



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i5.1602>

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de revisión

Análisis del funcionamiento de la máquina asíncrona mediante el uso del software MATLAB/Simulink

Analysis of the operation of the asynchronous machine using the MATLAB / Simulink software

Análise do funcionamento da máquina assíncrona utilizando o software MATLAB / Simulink

David Alejandro Anchundia-Bailón ^I

davidalejandro3013@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6352-4555>

Jorge Javier Sánchez-Acosta ^{II}

jorgjsa@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3772-3814>

Correspondencia: davidalejandro3013@gmail.com

***Recibido:** 9 de noviembre de 2020 ***Aceptado:** 16 de noviembre de 2020 *** Publicado:** 16 de diciembre de 2020

- I. Ingeniero Eléctrico, Estudiante Investigador de Posgrado de la Maestría de Investigación en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Ingeniero Eléctrico, Estudiante Investigador de Posgrado de la Maestría de Investigación en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

Resumen

En las últimas décadas las máquinas asíncronas se han convertido cada vez más en un elemento importante para la industria en general, que se hace imprescindible para la población. Este artículo se trata del análisis del funcionamiento de una máquina asíncrona mediante el uso del software Matlab/Simulink. El modelo se tomó a partir de submodelos simples. Las ecuaciones establecidas demuestran el comportamiento en estado estable de máquinas asíncronas. Cuando el modelo es altamente no lineal, se usa la transformación de voltaje trifásico con dos ejes para simplificar muchas ecuaciones que reaccionan al comportamiento físico de la máquina de inducción. Por medio del uso de la herramienta Simulink, se ha desarrollado el comportamiento dinámico de la máquina asíncrona obteniendo una visión general del funcionamiento de la máquina. Los resultados obtenidos demuestran las partes eléctricas y mecánicas de la máquina de inducción se implementaron mediante ecuaciones matemáticas detalladas que se explican. El modelo dinámico que se muestra en este artículo ha mostrado resultados de simulación muy precisos. Así, el modelo desarrollado permitió el control de pérdidas de la máquina asíncrona y también el comportamiento de ella. Por último, los resultados de la simulación proporcionan información sobre el orden de la máquina asíncrona.

Palabras claves: Máquina; asíncrona; inducción; funcionamiento; software.

Abstract

In recent decades asynchronous machines have become increasingly an important element for industry in general, which is essential for the population. This article deals with the analysis of the operation of an asynchronous machine using Matlab / Simulink software. The model was taken from simple sub-models. The established equations demonstrate the steady state behavior of asynchronous machines. When the model is highly non-linear, the two-axis three-phase voltage transformation is used to simplify many equations that react to the physical behavior of the induction machine. Through the use of the Simulink tool, the dynamic behavior of the asynchronous machine has been developed, obtaining an overview of the operation of the machine. The results obtained demonstrate the electrical and mechanical parts of the induction machine were implemented using detailed mathematical equations that are explained. The dynamic model shown in this article has shown very accurate simulation results. Thus, the model developed allowed the

loss control of the asynchronous machine and also its behavior. Finally, the simulation results provide information about the order of the asynchronous machine.

Keywords: Machine; asynchronous; induction; operation; software.

Resumo

Nas últimas décadas, as máquinas assíncronas têm se tornado cada vez mais um elemento importante para a indústria em geral, o que é essencial para a população. Este artigo trata da análise do funcionamento de uma máquina assíncrona utilizando o software Matlab / Simulink. O modelo foi retirado de submodelos simples. As equações estabelecidas demonstram o comportamento em regime permanente de máquinas assíncronas. Quando o modelo é altamente não linear, a transformação de tensão trifásica de dois eixos é usada para simplificar muitas equações que reagem ao comportamento físico da máquina de indução. Através do uso da ferramenta Simulink, o comportamento dinâmico da máquina assíncrona foi desenvolvido, obtendo-se uma visão geral do funcionamento da máquina. Os resultados obtidos demonstram que as partes elétricas e mecânicas da máquina de indução foram implementadas por meio de equações matemáticas detalhadas que são explicadas. O modelo dinâmico mostrado neste artigo mostrou resultados de simulação muito precisos. Assim, o modelo desenvolvido permitiu o controle de perdas da máquina assíncrona e também seu comportamento. Finalmente, os resultados da simulação fornecem informações sobre a ordem da máquina assíncrona.

Palavras-chave: Máquina; assíncrona; indução; operação; software.

Introducción

En las últimas décadas, las máquinas asíncronas son muy utilizadas en aplicaciones de la industria general. La utilización de software para los modelados de máquinas asíncronas ha atraído la atención de los investigadores para estudiar variados modos de funcionamiento tanto en estado estacionario como dinámico. De acuerdo a Lahouasnia et al. (2020), “la máquina asíncrona es reconocida por sus cualidades de robustez, confiabilidad, bajo costo de construcción y eficiencia” (p.1). Así mismo, Godoy y Farret (2015) indican que “con los altos costos energéticos actuales, el uso racional y la conservación implementados por muchos procesos de recuperación de calor y otras formas similares se convirtió en objetivos importantes” (p.31).

Para analizar el funcionamiento de la máquina asíncrona es importante definirla, primeramente, y es una máquina de inducción de corriente alterna, en la que la velocidad del rotor es menor a la del campo magnético del estator. La corriente del rotor se debe a una fuerza electromotriz inducida por la acción del flujo del arrollamiento del estator. A su vez se le denominan máquinas asíncronas ya que la velocidad de giro del rotor no es la de sincronismo de una frecuencia de la red. Mekrini y Bri (2016), indica a su vez que esta máquina también se denomina motor asíncrono porque *“funciona a una velocidad menor que la síncrona, el campo magnético giratorio que se produce en el estator generará un flujo en el rotor que hará que el rotor gire”* (p.1385). Este mismo autor expresa que *“los motores de inducción constituyen una clase teóricamente interesante y prácticamente importante de sistemas”* (1385).

La discrepancia de la máquina asíncrona con los otros tipos de máquinas es que no existe corriente conducida a uno de los arrollamientos. La corriente circula por uno de los devanados ubicados en el rotor, se debe a la fuerza electromotriz, inducida por la acción del flujo del otro, y por esta razón se denomina máquinas de inducción. Por su lado, Princy (2020) enuncia que *“Las máquinas de inducción son el tipo de motor más utilizado hasta ahora en entornos residenciales, comerciales e industriales”* (p.1).

Por otra parte, Fraile (2008), expresa que *“el principio de funcionamiento de las máquinas asíncrona se basa en el concepto de campo electromagnético giratorio”* (p.287). Los motores de una máquina asíncrona tienen una construcción simple y a su vez robusta, como es el caso del rotor en jaula de ardilla también conocido como cortocircuito. Otro tipo de estas máquinas asíncronas está el rotor devanado o con anillos.

La mayor limitación de estas máquinas es la regulación de la velocidad, sin embargo, ya se está logrando esta restricción con el uso de elementos electrónicos. Y su mayor ventaja es que tiene la propiedad de ser reversible, esto se refiere a que puede desempeñarse como motor y a su vez como generador. Su principio de funcionamiento es el de inducción mutua de Faraday, esta se debe que al emplear corriente alterna trifásica a las bobinas inductoras, causa un campo rotante o campo magnético giratorio, donde la frecuencia debe ser igual a la de la corriente alterna con la que alimenta al motor.

Las máquinas de inducción están teniendo un auge en estos últimos años debido a la creciente evolución de las energías renovables, comienza a resultar significativa la generación mediante

máquinas asíncronas así lo afirman Kral & Gono (2017). Dentro de la clasificación de los motores de inducción, estos son alimentados directamente de la red eléctrica, sin embargo, ya hay un conjunto significativo de ellos que son alimentados mediante variadores de frecuencia, con la finalidad de variar la velocidad de funcionamiento. Estos motores asíncronos son utilizados frecuentemente en compresores, ventiladores, bombas, transportes, vehículos híbridos o eléctricos, máquinas, herramientas, lavadores, entre otros. También tiene las desventajas como las enumera Crowder (2020), “altas pérdidas, bajo factor de potencia, baja eficiencia y bajo uso del inversor. Además, su peso y volumen son mayores para la misma potencia nominal que los motores PM” (p.1).

En la actualidad, estas máquinas son controladas y reparadas a través de programas o software, incluso existen simuladores de funcionamiento para aparentar sistemas asíncronos. Esto se hace en el presente a través de herramientas informáticas de simulación, en la cual se analiza dinámicamente las diversas posibilidades de funcionamiento de estas máquinas de inducción frente a la variación de entrada sin tener que realizar ningún tipo de ensayo en costosos laboratorios de alta tecnología que generalmente son dificultosos implementar en la mayoría de los casos.

Una alternativa efectiva y moderna es utilizar un modelo matemático para la predicción de variaciones de parámetros en funcionamiento dinámico de la máquina, además de realizar ensayos destructivos ficticios. Permitiendo realizar estudios sobre el funcionamiento de estas máquinas sin tener la necesidad de construir numerosas réplicas de ella. A través del modelo matemático del motor de inducción es posible hacer diversas simulaciones de funcionamiento del mismo a partir de variables de entrada (tensiones y corrientes). Las variaciones de las variables de entrada se transmiten sobre variaciones de variables de salida. Estudiando a estas máquinas asíncronas con maniobras reales.

En este apartado se analiza el funcionamiento de la máquina asíncrona mediante el uso del software de simulación MatLab, utilizando la extensión de simulación denominada Simulink. El Simulink es un toolbox especial de MatLab, conociéndose un toolbox como un entorno de desarrollo que accede introducir la programación de computadores sin competencias informáticas. Una ventaja de Simulink sobre los simuladores de circuitos explican Ozpineci1 y Tolber (2009) “es la facilidad para modelar los transitorios de las máquinas eléctricas y accionamientos e incluir controles de

accionamiento en la simulación” (p.728). El MatLab se usa para simular un comportamiento de los sistemas dinámicos de máquinas asíncronas.

A través de un entorno gráfico se puede hacer modelos a simular. Puede simular sistemas lineales y no lineales, como modelos en tiempo discreto y continuo o sistemas híbridos. De acuerdo a Mena (2013) el MatLab es “un ambiente de cómputo, de alta ejecución numérica y de visualización, integra el análisis numérico, cálculo de matrices, procesamiento de señales, diseño de sistema de potencia, mapeo y tratamiento de imágenes, instrumentación y adquisición de datos” (p.11).

Ansari y Deshpande (2010) define a Simulink como “un potente paquete de software para el estudio de sistemas dinámicos y no lineales. Usando Simulink, el modelo de simulación se puede construir sistemáticamente a partir de submodelos simples” (p.1260). El modelo de máquina de inducción desarrollado puede utilizarse solo, como de partida directo en línea presentado, o puede incorporarse en un sistema de accionamiento de motor avanzado. Estos autores opinan que Simulink en poco tiempo se convertirá en una herramienta indispensable para la investigación de accionamientos de máquinas eléctricas.

Son muchas las ventajas el simular con estos softwares antes mencionados y es que es un ambiente sencillo de utilizar, los problemas y sus soluciones son expresadas como están escritas, es una programación que permite resolver problemas en una fracción de tiempo.

La máquina asíncrona cuando trabaja como motor, tiene una elevada corriente de arranque, así lo indican Sadeghkhani & Sadoughi (2014), la cual genera altos costos de infraestructura eléctrica, que requiere protecciones y conductores costosos, por lo que el análisis de funcionamiento del motor de inducción síncrono se puede hacer de acuerdo a las variables que rigen su comportamiento, lo que permitiría desarrollar método de control y disminución de la elevada corriente de arranque.

Es de vital importancia recalcar que estas simulaciones son utilizadas en muchos estudios como una aproximación a condiciones reales. Son muchas las ventajas que ofrece este simulador, el cual se va a analizar el funcionamiento de la máquina asíncrona a través del uso de este software.

Metodología, Materiales y Métodos

La metodología a realizar en este artículo científico es básicamente documental y desk reserch, en el que se analiza la investigación de Pratyusha Biswas Deb y Sudhangshu Sarkar (2016),

denominada “Dynamic Model Analysis of Three Phase Induction Motor Using Matlab/Simulink“, donde ellos realizan un análisis de modelo dinámico de tres fases de Motor de inducción con Matlab/Simulink, cuyos autores reprodujeron el modelo dinámico de una máquina de inducción trifásica derivada de una ecuación matemática fundamentada en el programa Simulink de MatLab, estudiando su rendimiento transitorio, así como la respuesta estable de la máquina asíncrona.

Estos autores utilizaron un enfoque generalizado dinámico de simulación de la máquina de inducción trifásica, éste método es universalmente aplicado para simular un comportamiento dinámico de un sistema no lineal y variable en el tiempo. La simulación de la máquina de inducción trifásica tiene variaciones en el momento inercia, sin embargo, el rendimiento transitorio de la máquina eléctrica es enormemente afectada por cambios imprevistos en la velocidad de funcionamiento.

Para proseguir con el artículo es indispensable detallar los aspectos constructivos de una máquina asíncrona. La máquina asíncrona o de inducción al igual que cualquier otro dispositivo de conversión electromecánica de la energía de tipo rotativo, de acuerdo Fraile (2008) “está formada por un estátor y un rotor, donde el estátor se coloca normalmente el inductor, alimentado por una red mono o trifásica” (p.289). El rotor es el inducido, y las corrientes que circulan por él aparecen como consecuencia de la interacción con el flujo del estátor. Dependiendo del tipo de rotor, estas máquinas se clasifican en: rotor en jaula de ardilla o en cortocircuito y rotor devanado o con anillos. Este tipo de máquinas están integradas, fundamentalmente, por dos estructuras cilíndricas concéntricas: el estator estacionario y el rotor giratorio, explica Mantilla (2018). Ésta “está situada en su interior, separadas por una corona cilíndrica de aire muy estrecha (o entrehierro) que permite el movimiento del rotor y evita el contacto entre ambos cuerpos, cuyo valor depende de la potencia del motor” (p.7).

El Grupo MathWorks (2020), explica que “el bloque de máquina asíncrona implementa una máquina asíncrona trifásica (rotor bobinado, jaula de ardilla simple o jaula de ardilla doble). Funciona en modo generador o motor” (p.1). Así que el modo de funcionamiento viene determinado por el signo del par mecánico: Si T_m es positivo, la máquina actúa como motor y si T_m es negativo, la máquina actúa como generador. Este mismo autor indica que la parte eléctrica de la máquina asíncrona está “representada por un modelo de espacio de estados de cuarto orden (o sexto orden para la máquina de doble jaula de ardilla), y la parte mecánica por un sistema de

segundo orden.” (p.1). Todas las variables y parámetros eléctricos se refieren al estator, indicado por los signos primos en las siguientes ecuaciones de la máquina.

Por otro lado, el grupo MathWorks (2020) también expresan que “el modelado de motores y la simulación de motores lo ayudan a realizar tareas que van desde el análisis de rendimiento a nivel del sistema hasta el diseño detallado de la transmisión de motores eléctricos” (p.1), es decir, que cada labor requiere que se capturen diversos efectos físicos y en la simulación del motor. Los investigadores pueden importar datos de análisis de elementos finitos (AEF) para optimizar los parámetros de diseño de variadores y minimizar las pérdidas. Este mismo autor indica que a menudo “los ingenieros de sistemas a menudo confían en modelos de motores más abstractos que equilibran la potencia mecánica y eléctrica para acelerar la simulación del motor y analizar el rendimiento a nivel del sistema de un variador de motor” (p.1).

Por su parte, Bensalem y Naceur (2016) indican que “el modelado puede proporcionar información razonable sobre el rendimiento a nivel del sistema, pero no puede identificar e investigar ciertos efectos transitorios y armónicos, conmutación y aumento de pérdidas de hierro, etc., que son necesario para la optimización del accionamiento” (p.1101).

Análisis de los resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por Biswas P. y Sarkar, S. (2016), con su modelo dinámico de tres fases de Motor de inducción, en el cual se muestra la ecuación matemática del motor de inducción obtenida, para ello, se describe matemáticamente una máquina de jaula de ardilla simétrica ideal. El motor de inducción tipo jaula en el marco de referencia del rotor viene dado por cómo sigue: Los devanados del estator son idénticos, devanados distribuidos sinusoidales, desplazados 120° , con un número de vueltas equivalentes y la resistencia R_s y los devanados del rotor también se considerarán como tres devanados distribuidos sinusoidales idénticos, desplazados 120° , con N_r espiras equivalentes y resistencia r_r . La dirección positiva del eje magnético de cada devanado es mostrada en la ecuación 1. Es importante señalar que la dirección positiva de los ejes magnéticos de los devanados del estator coincide con la dirección de fas, f_{bs} y f_{cs} según lo especificado por las ecuaciones de transformación. Las ecuaciones de voltaje en variables de máquina pueden expresarse como se ve en la ecuación 1:

$$\begin{aligned} V_{abc} &= r_s i_{abc} + p \lambda_{abc} \\ V_{abcr} &= r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 1. Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

Para un sistema magnéticamente lineal, los enlaces de flujo se pueden expresar como se muestra en la ecuación 2:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2. Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

Las ecuaciones de voltaje expresadas en términos de variables de máquina, referido a los devanados del estator puede escribirse como se presentan en la ecuación 3:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & \omega_r L_s & L_m p & \omega_r L_m \\ -\omega_r L_s & R_s + L_s p & -\omega_r L_m & L_m p \\ L_m p & 0 & R_r + L_r p & 0 \\ 0 & L_m p & 0 & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 3. Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

El par y la velocidad del rotor están relacionados por la ecuación 4:

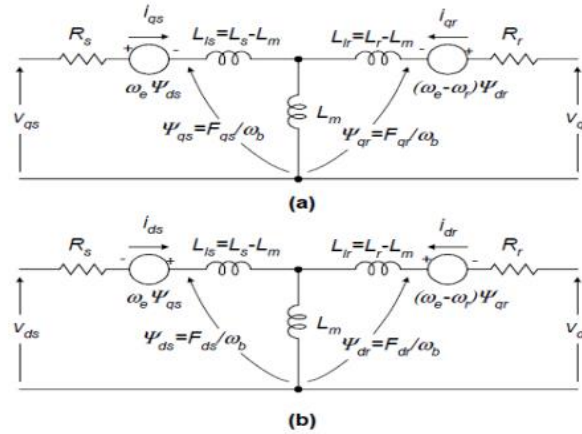
$$T_e = J \left(\frac{2}{P} \right) p \omega_r + T_L \quad \text{Ecuación 4. Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

En el análisis de las máquinas de inducción también es mejor transformar las variables asociadas con el rotor simétrico devanados al marco de referencia arbitrario. Un cambio de variables que formula una transformación de las variables trifásicas de los circuitos del rotor al marco de referencia arbitrario se puede visualizar en la ecuación 5:

$$f'_{qd0r} = K_r f'_{abcr} \quad \text{Ecuación 5. Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

De esta misma manera Biswas P. y Sarkar, S. (2016), con su modelo dinámico de tres fases de Motor de inducción analizan un modelo dinámico de motor de inducción y para este estudio de simulación de un motor de inducción trifásico, para ello MatLab/Simulink adopta un modelo basado para comparar el rendimiento transitorio del motor de inducción trifásico, incluido el flujo principal saturación del sistema conectado al motor. La máquina de inducción d-q, o el circuito dinámico equivalente se muestra en la figura 1:

Figura 1: Circuito equivalente d-q de una máquina de inducción.



Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Según este modelo, la ecuación de modelado en forma de enlace de flujo son las siguientes:

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b [v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{mq} + F_{qs})] \quad \text{Ecuación 6. Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b [v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{md} + F_{ds})] \quad \text{Ecuación 7. Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b [v_{dr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{md} - F_{dr})] \quad \text{Ecuación 8. Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b [v_{qr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{mq} - F_{qr})] \quad \text{Ecuación 9. Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

Para una máquina de inducción de jaula de ardilla como en el caso de este análisis, V_{qr} y V_{dr} se establecen en cero. Las ecuaciones de modelado de un motor de inducción de jaula de ardilla en el espacio de estados se convierten como se aprecia en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dF_{\varphi}}{dt} = \omega_b [v_{\varphi} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{\psi} + \frac{R_s}{X_b} (\frac{X_{ml}^*}{X_b} F_{\varphi} + (\frac{X_{ml}^*}{X_b} - 1) F_{\psi})] \quad \text{Ecuación 10. Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

$$\frac{dF_{\psi}}{dt} = \omega_b [v_{\psi} + \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{\varphi} + \frac{R_s}{X_b} (\frac{X_{ml}^*}{X_b} F_{\psi} + (\frac{X_{ml}^*}{X_b} - 1) F_{\varphi})] \quad \text{Ecuación 11. Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

$$\frac{dF_{\varphi}}{dt} = \omega_b [-\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{\psi} + \frac{R_r}{X_b} (\frac{X_{ml}^*}{X_b} F_{\varphi} + (\frac{X_{ml}^*}{X_b} - 1) F_{\psi})] \quad \text{Ecuación 12. Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

$$\frac{dF_{\psi}}{dt} = \omega_b [\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{\varphi} + \frac{R_r}{X_b} (\frac{X_{ml}^*}{X_b} F_{\psi} + (\frac{X_{ml}^*}{X_b} - 1) F_{\varphi})] \quad \text{Ecuación 13. Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

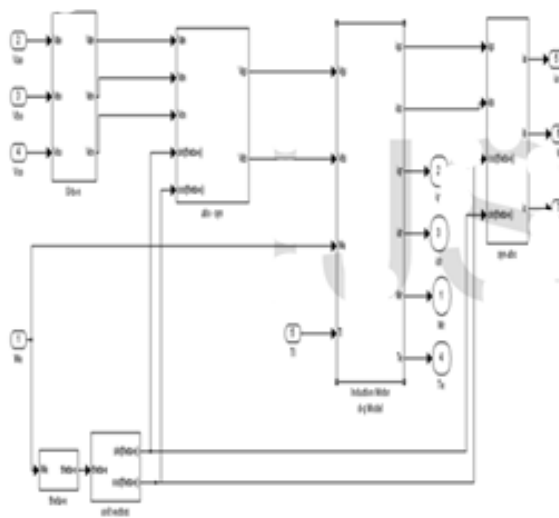
$$\frac{d\omega_e}{dt} = (T_e - T_l) \frac{p}{2J} \quad \text{Ecuación 14. Biswas P. y Sarkar, S. (2016).}$$

Para la implementación del modelo con Simulink, el modelo de simulación se puede construir sistemáticamente a partir de submodelos simples. El modelo se construye sistemáticamente mediante funciones básicas: bloques. Se puede usar el modelo de motor de inducción desarrollado

en este software y a su vez se puede incorporar en un motor avanzado sistema de accionamiento. Un conjunto de ecuaciones diferenciales de máquina puede así ser modelado por la interconexión de la función apropiada de bloques, cada uno de los cuales realiza una operación matemática específica. Los esfuerzos de programación se reducen drásticamente y la depuración de errores es fácil.

Dado que Simulink es un programador de operación de modelos, el modelo de simulación se puede desarrollar fácilmente mediante la adición de novedosos submodelos para crear para varias funciones de control. Como submodelo la máquina de inducción se podrá incorporar en un sistema de accionamiento de motor eléctrico completo. Este modelo completo de Simulink que dependen del modelo matemático d-q se muestra en la figura 2:

Figura 2: Modelo MATLAB Simulink de motor de inducción.



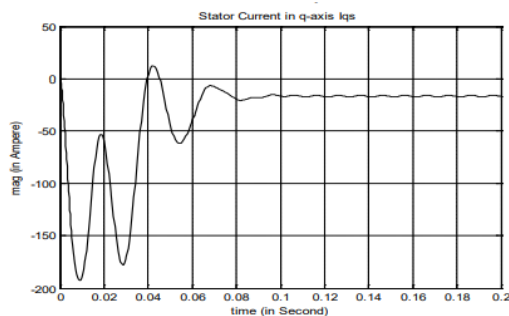
Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Un modelo dinámico generalizado del motor de inducción consta de una porción eléctrica para implementar el trifásico a dos ejes (3/2) para la transformación del estator vs voltaje y cálculo de corriente, para calcular el par electromagnético desarrollado y un submodelo mecánico para obtener la velocidad angular del rotor. En ingeniería eléctrica, la transformación dq0 es una transformación matemática utilizado para simplificar el análisis de circuito trifásico. En este caso de circuitos trifásicos balanceados, las aplicaciones de la transformada dq0 reducen las tres

cantidades de CA a 2 cantidades de CC. Entonces se puede simplificar llevado a cabo en estas cantidades de CC imaginarias, antes de realizar la transformada inversa para recuperar los resultados reales de corriente alterna trifásica.

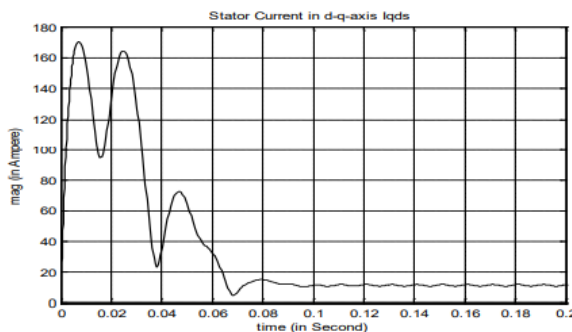
Por otro lado, se discute en detalle el análisis de desempeño de tres fases de la máquina de inducción. El comportamiento de la corriente de salida del estator por fase, la corriente del estator del eje d-q, la corriente del rotor del eje d-q, las características de velocidad y par, además se explican brevemente con respecto al tiempo. El modelo de inducción de MatLab/Simulink implementado en detalle se emplea para el análisis de rendimiento. La simulación del análisis de rendimiento se realiza utilizando el solucionador ode23tb (stiff / TR-BDF2), durante un tiempo total de 0,2 seg. y la tolerancia relativa es $1e-3$. A partir de todas las curvas, la naturaleza del motor de inducción implementado se explica tanto en estado transitorio como en estado estable. Estos comportamientos se pueden observar en la figura 3 y 4 respectivamente.

Figura 3: Corriente del estator en el eje q versus curvas de tiempo (iqs versus tiempo).



Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Figura 4: Corriente del estator en el eje dq frente a las curvas de tiempo (iqds vs. hora).



Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

El valor pico de la corriente del estator en el eje d es mayor que el valor de la corriente del estator del eje q-d resultante. Todos valores absolutos. Los picos se calculan a partir de la condición transitoria de estas corrientes, mientras que, a partir de esta condición de estado estable, se calculan los valores promedio de las corrientes del estator y del rotor. Como se muestra en la tabla 1 y 2.

Tabla 1. Valor de pico absoluto y valor medio de la corriente del estator.

Absolute Peak value and Average Value of Stator Current

Type	Stator Current (I_s) (amp)	Stator Current (I_b) (amp)	Stator Current (I_c) (amp)	Stator Current in q-axis (I_{qs}) (amp)	Stator Current in d-axis (I_{ds}) (amp)	Stator Current in q-d axis (I_{qds}) (amp)
Average Value	0.003427	0.004096	0.0004784	-16.19	3.563	11.06
Absolute Peak Value	214.5096	218.3873	255.0835	192.6226	214.4895	170.1812

Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

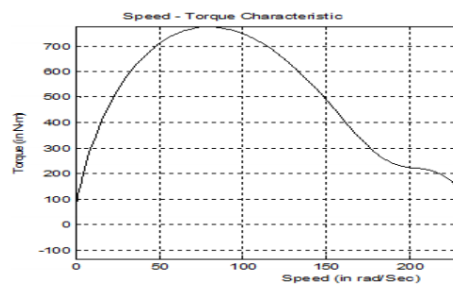
Tabla 2. Valor de pico absoluto y valor medio de la corriente del rotor en el eje d-q.

Absolute Peak value and Average Value of rotor current in d-q axis:

Type	Rotor Current in q-axis (I_{qr}) (amp)	Rotor Current in d-axis (I_{dr}) (amp)	Rotor Current in q-d axis (I_{qdr}) (amp)
Average Value	0.0984	2.913	1.983
Absolute Peak Value	173.33	215	160.4594

Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Figura 5: Características Velocidad – Esfuerzo de torsión.



Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Resultados y discusión

Para analizar el rendimiento del motor de inducción con Matlab/Simulink, el modelo se simula cuando se aplica voltaje trifásico sinusoidal puro. En esta investigación, las respuestas dinámicas de la velocidad y de las corrientes del estator para el proceso de arranque con un esfuerzo de torsión constante aplicado y un flujo de comando constante se exponen en los resultados de la simulación de funcionamiento. Los valores máximos y los valores medios de velocidad y par se muestran en la figura 5. De acuerdo a los resultados, la velocidad angular del rotor es un cuarto ($\frac{1}{4}$) de la velocidad angular nominal. De la misma manera, se explica la comparación entre el modelo implementado en Simulink y el modelo Matlab/Simulink.

El modelo realizado en Simulink representa que se implementó en base a una ecuación matemática detallada, como se indicó anteriormente. Por otro lado, el modelo de demostración de Matlab/Simulink significa que ya existe en el software. Para esta comparación de tres fases, las máquinas asíncronas se deben tomar los mismos parámetros para ambos modelos, como se observa en la tabla 3. La tensión de alimentación fundamental se aplica a ambos modelos para esta comparación.

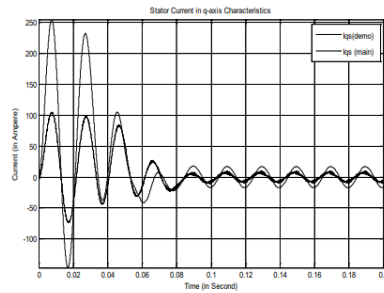
Tabla 3: Parámetros del motor de inducción trifásico.

Motor Parameters	Motor 1
Rated Voltage (V)	220
Stator resistance (Ω)	0.435
Rotor resistance (Ω)	0.816
Stator leakage inductance (Ω)	0.754
Rotor leakage inductance (Ω)	0.754
Mutual inductance (Ω)	26.13
Load torque (N-m)	11.9
Moment of inertia ($\text{Kg}\cdot\text{m}^2$)	0.089

Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

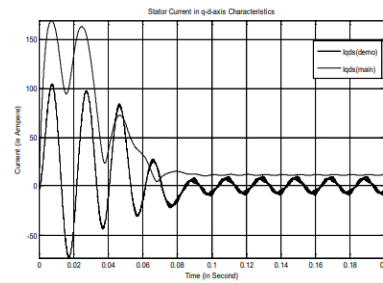
El modelo Simulink de Matlab de una máquina asíncrona trifásica se toma del software MatLab/Simulink. Después de obtener el modelo, se colocan los parámetros que ya están usados para el modelo implementado. Estos datos detallados de comparación se muestran en las siguientes figuras (6, 7, 8, 9 y 10). Aquí la línea firme denota el modelo Simulink implementado por Matlab, mientras que la línea de puntos denota el modelo de demostración Matlab/Simulink.

Figura 6: Corriente del estator en el eje q versus curvas de tiempo (i_{qs} versus tiempo).



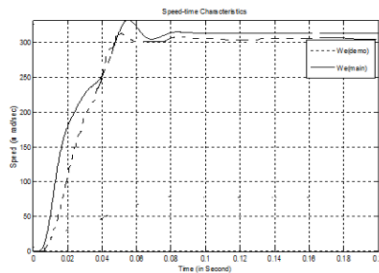
Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Figura 7: Corriente del estator en el eje dq frente a las curvas de tiempo (i_{qds} frente al tiempo).



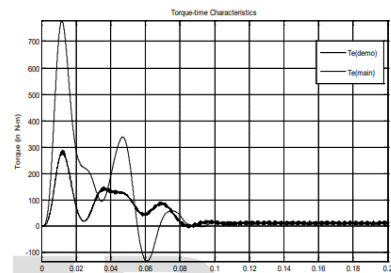
Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Figura 8: Características Esfuerzo de torsión.



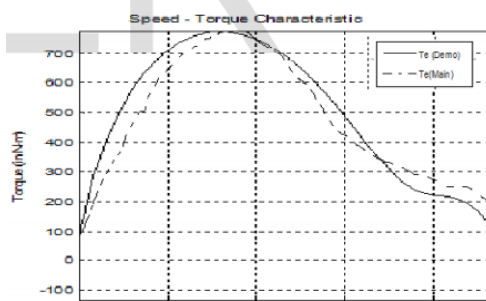
Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Figura 9: Características de velocidad.



Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Figura 10: Características velocidad – Esfuerzo de torsión.



Fuente: Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Conclusiones

En esta investigación de índole documental, se propuso un enfoque de simulación para analizar el comportamiento transitorio, así como el comportamiento en estado estable de una máquina de inducción trifásico de acuerdo al estudio realizado Biswas P. y Sarkar, S. (2016).

Las partes eléctricas y mecánicas de la máquina de inducción se implementaron mediante ecuaciones matemáticas detalladas que se explican detalladamente. El modelo dinámico que se muestra en este artículo ha mostrado resultados de simulación muy precisos. La principal desventaja de este modelo de implementación de la máquina de inducción, es que el valor de la velocidad angular del rotor es $\frac{1}{4}$ de la velocidad angular nominal del rotor real.

Para investigaciones futuras de la simulación del modelo de motor de inducción, se debería tomar en cuenta el efecto de la saturación del flujo en el lado de la oferta y el par de carga variable y coeficiente de fricción.

Referencias

1. Ansari, A. y Deshpande, D. (2010). Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink. <https://acortar.link/dq30w>
2. Bensalem, Y. y Naceur, M. (2016). Modeling and Simulation of Induction Motor based on Finite Element Analysis. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)* Vol. 7, No. 4, December 2016, pp. 1100~1109 ISSN: 2088-8694, DOI: 10.11591/ijpeds.v7i4.pp1100-1109. <https://acortar.link/mXSww>
3. Biswas, P. y Sarkar, S. (2016). Dynamic Model Analysis of Three Phase Induction Motor Using Matlab/Simulink. <https://acortar.link/7Kkg3>
4. CCTI Electricidad & Automatización (2020, 15 de agosto). El motor eléctrico asíncrono o de inducción. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=JQPjnCNwpg4>
5. Crowder (2020). Induction motors. <https://acortar.link/ffkaT>
6. Fraile, J. (2008). Maquinas eléctricas (6a. ed.). Recuperado de: https://www.academia.edu/42010234/Maquinas_electricas_6a_ed_Fraile_Mora_Jesus
7. Godoy y Farret (2015). Modeling and Analisis with Induction Generators. Version Date: 20141007 International Standard Book Number-13: 978-1-4822-4469-4 (eBook – PDF).
8. Hrabovcová, V.; Rafajdus, P. and Makyš, P. (2020). Analysis of Electrical Machines. <https://acortar.link/rw94y>
9. Ingeniería Eléctrica y Computación (2020, 14 de agosto). Clase 1 LAS MÁQUINAS DE CA Curso Máquinas Eléctricas | 2019. <https://acortar.link/4Rs6B>
10. Kral, M. y Gono, R.(2017). Dynamic Model of Asynchronous Machine. <https://acortar.link/oa9dB>

11. Lahouasnia, N.; Faouzi, M. Drici, D. and Saad, S. (2020). Load Unbalance Detection Improvement in Three-Phase Induction Machine Based on Current Space Vector Analysis. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42835-020-00403-y>
12. Mantilla, H. (2018). Diseño y análisis paramétrico de un motor de inducción trifásico de baja tensión con software jmag. <https://acortar.link/YKp2w>
13. MathWorks (2020, 10 de agosto). Motor Modeling and Simulation. <https://acortar.link/iOj3Y>
14. MathWorks (2020, 12 de agosto). Asynchronous Machine. <https://acortar.link/OyCit>
15. Mekrini, Z. and Bri, S. (2016). A Modular Approach and Simulation of an Asynchronous Machine. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 6, No. 4, August 2016, pp. 1385~1394 ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v6i4.9646 □ 1385. <https://acortar.link/FjNLq>
16. Mena, M. (2013). Estudio y Análisis de estabilidad de las máquinas de inducción, aplicando simulación en MatLab. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4260/1/UPS-CT002604.pdf>
17. Ozpinecil, B. and Tolber, L. (2009). Simulink Implementation of Induction Machine Model. <https://acortar.link/t3a1Q>
18. Paul C. Krause, O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff. 2004. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. IEEE Press Series on Power Engineering, John Wiley and Sons Inc. Publication.
19. Princy, A. (2020). Induction Motors: Main Types and Different Applications. <https://acortar.link/m7giq>
20. Sadeghkhan, I. and Sadoughi, A. (2014). Evaluation of Starting Current of Induction Motors Using Artificial Neural Network. <https://acortar.link/xn2HS>