



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**CONTROL DE MÁQUINAS DE INDUCCIÓN A TRAVÉS DE CAMPO  
ORIENTADO UTILIZANDO ATPDRAW Y MODELS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES:** ADRIÁN MARCELO ORELLANA VANEGAS  
CRISTIAN DAVID RODRÍGUEZ CARRIÓN

**TUTOR:** ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, DR.

Cuenca - Ecuador

2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Nosotros, Adrián Marcelo Orellana Vanegas con documento de identificación N° 1400500730 y Cristian David Rodríguez Carrión con documento de identificación N° 1105642712; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 18 de enero del 2024

Atentamente,



---

Adrián Marcelo Orellana Vanegas  
1400500730



---

Cristian David Rodríguez Carrión  
1105642712

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Adrián Marcelo Orellana Vanegas con documento de identificación N° 1400500730 y Cristian David Rodríguez Carrión con documento de identificación N° 1105642712, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Control de Máquinas de Inducción a través de Campo Orientado utilizando ATPDRAW Y MODELS”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 18 de enero del 2024

Atentamente,



---

Adrián Marcelo Orellana Vanegas  
1400500730



---

Cristian David Rodríguez Carrión  
1105642712

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N° 0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CONTROL DE MÁQUINAS DE INDUCCIÓN A TRAVÉS DE CAMPO ORIENTADO UTILIZANDO ATPDRAW Y MODELS, realizado por Adrián Marcelo Orellana Vanegas con documento de identificación N° 1400500730 y por Cristian David Rodríguez Carrión con documento de identificación N° 1105642712, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 18 de enero del 2024

Atentamente,



---

Ing. José Manuel Aller Castro, Dr.  
0151561800

## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta la implementación de un controlador por campo orientado FOC, utilizando la herramienta ATP-EMTP. El modelo se desarrolló mediante la interfaz gráfica ATPDraw, incorporando parte de los modelos en MODELS. También se han utilizado TACS en la modelación de los controladores PI. Los resultados obtenidos demuestran la capacidad de estas herramientas para desarrollar estrategias de control de máquinas eléctricas.

## **ABSTRACT**

This work presents the implementation of a field-oriented controller (FOC) using the ATP-EMTP tool. The model was developed through the ATPDraw graphical interface, incorporating parts of the models in MODELS. TACS were also used in the modeling of PI controllers. The results obtained demonstrate the capability of these tools to develop control strategies for electric machines.

## **PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS**

ATP-EMTP

ATPDraw

Modelo VBR

Máquinas de inducción

Control por Campo Orientado.

# Control de Máquinas de Inducción a través de Campo Orientado utilizando ATPDraw y MODELS

Adrián M. Orellana  
Universidad Politécnica Salesiana  
Cuenca, Ecuador  
aorellanav@est.ups.edu.ec

Cristian D. Rodríguez  
Universidad Politécnica Salesiana  
Cuenca, Ecuador  
crodriguez3@est.ups.edu.ec

José M. Aller  
Universidad Politécnica Salesiana  
Cuenca, Ecuador  
jaller@ups.edu.ec

**Resumen**—En este trabajo se presenta la implementación de un controlador por campo orientado FOC, utilizando la herramienta ATP-EMTP. El modelo se desarrolló mediante la interfaz gráfica ATPDraw, incorporando parte de los modelos en MODELS. También se han utilizado TACS en la modelación de los controladores PI. Los resultados obtenidos demuestran la capacidad de estas herramientas para desarrollar estrategias de control de máquinas eléctricas.

**Index Terms**—ATP-EMTP, ATPDraw, Modelo VBR, máquinas de inducción, Control por Campo Orientado.

## NOMENCLATURA

AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
DTC	Control directo de par
$f_{em}$	Fuerza electromotriz
FOC	Control por campo orientado
$T_r$	Constante de tiempo del rotor $L_r/R_r$
PI	Controlador proporcional-integral
VBR	Voltage Behind Reactance

## I. INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la construcción de máquinas eléctricas a finales del siglo XIX ha existido el interés por conseguir sistemas eficientes de control de velocidad para obtener mejores resultados en los sistemas de producción industrial, en la tracción eléctrica y en otras aplicaciones [1]. Durante todo el siglo XX se ha utilizado la máquina de corriente continua para suplir esta necesidad de control [2]. Por otra parte, el desarrollo de las máquinas de corriente alterna ha revolucionado el mundo industrial, comercial y residencial en todos los ámbitos. Hacia finales del siglo XX con el desarrollo de la electrónica de potencia [3], se han propuesto diferentes esquemas de control de velocidad y par para las máquinas de corriente alterna, emulando los controladores desarrollados para las máquinas de corriente continua.

Hacia los años 70 se comienza a desarrollar la teoría de los vectores espaciales en la modelación de las máquinas de corriente alterna [4]. Esta teoría tiene gran relevancia, debido a que por una parte simplifica la modelación de convertidor electromecánico y por otra representa eficazmente los controladores electrónicos de potencia [5]. En este sentido, trabajos como [6], [7], han desarrollado el control de velocidad y par de las máquinas AC.

Inicialmente Blaschke [8], propone la transformación del modelo en vectores espaciales de la máquina de inducción al dominio de las variables de campo orientado. Esta transformación, permite modelar este convertidor mediante ecuaciones similares a las que representan el comportamiento de una máquina de corriente continua [9]. Esto permitió utilizar los esquemas de control de velocidad de las máquinas de corriente continua en el ámbito de las máquinas de corriente alterna.

A pesar del gran interés suscitado por el control por campo orientado en las máquinas de inducción, los problemas debidos a la variación de los parámetros eléctricos de la máquina con la temperatura, complicaron notablemente la aplicación de la técnica de campo orientado para el control de velocidad, ocasionados por la desintonización de las transformaciones a este sistema de coordenadas con respecto a los cambios que suceden en el interior de la máquina. Durante varias décadas, los investigadores trabajaron en proporcionar mecanismos para solventar esta problemática con resultados ligeramente satisfactorios [1], [10], [11]. Una de las soluciones más eficaces se planteó utilizando la técnica del control directo de par, DTC [12], [13]. Este mecanismo de control de velocidad es independiente de los parámetros del convertidor electromecánico y resuelve muchos de los inconvenientes del control por campo orientado [14], [15].

Existen diferentes modelos para representar el control por campo orientado, muchos de los cuales se han implementado anteriormente en herramientas comerciales tales como Matlab-Simulink y PSIM entre muchos otros [16]–[18]. En este trabajo se presentan modelos de control por campo orientado de la máquina de inducción utilizando como herramienta el programa ATP-EMTP y su editor gráfico ATPDraw. Esta herramienta tiene licencia libre y es un entorno práctico y rápido para la realización de estos modelos. La utilización de este programa permitirá a los investigadores seguir avanzando en el desarrollo de nuevas propuestas para el control de velocidad en el control de máquinas DC.

## II. METODOLOGÍA

En esta sección se describe la formulación del control FOC y DTC, como paso previo a la implementación de estas estrategias de control en la herramienta ATP-EMTP.

## II-A. Modelo VBR de la máquina de Inducción

En [19] se presenta el modelo VBR de la máquina de inducción desarrollado en la herramienta ATPDraw. Las ecuaciones que representan este modelo definen los enlaces de flujo referidos al estator. Esto permite determinar el vector espacial de la corriente del rotor en este sistema de referencia,

$$\vec{\lambda}_r^s = M_{sr} \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r \Rightarrow \vec{i}_r^s = \frac{1}{L_r} \left( \vec{\lambda}_r^s - M_{sr} \vec{i}_s \right) \quad (1)$$

La derivada del enlace de flujo del rotor,  $p \vec{\lambda}_r^s$ , se obtiene como:

$$p \vec{\lambda}_r^s = -R_r \vec{i}_r^s + j\omega \vec{\lambda}_r^s. \quad (2)$$

El vector espacial del voltaje del estator  $\vec{v}_s$  es:

$$\begin{aligned} \vec{v}_s &= R_s \vec{i}_s + L_s p \vec{i}_s + M_{sr} p \vec{i}_r^s = \\ &= R_{eq} \vec{i}_s + L_{eq} p \vec{i}_s + \vec{e}_s, \end{aligned} \quad (3)$$

donde,

$$R_{eq} = R_e + R_r \frac{M_{er}^2}{L_r^2}; \quad L_{eq} = L_e - \frac{M_{er}^2}{L_r}, \quad (4)$$

y,

$$\vec{e}_s = \frac{M_{er}}{L_r} \left( j\omega - \frac{R_r}{L_r} \right) \vec{\lambda}_r^s \quad (5)$$

El enlace de flujo del rotor, en el sistema estatístico  $\vec{\lambda}_r^s$ , se determina integrando (2). La ecuación (4) define los parámetros del circuito equivalente  $R_{eq}$  y  $L_{eq}$ . Por otra parte, (5) determina el vector espacial de la *fem* detrás de la reactancia  $\vec{e}_s$ . En la Fig. 1, se muestra el circuito equivalente VBR de la máquina de inducción en vectores espaciales.

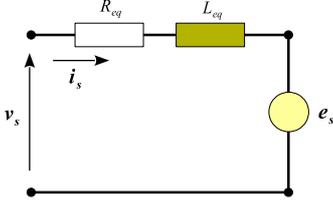


Figura 1. Modelo VBR de la máquina de inducción

La *fem*  $\vec{e}_e = e_{ex} + j e_{ey}$ , expresada en el dominio de fase ( $a, b, c$ ), se puede obtener mediante la siguiente transformación [5],

$$e_{ea} = \sqrt{\frac{2}{3}} \Re \{ \vec{e}_e \} = \sqrt{\frac{2}{3}} e_{ex}, \quad (6)$$

$$e_{eb} = \sqrt{\frac{2}{3}} \Re \{ \alpha^2 \vec{e}_e \} = -\frac{1}{\sqrt{6}} e_{ex} + \frac{1}{\sqrt{2}} e_{ey}, \quad (7)$$

$$e_{ec} = \sqrt{\frac{2}{3}} \Re \{ \alpha \vec{e}_e \} = -\frac{1}{\sqrt{6}} e_{ex} - \frac{1}{\sqrt{2}} e_{ey}, \quad (8)$$

donde,  $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ . Las componentes del vector espacial de la *fem*  $\vec{e}_e$ , se determinan mediante (6), (7) y (8) como,

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}, \quad (9)$$

y el par eléctrico  $T_e$ , se determina utilizando la expresión,

$$T_e = p \frac{M_{er}}{L_r} (\lambda_{rx}^s i_{sy} - \lambda_{ry}^s i_{sx}). \quad (10)$$

Las corrientes del estator  $i_a, i_b$ , and  $i_c$ , se pueden convertir a vectores espaciales con coordenadas  $i_x, i_y$ , and  $i_0$ , utilizando la transformación (9), reemplazando cada una de las *fem* por las correspondientes corrientes.

## II-B. Control por campo orientado

Según [4], el modelo de la máquina de inducción en coordenadas de campo orientado, utilizando la definición de la corriente de magnetización modificada  $\vec{i}_m^s$ ,

$$\vec{i}_m^s = \vec{i}_e + \frac{L_r}{M} \vec{i}_r^s = i_m e^{j\delta}, \quad (11)$$

se puede expresar como:

$$T_r p i_m + i_m = i_{de} \quad (12)$$

$$T_r i_m (\dot{\delta} - \theta) = i_{qe} \quad (13)$$

$$T_e = \frac{M_{er}^2}{L_r} i_m \cdot i_{qe} \quad (14)$$

La Fig. 2 muestra el diagrama de la máquina de inducción en variables de campo orientado, así como la transformación desde las coordenadas primitivas a las coordenadas de campo orientado. En este modelo, el par eléctrico depende del producto de las corrientes  $i_m$  e  $i_q$ . El control por campo orientado *FOC*, se fundamenta en el ajuste de estas variables para determinar el par eléctrico de la máquina.

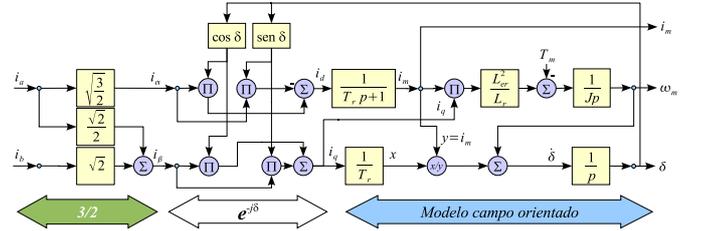


Figura 2. Modelo de la máquina de inducción en variables de campo orientado

En la Fig. 3 se muestra el controlador de velocidad de un motor de inducción en coordenadas de campo orientado donde se utiliza un inversor controlado en corriente.

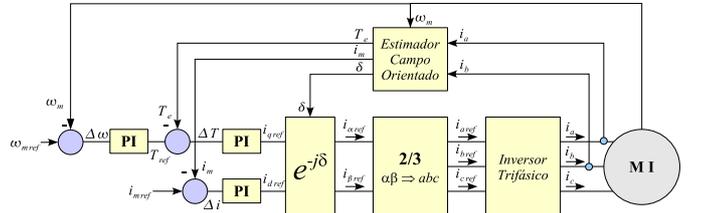


Figura 3. Controlador de velocidad en coordenadas de campo orientado

El inversor inyecta las corrientes en el estator, según la referencia calculada por el controlador. Utilizando la medida de las corrientes en las bobinas y la velocidad del rotor, se estiman los valores de las variables del modelo presentado en la Fig. 2. De esta forma, se estima el par eléctrico y la corriente de magnetización. Los valores estimados, se comparan con los valores de par y velocidad deseados y el error obtenido se utiliza para incrementar o disminuir las referencias de la corriente directa y cuadratura, mediante controladores *PI*. Las referencias de corrientes, obtenidas a partir de las diferencias entre pares y velocidades, se transforman a vectores espaciales, siendo necesaria la estimación de la posición del vector espacial de la corriente de magnetización  $\delta$ . Las corrientes de referencia en coordenadas espaciales se transforman nuevamente en variables primitivas *a*, *b* y *c*. Estas corrientes de referencia se aplican como entrada al inversor controlado en corriente. El inversor con control delta, inyecta a las bobinas de la máquina estas corrientes.

En la Fig. 4, se presenta el control de una de las ramas del inversor delta de corriente, incluyendo el algoritmo de disparo de los transistores del puente. Un esquema similar se realiza en cada una de las ramas.

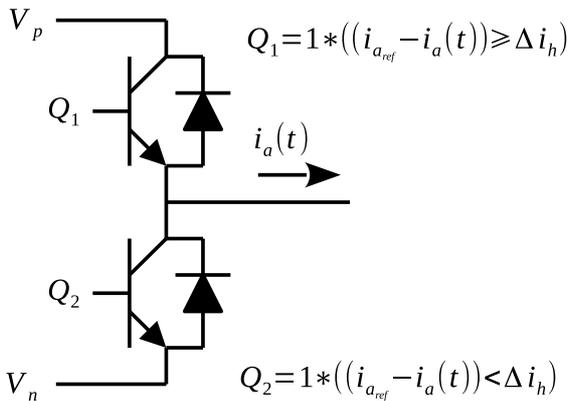


Figura 4. Principio del inversor delta de corriente, para una de las ramas del puente inversor trifásico

### II-C. Modelo del inversor con control delta de corriente

En la Fig. 5 se muestra el modelo ATPDraw del inversor que alimenta la máquina de inducción. Para el manejo de este inversor se utiliza la secuencia de bloques MODELS que se ilustran en la Fig. 6. El primer paso consiste en utilizar un bloque que convierte las corrientes de referencia  $i_{q-ref}$  e  $i_{d-ref}$  en las componentes de referencia del vector espacial  $i_{\alpha-ref}$  e  $i_{\beta-ref}$ . Este bloque se presenta en el Listado 2. En segundo lugar se programa un otro bloque MODELS para convertir las corrientes de referencia  $i_{\alpha-ref}$  e  $i_{\beta-ref}$  a  $i_{a-ref}$ ,  $i_{b-ref}$  e  $i_{c-ref}$ , el cual se muestra en el Listado 1. Estas corrientes se inyectan en el último bloque para determinar el encendido y apagado de los transistores del puente inversor. En el Listado 3, se presenta la programación de este bloque MODELS que maneja los transistores.

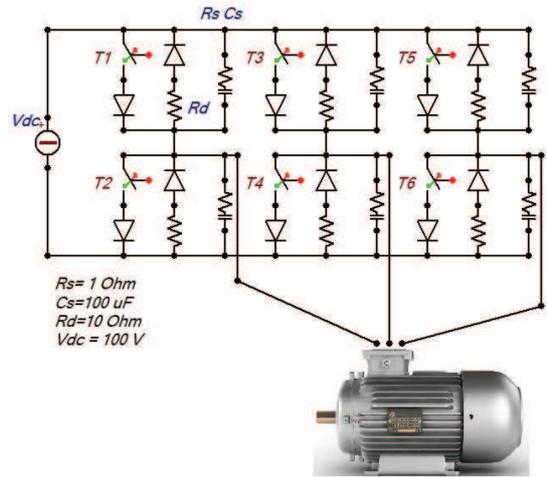


Figura 5. Circuito del inversor conectado al modelo VBR la Máquina de inducción [19]

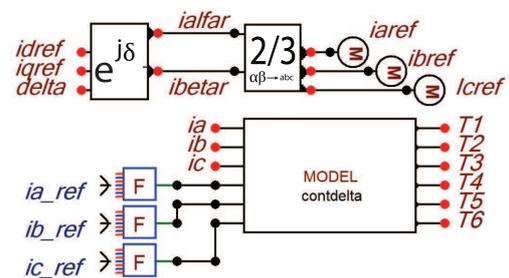


Figura 6. Cálculo de las corrientes de referencia

```

MODEL DOSTRES
CONST sqrt23 {val:0.8164965809},
sqrt12 {val:0.70710678}, sqrt16{val:0.4082482905}
INPUT ialfar, ibetar
OUTPUT iaref, ibref, icref
VAR iaref, ibref, icref
INIT
    iaref:=0; ibref:=0; icref:=0
ENDINIT
EXEC
    iaref:=sqrt23*ialfar
    ibref:=-sqrt16*ialfar+ibetar*sqrt12
    icref:=-iaref-ibref
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Listado 1. Transformación de coordenadas  $\alpha - \beta$  a coordenadas *abc*

```

MODEL EXPJd
INPUT id, iq
OUTPUT ialfa, ibeta, delta
VAR ialfa, ibeta, delta
INIT
    ialfa:=0; ibeta:=0
ENDINIT
EXEC
    ialfa:=id*cos(delta)-iq*sin(delta)
    ibeta:=iq*cos(delta)+id*sin(delta)
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Listado 2. Obtención de las corrientes  $i_{\alpha}$  e  $i_{\beta}$  a partir de  $i_d$  e  $i_q$

```

MODEL ContDelta
DATA w {df1t: 377}
INPUT ia, ib, ic, ia_ref, ib_ref, ic_ref
OUTPUT T1, T2, T3, T4, T5, T6
VAR T1, T2, T3, T4, T5, T6
INIT
  T1:=1, T2:=0, T3:=1, T4:=0, T5:=1, T6:=0
ENDINIT
EXEC
  if ia_ref>ia then
    T1:=1;T2:=0
  else
    T1:=0;T2:=1
  endif
  if ib_ref>ib then
    T3:=1;T4:=0
  else
    T3:=0;T4:=1
  endif
  if ic_ref>ic then
    T5:=1;T6:=0
  else
    T5:=0;T6:=1
  endif
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Listado 3. Controlador delta de corriente

#### II-D. Modelo del controlador de velocidad

En la Fig. 7 se muestra la implementación en ATPDraw del controlador de velocidad del motor de inducción. Este bloque se desarrolla mediante elementos TACS, utilizando tres módulos PI ajustados para obtener las referencias de Par eléctrico  $T_{e-ref}$ , corriente  $i_{q-ref}$  e  $i_{d-ref}$ . Este bloque de señales alimenta el control de disparo de los transistores que se muestra en la Fig. 6.

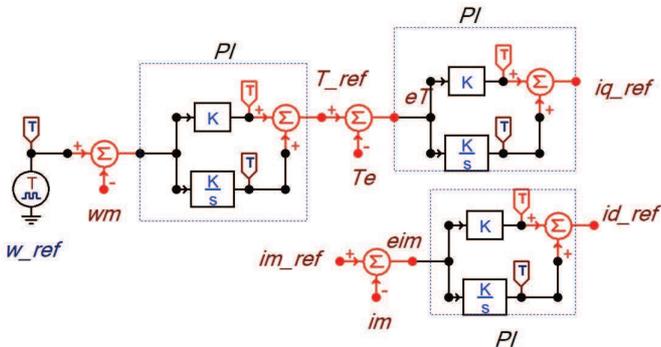


Figura 7. Modelo de los controladores PI para generación de las referencias

#### II-E. Modelo del estimador de estado

En la Fig. 8 se presenta la modelación del Estimador de estado de la máquina de inducción. Partiendo de la medición de las corrientes  $i_a$  e  $i_b$ , mediante el bloque MODELS, que se presenta en el Listado 4, se obtienen las corrientes estimadas  $i_\alpha$  e  $i_\beta$ . Con un bloque similar al Listado 2, pero para un ángulo  $\delta$  negativo, se obtienen las corrientes estimadas  $i_d$  e  $i_q$ . Seguidamente, utilizando bloques de control TACS, se obtienen los valores estimados de la corriente de magnetización  $i_m$ , el par eléctrico  $T_e$  y el ángulo  $\delta$ , implantando las ecuaciones (12), (13) y (14).

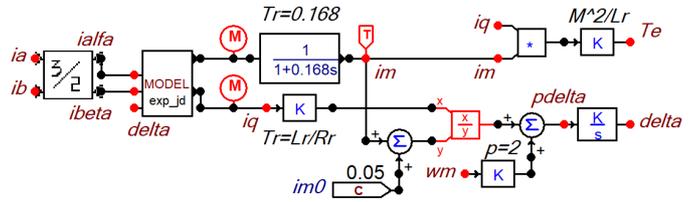


Figura 8. Estimador de las variables de estado de la máquina de inducción

```

MODEL TRESDOS
CONST sqrt32{val:1.224744871}, sqrt12{val:0.70710678}, sqrt2{val:1.41421356}
INPUT ia,ib
OUTPUT ialfa,ibeta
VAR ialfa,ibeta
INIT
  ialfa:=0;ibeta:=0
ENDINIT
EXEC
  ialfa:=sqrt32*ia;ibeta:=sqrt12*ia+ib*sqrt2
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Listado 4. Transformación de coordenadas  $abc$  a coordenadas  $\alpha - \beta$

### III. RESULTADOS

El controlador por campo orientado programado en ATPDraw, utilizando MODELS para las conversiones de coordenadas y en la generación de las señales a los transistores del puente inversor delta de corriente se aplicó a un motor de inducción de jaula de ardilla cuyo modelo se publicó en [19] y con los parámetros indicados en la Tabla I. Este inversor se está operando a la frecuencia de 20 kHz, es decir el cambio de encendido de los transistores ocurre cada 50  $\mu s$ .

Tabla I  
PARÁMETROS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA

$R_e$	$R_r$	$L_{\sigma e}$	$L_{\sigma r}$	$M_{er}$	$J$	$p$	$f$
$\Omega$	$\Omega$	$mH$	$mH$	$mH$	$kg\ m^2$	-	$Hz$
0,353	0,424	2,59	3,88	67,47	0,11	2	60

El controlador por campo orientado tiene como entrada una velocidad de referencia  $\omega_{m-ref}$  que debe seguir la máquina de inducción.

En la Fig. 9, se presenta la respuesta de la máquina a la referencia de velocidad.

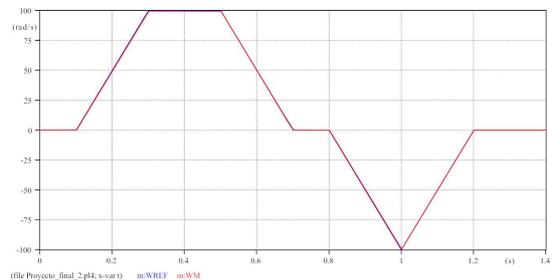


Figura 9. Respuesta del controlador a la referencia de velocidad  $w_m$  vs  $w_{m-ref}$

En la Fig. 10 se ha representado la comparación entre el par eléctrico  $T_e$ , que se obtiene del modelo de la máquina de inducción, con el par eléctrico calculado por el estimador de estado desarrollado y su correspondiente referencia. Se puede observar en esta gráfica una importante correspondencia entre estas tres variables.

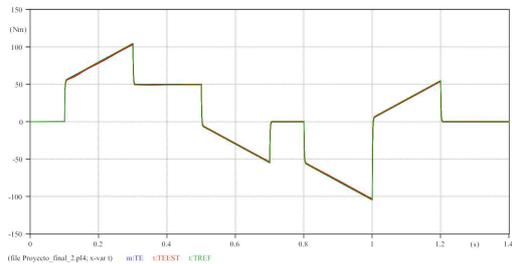


Figura 10. Comparación entre el par eléctrico de la máquina, el par eléctrico estimado por el controlador y el par eléctrico de referencia

En la Fig. 11 se han representado la comparación entre la corriente de la fase  $a$  de la máquina y la consigna  $i_{a-ref}$  que se entrega al controlador delta del inversor. Como se puede apreciar en esta figura, la corriente de la máquina tiene el mismo comportamiento de la referencia pero esta se ve filtrada por las inductancias de la misma.

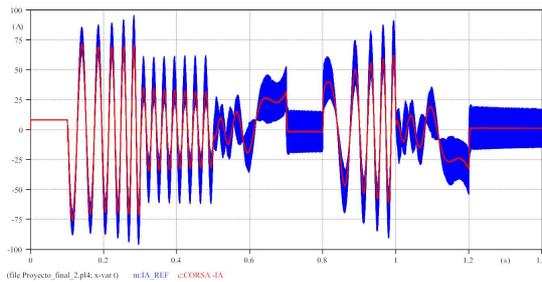


Figura 11. Comparación entre la corriente  $i_a$  inyectada en la máquina de inducción y la referencia calculada por el controlador

Finalmente en la Fig. 12 se presentan los resultados obtenidos al comparar la velocidad mecánica de la máquina con las corrientes del estator, donde se aprecian los cambios durante las aceleraciones, regímenes permanentes y frenados a que se ve sometida por las consignas del controlador por campo orientado.

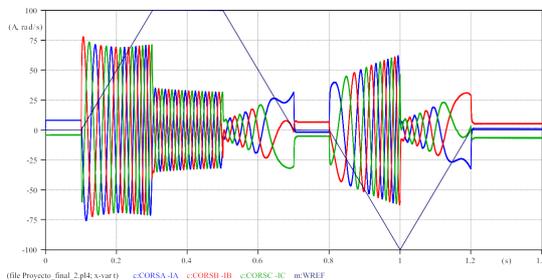


Figura 12. Comparación entre las corrientes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  inyectadas en la máquina de inducción y la velocidad mecánica  $\omega_m$

Del análisis de los resultados obtenidos se comprueba que el programa ATPDraw ha permitido realizar un controlador por campo orientado de una máquina de inducción. Los resultados muestran la precisión del ATP-EMTP para realizar complejos sistemas que involucran circuitos eléctricos conmutados a alta velocidad, controladores y transformaciones vectoriales.

### III-A. Modelo del controlador en SIMULINK

El presente modelo en la Fig. 13 será empleado para llevar a cabo la comparación con los resultados obtenidos en ATP-EMTP.

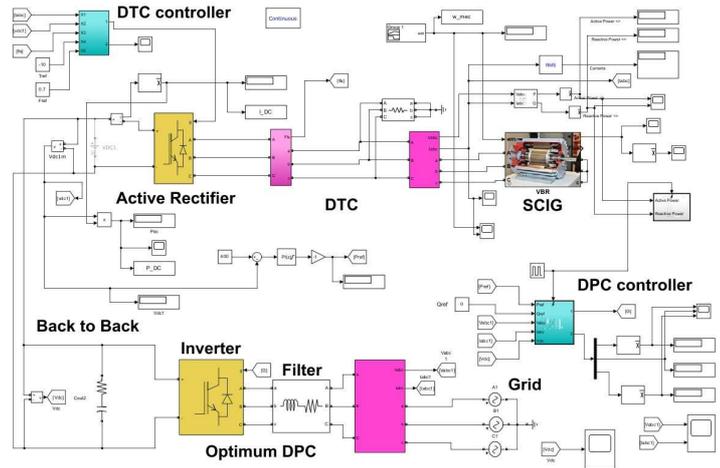


Figura 13. Modelo VBR realizado en SIMULINK

En la Fig. 14 se han representado los resultados obtenidos en el programa SIMULINK de Matlab, utilizando el modelo de la máquina de inducción con su controlador, donde se muestra la comparación de las corrientes inyectadas y la velocidad mecánica.

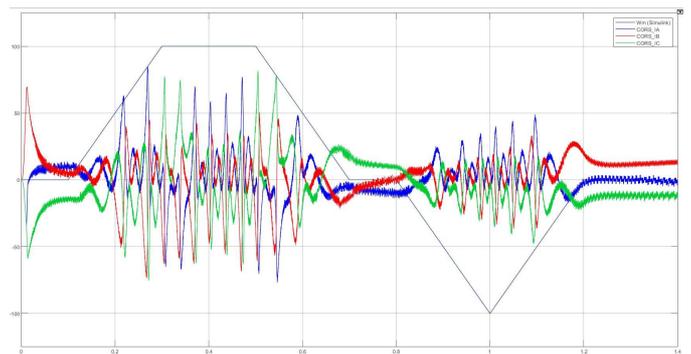


Figura 14. Comparación entre las corrientes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  inyectadas en la máquina de inducción y la velocidad mecánica en SIMULINK

De esta manera, se observa que, tanto en ATPDraw como en Simulink existe una gran similitud, y las corrientes de la máquina siguen su referencia de velocidad.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolla un modelo de controlador por campo orientado para una máquina de inducción utilizando ATPDraw, TACS y MODELS. Este modelo integra el modelo VBR de la máquina de inducción, su estimador de estado, basado en las ecuaciones de campo orientado, así como el inversor controlado en corriente y el sistema de control que define las referencias que permiten ajustar la velocidad, corriente de magnetización y el par eléctrico de la máquina.

El modelo VBR de la máquina de inducción utiliza la representación en variables de estado programadas en un módulo MODELS que determina las tensiones detrás de las reactancias. De igual forma las transformaciones de coordenadas se implementan exitosamente utilizando esta herramienta. Los bloques de control se programan mediante módulos TACS que permiten realizar los PI requeridos. El inversor se modela mediante elementos circuitales propios de ATP-EMTP.

Los resultados obtenidos demuestran las capacidades del programa ATPDraw y sus herramientas MODELS y TACS para realizar este tipo de simulaciones. Las principales ventajas de estas herramientas es que son rápidas, precisas y la obtención de su licencia es libre de costos. Todo esto permite a los investigadores realizar nuevos prototipos de control utilizando estas herramientas de simulación. Se observa que los resultados obtenidos tanto en el programa Simulink como en ATPDraw son confiables. Sin embargo, en este último, las representaciones gráficas se presentan de manera más efectiva.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca y en especial al Grupo de Investigación en Energía, por todo el apoyo prestado para la realización de esta investigación.

#### REFERENCIAS

- [1] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*. The University of Tennessee. Knoxville, 2002.
- [2] A. S. Langsdorf, R. G. de Ureta, and D. S. Muñoz, *Principios de las máquinas de corriente continua*. Edic. del Castillo, S.A., Madrid, 1967.
- [3] A. Bueno, *Electrónica de potencia: Aspectos Generales y Convertidores Electrónicos*. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2015.
- [4] J. M. Aller, *Máquinas eléctricas rotativas: Introducción a la teoría general*. Editorial Equinoccio, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2008.
- [5] J. Aller, A. Bueno, and T. Paga, "Power system analysis using space-vector transformation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 957–965, Nov 2002.
- [6] R. Gabriel, W. Leonhard, and C. J. Nordby, "Field-oriented control of a standard ac motor using microprocessors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-16, no. 2, pp. 186–192, March 1980.
- [7] P. Vas and M. Alakula, "Field-oriented control of saturated induction machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5, no. 1, pp. 218–224, March 1990.
- [8] B. F., "The principle of field orientation as applied to the new trans-vector closed-loop system for rotating-field machines," *Siemens Review*, vol. 34, no. 3, pp. 217–220, 1972.
- [9] W. Leonhard, *Control of electrical drives*. Springer Science & Business Media, 2001.
- [10] S. Sastry, *Nonlinear systems: analysis, stability, and control*. Springer-Verlag, New York. Inc, 1999.
- [11] J. Chiasson, *Modeling and high performance control of electric machines*. John Wiley & Sons, 2005.
- [12] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 5, pp. 820–827, Sep. 1986.
- [13] J. M. Aller and D. A. Naranjo, "Direct torque control model of an induction motor using atpdraw and models," in *2022 IEEE ANDESCON*, Nov 2022, pp. 1–6.
- [14] J. Aller, J. Restrepo, A. Bueno, T. Paga, V. Guzman, and M. Gimenez, "Sensorless speed control of the induction machine combining field oriented method and DTC," in *Proceedings of the 2000 Third IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (Cat. No.00TH8474)*, March 2000, pp. P79/1–P79/6.
- [15] J. Aller, J. Viola, J. Restrepo, M. Fajardo, A. Ginart, J. Rengifo, J. D. Loja, and J. D. Ochoa, "Space vector control of asymmetrical single-phase induction motors," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 1684–1690.
- [16] G. Singh, D. Singh, K. Nam, and S. Lim, "A simple indirect field-oriented control scheme for multiconverter-fed induction motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 6, pp. 1653–1659, Dec 2005.
- [17] K. Prabhakaran, S. Shyam Kumar, and N. Manoj Kumar, "Three level diode clamped inverter for field oriented control of induction motor," in *2013 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, April 2013, pp. 115–118.
- [18] J. M. Aller and D. A. Naranjo, "Optimal direct power control (odpc) model using atpdraw and models," in *2022 IEEE Sixth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Oct 2022, pp. 1–6.
- [19] J. M. Aller, J. A. Restrepo, and J. C. Viola, "Voltage behind reactance model of induction machines using atpdraw and models," in *2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Oct 2021, pp. 1–6.