

Análisis del motor de inducción alimentado por convertidor multinivel de frecuencia variable

Jorge Luis Díaz Rodríguez

Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia
E-mail: jdiazcu@gmail.com

Luis David Pabón Fernández

Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia
E-mail: davidpabon@hotmail.es

Yan Carlos Anaya Lizcano

Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia
E-mail: yanc83@hotmail.com

ABSTRACT

This paper deals with the analysis of the behavior of an three phase squirrel cage induction motor conneted to a variable frequency multilevel converters. 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 converters 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 suplies and an analysis of the supplied energy quality.

Keywords: Multilevel inverter, variable frequency, induction motor, power quality, simulation.

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. También incluye la parametrización del motor trifásico a utilizar, las simulaciones del sistema convertidor-motor-carga. Por último el artículo muestra el análisis del comportamiento de las variables del motor frente a las diferentes alimentaciones realizando un análisis de la calidad de la energía suministrada.

Palabras claves: Inversor multinivel, frecuencia variable, motor de inducción, calidad de la energía, simulación.

1. INTRODUCCIÓN

El suministro de energía eléctrica es uno de los principales servicios, por lo se ha tomado conciencia de la importancia de contar con un servicio de alto nivel en términos de calidad del suministro eléctrico. La sociedad y la industria actualmente poseen una penetración de altísimo 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 (Saucedo et al., 2008). Esta penetración de equipo electrónico es fuente de contaminantes en la red y causa de diferentes problemas en cuanto a calidad de la energía se refiere (Sánchez,

2009). Un ejemplo de esto son los convertidores de potencia que controlan los motores de inducción que por lo general son del tipo jaula de ardilla por su versatilidad y poca necesidad de mantenimiento (Fitzgerald et al., 2003), estos variadores de velocidad utilizados industrialmente realizan conversiones de AC en DC y DC en AC por medio de componentes de electrónica de potencia que producen distorsión armónica (Mohan et al., 2009), (Rashid, 2004) y (Pardo, 2004), provocando efectos indeseados tanto en el motor como en la red en donde se conecta (Issouribehere et al., 2005), (Barbera et al., 2009). En este trabajo se analiza este proceso mediante la utilización de tecnología de convertidores multinivel para identificar sus efectos sobre el motor de inducción para determinar los posibles beneficios que tiene utilizar este tipo de conversión sobre la convencional en los variadores de velocidad, evaluando el comportamiento del motor frente a la calidad de la energía suministrada.

2. MODELADO DE LOS INVERSORES

2.1 INVERSOR DE 5 NIVELES

Mediante la configuración de convertidor (inversor) multinivel en cascada simétrico, con sólo dos etapas de puente H en cada fase es fácil obtener cinco niveles de tensión por fase (Breton, 2003), utilizando dos fuentes independientes de igual valor ($V_{dc1}=V_{dc2}$) aunque la forma de onda obtenida no es la adecuada en cuanto a la calidad de la energía (Araque, 2012). En este trabajo esta topología resulta conveniente para realizar una comparación con las dos configuraciones de convertidores en cascada para explicar la metodología utilizada. En la figura 1 se puede apreciar la topología del convertidor y la forma de onda de tensión de salida para un período completo donde las fuentes se asignaron como 1 p.u. en una base igual a V_{dc} .

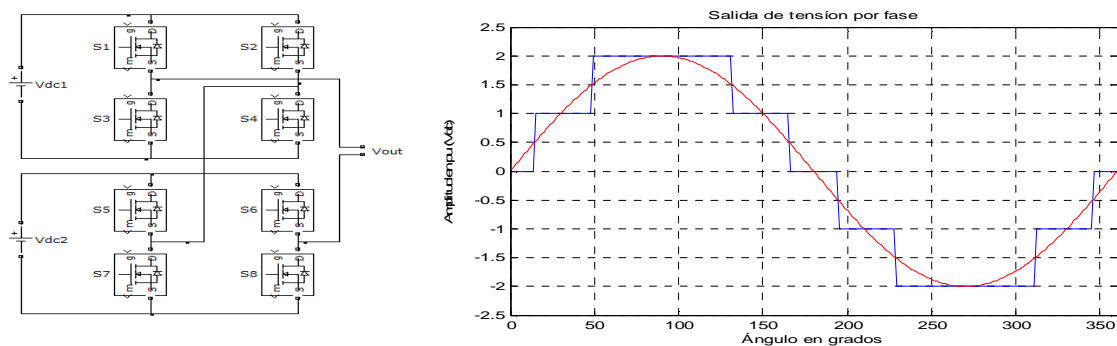


Figura 1. Topología del convertidor en cascada simétrico y forma de onda de salida en p.u. en base V_{dc} .

Para encontrar acertadamente los ángulos de conmutación del convertidor se programaron algoritmos en Matlab[®], donde mediante trabajos previos como (Araque 2012), (Díaz y Pabón 2011), (Elgueta, 2005) entre otros se encontraron ángulos aproximados donde el inversor conmuta en cada nivel, estos ángulos se observan en la figura 1. Luego de encontrar cada uno de los ángulos de activación del inversor es necesario generar la secuencia de encendido para los interruptores de potencia (*Mosfets*). Esta secuencia se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Secuencia de disparo para los dispositivos de potencia.

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

A continuación se modela el inversor multinivel de cinco niveles mediante la topología mostrada en la figura 1 y controlando su conmutación utilizando las señales de la tabla 1. En la figura 2 se observa las formas de ondas en la salida en cada puente producto de las secuencias establecidas para una frecuencia de 60 Hz. También se muestra la forma de onda resultante de la adición de la tensión de las dos salidas de los puentes.

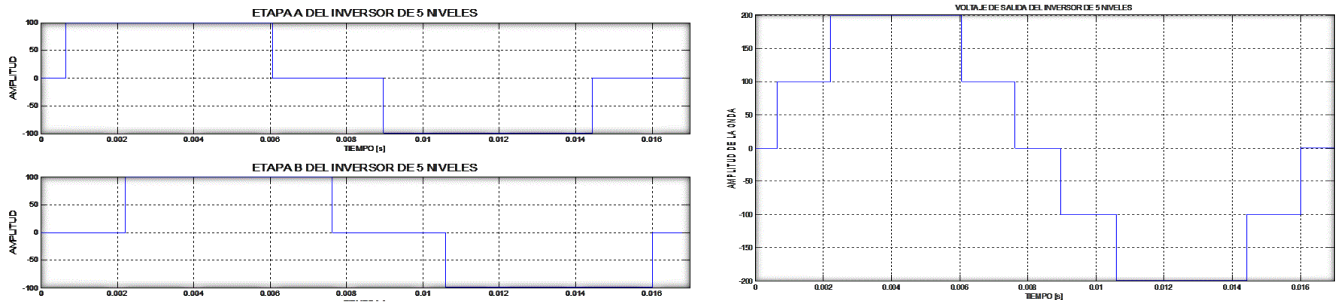


Figura 2. Ondas de voltaje presentes en la salida de cada puente y forma de onda total.

Para obtener el inversor multinivel trifásico es necesario replicar dos veces el diseño del circuito del inversor mostrado en la figura 1 para obtener las fases B y C. El esquema de conexiones se puede observar en la figura 3 en donde se muestra el convertidor resultado de tres convertidores monofásicos (Ríos, 2003). El convertidor trifásico está conectado en estrella (Y).

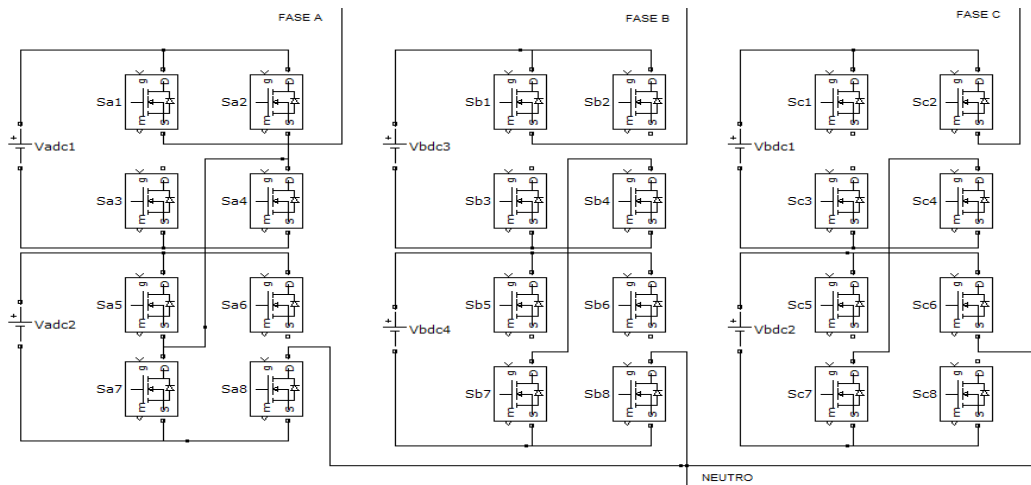


Figura 3. Topología del convertidor trifásico

Para las dos fases replicadas las señales serán las mismas sólo desfasadas 120° eléctricos entre sí. Las señales obtenidas del inversor se muestran en la figura 4. En esta figura se observan las ondas generadas por el inversor trifásico, la amplitud está en valores p.u. con base Vdc, en los voltajes de línea aparecen más escalones debido a la diferenciación realizada con las tensiones de fase (Ríos, 2003). Esto hace que las ondas de tensión de línea asemejen más a una onda sinusoidal pura lo cual es beneficioso para el buen funcionamiento de los motores de inducción y conservar el tiempo su vida útil (Hernández, 2009).

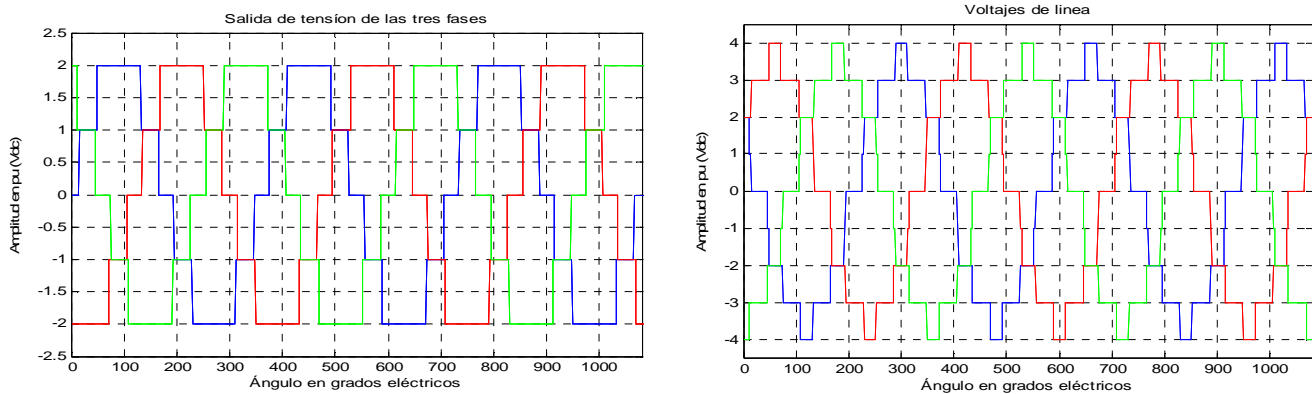


Figura 4. Voltajes de fase y voltajes de línea en la salida del convertidor trifásico

2.2 INVERSOR DE 9 NIVELES

Para formular el modelo del convertidor de 9 escalones se utilizó la configuración de convertidor multinivel en cascada asimétrico (Mohan, 2009). Para lo que se utilizó configuración mostrada en la figura 1 y utilizada en el convertidor de 5 escalones. En este caso las fuentes de DC que alimentan las etapas de cada inversor no tienen la misma amplitud sino que la segunda etapa posee una fuente de 3 veces el valor de la fuente DC de la primera etapa, o sea: $V_{dc2}=3*V_{dc1}$. (Breton, 2003), (Ríos, 2005) y (Díaz y Pabón, 2011).

En la figura 5 se aprecia la topología y el período de la forma de onda obtenida en el inversor de 9 niveles. La metodología para determinar los ángulos de conmutación es la misma que se utilizó para el inversor anterior, la tabla de activación es diferente debido a que para establecer los 9 escalones, las secuencias de conmutación cambian (Elgueta, 2005). Las formas de onda del convertidor trifásico se muestran en la figura 6. En esta se puede observar los tres voltajes de fase y de línea. Se observa que en las tensiones de línea aparecen muchos más escalones que en las tensiones de fase, lo cual asemeja aún más a la forma a una sinusoidal.

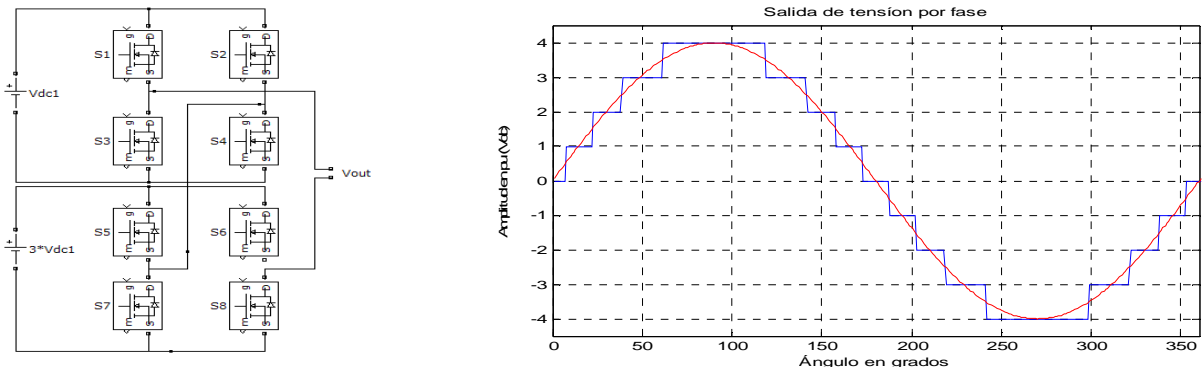


Figura 5. Topología y onda de tensión de salida por fase del convertidor de nueve escalones

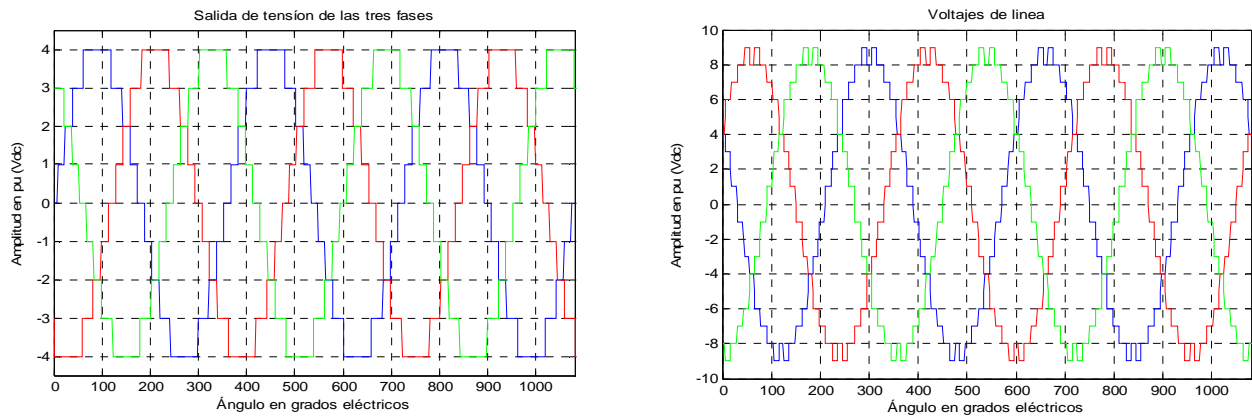


Figura 6. Forma de onda de las salidas de fase para el convertidor de 9 escalones.

2.3 INVERSOR DE 27 NIVELES

Para obtener el circuito del convertidor de 27 niveles se utilizó la configuración de convertidor multinivel en cascada asimétrico con potencia 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 $V_{dc2}=3*V_{dc1}$, (Díaz y Pabón, 2012) en la figura 7 se puede observar la topología trifásica de este convertidor conectado en estrella.

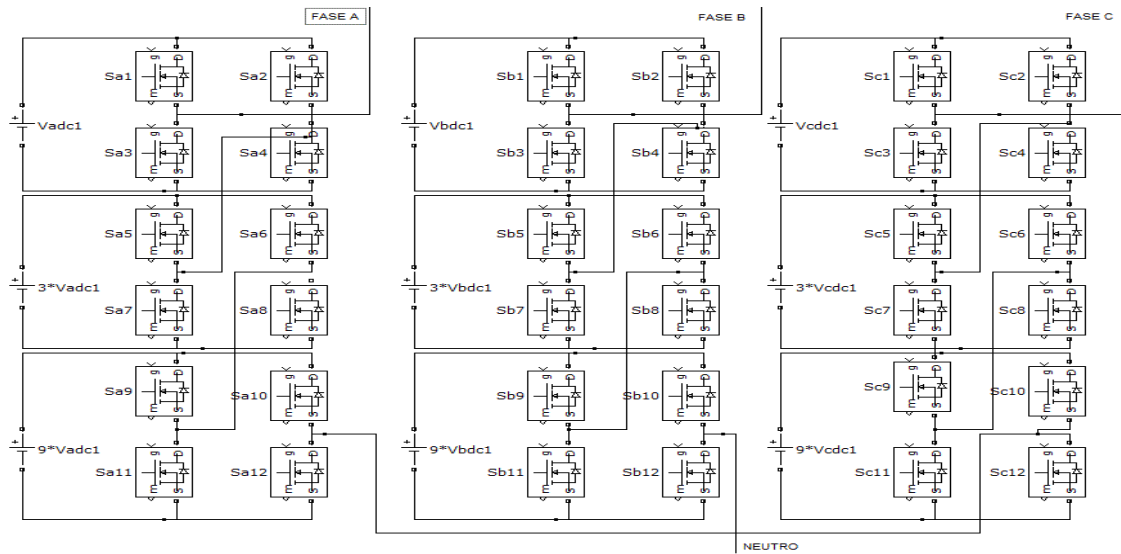


Figura 7. Topología del convertidor multinivel trifásico de 27 escalones.

En la figura 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 de frecuencia 60 Hz, presentando menor distorsión que los convertidores anteriores y desplazando el componente de distorsión hacia los armónicos de alta frecuencia (Araque, 2012).

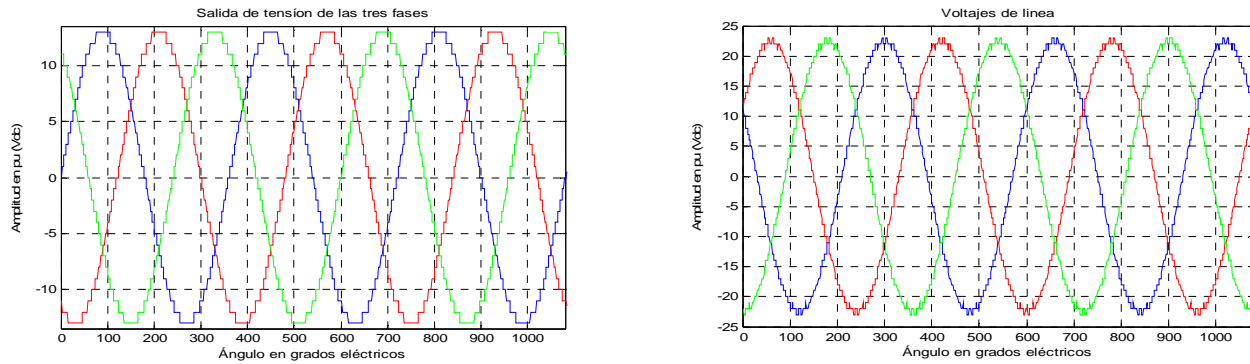


Figura 8. Voltajes de salida del convertidor de 27 escalones.

3. PARÁMETROS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA

Para la elección del motor a simular en el trabajo se optó por un motor jaula de ardilla trifásico de uso general que se puede encontrar comúnmente en la industria, por ejemplo aplicado a las bombas centrífugas de impulsión, las máquinas herramientas y compresores (Reyna, 2008). Se simula el modelo del motor de inducción de 3 HP con los valores de los parámetros que se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. 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

Para el modelo del motor en *Simulink*[®] se utiliza uno de los establecidos en la *Toolbox SymPowerSystems* al cual se le ajustaron los parámetros para el motor de inducción de jaula de ardilla descrito, teniendo en cuenta las respectivas conversiones de unidades y otras consideraciones, como la conversión de reactancias a inductancias.

4. SIMULACIÓN

Para realizar las simulaciones a frecuencia variable se programaron los algoritmos correspondientes que generan las señales de control de los dispositivos semiconductores dependientes de la frecuencia, y se realizó para cada convertidor el siguiente esquema de simulación (figura 9). 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 salida de línea 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 es de de 94 V.

En la figura 9 se puede observar en diferentes colores las etapas de la simulación del convertidor de cinco niveles. En color gris oscuro aparece la etapa de potencia y en gris claro los bloques de control de cada puente en los cuales se generan las señales de control de cada *Mosfet*. En color rojo se encuentran señalados los medidores de tensiones utilizados. En color verde se encuentran todos los bloques concernientes al análisis y la visualización de la energía suministrada (RMS, THD, espectro armónico) y las señales de salida del motor (corrientes estáticas, par electromagnético inducido y velocidad del rotor). Por último en color fucsia 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).

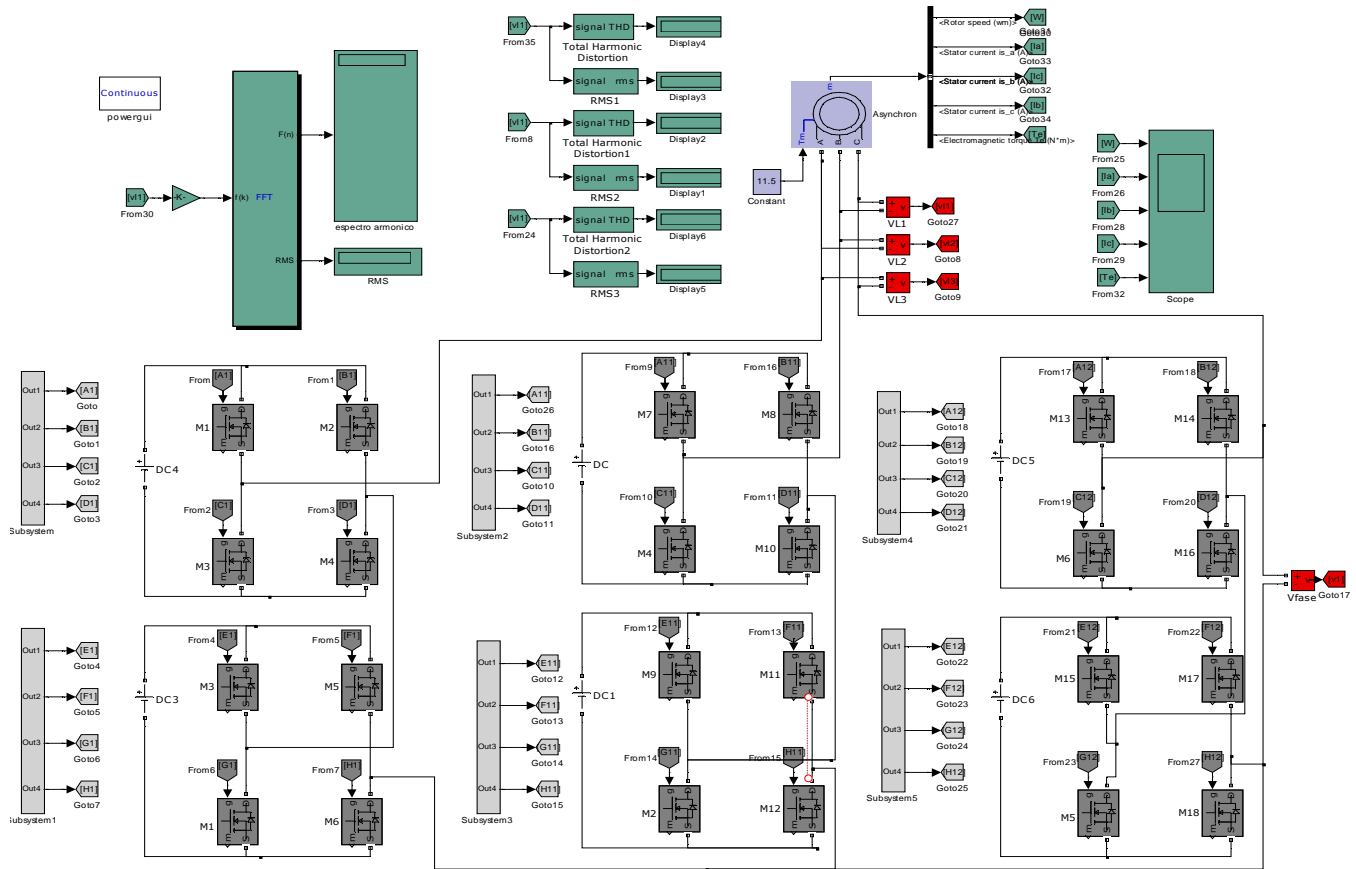


Figura 9. Esquema de simulación para el convertidor de cinco escalones por fase.

Las simulaciones se realizaron de igual manera para los tres convertidores a diferentes frecuencias, teniendo en cuenta un control escalar (V/Hz) de tensión a la entrada del motor proporcional para frecuencias de alimentación que están por debajo de la frecuencia nominal con el fin de no saturar la máquina (Mora, 2003).

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES

5.1 ONDAS DE TENSIÓN A LA ENTRADA DEL MOTOR

Las formas de onda de tensión tanto de fase como de línea fueron similares a las mostradas en la sección 2. El ajuste en las simulaciones consistió únicamente en los valores de Vdc de cada topología para obtener el voltaje de línea deseado para alimentar el motor. La tabla 3 resume los valores RMS de los voltajes de línea y el THD de las formas de onda para la frecuencia nominal de 60 Hz, indicadores que dan una percepción de la calidad de la energía suministrada al motor (Fuchs, 2008).

Tabla 3. Indicadores de calidad de las tensiones para los tres convertidores

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

La figura 9 muestra los tres espectros armónicos para las tensiones de línea a una frecuencia fundamental de 60 Hz en magnitudes pico. En esta figura y en la anterior se percibe claramente la disminución de la distorsión armónica (THD) y el desplazamiento de la distorsión hacia las componentes de alta frecuencia (Araque, 2012). El convertidor de 27 niveles presenta un espectro prácticamente con componente sólo fundamental y mínimos aportes armónicos en bajas frecuencias comportamiento muy favorable en cuanto a la calidad de energía (Lizcano et al., 2011) y los valores RMS a medida que se incrementa el número de escalones se hace más preciso.

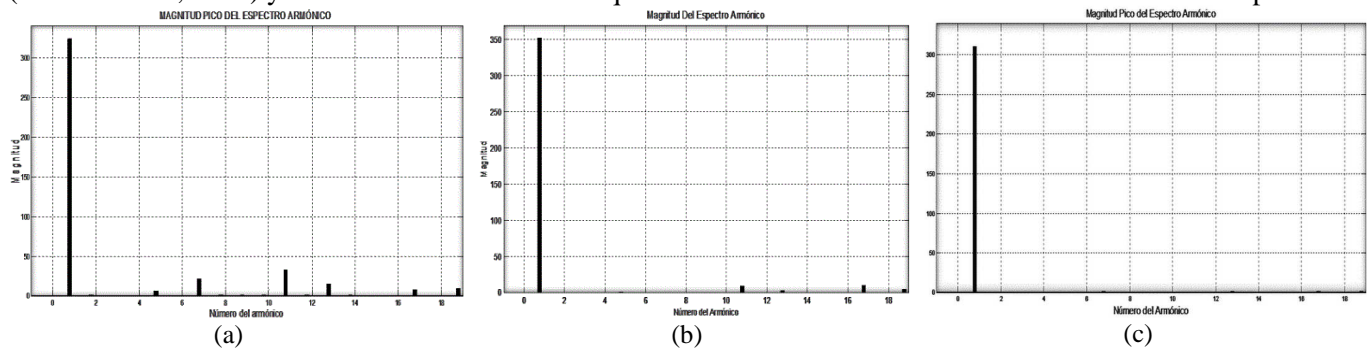


Figura 9. Espectros armónicos de la tensión de línea a 60 Hz para los convertidores 5 escalones b) 9 escalones y c) 27 escalones por fase

5.2 VARIABLES DE SALIDA DEL MOTOR A DIFERENTES FRECUENCIAS

Se seleccionaron dos frecuencias a 45 Hz y 80 Hz, una inferior y otra superior a la frecuencia nominal, para la alimentación del motor con el fin de observar los comportamientos a diferentes velocidades. A continuación se muestran los resultados para cada uno de los convertidores.

5.2.1 VELOCIDAD DEL ROTOR

En la figura 10 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 a grandes rasgos el comportamiento es similar.

Con respecto a la variación de la frecuencia, un aumento por encima de la nominal, afecta el tiempo de establecimiento a medida que se requiere mayor velocidad, debido a que el motor transita de una zona de trabajo de par constante a otra de potencia constante (debilitamiento de flujo) una vez la frecuencia supera la nominal. Con respecto a la velocidad los tres convertidores se puede decir que estos presentan comportamiento similares con muy leves diferencias.

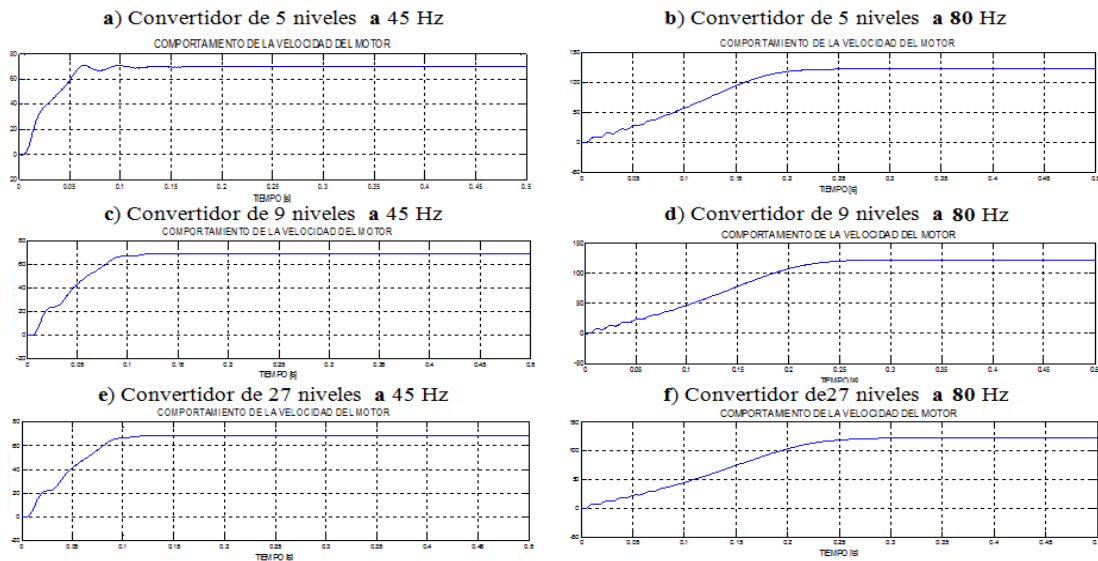


Figura 10. Comportamiento de la velocidad (rad/seg), para los tres convertidores a 45 Hz y 80 Hz.

En la figura 11 se muestra el comportamiento en el rango de frecuencias de alimentación de 10 a 100 Hz, en esta se puede observar que los tres convertidores tienen una curva similar. En zonas de baja velocidad el deslizamiento (Mora, 2005) es relativamente grande debido al voltaje bajo producto del control escalar (V/Hz) (Fitzgerald et al., 2003) en los tres convertidores. En esta zona el convertidor de 9 niveles genera una mejor onda de salida ya que el motor tiene un menor deslizamiento que los otros, producto al voltaje RMS superior que el convertidor de 27 y una mejor forma de onda que el de 9 niveles (tabla 3). 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 el convertidor que presenta menor deslizamiento es el de 27 escalones, aunque la diferencia es mínima.

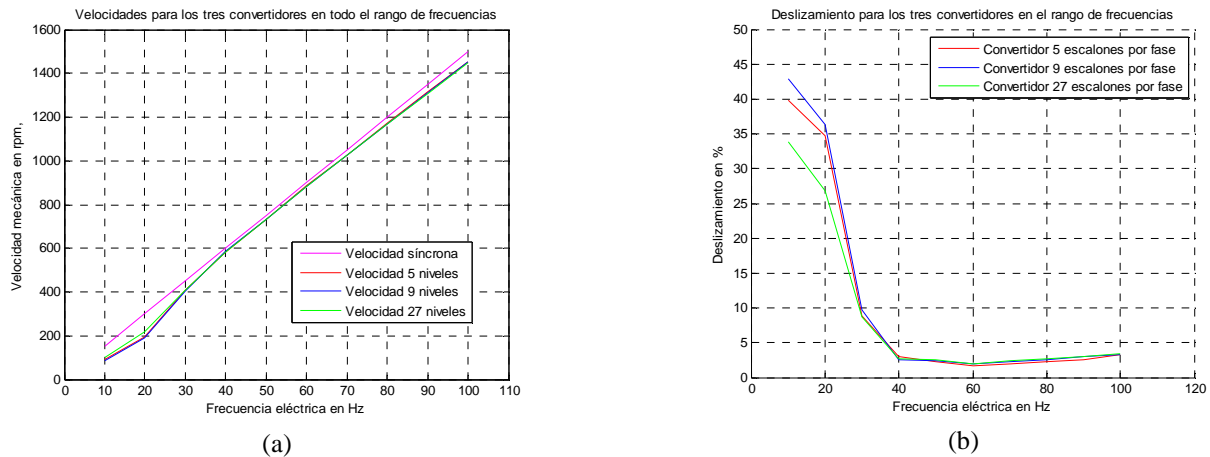


Figura 11. a) Curvas de velocidades en rpm b) Curvas de deslizamiento en %.

5.2.2 COMPORTAMIENTO DEL PAR INDUCIDO

En la figura 12 se observa que el par inducido tiene grandes cambios favorables a medida que el número de niveles del convertidor aumenta, esto repercute directamente en la disminución del rizado. El comportamiento es similar en el tiempo de establecimiento del par para todos los convertidores, siendo casi idéntico para los convertidores de 9 y 27 niveles. A pesar que este último presenta una mejoría debido a la disminución del componente armónico de la tensión que induce corrientes parásitas que generan 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 (Mora, 2003).

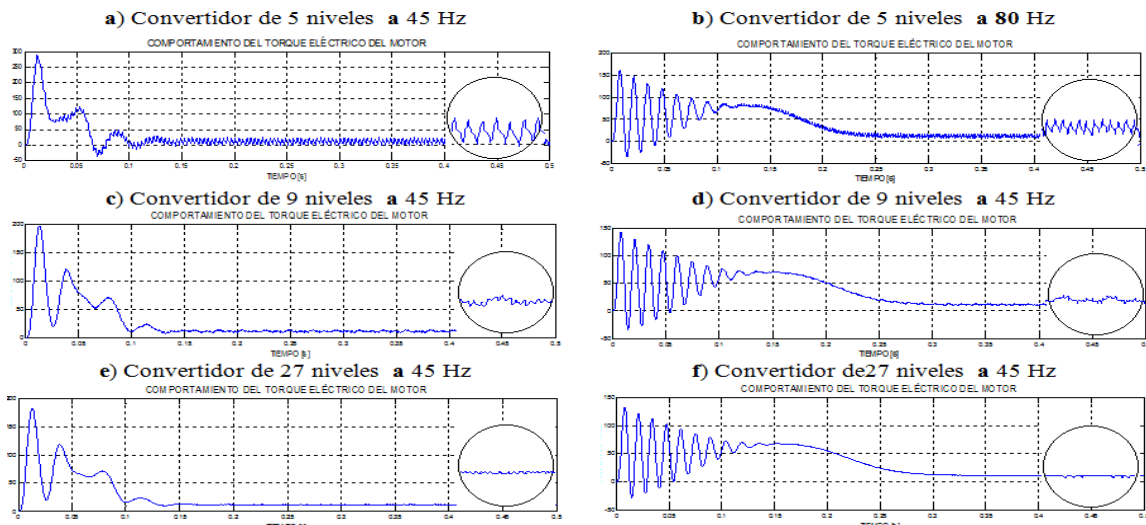


Figura 12. Comportamiento del par inducido (Nm), para los tres convertidores a 45 Hz y 80 Hz.

5.2.3 COMPORTAMIENTO DE LAS CORRIENTES DEL ESTATOR

En la figura 13 se muestra la corriente del estator en cada convertidor, el comportamiento es similar para los tres convertidores debido al filtrado por las inductancias del estator de las corrientes armónicas, pese a esto al realizar un acercamiento se evidencian 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 grandes beneficios como la disminución de vibraciones y el calentamiento de la máquina (Hernández, 2009).

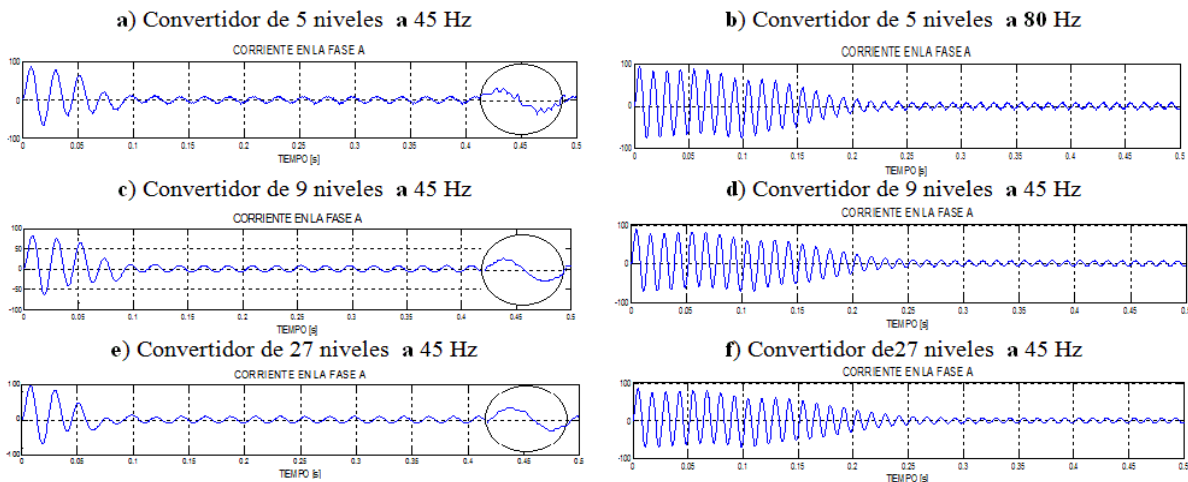


Figura 13. Comportamiento de la corriente de línea (A), para los tres convertidores a 45 Hz y 80 Hz.

5. CONCLUSIONES

Las variables estudiadas del motor de inducción 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 excelentes resultados en cuanto a la velocidad del motor, ya 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. Sin embargo, en las variables del par electromagnético y corrientes a medida que el número de escalones aumenta, se observa una mejoría ostensible proporcionando un THD inferior, reduciendo las corrientes parásitas y los pares de frenado no deseados.

El convertidor multinivel de 27 escalones satisface la normativa vigente como la 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 este estándar.

Al variar la frecuencia en cada convertidor, para obtener cambios en la velocidad, la calidad del suministro permanece constante. Sí 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 excelente 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 a costa de mayor complejidad y coste, 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.

REFERENCIAS

- Araque, J. (2012). *“Diseño e implementación de un inversor multi-nivel monofásico con optimización de armónicos para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos” Tesis de Maestría.* Universidad de Pamplona.
- Barbera, G., Mayer H. G. y Issouribehere, F. (2009). *Medición de la emisión armónica en variadores de velocidad y desarrollo de modelos de simulación.* Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE.
- Breton S., A. A. (2003). *Diseño y Construcción de un inversor Trifásico Multinivel de Cuatro Etapas para Compensación Armónica.* Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- Díaz, J. L. y Pabón, L. D. (2011). *Diseño y análisis de un inversor de potencia multinivel para la aplicación en un sistema híbrido de energía.* Trabajo categoría de profesor asociado. Universidad de Pamplona, Colombia
- Elgueta, C. (2005). *Aplicación de un inversor multinivel como variador de frecuencia de un motor de inducción trifásico.* Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- Fitzgerald A. E., Kingsley Ch. y Umans S. D. (2003). *Electric Machinery.* Sexta edición, McGraw Hill.
- Fuchs, E. F. y Masoum, M. S. (2008). *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines.* Elsevier, USA.
- Hernández, G., Romero, I., Montero L. (2009). *Calidad y uso final de la energía eléctrica.* Maestría en Gestión de Energías. Universidad técnica de Cotopaxi, Ecuador.
- Issouribehere P., Barbera G. y Issouribehere, F. (2005). *Compatibilización de perturbaciones de variadores de velocidad de motores con redes de AT.* XI ERIAC Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE.
- Lizcano, A. F., Díaz, J. L. y Pardo, A. (2011). *“Minimización de la distorsión armónica de una modulación PWM con algoritmos genéticos”*, *Revista ITECKNE*, Vol. 8, No. 1, Enero-Julio.
- Mohan, N.; Undeland, T. M. y Robbins, W. P. (2009). *Electrónica de Potencia: Convertidores Aplicación y Diseño.* 3ra Edición, McGraw Hill Interamericana.
- Mora, F. J. (2003). *Maquinas Eléctricas.* Quinta Edición, McGraw Hill.
- Pardo, A. y Díaz, J. L. (2004). *Aplicaciones de los convertidores de frecuencia. Estrategias PWM.* Editorial Java E. U., Pamplona, Colombia.
- Reyna, C., Vela, L. y Sánchez A. (2008). *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.
- Ríos, F. (2003). *Diseño y construcción de un inversor trifásico multinivel.* Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- Sánchez, M. (2009). *Calidad de la energía eléctrica.* Instituto Tecnológico de Puebla, México.
- Saucedo, D., Taxis J. y Flores Z. (2008). *Factores que afectan la calidad de la energía y su solución.* Instituto Politécnico Nacional, México DF.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.