

# Control of the rotational speed of an induction motor by means of an inverter applying vector control

Gerardo Mino-Aguilar\* Jose J. Mendoza-Fabian\*  
G. A. Munoz-Hernandez\* Victor R. Gonzalez-Diaz\*

\* Faculty of Electronics, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) Av. San Claudio y 18 sur Ciudad Universitaria Puebla Pue, México. (e-mail: see <http://www.ece.buap.mx>)

**Abstract:** This paper presents the simulation in Simulink of the speed control of a three-phase induction motor using vector control technique specifically field oriented control (FOC), which makes use of the feedback of the speed and phase currents of the motor, the control processes this data and generates the pulses that command the activation of the switching devices of the three-phase inverter, which is in charge of supplying the power to the motor to obtain the desired speed. The control block is tuned based on the parameters of a 5 HP motor that is chosen from the simulink library, each of the steps is detailed and the entire process is illustrated to reach the final result. The system is tested to reach two different speeds and the simulation results show how this control works properly controlling the speed of rotation of the motor after having been tuned with the parameters corresponding to the motor model.

*Keywords:* Vector Control, Inverter, Induction Motor, Simulink, Fiel Oriented Control.

## 1. INTRODUCTION

Actualmente existen diferentes ramas de aplicación para los motores de inducción, desde tareas domesticas hasta aplicaciones industriales, y una de las razones por las que este tipo de motores ha ganado preferencia es gracias a los puntos fuertes que los caracterizan como son bajo costo, de construcción simple, robustez, confiabilidad y menor mantenimiento ver Iqbal et al. (2010), Asgari et al. (2014). Y es justamente en aplicaciones industriales donde se requiere el poder controlar la velocidad de giro de los motores para diferentes procesos Umar et al. (2018), es qui donde el control de velocidad se vuelve esencial.

Un método de control vectorial es el control de campo orientado FOC, con este método se logra obtener un comportamiento del motor de inducción cercano al de un motor de corriente directa, esto se logra debido a que en este método se desacopla el par y el flujo magnético del motor de inducción Ponce (2017). Este control se logra implementar por medio de convertidores de potencia como es el caso de los de CD - CA o inversores, en conjunto inductor y motor conforman una herramienta fundamental en diferentes áreas de aplicación, como son el área industrial, la tracción de vehículos eléctricos o el aprovechamiento de energía proveniente de fuentes alternativas Nayak and Rajashekara (2019).

Tomando en consideración la amplia gama de aplicaciones que se encuentran alrededor de un sistema inductor -

motor y de la comunidad creciente que busca iniciarse en este campo del conocimiento este trabajo se presenta como un primer acercamiento planteando la configuración detallada de un control básico aplicado al control de velocidad de un motor de inducción. El trabajo tiene por objetivo servir como guía práctica para la configuración y uso del driver implementado en simulink, que se encuentra en la herramienta de MathWorks de MATLAB y Simulink (2022), el cual emplea la técnica de control vectorial en específico el control por campo orientado (FOC) para el manejo de un inductor trifásico que controla un motor de inducción de 5 HP elegido de la librería de simulink y que proporciona las características del motor que se requieren para el control como son la resistencia del rotor, la inductancia, entre otros. Se toma como punto de partida un esquema de control vectorial FOC como el que se muestra en la Fig. 1, se detalla paso a paso el procedimiento que se sigue para configurar cada uno de los bloques del control para los parámetros del motor seleccionado, se muestran las ecuaciones que describen al control y se muestra el proceso para calcular cada uno de los valores que se requieren.

## 2. BLOQUE DE CONTROL VECTORIAL

Se parte del diagrama en el que se basa la construcción de este sistema control-inductor-motor, el cual se muestra en la Fig. 1. La propuesta se basa en la retroalimentación de la medición de las tres corrientes  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  y la de la

velocidad  $w$ , esta última se compara con la velocidad de referencia ( $w^*$  que es solicitada al usuario) dando como resultado la diferencia entre las dos velocidades, este valor se utiliza para implementar un control de velocidad, el cual es proporcional e integral (PI) y que tiene como objetivo generar el torque de referencia  $T_e^*$ , parámetro que sirve para calcular la corriente de cuadratura de referencia " $i_{qs}^*$ " que posteriormente se emplea para la conversión de las componentes "dq" a "abc".

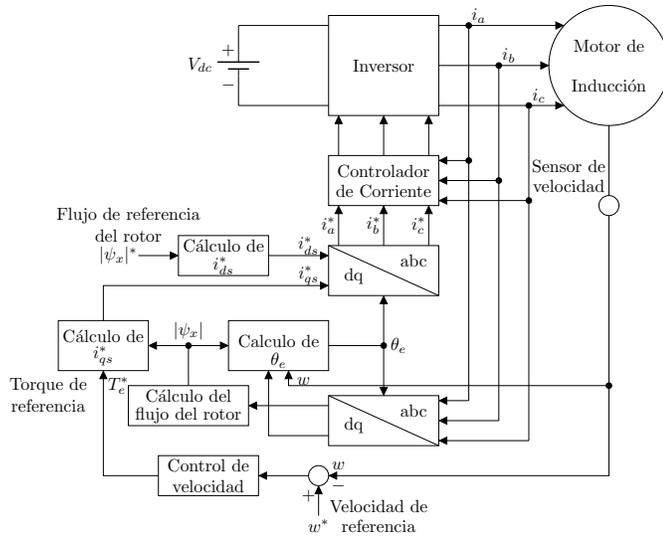


Fig. 1. Diagrama de bloques del control vectorial para controlar la velocidad de giro de un motor de inducción.

Por otra parte, las corrientes sensadas ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ) son empleadas para obtener las corrientes  $i_d$  e  $i_q$  que posteriormente se emplean para el cálculo del flujo del rotor " $\psi_x$ " que a su vez es empleado para el cálculo de  $i_{qs}^*$ . Una vez que se tienen los valores de las corrientes de referencia  $i_{ds}^*$  e  $i_{qs}^*$  el siguiente paso es pasarlas a coordenadas  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ ,  $i_c^*$  pues se emplean para el regulador de corriente que se encarga de procesar las corrientes de referencia y las que son medidas del motor para así generar los pulsos de control que accionan a los IGBT.

Es importante aclarar que el método de control que se emplea en el controlador de la Fig. 1 es el control de campo orientado (FOC), en donde el flujo del rotor puede ser controlado por la corriente directa del estator  $i_{ds}$  y de manera paralela se puede controlar el torque del motor por medio de la corriente de cuadratura  $i_{qs}$ . Por una parte, para calcular  $i_{qs}^*$  se utiliza la ecuación 1.

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{p} \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{T_e^*}{|\psi_r|_{est}} \quad (1)$$

donde

- $L_r$ : Inductancia del rotor.
- $L_m$ : Inductancia mutua.
- $|\psi_r|_{est}$ : Flujo estimado del rotor.

- $p$ : número de polos.

El flujo estimado del rotor se obtiene por medio de la ecuación 2.

$$|\psi_r|_{est} = \frac{L_m \cdot i_{ds}}{1 + \tau_r \cdot s} \quad (2)$$

donde

- $\tau_r = L_r/R_r$ : Constante de tiempo del rotor.
- $R_r$ : Resistencia del rotor.

Otro de los parámetro que se requiere calcular es  $i_{ds}^*$  que se calcula con la ecuación 3.

$$i_{ds}^* = \frac{|\psi_r|}{L_m} \quad (3)$$

donde

- $|\psi_r|$ : Flujo del rotor de referencia.

El control también requiere del cálculo del la posición del flujo del rotor  $\Theta_e$  para la transformación del sistema de coordenadas de "dq" a "abc", para ello se emplea la ecuación 4.

$$\Theta_e = \int (\omega_m + \omega_{sl}) dt \quad (4)$$

donde

- $\omega_m$ : Velocidad del rotor.
- $\omega_{sl}$ : Frecuencia de deslizamiento.

La frecuencia de deslizamiento se calcula a partir de la ecuación 5.

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{|\psi_r|_{est}} \cdot \frac{R_r}{L_r} \cdot i_{qs}^* \quad (5)$$

En la Fig. 2 se muestra el inversor controlado por el bloque de control vectorial que genera los pulsos que determinan la conmutación de los IGBT del inversor. La corriente de salida del inversor alimenta al motor de inducción. El bloque de control vectorial esta elaborado por bloques de simulink que describen las ecuaciones que generan las corrientes de referencia  $i_{ds}^*$  e  $i_{qs}^*$ , esto se muestra en la Fig. 3.

En principio las corrientes sensadas  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  son convertidas a coordenadas "dq" por medio de los bloques de simulink que se muestran en la Fig. 4, donde se emplean bloques de la librería de Simulink. El Bloque "Fcn" tiene la propiedad de evaluar una expresión matemática con el argumento de entrada, en este caso obtiene el coseno y seno de la posición de flujo del rotor  $\Theta_e$ , posteriormente son empleados para el cálculo de  $i_d$  e  $i_q$ .

De manera similar se sigue un proceso con bloques de la librería de Simulink para obtener las corrientes  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ , e  $i_c^*$  a partir de  $i_q^*$  e  $i_d^*$  tal como se muestra en la Fig. 5.

El bloque de se utiliza para calcular el flujo estimado del rotor se muestra en la Fig. 6, el cual describe la ecuación 2, donde el valor de la constante de tiempo se calcula con

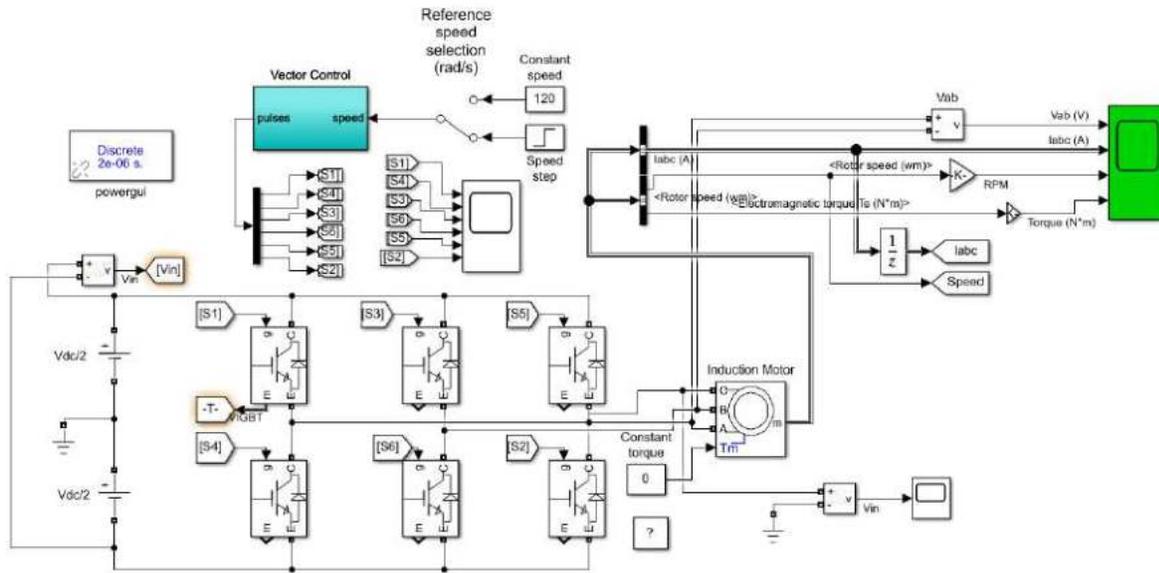


Fig. 2. Diagrama del sistema implementado en simulink .

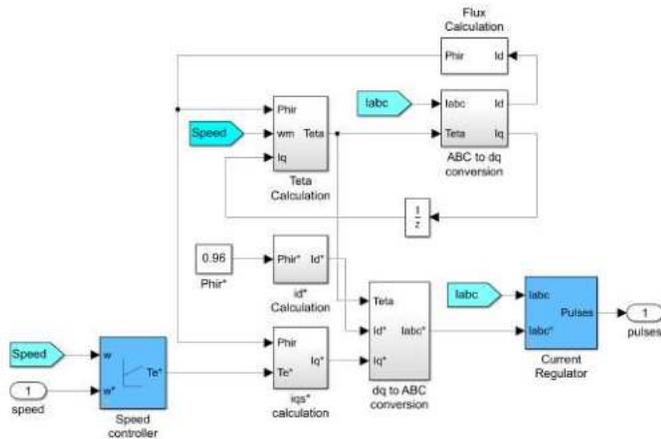


Fig. 3. Bloque del control vectorial aplicado al inversor trifásico.

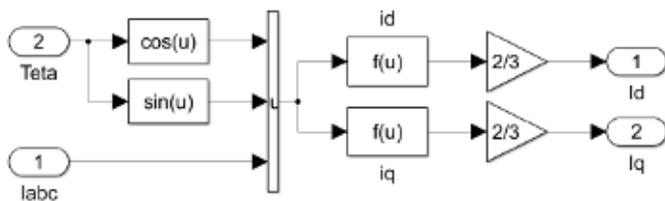


Fig. 4. Bloque de conversión de las corrientes  $i_a^*$ ,  $i_b^*$  a corrientes  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ , e  $i_c^*$ .

la relación  $\tau_r = L_r/R_r$  y a partir de los valores de la Tabla 1 se obtiene  $L_r$  como

$$L_r = Ll_r' + Lm = 5.974mH + 203.7mH = 209.6mH \quad (6)$$

La posición del flujo del rotor  $\Theta_e$  se obtiene utilizando la ecuación 4, que se traduce en bloques de Simulink tal

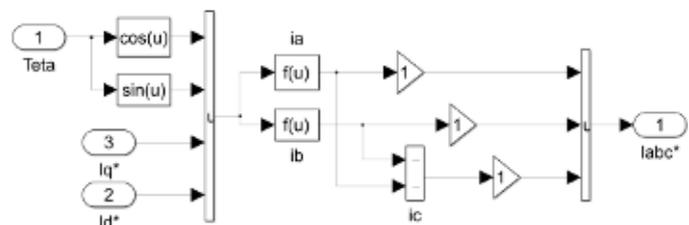


Fig. 5. Bloque de conversión en Simulink de las corrientes  $i_q^*$  e  $i_d^*$  a corrientes  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ , e  $i_c^*$ .

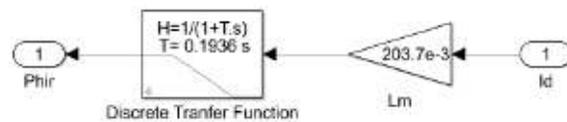


Fig. 6. Bloque empleado para el cálculo del flujo del rotor ( $|\psi_r|_{est}$ ).

como se muestra en la Fig. 7. Cabe destacar que el primer caso es calcular la frecuencia de deslizamiento  $w_{sl}$  que se calcula utilizando la ecuación 5 plasmada en el bloque "Fnc" que se encuentra después del bloque que multiplexa las entradas  $i_q$  y  $|\psi_r|_{est}$  una vez que se tiene este resultado se procede con la suma y posterior integración.

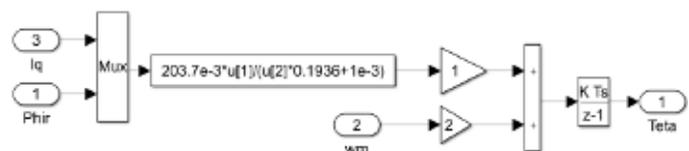


Fig. 7. Bloque empleado para el cálculo de la posición del flujo del rotor ( $\Theta_e$ ).

La corriente de cuadratura del estator ( $i_q^*$ ) se calcula con la ecuación 1, la cual se ejecuta con los bloques de Simulink que se muestran en la Fig. 8.

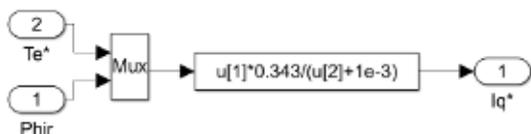


Fig. 8. Bloque empleado para el cálculo la corriente  $i_q^*$ .

La corriente  $i_d^*$  se calcula utilizando la ecuación 3 que se ejecuta con los bloques de simulink que se muestran en la Fig. 9, que consta de un bloque de ganancia que se multiplica con la señal de entrada.

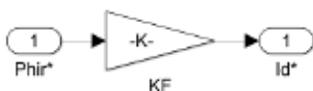


Fig. 9. Bloque empleado para el cálculo la corriente  $i_d^*$ .

El bloque de control de velocidad construido con bloques de Simulink se muestra en la Fig. 10.

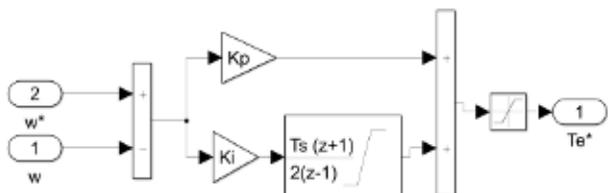


Fig. 10. Bloque dedicado al control de la velocidad del motor.

En la Fig. 11 se muestra el bloque elaborado en Simulink que genera los pulsos de control para el encendido y apagado en este caso de los IGBT del inversor. El bloque consiste en la comparación de las corrientes medidas y las corrientes generadas por el bloque de control, de aquí se determina el tiempo de encendido y apagado de cada rama del inversor y su correspondiente señal complementaria.

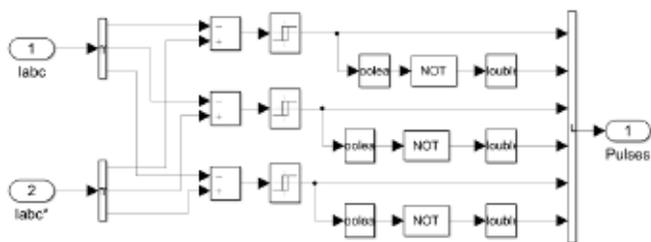


Fig. 11. Bloque dedicado a generar los pulsos que controlan a los conmutadores del inversor.

### 2.1 Inversor

El bloque del inversor se realizó utilizando transistores IGBT de la librería de Simulink “Simscape - Electrical -

Specialized Power Systems - Fundamental Blocks - Power Electronics”, específicamente el bloque que cuenta con diodo en antiparalelo. Se hace la topología de un inversor trifásico de medio puente el cual cuenta con tres ramas que generan las corrientes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ . Cada rama se compone de un par de IGBT los cuales conmutan de manera complementaria.

### 2.2 Motor

En este trabajo se emplea como carga un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla que es tomado de la librería de Simulink, es un motor de 5 HP, se alimenta con 400 V, opera a 60 Hz, y alcanza 1750 RPM. A continuación se presentan los parámetros del motor.

Table 1. Parámetros del motor de inducción

Parámetro	Valores
Potencia	3730 VA
$V_n$	460 V(RMS)
$f_n$	60 Hz
$R_s$	1.115 ohm
$L_{ls}$	5.974 mH
$R_r'$	1.083 ohm
$L_{lr}'$	1.083 mH
$L_m$	203.7 mH
Inercia $J$	0.02 kg · m <sup>2</sup>
Factor de fricción $F$	5.752m N · m · s
Par de polos $P$	2

Una de los datos de entrada que requiere este motor es el valor inicial del torque, en este caso se fija un torque constante de cero. Esto quiere decir que el torque sufrirá cambios solo cuando se le ordene al sistema de control que se cambien la velocidad del motor.

### 2.3 Configuración de parámetros

Para el correcto funcionamiento del sistema se debe recalcar que los valores que se emplean para el bloque de control vectorial fueron calculados empleando los valores del motor de inducción mostrados en la Tabla 1, con esto, se obtiene cada uno de los parámetros de los bloques como por ejemplo el control de velocidad, la conversión de las corrientes etc. Los valores se calcularon con las ecuaciones descritas previamente. En seguida se configuró cada uno de los bloques. De esta manera se asegura que el control trabajará de manera adecuada y se obtienen resultados correctos.

Una vez que se han configurado los bloques con los valores calculados se procede con la simulación y mediciones al sistema para corroborar su comportamiento. Del motor de inducción se toma la lectura de la velocidad, el torque y las corrientes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ , para este propósito se emplean dos “Bus Selector” que se encuentran en “Simulink - Signal Routing” de la librería de Simulink, de uno se obtienen las corrientes del motor, mientras en el segundo selector se tiene el torque electromagnético y la velocidad del motor en radianes por segundo ( $rad/s$ ), que es retroalimentada

al bloque de control. Para fines de poder tener las lecturas de la velocidad del motor en revoluciones por minuto (RPM) se hace uso de la relación de la ecuación 7 para hacer la conversión del valor de velocidad.

$$1 \cdot RPM = 1 \cdot \frac{rad}{s} \cdot \frac{60}{2 * \pi} \quad (7)$$

El último parámetro que se fija es la velocidad que se quiere que el motor alcance en  $rad/s$ . Con el objetivo de poder probar el correcto funcionamiento del control se plantea la “prueba 1” fijando una velocidad final de  $120 rad/s$ . En seguida se define la “prueba 2”, la cual tiene el fin de probar el comportamiento del control ante la orden de cambio de velocidad, para ello se fija una velocidad inicial de  $30 rad/s$  y en un tiempo  $T = 0.5 s$  la velocidad del motor debe cambiar a  $120 rad/s$ . Para lograr este propósito se emplea un conmutador manual que permite cambiar entre la prueba 1 y la prueba 2, por una parte, para la prueba uno se fija la velocidad con un bloque “constante”, por otra parte, para el caso del cambio de velocidad (prueba 2) se emplea el bloque de “Step” en el que se puede programar el valor inicial de la velocidad y el valor final que se dará en el tiempo indicado.

### 3. SIMULACIÓN

Se comienza con la prueba 1 en donde se fija una velocidad constante de  $120 rad/s$ , y la primera medición que se hace es el voltaje entre las fases “a” y “b” ( $V_{ab}$ ) y el resultado se muestra en la Fig. 12 donde se observa que al sistema le toma  $30 ms$  en estabilizarse. En la Fig. 13 se muestra el comportamiento de las corrientes  $i_a, i_b, i_c$  en función del tiempo, se observa que en el tiempo transitorio la corriente se eleva hasta los  $75 A$  para luego estabilizarse en  $6 A$ .

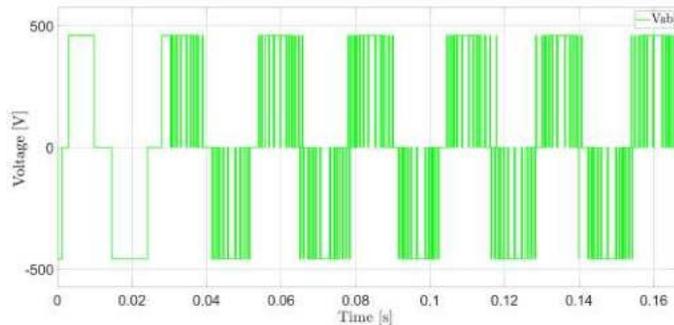


Fig. 12. Voltaje de la fase “a” con respecto a la fase “b”  $V_{ab}$  (prueba 1).

En la Fig. 14 se muestra que el sistema llega a la velocidad de  $1150 RPM$  lo que indica que el bloque de control esta operando de manera adecuada.

La Fig. 15 muestra el torque, se muestra que en el tiempo transitorio alcanza  $140 N \cdot m$ , mientras que en estado estable oscila en  $0 N \cdot m$ .

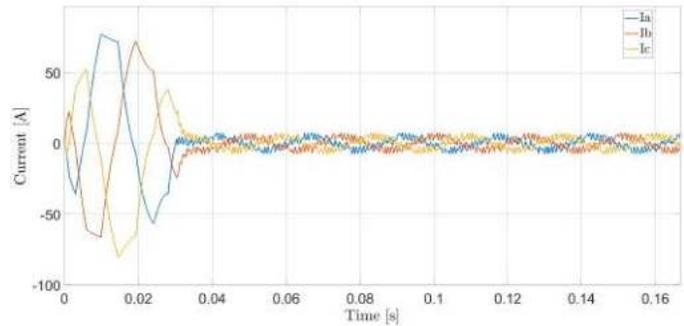


Fig. 13. Corrientes de fase  $i_a, i_b, i_c$  (prueba 1).

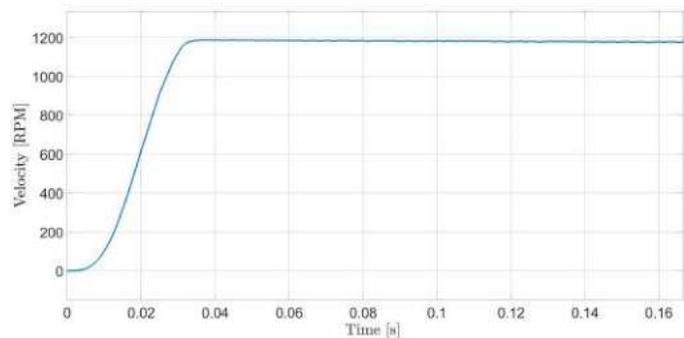


Fig. 14. Velocidad de giro del motor en RPM (prueba 1).

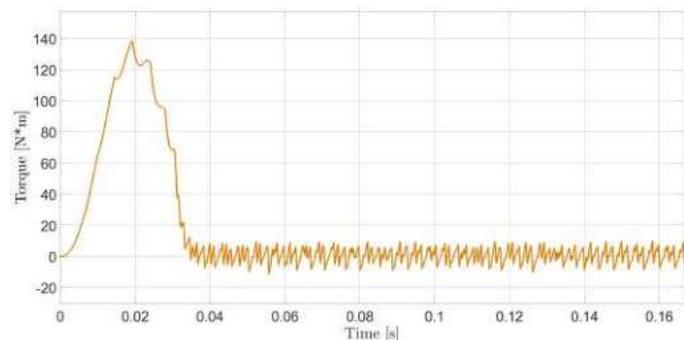


Fig. 15. Torque del motor (prueba 1).

En seguida se procede con la prueba 2, donde se establece una velocidad inicial de  $30 rad/s$  y en un tiempo  $t = 0.5 s$  se cambia la velocidad a  $120 rad/s$ . En la Fig. 16 se muestra el comportamiento del voltaje de salida  $V_{ab}$ , y se vuelve notorio el cambio en cuanto se cambia la velocidad del motor.

En la Fig. 17 se muestra el comportamiento de las corrientes  $i_a, i_b, i_c$  en función del tiempo, en el tiempo transitorio de inicio la corriente alcanza un valor pico de  $75 A$  y la transición al estado estable tiene una duración de  $17 ms$ . En  $t = 0.5 s$  se muestra un segundo estado transitorio donde se alcanza un valor pico de corriente de  $66 A$  y la duración es de  $17 ms$ .

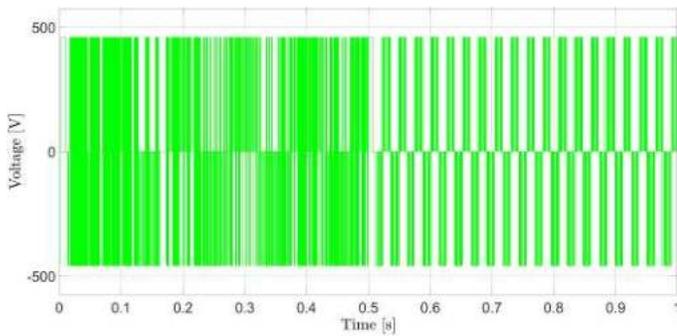


Fig. 16. Voltaje de la fase “a” con respecto a la fase “b”  $V_{ab}$  (prueba 2).

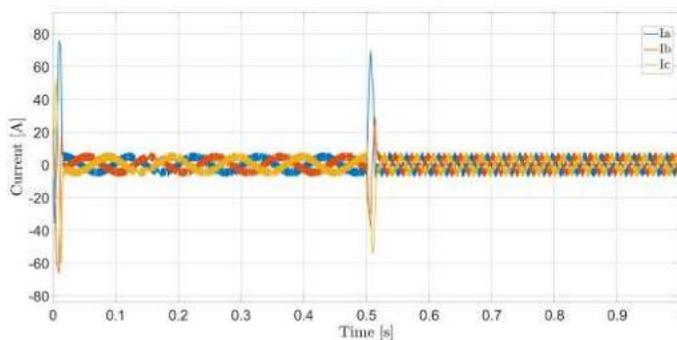


Fig. 17. Corrientes de fase  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  (prueba 2).

En la Fig. 18 se muestra la velocidad en RPM que se obtiene en el primer caso 290 RPM y cuando  $t > 0.5$  s la velocidad cambia a 1160 RPM.

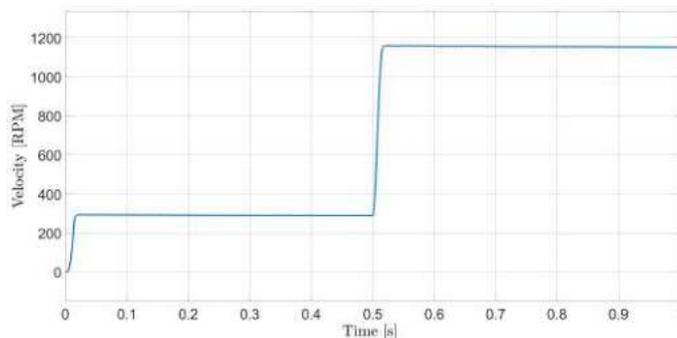


Fig. 18. Velocidad de giro del motor en RPM (prueba 2).

En la Fig. 19 se muestra el comportamiento del torque, se observa como la amplitud del torque está relacionada con los cambios de velocidad de giro del motor. En el caso de inicio el torque se eleva hasta  $T = 91.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ , y en el caso cuando  $t = 0.5$  s el torque alcanza un pico de  $T = 173.4 \text{ N} \cdot \text{m}$

#### 4. CONCLUSIÓN

En este trabajo se realizó la simulación en Simulink de un sistema inversor - motor controlado por un esquema

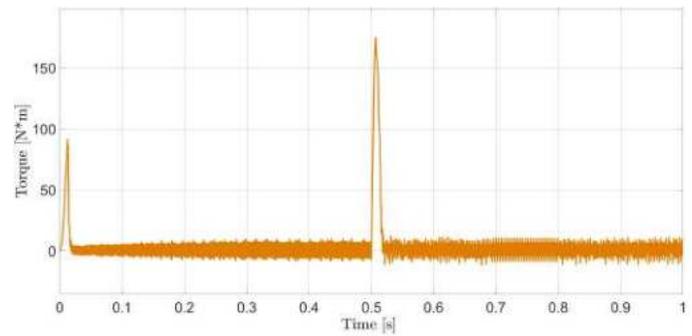


Fig. 19. Torque del motor (prueba 2).

de control vectorial de campo orientado FOC que permite controlar la velocidad de giro de un motor de inducción de 5 HP, reacondicionando y ajustando los parámetros requeridos por el control para este motor en específico. Se configuró cada uno de los bloques que conforman al control calculando cada uno de los parámetros que se requieren y se mostró cada paso del proceso y los resultados de simulación muestra que el sistema es capaz de controlar la velocidad de giro del motor de manera satisfactoria.

#### REFERENCES

- Asgari, S.H., Jannati, M., and Idris, N.R.N. (2014). Modeling of three-phase induction motor with two stator phases open-circuit. In *2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 231–236. doi: 10.1109/CENCON.2014.6967507.
- de MATLAB y Simulink, M.C. (2022). “*Building Your Own Drive- MATLAB & Simulink- MathWorks América Latina*”.
- Iqbal, A., Ahmed, S.M., Khan, M.A., Khan, M.R., and Abu-Rub, H. (2010). Modeling, simulation and implementation of a five-phase induction motor drive system. In *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*, 1–6. doi:10.1109/PEDES.2010.5712373.
- Nayak, P. and Rajashekara, K. (2019). An asymmetrical space vector pwm scheme for a three phase single-stage dc-ac converter. In *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 635–639. doi: 10.1109/ECCE.2019.8912742.
- Ponce, P. (2017). *Máquinas eléctricas: técnicas modernas de control*. Alpha Editorial.
- Umar, M.F., Akbar, M.N., and Kazmi, S.M.R. (2018). Design and simulation of a 3 phase induction motor drive based on indirect rotor field orientation using matlab simulink tool. In *2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG)*, 1–6. doi:10.1109/ICPESG.2018.8384497.