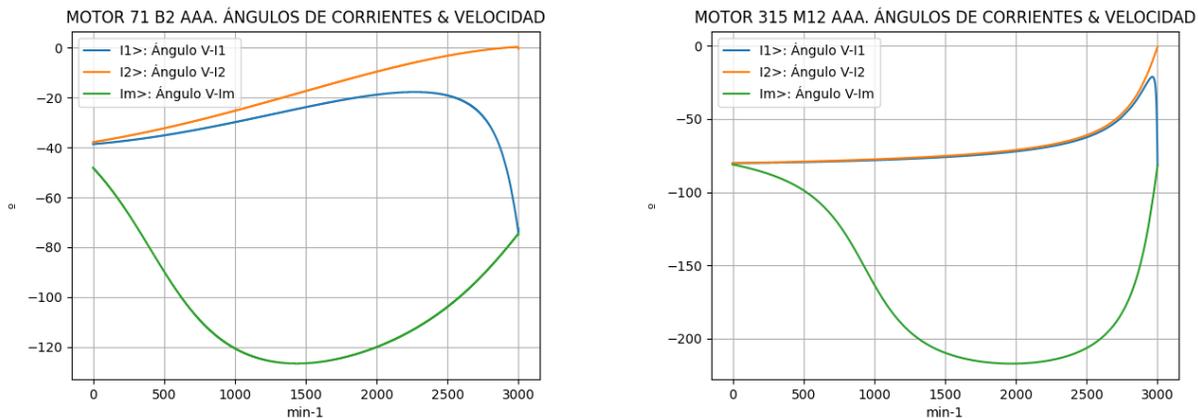


Fig. 5. Curvas de ángulos entre corrientes y tensión

La Fig. 6 muestra las curvas de potencia de entrada, en el eje y las pérdidas en el arrollamiento de los motores en función de la velocidad. La potencia de entrada $P1t$ presenta cambios de pendiente más pronunciados en el 315, al igual que la potencia en el eje Pej . Las pérdidas en el arrollamiento descienden con pendientes poco variables.

En la Fig. 7 se ven las pérdidas en función de la velocidad, que se muestran en general muy diferentes en ambos tamaños. Las pérdidas adicionales Pad responden a la curva de potencia de salida, ya que son un porcentaje particular, estipulado por normas, de ella; las mecánicas Pme , relacionadas con los rodamientos, la velocidad, el tamaño y forma del ventilador, ascienden con pendiente suave y las pérdidas en el hierro Pfe , que se relacionan con el estado de magnetización de la chapa, acusan depresiones y picos pronunciados. Todas estas pérdidas están íntimamente ligadas al diseño del motor.

Limitaciones de espacio impiden agregar las curvas de caídas de tensión en la rama derivada y a la salida del circuito, junto a sus ángulos y la curva de eficiencia.

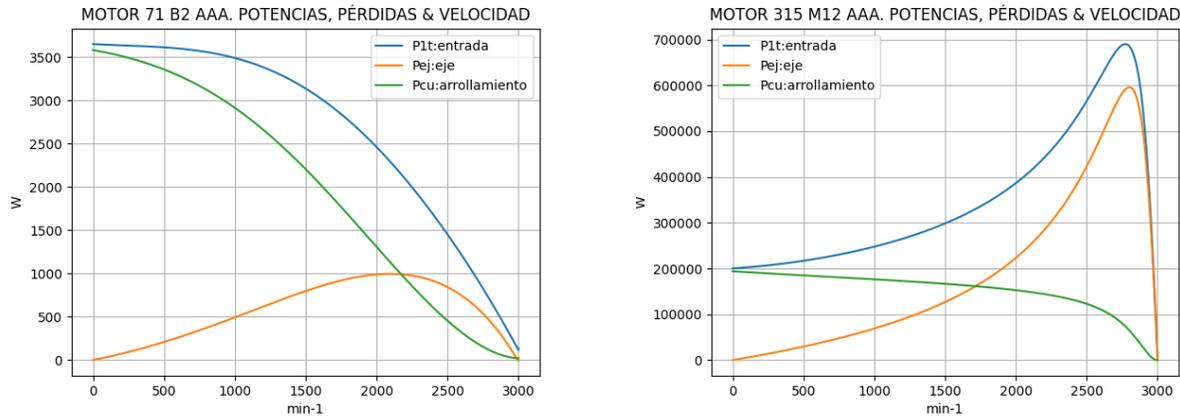


Fig. 6. Curvas de potencias y pérdidas en el arrollamiento

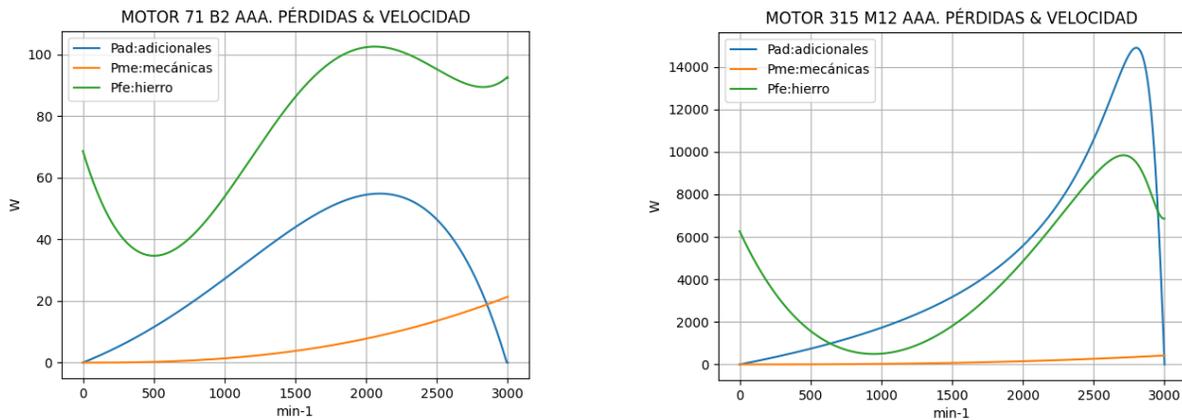


Fig. 7. Curvas de otras pérdidas

Conclusiones

Este material es una parte resumida de una investigación que se extiende a motores de 4, 6 y 8 polos, además de motores de 2 velocidades, del mismo fabricante. Los resultados obtenidos con las otras polaridades pueden ser expuestos de la misma manera que aquí. Por esta razón, es permisible:

- Admitir que el circuito equivalente tradicional del motor con parámetros de variación lineal puede ser usado con aceptable certeza para calcular los valores de funcionamiento del motor eléctrico de inducción, sobre todo en los estados de carga normalizados, donde se comprueban reducidas diferencias con los valores de ensayos.
- Comprobar que el uso de un software acondicionado resulta una herramienta adecuada para resolver tal circuito equivalente en todos los estados de velocidad del motor, por su velocidad y confiabilidad de respuesta.
- Proponer que los valores numéricos y curvas obtenidas de esta resolución constituyan referencias racionales en el momento de diseñar una máquina de esta naturaleza, porque dichas curvas se obtuvieron de motores con comprobada calidad de servicio.

A futuro, aún queda continuar con el desarrollo del software para intentar que devuelva valores intermedios de la curva aún más cercanos a los obtenidos de los ensayos y ofrezca otras posibilidades al cálculo de prototipos.

Bibliografía

Chapman, S. (2005). "Máquinas Eléctricas". México: Mc Graw Hill, 401-430.

Corrales Martín, J. (1976). "Cálculo industrial de máquinas eléctricas". Tomo I . Barcelona: Marcombo B.E.: 236-276.

Corrales Martín, J. (1976). "Cálculo industrial de máquinas eléctricas". Tomo II. Barcelona: Marcombo B.E.: 380-430.

Freile Mora, J. (2008). "Máquinas Eléctricas". Madrid: Mc Graw Hill, 259-334.

Gallo, O; Ferreyra, D. (2021). "Obtención de curvas de motores de inducción usando un circuito equivalente de parámetros variables". Repositorio Institucional de la UTN. Disponible en: <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/6170>

González Duque, R. (2019). "Python para todos". Disponible en: <http://mundogeek.net/tutorial-python/>

Jabbar, M.A.; Yeo, S.W. (2000). "A new architecture of design software for electric motors". IEEE Xplore Digital Library. Disponible en: <http://portal.bibliotecas.utn.edu.ar/proxy/https://ieeexplore.ieee.org/document/849730>

Juha Pyrhönen, J. et al. , (2008). "Design of Rotating Electrical Machines". UK: John Wiley & Sons, Ltd. : 225-280.

Liwschitz-Garik, M; Whipple, C. (1974). "Máquinas de corriente alterna". México: Editorial CECSA: 177-209.

Norma IEC 60034-2-1. (2014). Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles). Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0053468>
Python Software Foundation

Norma IRAM 62405. (2022) Etiquetado de eficiencia energética para motores de inducción trifásicos. Disponible en: <https://www.iram.org.ar/busqueda-avanzada-de-normas-iram/>

Python Software Foundation. (2021). "Documentation". Disponible en: <https://www.python.org/>

The Python Package Index. (2022). "Induction Motors". Disponible en: <https://pypi.org/search/?q=Induction+Motors>

Sale A, A. et al. (2018). "Optimization of Induction Motor Equivalent Circuit Parameter Estimation Based on Manufacturer's Data". Energies, 2018, 11, 7, 1. Disponible en: <http://portal.bibliotecas.utn.edu.ar/proxy/https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v11y2018i7p1792-d156869.html>

Wengerkievicz C. et al. (2017). "Estimation of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters from Manufacturer Catalog Data". Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. March 2017 16(1): 90-107. Disponible en: http://portal.bibliotecas.utn.edu.ar/proxy/http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-10742017000100090&lng=en&tlng=en