

MOTOR DE INDUCCIÓN ALIMENTADO CON INVERSOR MULTINIVEL

J. Díaz¹, D. Pabón², Y. Anaya³, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Pamplona

Recibido marzo 7 de 2014 – Aceptado abril 25 de 2014.

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v8n1.a02>

Resumen — En el artículo se realiza un análisis del comportamiento de un motor de inducción tipo jaula de ardilla frente al suministro eléctrico por convertidores multinivel de frecuencia variable. Este análisis se realiza mediante el modelado y simulación en MATLAB® por medio de su entorno de programación visual Simulink®. El trabajo comprende el modelo de convertidores multinivel en cascada de 5, 9 y 27 escalones. Incluye la parametrización del motor trifásico a utilizar, las simulaciones del sistema convertidor-motor-carga y por último se muestra el comportamiento de las variables del motor frente a las diferentes alimentaciones realizando un análisis de la calidad de la energía suministrada.

Palabras claves — Calidad de la energía, frecuencia variable, inverter multinivel, motor de inducción, simulación.

Abstract — This work deals with the analysis of the behavior of a three phase squirrel cage induction motor connected to a variable frequency multilevel converter. This analysis is conducted using MATLAB® and its tools for modeling and simulation, and also using the visual programming environment of Simulink®. The work includes the modeling of a cascade multilevel converter of 5, 9 and 27 steps, the induction motor model and its parameters and the simulation of the converter - induction motor - load system. Finally, the paper shows the analysis of the behavior of the motor variables versus different power supplies and an analysis of the supplied energy quality.

Keywords— Induction motor, multilevel inverter, power quality, variable frequency, simulation.

I. INTRODUCCIÓN

EL suministro de energía eléctrica es uno de los principales servicios industriales y domiciliarios en la sociedad actual, por lo que se ha tomado conciencia de la importancia de contar con un abastecimiento de alto nivel en términos de calidad de la energía.

Este trabajo es postulado dentro del marco del Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Agricultura - CIIMCA 2013 -

¹ J. L. Díaz R. es Msc. en Automática de la Univ. Central de Las Villas, Cuba, Email: jdiazcu@gmail.com.

² L. D. Pabón F. es Ingeniero Eléctrico de la Universidad de Pamplona, Email: davidpabon@hotmail.es.

³ Y. C. Anaya L. es Ingeniero Eléctrico de Universidad de Pamplona, Email: yanc83@hotmail.com.

La sociedad y la industria actualmente poseen una penetración de alto grado en cuanto a equipamiento electrónico de diversas generaciones, vinculados al control de procesos, accionamiento, procesamiento de datos, comunicaciones y transmisión de información entre otros [1].

Esta penetración de equipo electrónico es fuente de contaminantes en las redes eléctricas y causa de diferentes problemas en cuanto a calidad de la energía se refiere [2].

Un ejemplo de esto son los convertidores de potencia que controlan los motores de inducción, por lo general del tipo jaula de ardilla debido a su versatilidad y poca necesidad de mantenimiento [3], estos variadores de velocidad industriales realizan conversiones de AC en DC y DC en AC por medio de componentes de electrónica de potencia que producen distorsión armónica [4], [5] provocando efectos indeseados tanto en el motor como en la red en donde se conectan [6], [7]. En este trabajo se analiza el proceso de conversión DC-AC mediante la utilización de tecnología de convertidores multinivel para identificar sus efectos sobre el motor de inducción determinando los posibles beneficios que tiene utilizar este tipo de conversión sobre la convencional en este tipo de aplicaciones, evaluando el comportamiento del motor frente a la calidad de la energía suministrada.

II. MARCO TEÓRICO

Los convertidores multinivel están disponibles desde mediados de 1980 con el trabajo de Nabae, Takahashi y Agaki [8]. En los últimos años se evidencia un incremento significativo en las aplicaciones de estos tipos de convertidores [9]-[11], a pesar que este tipo de conversión puede considerarse un área joven en el entorno de la inversión de energía, presenta una gran expectativa debido a que la tensión de salida tiene un contenido armónico inferior a la obtenida por un convertidor convencional [12].

El control de motores es una rama ampliamente trabajada presentando investigaciones desde controles relativamente sencillos en lazo abierto para la industria, como modelos más complejos con y sin utilización de sensores en el ámbito académico. Sin embargo, en la mayoría de estos estudios utilizan

convertidores convencionales de potencia con modulación por ancho de pulso (PWM) que no son una buena opción si de calidad de la energía se trata [13]. Teniendo en cuenta esta problemática que tienen los convertidores convencionales en cuanto a calidad de la potencia, en los últimos años se han hecho investigaciones acerca de la alimentación del motor de inducción mediante convertidores multinivel [14]-[17], pero aún no se presenta el comportamiento del motor frente a la variación de frecuencia utilizando modulaciones multinivel invariantes en forma y calidad de la energía.

utilizando dos fuentes independientes de igual valor ($V_{dc1}=V_{dc2}$) [18] aunque la forma de onda obtenida no es la adecuada en cuanto a la calidad de la energía se refiere [19], esta topología nos servirá como punto de partida para explicar la metodología utilizada.

En la Fig. 1. se puede apreciar la topología del convertidor y la forma de onda de tensión a la salida para un período completo de frecuencia igual a 60 Hz. Las fuentes se asignaron como 1 p.u. (por unidad) en una base igual a V_{dc} (Voltaje en directa de la fuente de alimentación).

III. MODELADO Y SIMULACIÓN

A. Modelado de los inversores. Inversor de 5 Niveles

Mediante la topología de un inversor multinivel en cascada simétrico, con dos etapas de puente H, en cada fase se pueden obtener cinco niveles de tensión por fase

Para encontrar acertadamente los ángulos de conmutación del convertidor se usaron algoritmos en Matlab®, en donde mediante trabajos previos como [19]-[21], entre otros, se encontraron ángulos aproximados para la conmutación de cada nivel (ver Fig. 1.)

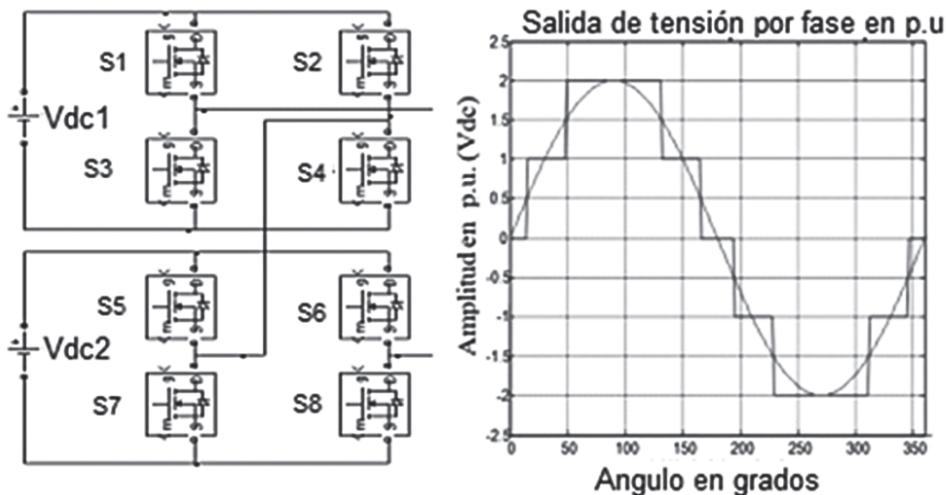


Fig. 1. Topología del convertidor en cascada simétrico y forma de onda de salida en p.u. en base V_{dc} .

TABLA I.
SECUENCIA DE DISPARO PARA LOS DISPOSITIVOS DE POTENCIA.

Switch	Ángulo de disparo en grados									
	0	14	48	132	165	194	229	312	346	
S1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	
S2	1	0	0	0	0	1	1	1	1	
S3	0	0	0	1	1	1	1	0	0	
S4	0	1	1	1	1	0	0	0	0	
S5	0	0	1	1	1	1	0	0	0	
S6	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
S7	1	1	0	0	0	0	1	1	1	
S8	1	1	1	1	0	0	0	0	1	

Con los ángulos de activación del inversor se generaron las secuencias de encendido para los interruptores de potencia (*Mosfets*). Esta secuencia se resume en la TABLA I.

Se modeló el inversor multinivel de cinco escalones en Simulink® mediante la topología mostrada en la Fig. 1. y controlando su conmutación mediante las señales de la TABLA I.

En la Fig. 2. se observa las formas de ondas en la salida de cada puente producto de las secuencias establecidas para los *mosfets* y la forma de onda resultante de la adición de la tensión de las salidas de los puentes.

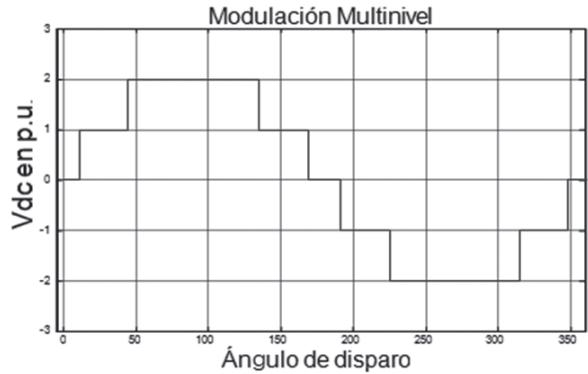
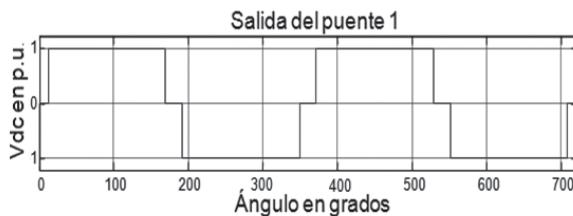
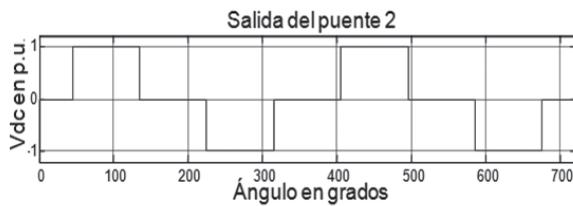
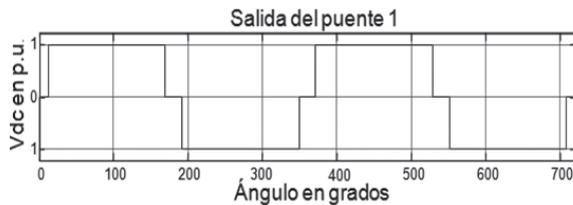


Fig. 2. Ondas de voltaje presentes en la salida de cada puente y forma de onda total.



Para modelar el inversor multinivel trifásico es necesario replicar dos veces el diseño del circuito del inversor de una fase, mostrado en la Fig. 1. De esta manera se obtienen las fases B y C. El esquema de conexiones se observa en la Fig. 3., en donde se muestra el inversor resultado de la adición de 3 convertidores monofásicos [22].

Para las dos fases replicadas, se debe tener en cuenta que las señales de control y las salidas de los puentes serán las mismas sólo que desfasadas 120° eléctricos entre sí. En la Fig. 4., se muestran las ondas de las tensiones de línea obtenidas a la salida del convertidor. La amplitud está en valores p.u. con base V_{dc} y se presentan más de 5 escalones debido a la diferenciación realizada con las tensiones de fase (de 5 escalones ver Fig. 1.) [22]. Esto hace que los voltajes de línea asemejen más a una onda sinusoidal lo cual es conveniente para el buen funcionamiento de los motores de inducción y preservar su tiempo de vida útil [23].

Inversor de 9 Niveles

Para formular el modelo del convertidor de 9 escalones se utilizó la configuración de inversor multinivel en cascada asimétrico [13], la misma utilizada en el convertidor de 5 escalones y mostrada en la Fig. 1. solo que en este caso, las fuentes de DC que alimentan las etapas de cada inversor no tienen la misma amplitud, para la segunda etapa se utiliza una fuente de 3 veces el valor de la fuente DC de la primera etapa, es decir: $V_{dc2}=3*V_{dc1}$. [4],[18],[20] y [22]. En la Fig. 5, se aprecia la topología y el período de la forma de onda obtenida con el inversor de 9 niveles.

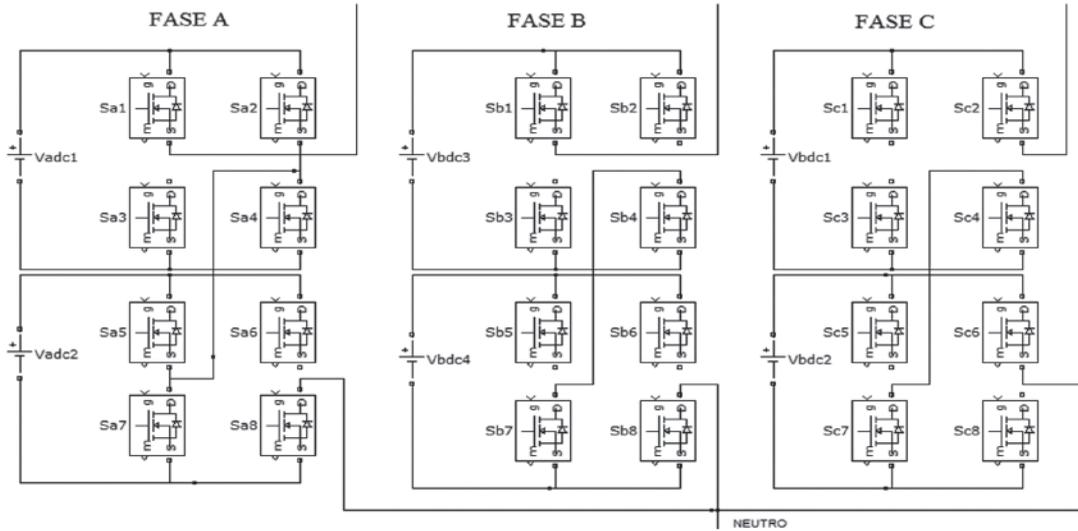


Fig. 3. Topología del convertidor trifásico conectado en estrella (Y)

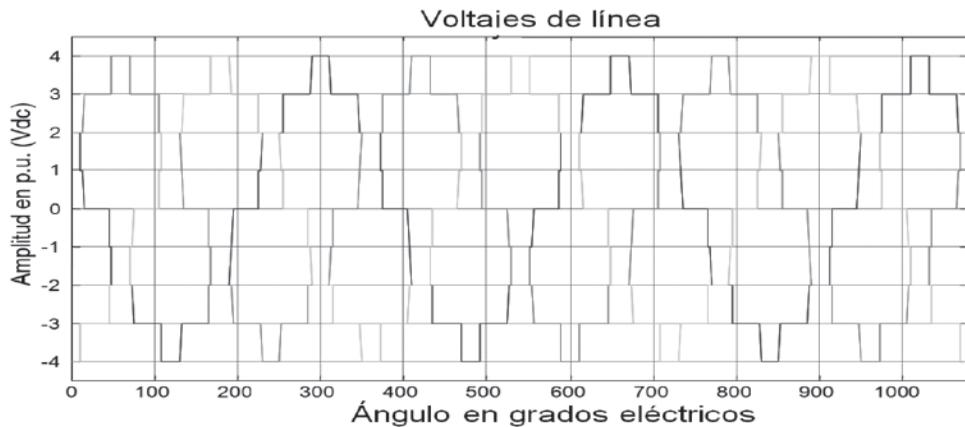


Fig. 4. Voltajes de línea en la salida del convertidor trifásico.

La metodología para determinar los ángulos de conmutación es la misma que se utilizó para el inversor anterior. La tabla de activación es diferente ya que para establecer los 9 escalones las secuencias de conmutación cambian [21]. Las formas de onda del convertidor trifásico se muestran en la Fig. 6. En esta se puede observar los tres voltajes de línea, en donde aparecen muchos más escalones que en las tensiones de fase (Fig. 5), lo cual asemeja aún más a la forma de onda sinusoidal deseada.

Inversor de 27 Niveles

Para obtener el modelo del convertidor de 27 niveles se utilizó la configuración de convertidor multinivel en cascada

asimétrico con relación de 3 nuevamente, para esto fue necesario utilizar una tercera etapa en el inversor y un arreglo de fuentes por fase de $V_{dc3}=3*V_{dc2}$ y $V_{dc2}=3*V_{dc1}$ [13]. En la Fig. 7. se puede observar la topología trifásica de este convertidor conectado en estrella.

En la Fig. 8. se muestran las formas de onda generadas en cada fase del inversor. Nótese que en las tensiones de línea la forma de onda es prácticamente sinusoidal para una frecuencia 60 Hz, presentando menor distorsión que los convertidores anteriores y desplazando el componente de distorsión hacia los armónicos de alta frecuencia [19].

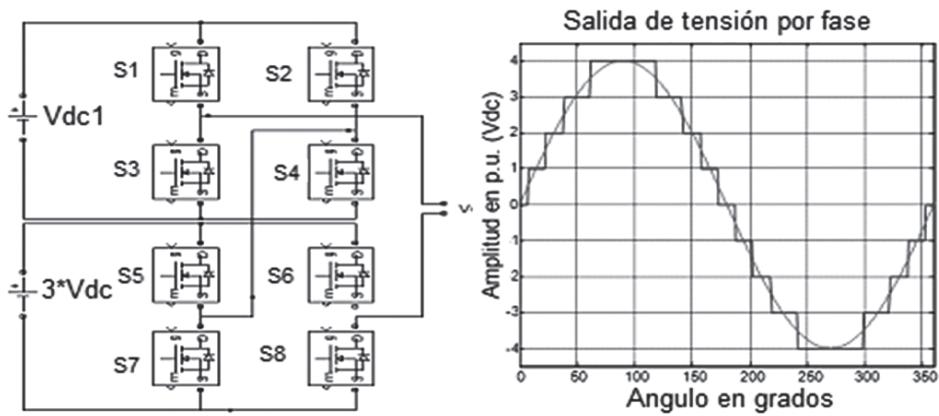


Fig. 5. Topología y onda de tensión de salida por fase del convertidor de nueve escalones

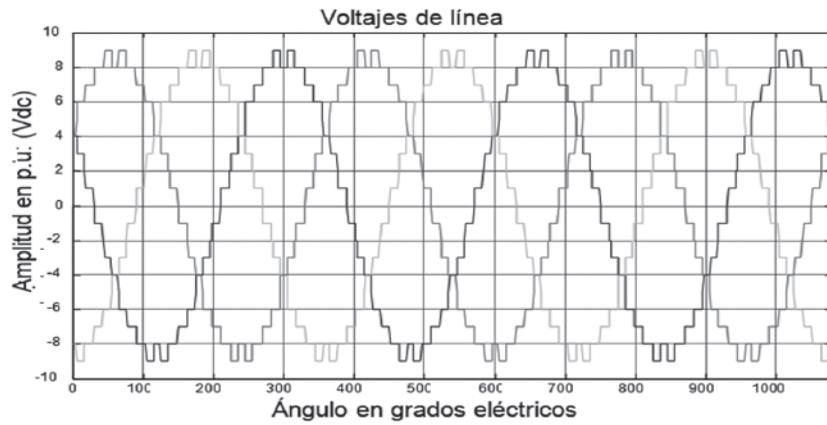


Fig. 6. Forma de onda de las tensiones de línea para el convertidor de 9 escalones por fase.

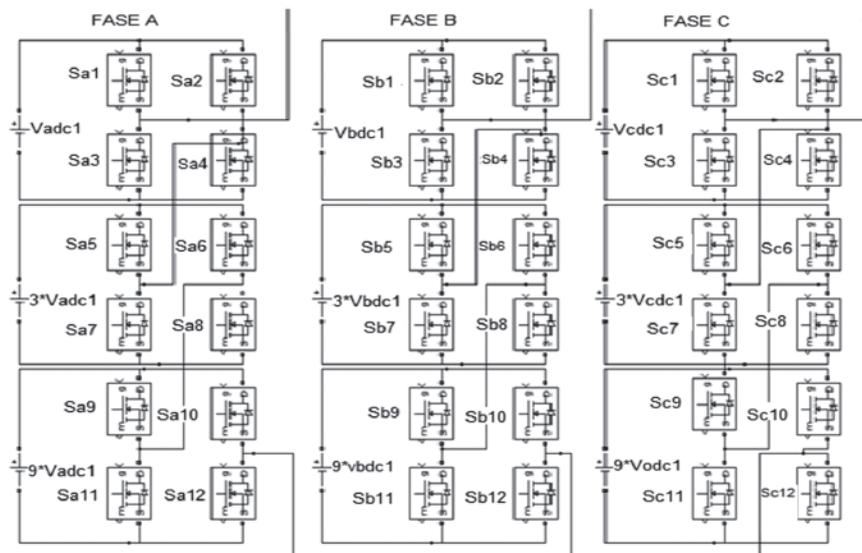


Fig. 7. Topología multinivel trifásica de 27 escalones, conexión

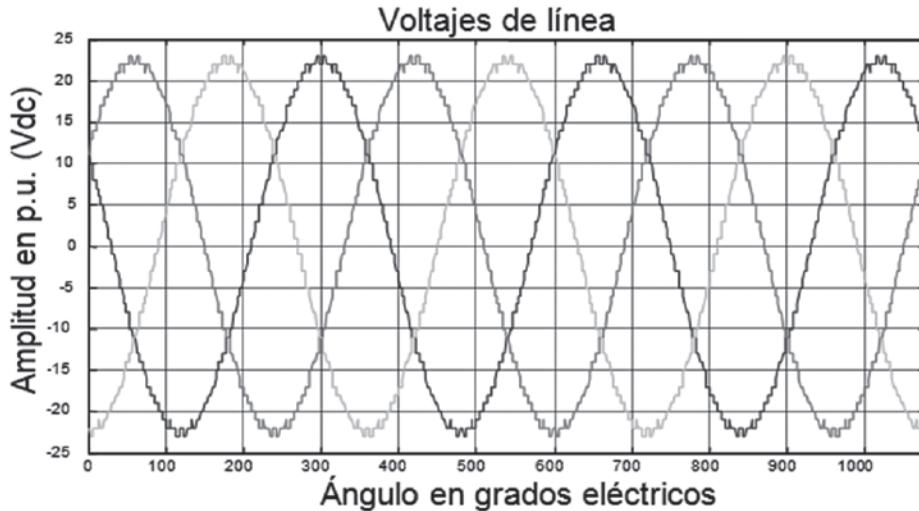


Fig. 8. Voltajes de línea del convertidor de 27 escalones

B. Parámetros del motor de inducción jaula de ardilla

Para la elección del motor se optó por uno de inducción tipo jaula de ardilla trifásico de uso general que se puede encontrar comúnmente en la industria aplicado en bombas centrífugas de impulsión, máquinas de herramientas y compresores [24]. Se simula el modelo del motor de inducción de 3 HP con los valores de los parámetros que se presentan en la TABLA II.

Para el modelo en *Simulink*[®] se utilizó uno de los bloques establecidos en la *Toolbox SymPowerSystems*, al cual se le ajustaron los parámetros solicitados por *Matlab*[®] para el tipo de motor descrito teniendo en cuenta las respectivas conversiones de unidades y otras consideraciones, como la conversión de reactancias a inductancias

TABLA II.
PARÁMETROS DEL MOTOR

Parámetro	Magnitud	Parámetro	Magnitud
Potencia nominal	3 HP	Resistencia del estator	0.435 Ω
Voltaje nominal	220 V	Resistencia del rotor	0.816 Ω
Frecuencia nominal	60 Hz	Reactancia del estator	0.754 Ω
Velocidad nominal	900 rpm	Reactancia del rotor	0.754 Ω
Par de la Carga Nominal	11.5 Nm	Reactancia mutua	26 Ω
Número de Polos	4	Inercia del rotor	0.089 Kgm^2

C. Simulación

Para realizar las simulaciones a frecuencia variable se programaron los algoritmos correspondientes a la generación de las señales de control de los dispositivos semiconductores en dependencia de la frecuencia, y se realizó para cada convertidor un programa de simulación como el que se muestra en la Fig. 8, donde se incluyen todos los medidores correspondientes tanto a la calidad del suministro como a las variables del motor, cabe resaltar que en cada uno de los convertidores se calcularon las fuentes para que el voltaje de línea de salida RMS fuera lo más cercano al voltaje nominal de motor. Por ejemplo, para el caso del convertidor de cinco niveles el voltaje de las fuentes fue de 94V.

En la Fig. 9. se puede observar en diferentes colores las etapas de la simulación. En color gris aparece el convertidor multinivel, en color rojo se encuentran señalados los medidores de tensiones utilizados. En color verde los bloques concernientes al análisis y la visualización de las variables de la calidad de energía suministrada (RMS, THD, espectro armónico) y las señales de salida del motor analizadas (corrientes estáticas, par electromagnético inducido y velocidad del rotor). Por último, en color violeta aparece el modelo del motor y el bloque correspondiente al par de carga, el cual es considerado constante e igual al nominal (11.5 Nm). Las simulaciones se realizaron de igual manera para los tres convertidores a diferentes frecuencias, teniendo en cuenta un control escalar de tensión (V/Hz) a la entrada del motor para alimentaciones con frecuencias por debajo de la nominal con el fin de no saturar la máquina [25].

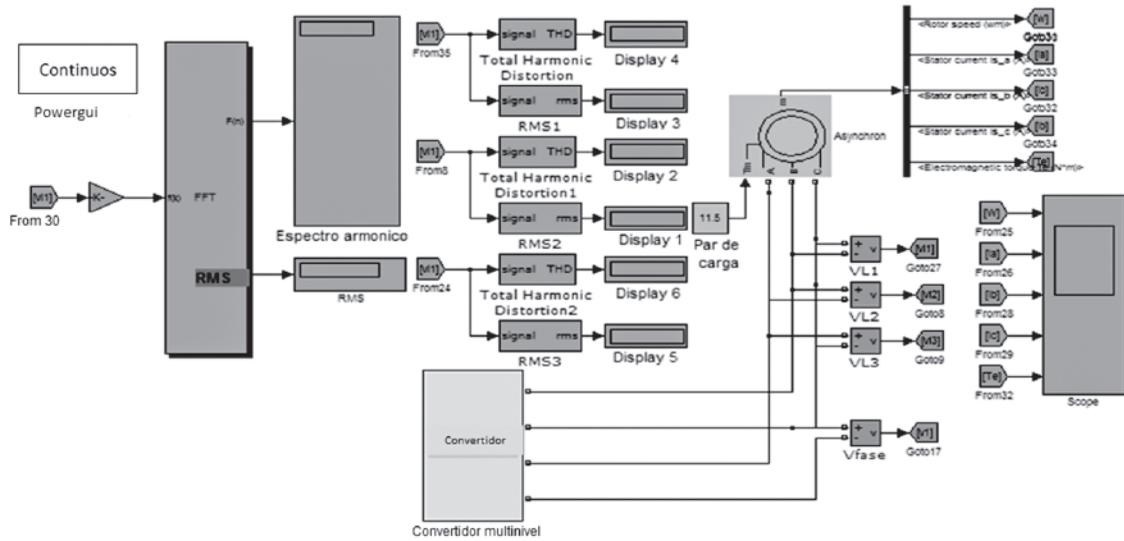


Fig. 9. Esquema de simulación.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES

A. Ondas de tensión a la entrada del motor

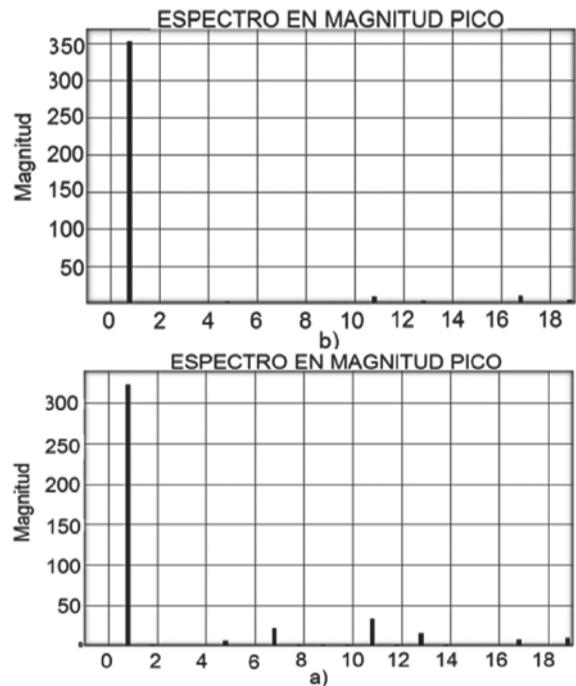
Las formas de onda de tensión de fase como de línea fueron las mostradas en la sección III, aunque se realizó un ajuste en las simulaciones en los valores de Vdc de cada topología, para obtener el voltaje de línea deseado para alimentar el motor a tensión nominal. La TABLA III resume los valores RMS de los voltajes de línea y el THD de las formas de onda para una frecuencia nominal de 60 Hz, indicadores que dan una percepción de la calidad de la energía suministrada [26].

TABLA III.
INDICADORES DE LAS TENSIONES
PARA LOS CONVERTIDORES

Niveles (por fase)	THD V LINEA (%)	VLINEA RMS (V)
5	15.83	230.6
9	7.5	225
27	2.69	220

La Fig. 10. muestra los tres espectros armónicos en magnitudes pico para las tensiones de línea a una frecuencia fundamental de 60 Hz. En esta figura y en la tabla anterior se percibe claramente la disminución de la distorsión armónica (THD), al igual que el desplazamiento del contenido armónico hacia las

componentes de alta frecuencia [19]. El convertidor de 27 niveles presenta un contenido espectral prácticamente sólo en la fundamental y mínimos aportes armónicos en bajas frecuencias, comportamiento muy favorable en cuanto a la calidad de energía necesaria para la alimentación de motores de inducción [27]. Los valores RMS a medida que se incrementa el número de escalones se hacen más precisos.



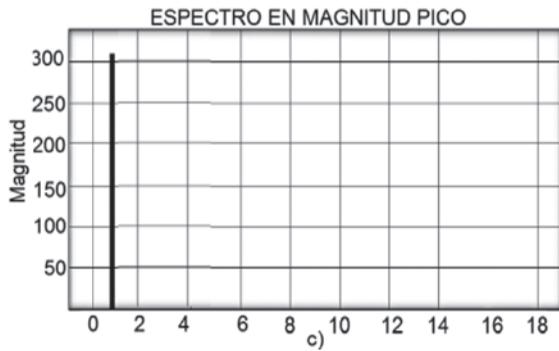


Fig. 10. Espectros armónicos de la tensión de línea a 60 Hz para los convertidores a) 5 escalones b) 9 escalones y c) 27 escalones por fase.

B. Variables de salida del motor a diferentes frecuencias

Se seleccionaron dos frecuencias de 45 Hz y 80 Hz para las tensiones de línea, una inferior y otra superior a la frecuencia nominal, para observar los

comportamientos a diferentes velocidades. A continuación, se muestran los resultados para cada uno de los convertidores.

Velocidad del rotor

En la Fig. 11. se muestra el comportamiento de la velocidad mecánica del motor [rpm] para las diferentes frecuencias. Se puede observar que el comportamiento de la velocidad es más suave a medida que el número de niveles aumenta, es decir los picos se minimizan, el tiempo de establecimiento permanece constante con la variación de los escalones, es indudable que en términos generales el comportamiento es similar. Con respecto a la variación de la frecuencia, un aumento por encima del valor nominal, afecta el tiempo de establecimiento, debido a que el motor transita de una zona de trabajo de par constante a una de potencia constante (debilitamiento de flujo). En términos generales la velocidad en tres convertidores presenta comportamientos similares con diferencias muy leves.

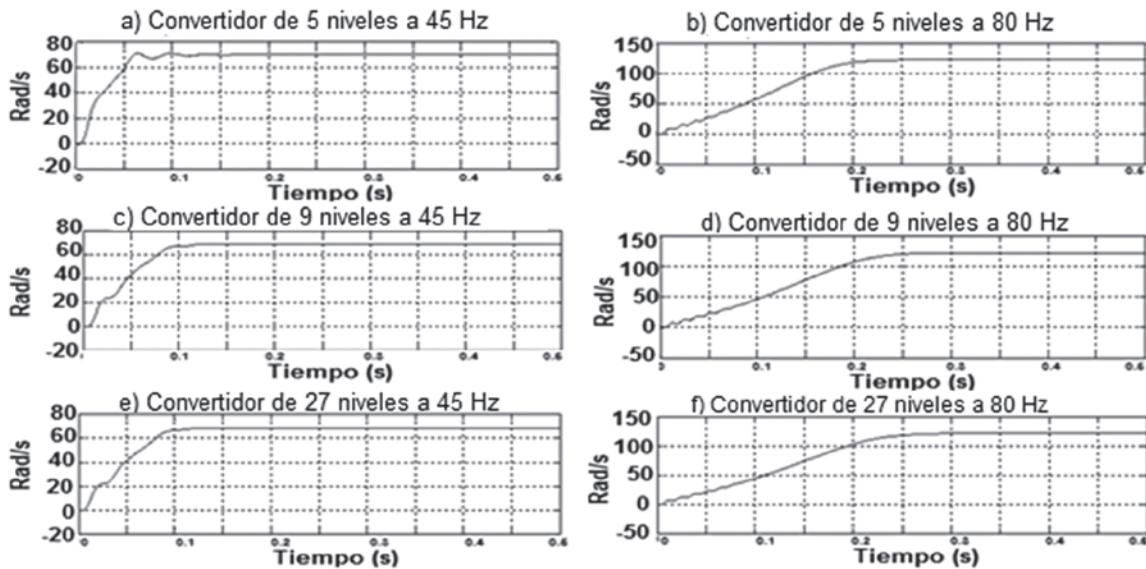


Fig. 11. Comportamiento de la velocidad (rad/seg), para los tres convertidores a 45 Hz y 80 Hz.

En la Fig. 12. se muestra el comportamiento del deslizamiento [25] en el rango de frecuencias de 10 a 100 Hz, en esta figura se puede observar que los tres convertidores tienen una curva similar; en zonas de baja velocidad el deslizamiento es relativamente grande debido al bajo voltaje producto del control escalar (V/Hz) [3], en esta zona el convertidor de 9 niveles genera una mejor respuesta, pues el motor

tiene un menor deslizamiento que los otros, esto a causa del voltaje RMS superior a los convertidores de 27 y 9 niveles. La respuesta de los tres inversores al aumento de la velocidad es la disminución del deslizamiento comportándose de manera casi idéntica en zonas de alta velocidad, en donde el convertidor de 27 escalones presenta menor deslizamiento, no obstante la diferencia es mínima.

Comportamiento del par inducido

En la Fig. 13. se observa que el par inducido tiene cambios favorables a medida que el número de niveles del convertidor aumenta, esto repercute directamente en la disminución del rizado. El convertidor de 27 niveles presenta una mejoría debido a la disminución del componente armónico

de la tensión, que induce corrientes parásitas generando pares indeseados que se adicionan al par ideal o el par de la componente fundamental. Estas distorsiones presentes en los convertidores de pocos escalones o de PWM generan pérdidas y disminuyen la vida útil de la máquina [25]. En cuanto al tiempo de establecimiento del par es muy similar para los 3 convertidores.

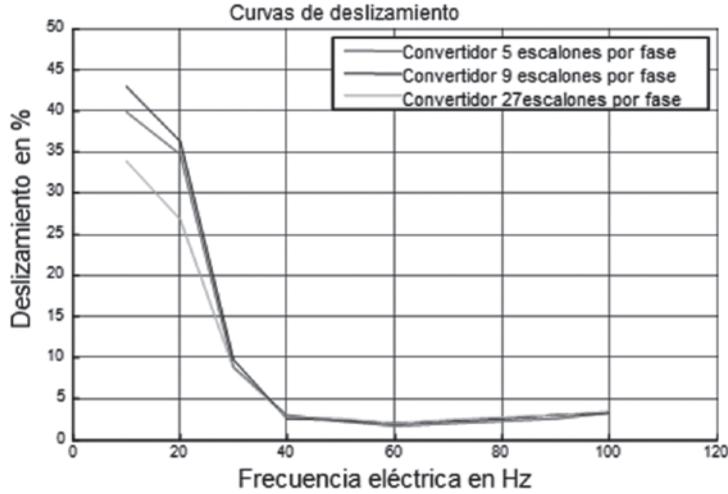


Fig.12. Curvas de deslizamiento en %.

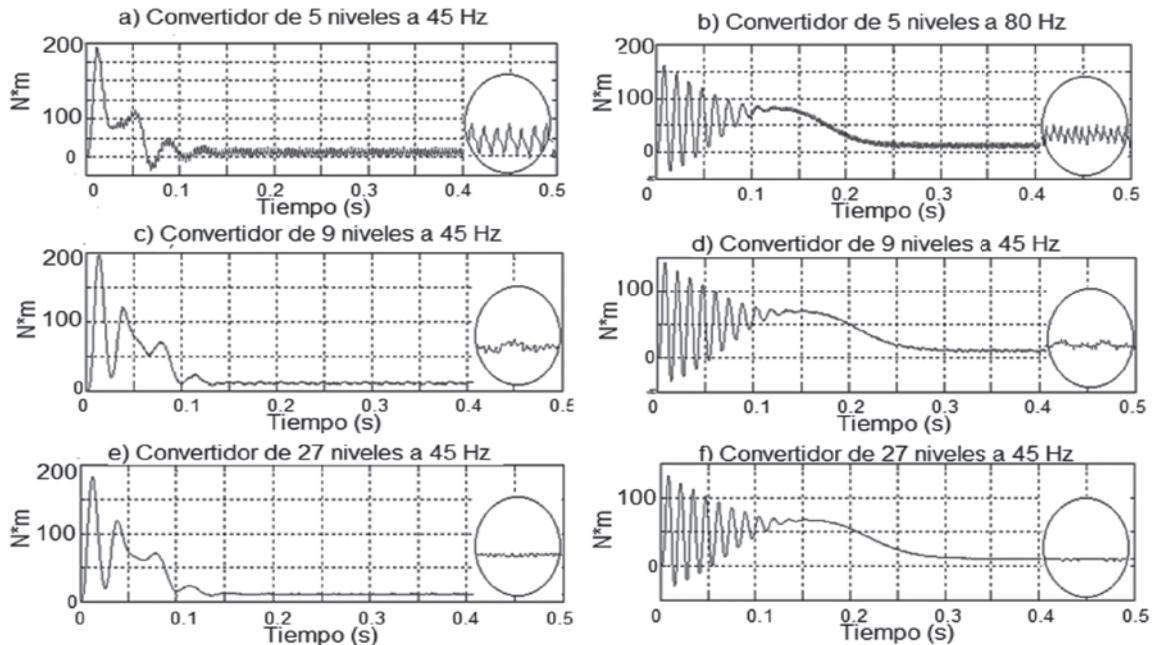


Fig. 13. Comportamiento del par inducido (Nm), para los tres convertidores a 45 Hz y 80 Hz.

Comportamiento de las corrientes del estator

Por último en la Fig. 14. se muestra la corriente del estator en cada convertidor, el comportamiento es similar para los tres a causa del filtrado de las corrientes armónicas por las inductancias del estator,

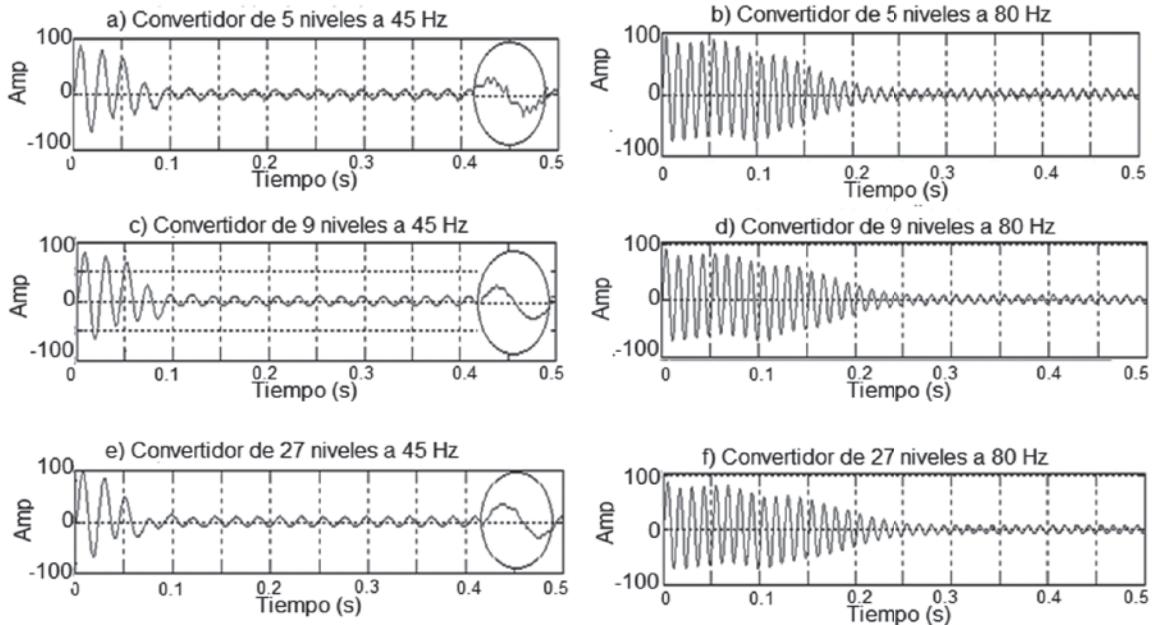


Fig. 14. Comportamiento de la corriente de línea (A), para los tres convertidores a 45 Hz y 80 Hz.

V. CONCLUSIONES

Las variables del motor de inducción que fueron estudiadas evidenciaron la relación directa que tiene su comportamiento con la calidad del suministro eléctrico, presentando a los convertidores multinivel como una opción para mejorar la calidad en este tipo de carga y preservar la vida útil de estas máquinas minimizando las perturbaciones producto de los altos contenidos armónicos de los variadores convencionales.

Los convertidores estudiados reflejaron unos resultados favorables en cuanto a la velocidad del motor, dado que el sistema mecánico del motor al poseer inercia hace la función de un filtro pasa-bajo atenuando significativamente las componentes de alta frecuencia generadas por los armónicos. Se puede apreciar en las variables del par electromagnético y corrientes una mejoría ostensible proporcionando un THD inferior a medida que el número de escalones aumenta, por tanto se observa

pese a esto al realizar un acercamiento se evidencia diferencias en la distorsión en cada corriente, siendo la mejor forma de onda la presentada por el convertidor de 27 niveles. La onda sin distorsión trae beneficios como la disminución de vibraciones y el calentamiento de la máquina [23].

reducción en las corrientes parásitas y los pares de frenado no deseados.

El convertidor multinivel de 27 escalones satisface la normativa vigente IEEE-519. Esta establece para baja y media tensión ($V < 65$ kV) una distorsión armónica (THD) en el voltaje de 5% como máximo, límite que este convertidor satisface. Los convertidores de 5 y 9 niveles no satisfacen el estándar, debido a que sus THDs superan el 5% establecido como límite para baja tensión.

Al variar la frecuencia en cada convertidor, para obtener cambios en la velocidad, la calidad del suministro permanece constante. Si se desean velocidades superiores a la nominal la única variación se observará en el tiempo de establecimiento de las variables, debido al cambio de zona de trabajo del motor de inducción y el proceso transitorio en las corrientes se acentúa, hasta que finalmente logra estabilizarse.

Finalmente, con el convertidor multinivel de 27 niveles se consigue una mejor calidad de suministro

de energía, con un THD de tan sólo el 2.7 %, alcanzando un comportamiento aceptable respecto al valor del RMS de la onda de voltaje (220 V), características similares al comportamiento del motor con alimentación sinusoidal. Podemos inferir que aumentando el número de niveles se conseguirá mejores indicadores pese a tener mayor complejidad y costo, sin embargo, es atractivo poder optimizar la modulación del inversor de 9 niveles para reducir el THD inferior al 5 %, y de esta forma satisfacer la normativa vigente a un menor coste y complejidad del convertidor.

VI. REFERENCIAS

- [1] D. Saucedo, J. Taxis y Z. Flores . “Factores que afectan la calidad de la energía y su solución”. Tesis para optar el título de ingeniero electricista. Instituto Politécnico Nacional, México DF 2008.
- [2] M. Sánchez, . “Calidad de la energía eléctrica”. Instituto Tecnológico de Puebla, México 2009.
- [3] A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley y S. D. Umans. “Electric Machinery”. Sexta edición, McGraw Hill 2003.
- [4] N. Mohan, T. M. Undeland, y W. P. Robbins . “Electrónica de Potencia: Convertidores Aplicación y Diseño”. 3ra Edición, McGraw Hill Interamericana 2009.
- [5] A. Pardo, y J. L. Díaz. “Aplicaciones de los convertidores de frecuencia. Estrategias PWM”. Editorial Java E. U., Pamplona, Colombia 2004.
- [6] P. Issouribehere, G. Barbera y F. Issouribehere, “Compatibilización de perturbaciones de variadores de velocidad de motores con redes de AT”. XI ERIAC Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE 2005.
- [7] G. Barbera, H. G Mayer. y F. Issouribehere. “Medición de la emisión armónica en variadores de velocidad y desarrollo de modelos de simulación”. Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE 2009.
- [8] A. Nabae, I. Takahashi , A Akagi. “ A New neutral point-clamped PWM inverter”. IEEE Industry Appl. Soc Annual Meeting conference. 1981, Vol.2
- [9] S. Fazel. “Investigation and Comparison of Multi-Level Converters for Medium Voltage Applications” Alemania, Technische Universität Berlin 2007.
- [10] S. Ebenezar, y R.Narciss. “Induction Motor Drive Using Seven Level Multilevel Inverter for Energy Saving in Variable Torque Load Application” International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology IEEE 2012 p.p. 352-357
- [11] J. Rodríguez, y S. Lai. “Multilevel inverters: A survey of topologies. Controls and applications” IEEE Trans. On industrial Electronics 2002, Vol.49.
- [12] N. Rahim; H. Wooi, y J. Selvaraj. "Elimination of Harmonics in Photovoltaic Seven-level Inverter with Newton-raphson Optimization", Procedia Environmental Sciences, Volume 17, 2013, pp. 519-528,
- [13] J. Díaz, L. Pabón y I. Torres “Análisis Comparativo De La Distorsión Armónica En Inversores De Potencia” Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 1 - N. 19, 2012.
- [14] K. Ramani y A. Krishnan. “An Estimation of Multilevel Inverter Fed Induction Motor Drive” International Journal of Reviews in Computing E-ISSN: 2076-3336, 2009, p.p. 19-24
- [15] G. Pandian y S. Rama. “Simulation and analysis of multilevel inverter fed induction motor drive” Indian Journal of Science and Technology Vol.2 No 2 2009, p.p. 67-69
- [16] M. Parkhi, R.K. Dhattrak y Z. Khan. “Performance & Analysis Of Three Phase Induction Motor Fed By Multilevel inverter Using Various Modulation Techniques With Matlab Simulink” International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering ISSN (Print): 2320 – 3765, 2013, p.p 3768-3777.
- [17] K. Bharath y R. J. Satputaley “Single Phase Asymmetrical Cascaded Multilevel Inverter Design For Induction Motor” International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication, Volume- 1, Issue- 3 ISSN: 2320-2084, 2011, p.p 8-13.
- [18] S. Breton. “Diseño y Construcción de un inversor Trifásico Multinivel de Cuatro Etapas para Compensación Armónica. (Tesis de Maestría)”, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile 2003.
- [19] J. Araque. “Diseño e implementación de un inversor multinivel monofásico con optimización de armónicos para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos (Tesis de Maestría)”. Universidad de Pamplona, 2012.
- [20] J. L. Díaz, y L. D. Pabón.” Diseño y análisis de un inversor multinivel para la aplicación en un sistema híbrido de energía. (Trabajo categoría de profesor asociado)”. Universidad de Pamplona, Colombia 2011
- [21] C. Elgueta. “Aplicación de un inversor multinivel como variador de frecuencia de un motor de inducción trifásico. (Tesis de Maestría)”, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile 2005.
- [22] F. Ríos. “Diseño y construcción de un inversor trifásico multinivel. (Tesis de Maestría)”, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile 2003.
- [23] G. Hernández, I. Romero y L. Montero. “Calidad y uso final de la energía eléctrica. (Maestría en Gestión de Energías)”. Universidad técnica de Cotopaxi, Ecuador 2009.
- [24] C. Reyna, L. Vela, y A. Sánchez. “Control tolerante a fallas con modelo de control predictivo en el motor de inducción. (Tesis de Maestría)”. Centro Nacional de investigaciones y desarrollo tecnológico. México 2008.
- [25] J. Mora. “Maquinas Eléctricas”. Quinta Edición, McGraw Hill 2003.
- [26] E. F. Fuchs, y M. S. Masoum. “Power Quality in Power Systems and Electrical Machines”. Elsevier, USA 2008.
- [27] A. F. Lizcano, J. L. Díaz, y A. Pardo. “Minimización de la distorsión armónica de una modulación PWM con algoritmos genéticos”, Revista ITECKNE, Vol. 8, No. 1, 2011.

BIOGRAFÍA



Jorge Luis Díaz Rodríguez, graduado *Summa Cum Laude* de Ingeniero Electricista de la Universidad de Camagüey, Cuba, en julio de 1996. Magíster en Automática de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas en abril del año 2000. Actualmente es Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica, Sistemas y Telecomunicaciones de la Universidad de Pamplona, Colombia. Imparte la materia de Máquinas Eléctricas. Ha publicado varios artículos sobre el control del motor de inducción, electrónica de potencia, control inteligente, energía renovable y calidad de la energía.



Luis David Pabón Fernández, graduado como Ingeniero Eléctrico de la Universidad de Pamplona en el año 2011. Candidato a Magister en Controles Industriales de la Universidad de Pamplona. Joven investigador del Programa “Jóvenes Investigadores e Innovadores” del año 2012 de Colciencias. Actualmente docente tiempo completo ocasional del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Pamplona. Imparte las materias de Máquinas Eléctricas y Suministros Eléctricos.



Yan Carlos Anaya Lizcano, graduado como Ingeniero Eléctrico de la Universidad de Pamplona en el año 2012.