

Design, Analysis and Validation of a Six-Phase Induction Machine from a Commercial Three-Phase for Academic Research

Gary Echagüe, Magno Ayala, and Jorge Rodas, *Senior Member, IEEE*

Abstract—Multiphase machines have been reemerged for high-power as well as fault-tolerant applications such as electric vehicles and wind turbines. Nevertheless, these types of machines are typically built only for industries for specific purposes. Therefore, the availability of multiphase machines in the market for academic research work, for instance at universities, is limited due to they require special construction processes and involve high initial costs for the companies. For that reason, the aim of this paper is to present a step-by-step design of a multiphase winding of an induction machine (IM) from a commercial three-phase IM for academic research use. The obtained results will be first analyzed by using the ANSYS Maxwell simulation environment. Then, a model-based current controller will be performed to validate the proposed design and the electric parameters of the six-phase IM.

Keywords—ANSYS, induction machine, multiphase machine design, rewinding.

ejemplos de la adopción de esta tecnología en la industria son el aerogenerador eólico de 4.5 MW de la empresa Gamesa G10x [5], el ascensor ultra rápido Hyundai THE EL 1080 [6], el porta avión Queen Elizabeth del ejército británico [7] y el autobús eléctrico de la empresa canadiense TM4 [8].

Gracias a los grandes avances en el desarrollo de microcontroladores y de la electrónica de potencia, la implementación de nuevas y avanzadas estrategias de control de máquinas multifásicas ha sido también posible [9]. Esto ha motivado a que investigadores, principalmente vinculados a instituciones académicas, centren sus investigaciones en propuestas de nuevos y avanzados esquemas de control aplicados a las máquinas multifásicas tales como el control predictivo [10], [11] o el control no lineal [12]-[14].

NOMENCLATURA

Lista de símbolos

G_f	Grupo de devanados por fase.
K	Número de ranuras.
K_{pq}	Número de ranuras por polo y fase.
m	Amplitud de grupo.
p	Número de par de polos.
q	Número de fases.
U_g	Número de devanados que forman un grupo.
Y	Paso resultante. Para devanados ondulados.
Y_2	Paso de conexión. Para devanados ondulados.
Y_k	Paso de ranura o ancho de devanado.
Y_q	Distancia entre grupos trifásicos.

I. INTRODUCCIÓN

A. Máquinas Multifásicas

Las máquinas multifásicas ($q > 3$) poseen entre sus mayores ventajas, si se lo compara con el tradicional esquema trifásico, la posibilidad de seguir funcionando en presencia de fallas en una de sus fases como también la posibilidad de dividir la potencia/corriente en un mayor número de fases [1], [2]. Estas ventajas han motivado un creciente interés y el uso en aplicaciones donde es necesaria una elevada potencia y alta fiabilidad tales como la propulsión eléctrica y la generación de energía eléctrica [3], [4]. Algunos

B. Planteamiento del Problema

No obstante, al ser las máquinas multifásicas de poco uso masivo, los mismos no son producidos comercialmente para uso general y habitualmente se consigue rediseñando los devanados del estátor de una máquina trifásica comercial para obtener q devanados o fases independientes [5].

Si bien el diseño de máquinas trifásicas ha sido ampliamente abordado en la literatura, para el caso multifásico se ha centrado principalmente diseños para aplicaciones específicas [15]-[18]. En [15] se ha realizado el diseño y estudio mediante simulación de una máquina trifásica como así también de 5 y 7 fases para aplicaciones en tracción eléctrica. En [16] se propone un método para el diseño de los devanados del estátor de cualquier número de fases. No obstante, el método propone ciertas restricciones para su diseño. En [17] se realiza un estudio comparativo de dos diseños de devanados de una máquina de inducción (MI) de 6 fases. En [18] se propone un generador de arranque de 6 fases y se lo comparara con un esquema trifásico. Sin embargo, en ninguno de los trabajos mencionados ni en la literatura se propone y/o se presenta una manera práctica para realizar el diseño del devanado de una máquina multifásica a partir de una comercial trifásica.

C. Solución Propuesta

En ese contexto, este trabajo propone un procedimiento simple y directo para realizar la construcción de los devanados del estátor de una MI de 6 fases. Teniendo en cuenta los tipos de devanados posibles para este tipo de máquinas, se propone unos pasos secuenciales para el diseño del mismo. Cabe destacar que para el diseño de la MI de 6 fases puede

G. Echagüe, M. Ayala y J. Rodas forman parte del Laboratorio de Sistemas de Potencia y Control, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Luque, Paraguay. Email: garyechague@gmail.com, mayala@ing.una.py, jrodas@ing.una.py

utilizarse cualquier MI de 3 fases disponible sin necesidad que la misma posea requerimientos mecánicos y/o eléctricos específicos. De esta manera, cualquier investigador, institución o persona interesada en utilizar máquinas multifásicas (6 fases) para investigaciones podría conseguirla siguiendo el procedimiento propuesto en este artículo.

D. Organización del Documento

El resto del documento se divide en las siguientes secciones. La Sección 2 presenta los pasos para el cálculo de los devanados del estátor dependiendo del tipo del mismo. Luego, en la Sección 3 se aplican los pasos de diseño utilizando una MI trifásica comercial. El análisis del diseño obtenido se realiza mediante simulaciones en ANSYS en la Sección 4. En la misma sección se valida el diseño aplicando un control predictivo de corriente basado en el modelo a la MI de 6 fases. Finaliza el documento con las conclusiones más relevantes obtenidas en este trabajo.

II. MÉTODOS PARA EL DISEÑO DEL DEVANADO DE UNA MI MULTIFÁSICA

Las máquinas multifásicas más utilizadas son aquellas con múltiples devanados trifásicos (6, 9, 12, etc) debido a que éstas permiten el uso modular de la tecnología trifásica ya bien desarrollada lo cual reduce el costo total del sistema [19]. Entre estas configuraciones, la de 6 fases ha sido la más estudiada para aplicaciones de elevada potencia [1] y consecuentemente será la configuración elegida para este artículo. En ese contexto, para el caso particular de una máquina de 6 fases, el devanado en el estátor se puede realizar de tal forma que cada grupo de 3 fases (a_1 b_1 c_1 y a_2 b_2 c_2) estén desfasados 30° o 60° tal como se muestra en la Fig. 1. Cuando el desfase es de 30° a la máquina de 6 fases se la denomina asimétrica mientras que cuando el desfase es de 60° se la denomina simétrica [1].

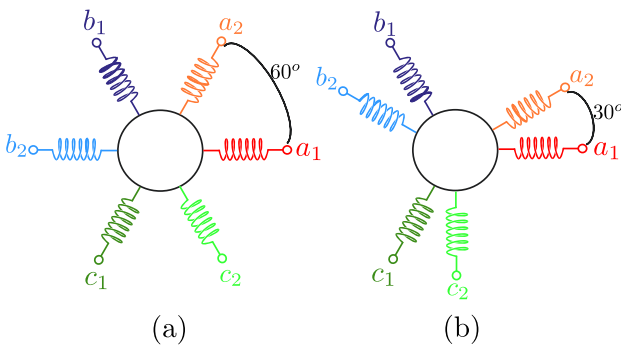


Fig. 1. Configuración de devanados de una máquina de 6 fases. (a) Simétrica. (b) Asimétrica.

Asimismo, este trabajo utilizará la MI del tipo jaula de ardilla justificada principalmente porque es la más utilizada en el ámbito industrial debido a su simplicidad de construcción, mínima necesidad de mantenimiento, robustez, bajo costo, entre otras ventajas [20], [21].

Los devanados de la MI se pueden dividir en concéntrico o excéntrico. Para el primer caso se puede dividir por polos o por polos consecuentes. Mientras que para el segundo caso

puede dividirse en imbricados u ondulados [22]. Un esquema de esta clasificación puede verse en la Fig. 2.

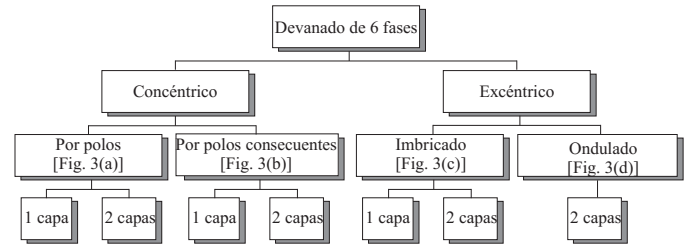


Fig. 2. Taxonomía de los tipos de devanados.

En los devanados concéntricos, los lados activos de una misma fase, situados en ranuras que estén frente a polos consecutivos, son unidos entre sí mediante conexiones o cabezas de devanados concéntricas, como si los devanados situados en ranuras consecutivas, pertenecientes a un mismo grupo de devanados, fueran parte de una sola bobina, concéntricamente distribuida en varias ranuras. Los devanados concéntricos pueden realizarse por polos o por polos consecuentes, como se muestran en la Fig. 3(a) y Fig. 3(b), respectivamente. Estos devanados pueden ser de una o dos capas por ranura.

Por otro lado, en los devanados excéntricos todas las bobinas son iguales y pueden ser imbricadas u onduladas, tal como se puede ver en la Fig. 3(c) y Fig. 3(d), respectivamente. Los devanados ondulados se ejecutan normalmente a dos capas por ranura y de tal forma que al recorrer la armadura se avanza tanto por una cara como por la otra, hasta completar varias vueltas a la misma para que, de esta forma por cada polo de la máquina, se vayan formando grupos de varias bobinas. Los devanados imbricados se ejecutan de tal forma que se avanza por una cara de la armadura y se retrocede a continuación por la otra cara.

Para todos los tipos de devanados es necesario determinar primeramente la distancia entre los grupos trifásicos dependiendo del desfase θ° entre ellos utilizando la ecuación:

$$Y_q = \frac{K \cdot \theta^\circ}{360^\circ \cdot p} \in \mathbb{Z}. \quad (1)$$

Ésta distancia está medida en cantidades de ranuras, por lo que necesariamente deberá ser un número entero. En este trabajo se ha tenido en cuenta, para simplificar el diseño y construcción del devanado, que sólo se tendrá en consideración los diseños que tengan la misma cantidad de devanados en todos los grupos de devanados, así como devanados de la misma cantidad de conductores. Posteriormente se realiza el cálculo del devanado dependiendo el tipo elegido y cuyos pasos a seguir se detallan a continuación.

A. Devanado Concéntrico: por Polos

Paso 1: Calcular K_{pq} utilizando la siguiente ecuación:

$$K_{pq} = \frac{K}{2 \cdot p \cdot q} \in \mathbb{Z}, \quad (2)$$

el cual deberá ser un número entero y es preferible que sea par para que todos los grupos tengan la misma cantidad de devanados y así simplificar el diseño.

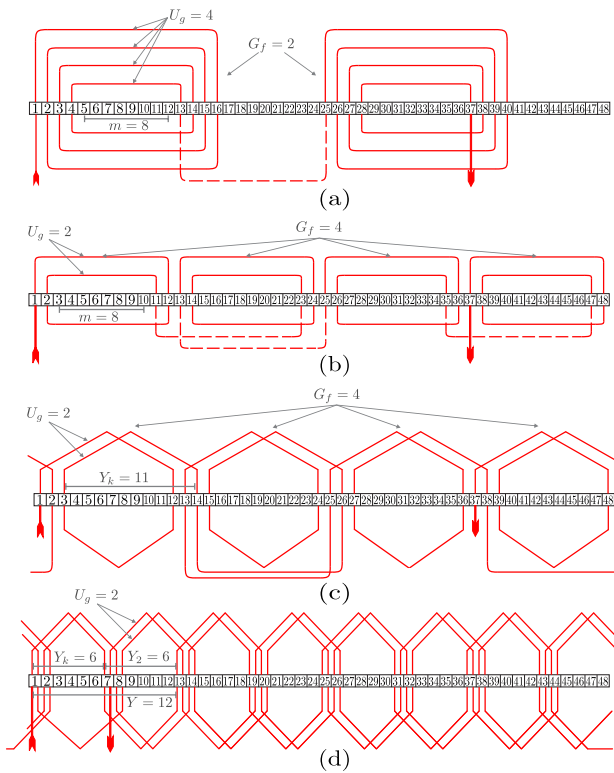


Fig. 3. Tipos de devanados. (a) Concéntrico por polos. (b) Concéntrico por polos consecuentes. (c) Excéntrico imbricado. (d) Excéntrico ondulado.

Paso 2: Se calcula G_f .

$$G_f = 2 \cdot p. \quad (3)$$

Paso 3: Se calcula U_g utilizando la siguiente ecuación para 1 capa:

$$U_g = \frac{K}{4 \cdot p \cdot q} \in \mathbb{Z}, \quad (4)$$

mientras que para 2 capas se utiliza:

$$U_g = \frac{K}{2 \cdot p \cdot q} \in \mathbb{Z}, \quad (5)$$

En todos los casos es deseable que U_g sea un número entero, para que todos los grupos tengan la misma cantidad de devanados.

Paso 4: Se calcula m .

$$m = 2 \cdot U_g \cdot (q - 1). \quad (6)$$

B. Devanado Concéntrico: por Polos Consecuentes

Paso 1: Calcular K_{pq} utilizando (2), el cual debe ser un número entero.

Paso 2: Se calcula G_f :

$$G_f = p. \quad (7)$$

Paso 3: Se calcula U_g mediante (5) para el caso de 1 capa mientras que 2 capas se utiliza:

$$U_g = \frac{K}{p \cdot q} \in \mathbb{Z}, \quad (8)$$

En todos los casos es deseable que U_g sea un número entero.

Paso 4: Se calcula m .

$$m = U_g \cdot (q - 1). \quad (9)$$

C. Devanado Excéntrico: Imbricado

Paso 1: Se calcula U_g . Es deseable que sea un número entero, para que todos los grupos tengan la misma cantidad de devanados. Para 1 capa se utiliza (4) mientras que para 2 capas se utiliza (5).

Paso 2: Se calcula G_f utilizando (3) la cual es válida para devanados de 1 y 2 capas.

Paso 3: Calcular Y_k mediante (10), la cual es válida para devanados de 1 y 2 capas. Se debe tener en cuenta que para 1 capa debe ser un número impar, en caso de que sea un número par, se puede acortar en un número impar de ranuras, el cual no necesariamente debe ser el inmediato inferior. Para devanados de 2 capas puede ser un número par o impar

$$Y_k = \frac{K}{2 \cdot p} \in \mathbb{Z}. \quad (10)$$

D. Devanado Excéntrico: Ondulado

Para el cálculo de este tipo de devanado, todas las ecuaciones utilizadas en los siguientes pasos deben ser números enteros.

Paso 1: Determinar U_g utilizando (5).

Paso 2: Determinar Y_k mediante (10).

Paso 3: Determinar Y mediante:

$$Y = \frac{K}{p} \in \mathbb{Z}. \quad (11)$$

Paso 4: Determinar Y_2 mediante:

$$Y_2 = Y - Y_k. \quad (12)$$

E. Devanado Doble Trifásico Independiente

En el caso que los diseños anteriores no sean viables, es posible implementar un método alternativo para el caso de 2 capas. El método consiste en implementar un devanado trifásico independiente en cada capa, con el desfase correspondiente entre cada grupo trifásico. Posteriormente, se siguen los mismos pasos descritos en las secciones anteriores para devanados de una capa a excepción del devanado ondulado que normalmente se realiza de dos capas

De manera a que se comprenda mejor el proceso de diseño, la Fig. 4 muestra el diagrama de flujo tanto para

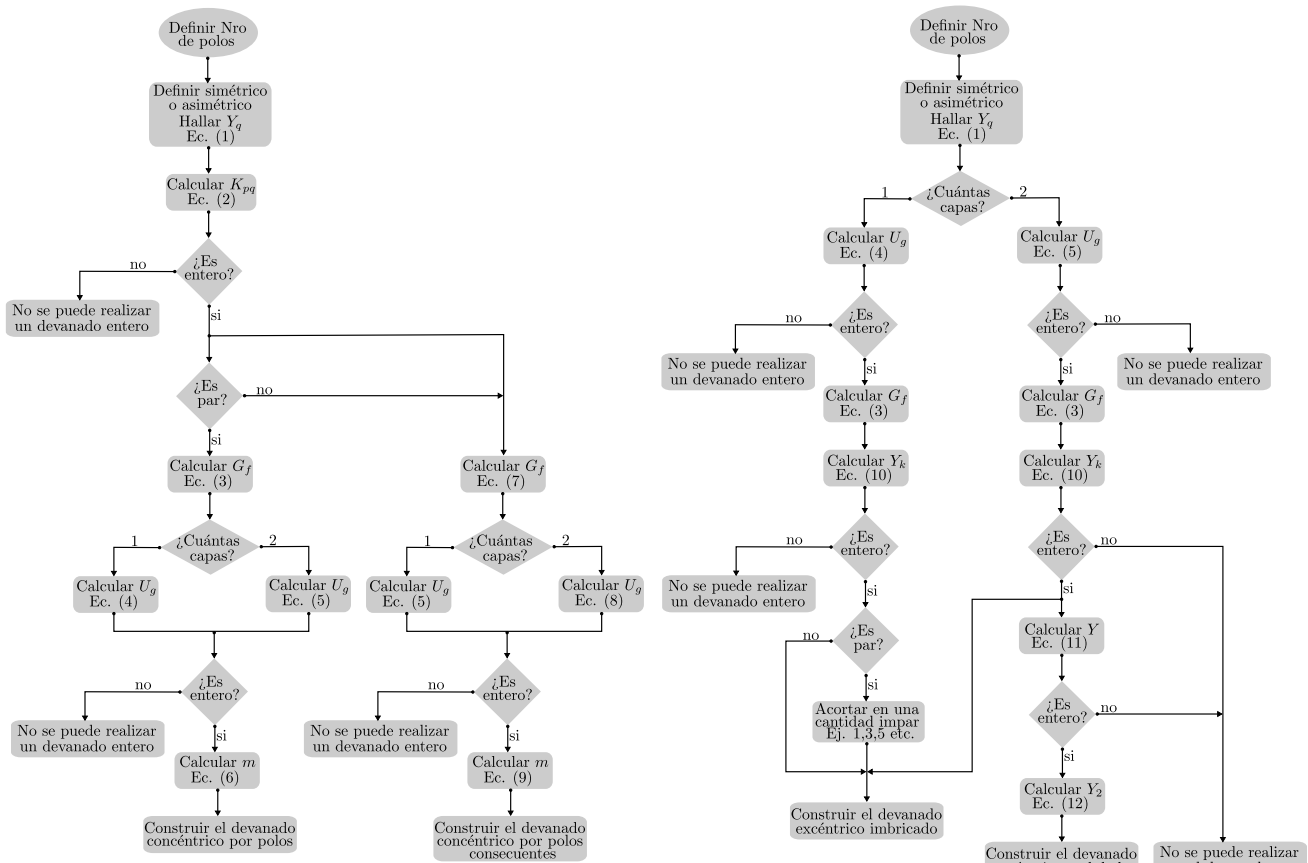


Fig. 4. Diagrama de flujo del proceso de diseño de devanados. Concéntricos (izq.). Excéntricos (der.).

el caso concéntrico como para el excéntrico. Luego, una vez identificados los pasos a seguir dependiendo del tipo de devanado, en la siguiente sección se aplica el procedimiento descrito a una MI trifásica.

III. CASO DE ESTUDIO: DISEÑO DEL DEVANADO DEL ESTÁTOR DE UNA MI DE 6 FASES

Para el diseño de la MI de 6 fases no se tendrá en cuenta requerimientos específicos tales como de par y velocidad. En ese contexto, a modo de estudio de caso, se buscará replicar las mismas características del devanado trifásico original, de 4 polos y 2 capas. Las características mecánicas y eléctricas de la MI original se presentan en la Tabla I. Cabe resaltar que la utilización de esta MI se debe exclusivamente a su disponibilidad y no por un requerimiento específico.

Primeramente se determina el valor de Y_q utilizando (1). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla II. Los valores de las casillas sombreadas no son posibles de implementar debido a que la distancia entre cada inicio de fase está expresado en unidades de ranuras. Dentro de los valores posibles se elige $Y_q = 3$, correspondiente a $p = 2$ y $\theta^\circ = 60^\circ$ (simétrico) para poder replicar las mismas características originales de la MI trifásica descritas al inicio de esta sección. Con éste valor de Y_q está determinada la distancia entre a_1 y a_2 que serán de 3 ranuras que representa 60° y cada fase de un mismo grupo trifásico estarán separadas 6 ranuras que representa 120° . Las

TABLA I
PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS DE LA MI TRIFÁSICA ORIGINAL.

Descripción	Valor
Potencia nominal	4,045 kW
Velocidad nominal	1430 rpm
Número de fases	3
Frecuencia nominal	50 Hz
Tensión nominal	220 V
Corriente nominal	7,9 A
Factor de potencia	0,85
Número de polos	4
Número de ranuras en el estátor	36
Diámetro interno del estátor	103 mm
Diámetro externo del estátor	170 mm
Longitud del estátor	136 mm
Capas por ranura	2
Número de conexiones en paralelo por fase	2
Conductores por ranura	100
Número de barras en el rotor	28
Diámetro interno del rotor	65 mm
Diámetro externo del rotor	104 mm
Longitud del rotor	136 mm

6 fases tendrán sus inicios en las ranuras indicadas en la Tabla III.

Una vez determinado el valor de $p = 2$ se puede aplicar los pasos de la sección anterior con los valores de $K = 36$ y $q = 6$. A continuación se presentan los valores obtenidos para el paso 1 de los cuatro primeros métodos descritos en la sección anterior, los cuales otorgan valores no enteros,

TABLA II
CÁLCULO DE Y_q .

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$	$p = 6$
$Y_q (\theta = 30^\circ)$	3	1,5	1	0,75	0,6	0,5
$Y_q (\theta = 60^\circ)$	6	3	2	1,5	1,2	1

TABLA III
UBICACIÓN DE LA RANURA DE INICIO PARA CADA FASE.

a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2
1	7	13	4	10	16

haciendo así inviable su diseño.

Diseño del Devanado Concéntrico por Polos

Paso 1: $K_{pq} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 6} = 1,5 \notin \mathbb{Z}$.

Diseño del Devanado Concéntrico por Polos Consecuentes

Paso 1 $K_{pq} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 6} = 1,5 \notin \mathbb{Z}$.

Diseño del Devanado Excéntrico Imbricado

Paso 1: $U_g = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 6} = 1,5 \notin \mathbb{Z}$.

Diseño del Devanado Excéntrico Ondulado

Paso 1: $U_g = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 6} = 1,5 \notin \mathbb{Z}$.

A. *Diseño de Doble Devanado Trifásico Independiente*

Debido a que cada grupo trifásico debe tener las mismas características, y no se modificarán el número de capas, el proceso de diseño se resume a un devanado trifásico a una capa para un grupo trifásico (a_1, b_1, c_1), replicando el mismo diseño para el segundo grupo (a_2, b_2, c_2) en la segunda capa y con un desfase de 60° . Por éste motivo se descarta la posibilidad de realizar un devanado ondulado, debido a que este tipo de devanado se realiza normalmente a 2 capas. Consecuentemente, a continuación se analizan las 3 configuraciones posibles.

Opción 1: Devanado Concéntrico por Polos.

Paso 1: Utilizando (2) se tiene: $K_{pq} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3$.

Si bien es un número entero resulta ser impar, por lo que descartamos este diseño.

Opción 2: Devanado Concéntrico por Polos Consecuentes.

Paso 1: Utilizando (2) se tiene: $K_{pq} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3$.

Paso 2: Utilizando (7) se tiene: $G_f = 2$.

Paso 3: Utilizando (4) se tiene: $U_g = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3$.

Paso 4: Utilizando (9) se tiene: $m = 3 \cdot (3 - 1) = 6$.

Opción 3: Devanado Excéntrico Imbricado.

Paso 1: Utilizando (4) se tiene: $U_g = \frac{36}{4 \cdot 2 \cdot 3} = 1,5 \notin \mathbb{Z}$. Por tanto, no será posible realizar este diseño.

La Tabla IV resume los valores obtenidos para cada tipo de devanado donde los valores sombreados no cumplen las condiciones para su diseño.

TABLA IV
RESUMEN DE LOS VALORES DE DISEÑO OBTENIDOS.

Concéntrico						Excéntrico				
Opción 1			Opción 2			Opción 3				
K_{pq}	G_f	U_g	m	K_{pq}	G_f	U_g	m	U_g	G_f	Y_k
3	4	1,5	6	3	2	3	6	1,5	4	9

De los 3 diseños analizados, el concéntrico *por polos consecuentes* es el que cumple con todos los requisitos, por lo que será el diseño a implementar, quedando el diseño final como se muestra en la Fig. 5. En dicha figura se puede observar, tomando como referencia la fase a_1 que el devanado está distribuido en dos grupos ($G_f = 2$), siendo el primer grupo los que se encuentran entre las ranuras 1 al 12, mientras que el segundo grupo corresponde a aquellos que se encuentran entre las ranuras 19 al 30. Cada uno de los grupos están compuestos por 3 bobinas ($U_g = 3$), siendo los correspondientes 1-12, 2-11, 3-10 para el primer grupo y mientras que 19-30, 20-29, 21-28 para el segundo grupo. También se puede observar que dentro de cada grupo hay 6 ranuras libres ($m = 6$) del 4 al 9 para el primer grupo y del 22 al 27 para el segundo grupo, así como también la misma cantidad de ranuras libres entre grupos. Con el mismo criterio de construcción se realizan los siguientes devanados respetando las ranuras de inicio de fase de la Tabla III.

IV. ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO DE LA MI DE 6 FASES

El diseño del devanado del estátor obtenido en la sección anterior se analiza primeramente mediante simulaciones. Para ello se utiliza el paquete Maxwell 2D Design del software ANSYS Electronics, con el cual se podrá determinar si el devanado diseñado genera un campo magnético simétrico en todo el estátor, así como también el campo inducido en el rotor. Primeramente se crea en ANSYS la MI trifásica utilizando los parámetros eléctricos y mecánicos detallados en la Tabla I. Luego, se realiza la simulación del devanado trifásico, cuyos resultados se pueden observar en las Figs. 6 y 7.

Posteriormente se modifica el diseño por el de 6 fases. Para ello se crean las fases adicionales teniendo en cuenta que el desfase entre cada fase debe ser 120° y en cada grupo trifásico 60° . Luego, siguiendo el esquema de la Fig. 5 se indican la distribución de las fases en las diferentes ranuras, así como el sentido de la corriente. De ésta manera se obtiene la distribución del campo magnético a través del estátor (Fig. 8) y el gráfico del flujo magnético en función del tiempo (Fig. 9) donde se puede apreciar el desfase simétrico de las 6 fases con amplitud constante. Al mismo tiempo, en las Figs. 10 y 11, se pueden observar las tensiones y corrientes de estátor

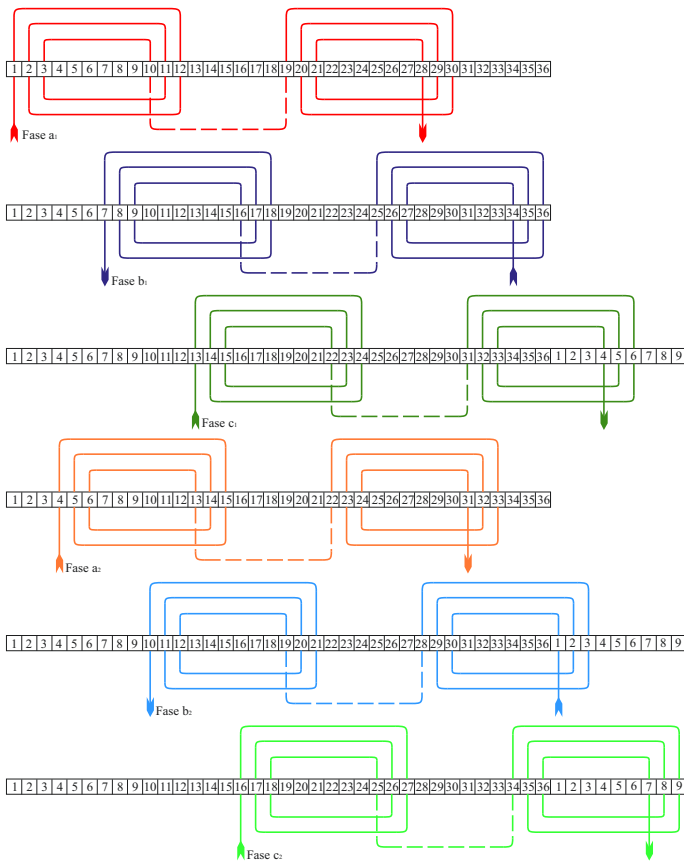


Fig. 5. Diseño final del devanado del estator de la MI de 6 fases.

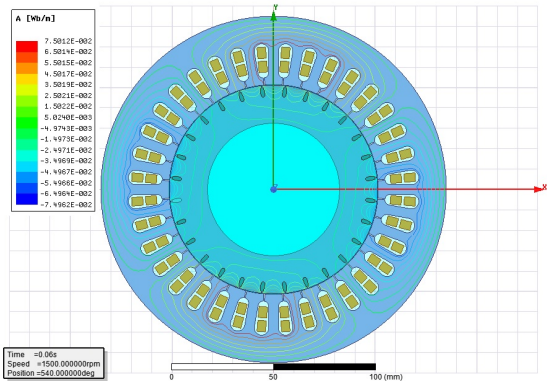


Fig. 6. Distribución del campo magnético en el devanado trifásico de 4 polos.

por fase y sus respectivos desfases con respecto al tiempo. Por último, las Figs. 12 y 13 representan la distribución de los armónicos de la corriente en la fase a_1 de la MI 3 y de 6 fases, respectivamente, obteniendo una distorsión armónica total (THD) similar en ambos casos siendo 0,9 % y 1,02 % respectivamente. Cabe destacar que la MI trifásica posee una amplitud de corriente nominal mayor que la de 6 fases. Cabe mencionar que todas las corrientes de fase tienen un comportamiento muy similar.

A. Implementación del diseño de la MI de 6 fases

La implementación física del diseño (Fig. 5) del devanado

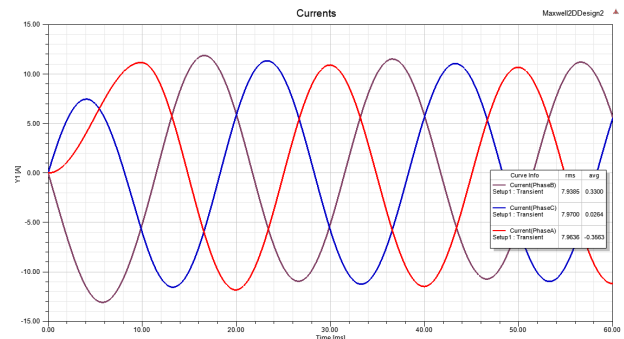


Fig. 7. Corrientes de estator por fase en función del tiempo de la MI trifásica.

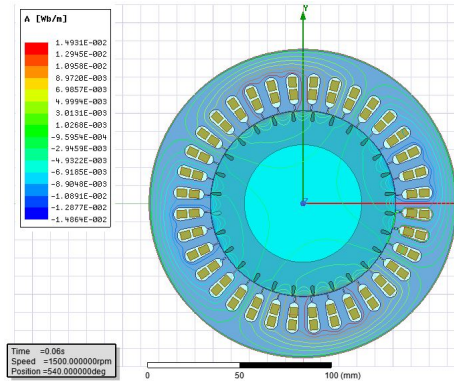


Fig. 8. Distribución del campo magnético en el devanado de 6 fases de 4 polos.

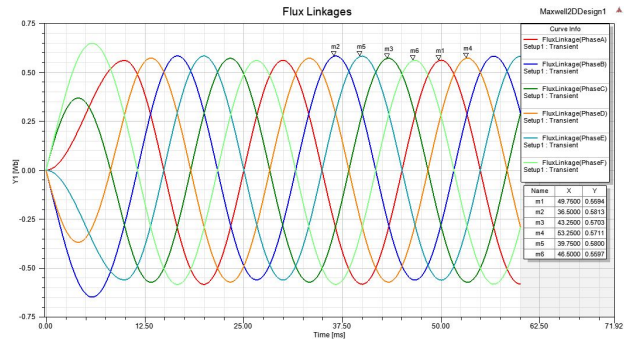


Fig. 9. Flujo magnético en función del tiempo en el devanado de 6 fases.

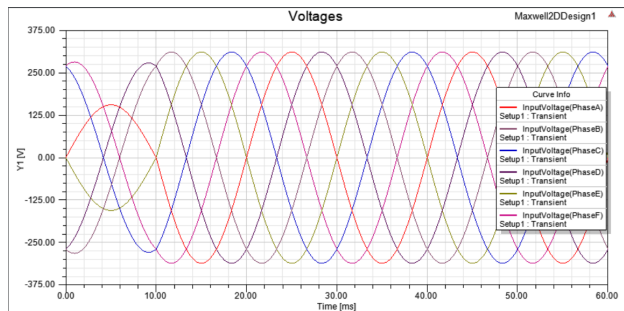


Fig. 10. Tensiones por fase en función del tiempo de la MI de 6 fases.

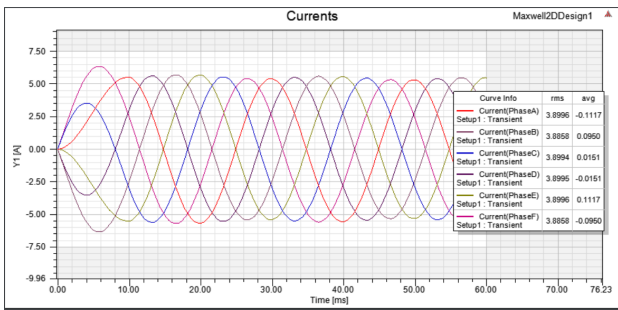


Fig. 11. Corrientes de estátor por fase en función del tiempo de la MI de 6 fases.

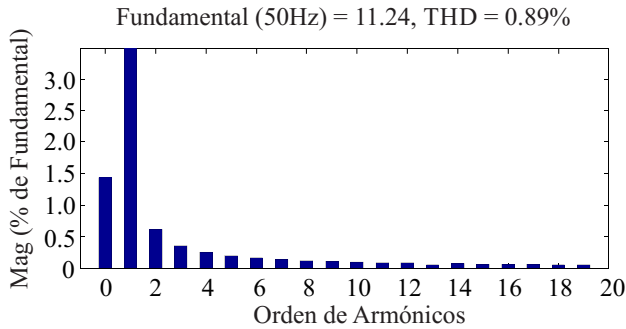


Fig. 12. Distribución de corrientes de estátor armónicas en la MI trifásica.

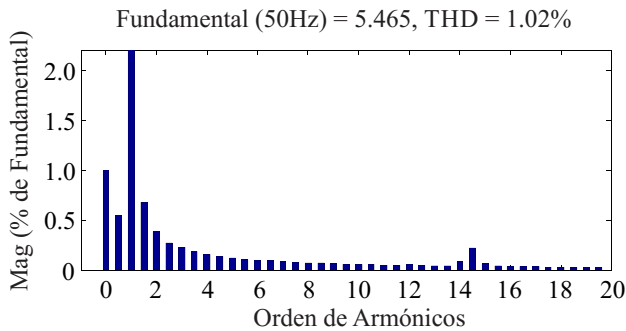


Fig. 13. Distribución de corrientes de estátor armónicas en la MI de 6 fases.

fue llevada a cabo en una empresa paraguaya Electromotor dedicada a la fabricación y reparación de máquinas eléctricas [23]. Se han mantenido el grupo de conductores y el número de conductores por ranura detalladas en la Tabla I. La Fig. 14 muestra las fotografías, por un lado, de los devanados de estátor de la MI de 6 fases, y por otro lado, los terminales del mismo.

Una vez realizado el devanado, se verifica el desfase existente. Para ello se alimenta el primer grupo trifásico (a_1 b_1 c_1) y se mide el desfase de la tensión inducida en el segundo grupo trifásico (a_2 b_2 c_2). La Fig. 15(b) verifica que las fases del segundo grupo están desfasadas 120° entre sí. De la misma manera se repite el procedimiento, se alimenta el segundo grupo y luego se mide las fases de la tensión inducida en el primer grupo obteniendo el mismo resultado, 120° entre las 3 fases. Por último se verifica el desfase entre cada grupo trifásico, para ello se alimenta el primer grupo y

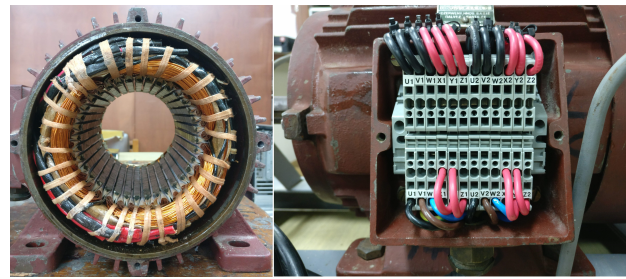


Fig. 14. Fotografías del devanado terminado ($q = 6$). (a) devanado, (b) terminales.

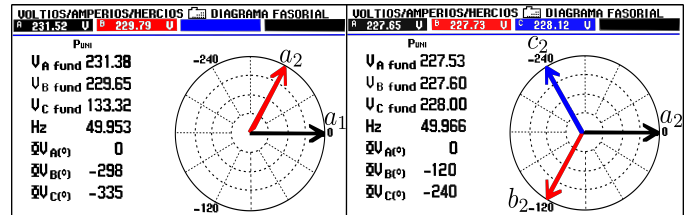


Fig. 15. Fotografía de la medición de las tensiones y desfases. (a) Fases de las tensiones entre a_1 y a_2 . (b) Fases de las tensiones inducidas en a_1 b_1 c_1 .

se mide solamente la tensión en a_1 y a_2 (Fig. 15(a)) y se verifica un desfase de 60° entre ellos, en resumen las fases están distribuidas como se indica en la Fig. 9. Por último, en la Fig. 16 se observan 4 corrientes de la MI de 6 fases con fuente AC senoidal. Se detecta el desfase simétrico de todas las corrientes y un valor similar RMS y THD aproximado de 1% considerando diferentes sondas de medición.

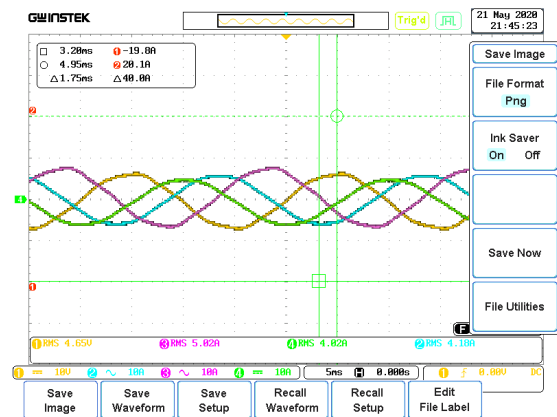


Fig. 16. Medición de 4 corrientes y sus respectivos desfases de la MI de 6 fases.

B. Determinación de la Densidad de Campo

A continuación se determina el valor de la densidad de campo en la región del entrehierro utilizando la siguiente ecuación descrita en [24]:

$$B = \mu_0 \frac{f N \cdot i}{2 \cdot p \cdot g} = \frac{4\pi \cdot 6}{10^7} \frac{198 \cdot 3,9}{2 \cdot 2 \cdot 0,0013} = 0,5198 \quad (13)$$

donde B es la densidad del campo magnético en T, μ_0 es la permeabilidad del vacío considerado para el entrehierro $\frac{4\pi}{10^7}$ en T.m/A, f el número de fases, N el número de vueltas

completas en una fase, i la corriente nominal eficaz por fase y g el espacio promedio en el entrehierro. Cabe resaltar que el valor obtenido, 0,5198 T se encuentra definido dentro del rango de operación típico de 0,4 < B < 0,55 T, tal como se indica en [25].

V. ESTUDIO DE CASO: APLICACIÓN DEL CONTROL PREDICTIVO DE CORRIENTE A LA MI DE 6 FASES

Como ya fue mencionado, el estudio de nuevas estrategias de control ha sido uno de los temas de investigación más estudiados en el área de las máquinas multifásicas en las últimas décadas [1]–[5]. Como el objetivo del diseño de la MI de 6 fases propuesto en el artículo es utilizarlo en investigación, a continuación se valida experimentalmente, como caso de estudio, el control predictivo de corriente.

A. Control Predictivo de Corriente

El concepto del control predictivo se basa en el cálculo del comportamiento futuro del sistema, de tal forma a utilizar dicha información para calcular los valores óptimos que minimizan una función de costo. La ejecución del algoritmo del controlador predictivo se basa en tres pasos: estimación de las variables no medibles, predicción del comportamiento futuro de los estados del sistema, y optimización de las salidas, de acuerdo a las restricciones impuestas como consigna de control. El modelo matemático utilizado para la predicción es un modelo en tiempo discreto el cual puede ser expresado en el espacio de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha}[k+1] \\ \dot{i}_{s\beta}[k+1] \\ \dot{i}_{sx}[k+1] \\ \dot{i}_{sy}[k+1] \\ \dot{i}_{r\alpha}[k+1] \\ \dot{i}_{r\beta}[k+1] \end{bmatrix} = \mathbb{A} \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha}[k] \\ \dot{i}_{s\beta}[k] \\ \dot{i}_{sx}[k] \\ \dot{i}_{sy}[k] \\ \dot{i}_{r\alpha}[k] \\ \dot{i}_{r\beta}[k] \end{bmatrix} + \mathbb{B} \cdot \begin{bmatrix} v_{s\alpha}[k] \\ v_{s\beta}[k] \\ v_{sx}[k] \\ v_{sy}[k] \end{bmatrix} \quad (14)$$

donde las corrientes del estátor en el sub-espacio $\alpha - \beta$ son $\dot{i}_{s\alpha}$, $\dot{i}_{s\beta}$, las corrientes del estátor en el sub-espacio $x - y$ son \dot{i}_{sx} , \dot{i}_{sy} y las corrientes del rotor en el sub-espacio $\alpha - \beta$ son $\dot{i}_{r\alpha}$, $\dot{i}_{r\beta}$. Las tensiones de entrada se representan por $v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$, v_{sx} , v_{sy} . Las matrices \mathbb{A} y \mathbb{B} están definidas en [12].

Luego, una función de costo (15) se utiliza para definir el comportamiento deseado del sistema, en este caso el seguimiento de la corriente. La acción de control óptima es obtenida por medio de la minimización de la siguiente función de costo:

$$J = |i_{s\alpha\beta}^*[k+1] - \hat{i}_{s\alpha\beta}[k+1]|^2 + \lambda_{xy} \cdot |i_{sxy}^*[k+1] - \hat{i}_{sxy}[k+1]|^2 \quad (15)$$

Debido que el control predictivo de corriente está fuera del alcance de este artículo, los lectores puede consultar más detalles en [9], [26], [27].

B. Plataforma de Ensayo Experimental

Para la implementación del control predictivo de corriente se utiliza una bancada de ensayos experimentales mostrada en la Fig. 17, donde el convertidor matricial 3×6 es utilizado

para alimentar a la MI de 6 fases. El control predictivo de corriente se implementa en el procesador de señales dSPACE. Para ello, es necesario extraer los parámetros de la MI diseñada la cual fue realizada utilizando técnicas típicas AC en el dominio del tiempo [28], [29]. Los valores obtenidos para la resistencia del rotor y del estátor fueron 3,95 Ω y 5,95 Ω respectivamente. La inductancia de magnetización (L_m) es 429,2 mH, la inductancia del estátor (L_s) es 434,3 mH y la inductancia del rotor (L_r) es 436,9 mH. Cabe destacar que la MI de 6 fases mantiene tanto la velocidad nominal, la potencia nominal y el número de polos a su versión original.

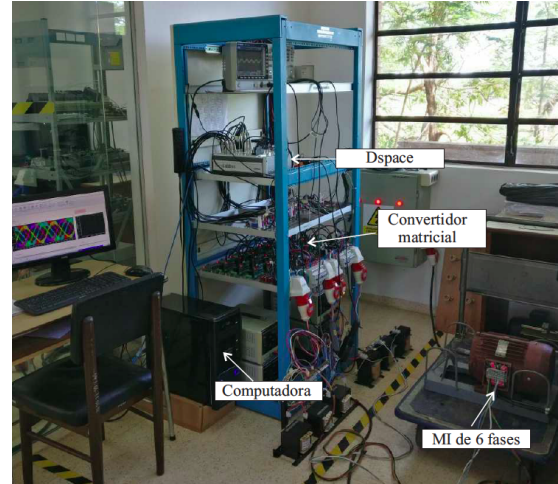


Fig. 17. Fotografía de la plataforma de ensayos experimentales.

C. Validación Experimental

A continuación se valida el diseño de los bobinados de la MI de 6 fases. Cabe destacar que la implementación experimental del control predictivo sirve para demostrar que la MI de 6 fases diseñada funciona para su uso en investigación. Consecuentemente, otros controladores, lineales o no lineales, ya pueden ser estudiados y validados con esta MI multifásica, cumpliéndose así uno de los objetivos del artículo. Además, el correcto funcionamiento del control predictivo se basa, entre otras cosas, en la utilización de los parámetros correctos de la MI [30]. En ese contexto, la Fig. 18 muestra el seguimiento de la corriente de las fases a_1 y a_2 . La corriente de referencia senoidal con amplitud pico 1 A.

VI. CONCLUSIONES

La disponibilidad de las máquinas multifásicas para su compra directa en el mercado tanto mundial como latinoamericano es limitada. Consecuentemente, las actividades de investigación aplicadas al área de las máquinas multifásicas abordan como primera etapa la construcción del mismo a partir de una máquina trifásica comercial. En ese contexto, el presente artículo ha presentado una guía del procedimiento paso a paso para el diseño del devanado de una MI de 6 fases a partir de una MI trifásica comercial. El análisis del diseño fue llevado a cabo utilizando el software ANSYS-Maxwell. Posteriormente, el correcto funcionamiento de la MI de 6 fases diseñada y de los parámetros de la misma fue realizado aplicando el control predictivo de corriente.

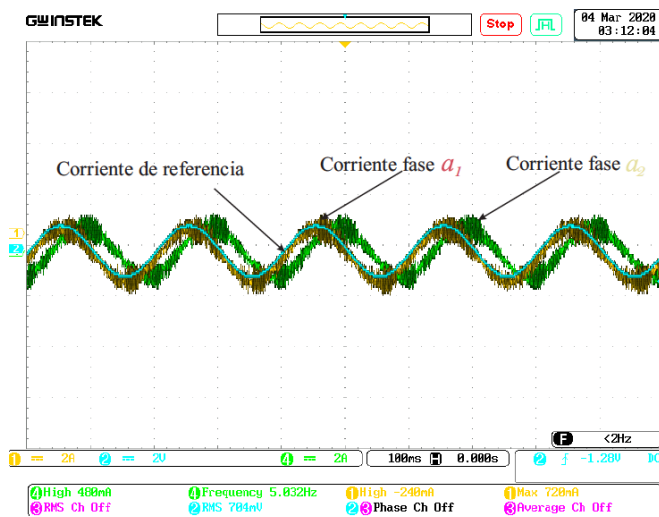


Fig. 18. Control predictivo de corriente aplicado a la MI de 6 fases diseñada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer, por un lado, a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción, Paraguay, por el apoyo financiero proveído para la realización del trabajo de investigación, y por otro lado, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) mediante su Programa Nacional de Incentivo a los Investigadores (PRONII).

REFERENCIAS

- [1] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat and S. Williamson, "Multiphase induction motor drives - a technology status review," *IET Electr. Power App.*, vol. 1, no. 4, pp. 489-516, Jul. 2007, doi: 10.1049/iet-epa:20060342.
- [2] E. Levi, "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 5, pp. 1893-1909, May 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.918488.
- [3] F. Barrero and M. J. Duran, "Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines—Part I," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 449-458, Jan. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2447733.
- [4] M. J. Duran and F. Barrero, "Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines—Part II," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 459-468, Jan. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2448211.
- [5] M.J. Duran, E. Levi and F. Barrero, *Multiphase Electric Drives: Introduction*, USA: Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2017.
- [6] (2020, Abr.) Sitio web HYUNDAI elevator. [Online]. Disponible: [www.hyundaielevator.co.kr/upload/product-catalog/THE%20EL\(en\).pdf](http://www.hyundaielevator.co.kr/upload/product-catalog/THE%20EL(en).pdf)
- [7] (2020, Abr.) Sitio web Queen Elizabeth Cruises. [Online]. Disponible: www.queenelizabethcruises.net/hms-queen-elizabeth-aircraft-carrier/
- [8] (2020, Abr.) Sitio web TM4. [Online]. Disponible: www.danatm4.com/applications/commercial-vehicles/
- [9] J. Rodas, F. Barrero, M.R. Arahal, C. Martín, and R. Gregor, "On-Line Estimation of Rotor Variables in Predictive Current Controllers: a Case Study using Five-Phase Induction Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 9, pp. 5348-5356, Sep. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2559420.
- [10] M. Ayala, J. Doval-Gandoy, J. Rodas, O. González, and R. Gregor, "Current Control Designed with Model based Predictive Control for Six-Phase Motor Drives," *ISA Trans.*, vol. 98, pp. 496-504, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.isatra.2019.08.052.
- [11] M. Ayala, J. Doval-Gandoy, J. Rodas, O. González, R. Gregor, M. Rivera, "A Novel Modulated Model Predictive Control Applied to Six-Phase Induction Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Early Access, 2020, doi: 10.1109/TIE.2020.2984425.
- [12] Y. Kali, M. Ayala, J. Rodas, M. Saad, J. Doval-Gandoy, R. Gregor, K. Benjelloun, "Current Control of a Six-Phase Induction Machine Drive Based on Discrete-Time Sliding Mode with Time Delay Estimation," *Energies*, vol. 12, pp. 170, 2019, doi: 10.3390/en12010170.
- [13] Y. Kali, M. Saad, J. Doval-Gandoy, J. Rodas, K. Benjelloun, "Discrete Sliding Mode Control based on Exponential Reaching Law and Time Delay Estimation for an Asymmetrical Six-Phase Induction Machine Drive," *IET Electr. Power App.*, vol. 13, no. 11, pp. 1660-1671, Nov. 2019, doi: 10.1049/iet-epa.2019.0058.
- [14] Y. Kali, M. Ayala, J. Rodas, M. Saad, J. Doval-Gandoy, R. Gregor, K. Benjelloun, "Time Delay Estimation based Discrete-Time Super-Twisting Current Control for a Six-Phase Induction Motor," *IEEE Trans. Power Electron.*, Early Access, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2995773.
- [15] G. Boztas, M. Yildirim, O. Aydogmus, "Design and Analysis of Multi-Phase BLDC Motors for Electric Vehicles," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 8, no 2, pp. 2646-2650, 2018.
- [16] M. Caruso, et al., "A general mathematical formulation for winding layout arrangement of electrical machines," *Energies*, vol. 11, no 2, pp. 446, 2018, doi: 10.3390/en11020446.
- [17] B. Kundrotas, et al., "Research of six-phase induction motor windings," *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 20, no 1, pp. 15-18, 2014, doi: 10.5755/j01.eee.20.1.2237.
- [18] R. Bojoi, A. Cavagnino, M. Cossale, A. Tenconi, "Multiphase starter generator for a 48-V mini-hybrid powertrain: Design and testing," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 2, 1750-1758, Mar.-Apr. 2016, doi: 10.1109/TIA.2015.2487351.
- [19] E. Levi, "Advances in Converter Control and Innovative Exploitation of Additional Degrees of Freedom for Multiphase Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 433-448, Jan. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2434999.
- [20] A. S. Lunardi, J. S. Solís Chaves and A. J. Sguarezi Filho, "Predictive Direct Torque Control for a Squirrel Cage Induction Generator Grid Connected for Wind Energy Applications," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4454-4461, Nov. 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7795814.
- [21] L. A. Mier, J. S. Benítez, R. López, J. A. Segovia, R. Peña and F. J. Ramirez, "Adaptive Fuzzy Control System for a Squirrel Cage Induction Motor," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 15, no. 5, pp. 795-805, May 2017, doi: 10.1109/TLA.2017.7910191.
- [22] F. Martínez Domínguez, *Reparación y bobinado de motores eléctricos*, España: Paraninfo Cengage Learning, 2008.
- [23] (2020, Mar.) Sitio web Electromotor. [Online]. Disponible: www.electromotor.com.py
- [24] J. F. Mora, *Máquinas Eléctricas*, España: McGraw-Hill, 2008.
- [25] G. E. Harper, *Manual de Electricidad Industrial II: Reparación de motores eléctricos*, México: Limusa, 2002.
- [26] J. Rodas, "Aplicación de estimadores on-line de variables rotóricas para la mejora de las prestaciones en variadores de velocidad multifásicos," Tesis Doctoral, Dpto. Ing. Electr., Universidad de Sevilla, Sevilla, Andalucía, España, 2016. [Online]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11441/44338>
- [27] F. Barrero, M. R. Arahal, R. Gregor, S. Toral and M. J. Duran, "A Proof of Concept Study of Predictive Current Control for VSI-Driven Asymmetrical Dual Three-Phase AC Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 1937-1954, Jun. 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2011604
- [28] A. G. Yepes, J. A. Riveros, J. Doval-Gandoy, F. Barrero, O. López, B. Bogado, M. Jones, and E. Levi, "Parameter identification of multiphase induction machines with distributed windings Part 1: Sinusoidal excitation methods", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 4, pp. 1056-1066, Dec. 2012, 10.1109/TEC.2012.2220967.
- [29] J. A. Riveros, A. G. Yepes, F. Barrero, J. Doval-Gandoy, B. Bogado, O. López, M. Jones, and E. Levi, "Parameter identification of multiphase induction machines with distributed windings Part 2: Time-domain techniques", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 4, pp. 1067-1077, Dec. 2012, 10.1109/TEC.2012.2219862.
- [30] C. Martín, M. Bermúdez, F. Barrero, M.R. Arahal, X. Kestelyn, et al. "Sensitivity of Predictive Controllers to Parameter Variation in Five-Phase Induction Motor Drives," *Control Eng. Pract.*, vol. 68, pp. 23-31, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.conengprac.2017.08.001.



Gary Echagüe nació en Asunción, Paraguay, en 1989. Se unió al Laboratorio de Sistemas de Potencia y Control de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (FIUNA), Paraguay en el 2019. Actualmente se encuentra desarrollando su trabajo final de grado en la carrera de Ingeniería Electrónica de la FIUNA. Sus intereses en investigación se centran en la electrónica de potencia, diseño y control de accionamientos eléctricos trifásicos y multifásicos.



Magno Ayala recibió su grado en Ingeniería Electrónica por la Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción, Paraguay en 2014 y su Maestría en Ingeniería Electrónica en 2017 por la Facultad de Ingeniería en la Universidad Nacional de Asunción (FIUNA). Se unió al Laboratorio de Sistemas de Potencia y Control en la FIUNA en el 2015, como Investigador Asistente. El Prof. Ayala es becario por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para programa de Doctorado en Ingeniería Electrónica de la FIUNA.



Jorge Rodas (Senior Member, IEEE) nació en Asunción, Paraguay en 1984. Recibió su título en Ingeniería Electrónica por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (FIUNA), en 2009. Recibió su título de Máster Universitario en Aplicaciones de Procesado de Señal en Comunicaciones por Universidad de Vigo, España en el 2012. Recibió su título de Máster Universitario en Electrónica, Tratamiento de Señal y Comunicaciones por la Universidad de Sevilla (US), España en 2013. Recibió el Doctorado en Ingeniería

Automática, Electrónica y Telecomunicación por la US y el Doctorado en Ingeniería Electrónica por la FIUNA, ambos en 2016. Desde el 2011 forma parte del plantel docente y de investigación de la FIUNA. El Prof. Rodas es autor de más de 80 artículos científicos publicados en revistas y conferencias arbitradas e indexadas. Fue disertante invitado en varios seminarios nacionales y en congresos internacionales en Austria, Brasil, Chile, China, Canadá, Estados Unidos, Italia, República Checa, España e Inglaterra, entre otros. Realizó una estancia de investigación post-doctoral en la École de Technologie Supérieure (Montreal, Canadá) en 2017. Su área de investigación incluye al control predictivo, control no lineal, control de vehículos aéreos no tripulados, accionamientos multifásicos, convertidores matriciales y control de convertidores de potencia para aplicaciones en energías renovables.