

## Modificación del Control Directo del Par para un Mejor Aprovechamiento de la Energía en Motores de Inducción

G. Calzada-Lara, F. Pazos-Flores

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado  
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
San Luis Potosí, 78290, México  
gacala@ieee.org, fpazos@uaslp.mx  
Tel/Fax: (52)-01-444-8173381

**Resumen**—En este trabajo se aborda el tema de la posible mejora en el rendimiento de los accionamientos eléctricos (variadores de velocidad) para motores de inducción en esquemas comerciales que podrían ser modificados para un mejor desempeño dependiendo de la aplicación, como por ejemplo en esquemas de control bastante utilizados como lo son el Control por Orientación de Campo (FOC) y el Control Directo del Par (DTC), así como la exploración de nuevas técnicas que nos ofrezcan un mejor desempeño tomando como eje central la optimización de la energía. Un aumento del rendimiento de un accionamiento supone, por un lado, un importante ahorro económico, y por otro lado, una reducción de la contaminación del medio ambiente.

**Palabras clave:** Motor de inducción, control directo de par (DTC), aprovechamiento de la energía.

### I. INTRODUCCIÓN

El constante incremento de los costos de la energía eléctrica y las restricciones establecidas sobre la conservación del medio ambiente hicieron que en los países industrializados como E. U. A. y algunos países europeos se dictaran políticas y se aprobaran legislaciones respecto al uso de la energía. Considerando que de la energía total generada en el mundo, aproximadamente el 60% la consumen los motores eléctricos y que el motor eléctrico más usado es el de inducción tipo jaula de ardilla, surgió entre las medidas más prometedoras para el ahorro de la energía, establecer el incremento obligatorio de la eficiencia de estos motores. Esta idea fue reforzada cuando un estudio realizado en 1990 por el Departamento de Energía de los E. U. A. mostró que para el año 2010, la industria podría ahorrar 240 mil millones de Kwh anualmente reemplazando motores y accionamientos de eficiencia estándar, por otros que fueran solo de 2 a 6% más eficientes (Hammons, et al., 1996). En los países subdesarrollados, este tipo de política energética ha demorado en establecerse y las cifras que se encuentran en cuanto al uso de motores más eficientes son notablemente inferiores a las de los países industrializados. Una de las razones es que en las prácticas tradicionales de compra no se evalúa el costo real de la energía, entre otras cosas, porque no se comprende la relación entre la eficiencia y los costos totales durante la vida útil del equipo. Así, los compradores se concentran con frecuencia en el bajo costo inicial. No se comprende suficientemente que los motores y accionamientos con mayor eficiencia, aunque son más caros inicialmente, gracias a los costos de operación más bajos,

compensan la diferencia en un plazo generalmente apropiado. Otra razón es la poca información que tienen los ingenieros y técnicos respecto a los motores y controles de alta eficiencia. Este desconocimiento da inseguridad en el momento de la aplicación y en algunos casos puede ocasionar inconvenientes en la operación de los motores. Es importante entonces conocer cuáles son las características electromecánicas de los motores y la estructura del control de alta eficiencia, sus ventajas y las limitaciones que pueden presentar en su aplicación (Bonnett, 1994).

El alto nivel de consumo eléctrico es uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la industria hoy en día debido al aumento del costo de la energía, lo que significa que muchas compañías se esfuercen para mantener los niveles de rentabilidad y mantenerse competitivos en el mercado. En la industria por ejemplo casi el 70% de toda la electricidad es consumida por motores. De forma increíble, un motor puede consumir hasta 20 veces su costo inicial cada año. Aunque los motores juegan un papel vital en la producción de casi todos los productos, existen muchos problemas asociados con ellos y todos ellos tienen importantes costos asociados. Ya que casi todo producto está fabricado con el uso de motores no es sorprendente que el motor de inducción sea el consumidor más grande de energía en el mundo. De forma colectiva, como un recurso mundial, los motores consumen más de \$300 mil millones de dólares en energía cada año. En realidad, el costo de operar los motores es un elemento significativo de costo en cada producto que adquirimos.

Por lo general, la mayoría de los motores de inducción se encuentran bajo carga completa solo por periodos de tiempo limitados, y en las demás ocasiones, se desperdician enormes cantidades de energía, como calor y vibración. En aplicaciones prácticas, muchos motores trabajan de forma significativa por debajo de su capacidad de diseño, dando como resultado bajos niveles de eficiencia. Resulta claro que si se pudiera supervisar y reducir la energía atraída por un motor para igualar su necesidad real bajo condiciones de carga variable, se abriría una oportunidad de enormes ahorros de energía.

El constante incremento de usuarios de energía mientras las fuentes de energía son cada vez más limitadas, hace necesaria la investigación en métodos que incrementen la

eficiencia de los sistemas. La minimización de pérdidas es una técnica comúnmente utilizada, la cual es aplicada en el campo de la energía eléctrica. Este método obliga a los usuarios de la energía eléctrica a trabajar prácticamente con la máxima eficiencia en cualquier condición (Bonnett, 2008; Malinowski, 2004).

El sector industrial es el más grande de los sectores de uso final, consumiendo el 50% de la energía disponible en todo el mundo (según estadísticas del año 2003); se proyecta un rápido crecimiento en el uso de energía en la industria, con un aumento de aproximadamente 2.4% anual desde ahora y hasta el 2030 (EIA, 2007). Otras estadísticas muestran que cerca del 60% de la electricidad producida en los Estados Unidos es consumida por motores, particularmente con rangos de potencia que van de 1 a 90 kW.

Más de 150 TWh de electricidad consumida anualmente podía ser ahorrada de una manera rentable si los sistemas de accionamiento fueran diseñados desde el punto de vista del rendimiento energético (Bonnett y Yung, 2008). Los motores eléctricos son uno de los componentes involucrados que pueden contribuir al ahorro de energía. La situación en la última década fue de proponer diversas aproximaciones. Esto se ilustra en una visión general de las eficiencias de los motores de inducción fabricados en Europa (Haataja y Pyrhonen, 1998). Los beneficios del ahorro de energía pueden reembolsar el alto costo de la máquina en el primer o segundo año (Finley, et al., 2007; CEMEP, 2003).

Muchos cambios en términos de materiales y en criterios de proyección han sido trabajados en el pasado, con resultados importantes obtenidos bajo el punto de vista de la eficiencia. Nuevamente, esto hace aún más evidente el problema histórico de las pérdidas de potencia en los motores eléctricos. El problema fue abordado en los años 80; por un lado se obtuvieron buenos resultados mediante la adopción de nuevos materiales magnéticos, y por otro con los reguladores de velocidad (sin disipación) (Fuchsloch, et al., 2008). En las últimas décadas han surgido discusiones referentes al muy bajo rendimiento de los motores utilizados para electrodomésticos (Boglietti, et al., 1986). Estudios recientes se centran en las máquinas de bajo rango de potencia; de hecho, su distribución es muy significativa desde el punto de vista de las pérdidas totales y de los costos de producción con las nuevas tecnologías (Boglietti, et al., 2008). Es posible estimar que hoy en día cerca del 30% de la potencia eléctrica es absorbida por máquinas con rangos de potencia menores a los 5 kW. Si asumimos un promedio de eficiencia equivalente del 80% (muy optimista), esto significaría que el 20% es disipado. Por consiguiente, más del 6% del total de la potencia eléctrica producida se disipa en pequeños motores eléctricos. Es también evidente que la posibilidad de reducir aun más las pérdidas internas de los motores debe permitir un incremento de la eficiencia, incluso si se limita al 1 ó 2%.

## II. DESARROLLO

El empleo de convertidores de potencia controlados adecuadamente permite reducir las pérdidas totales del accionamiento (Bonnett, 1996). Por estas razones, la mejora del rendimiento en los accionamientos eléctricos para motores de inducción es, hoy en día, un tema de vanguardia. Un aumento del rendimiento de un accionamiento supone, por un lado, un importante ahorro económico, y por otro lado, una reducción de la contaminación del medio ambiente (Hammons, et al., 1996).

En esquemas de control de alto desempeño dinámico usados en aplicaciones industriales como el Control por Orientación de Campo (FOC) y el Control Directo del Par (DTC), el flujo es mantenido usualmente constante en su valor nominal. En esta situación la eficiencia es máxima solo cuando el sistema funciona en su punto de operación nominal. Por debajo de este punto, el excesivo almacenamiento de energía en los embobinados, necesariamente disminuyen la eficiencia de la máquina. Una posible modificación de una de estas técnicas para resolver dicho problema puede apreciarse en la Figura 1.

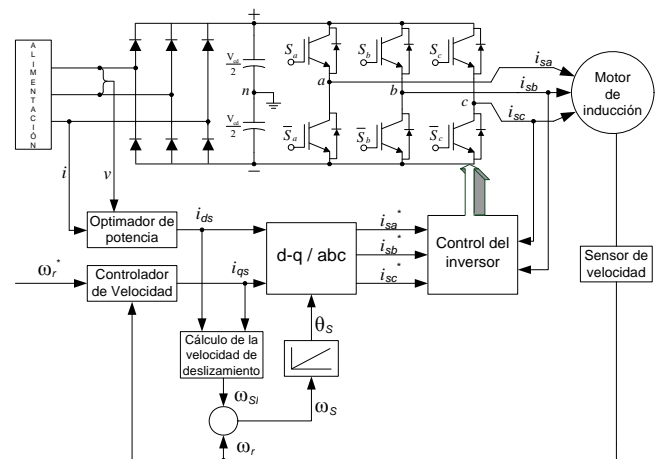


Figura 1. FOC con optimización del rendimiento basado en la medición de potencia activa consumida.

En muchas aplicaciones de accionadores electromecánicos el motor de inducción no opera en su punto óptimo ya que el par de consigna puede cambiar en función de la posición o la velocidad. Debido a lo anterior, es interesante el análisis de la disminución del flujo para lograr la optimización en el desempeño del sistema. La ganancia en eficiencia obtenida debido a la aplicación del flujo óptimo en comparación con el flujo convencional que es constante, es significativa, sobretodo a baja carga y también a baja velocidad. Los motores de inducción consumen más del 60% de la energía eléctrica en la industria. Esta es la razón por la cual se realizan considerables esfuerzos para mejorar la eficiencia de dichos motores. La minimización de pérdidas es llevada a cabo utilizando materiales de alta calidad, desarrollando excelentes procesos de diseño en el sistema de manufactura y programando algoritmos de control experto en el proceso de operación. En la última categoría, el

planteamiento principal es la adaptación del flujo del motor a la carga. El valor nominal del flujo es el valor del flujo optimizado para el punto de operación nominal del motor. Pero con carga ligera, utilizando el mismo valor de flujo que antes, se disminuye el factor de potencia y la eficiencia del accionamiento.

Existen algunas contribuciones en cuanto a la modificación del FOC para poder tomar en cuenta la optimización del rendimiento de la máquina según la carga conectada, sin embargo en cuanto a las modificaciones que se realizan al DTC hay muy poco reportado, incluso lo que existe toma como base el funcionamiento del DTC convencional para después modificarlo desde el punto de vista energético. La contribución de este trabajo se centra en realizar las modificaciones propuestas en (Kaboli, et al., 2003, 2004) para poder tomar en cuenta la mejora en el rendimiento del motor controlado bajo la técnica DTC convencional, pero además realizando mejoras en el funcionamiento del mismo control para resolver problemas intrínsecos al funcionamiento del mismo con las técnicas propuestas en (Toh, Idris y Yatim, 2005; Nik, Toh y Elbuluk, 2006). Además de agregar diversos elementos al control permitiendo mayor robustez y mejor funcionamiento del mismo con las contribuciones realizadas por (Calzada Lara, 2005).

*a) Principios y funcionamiento del DTC.*

La idea básica del DTC es calcular los valores instantáneos del par y del flujo a partir de las variables del estator de la máquina. El par y el flujo se controlan directamente y de forma independiente mediante la selección óptima de los estados de conmutación del inversor y limitando los errores de los mismos mediante controladores de histéresis (Noguchi, Takahashi, 1985). En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques básico del DTC. Mediante el DTC el par del motor se controla efectivamente con la rotación del vector de voltaje del estator utilizando estados de conmutación adecuados. En el mismo tiempo se controla la magnitud del vector del flujo de estator, es decir, con la utilización de los estados de conmutación del inversor. Este valor se puede cambiar según los requisitos de la consigna del flujo y el par.

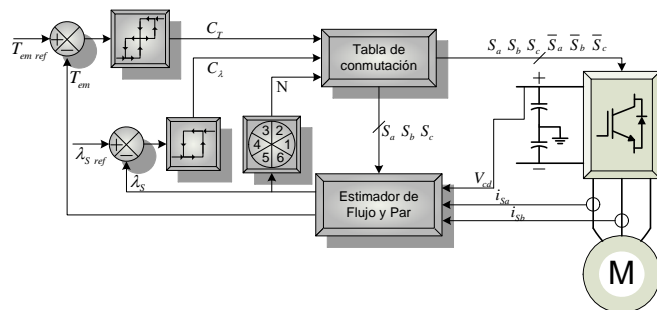


Figura 2. Estructura general del DTC

Según la Figura 2, los valores calculados del par y del flujo se comparan con sus consignas. Los errores entran en

los controladores de histéresis, cuyas salidas son señales lógicas de valores discretos (1, -1, 0) que se aplican a la tabla de conmutación, la cual junto con el valor numérico de uno de los seis sectores en los que se encuentra el vector de flujo, elige uno de los ocho estados posibles para generar el vector espacial de la tensión de salida del inversor, definiendo los valores que se deben generar para controlar los estados de conmutación de los interruptores de potencia por medio de las seis señales que son enviadas a las compuertas de dichos dispositivos. Cabe mencionar que los valores tanto de flujo como de par de la máquina son calculados por medio de un estimador, ya que dichas variables no son fácilmente medibles, por lo que se deben utilizar mediciones disponibles, que en este caso, son los valores de dos corrientes del estator del motor y el valor del voltaje en el bus de corriente directa que alimenta al inversor. Pero además, para poder estimar dichos valores de par y flujo, el estimador necesita como retroalimentación los valores de los estados de conmutación generados por la tabla y aplicados a los interruptores de potencia (Moustafa, 2002).

*b) Primera aproximación para modificar el DTC en busca de una mejor eficiencia.*

Se trabajó con una técnica de optimización de energía desde el punto de vista de la modificación del flujo en base al valor actualizado del par de carga en comparación con el par nominal de la máquina. Esto se realizó en conjunto con el DTC haciendo una modificación al esquema de control para poder tomar en cuenta las variaciones en la carga como lo muestra la Figura 3.

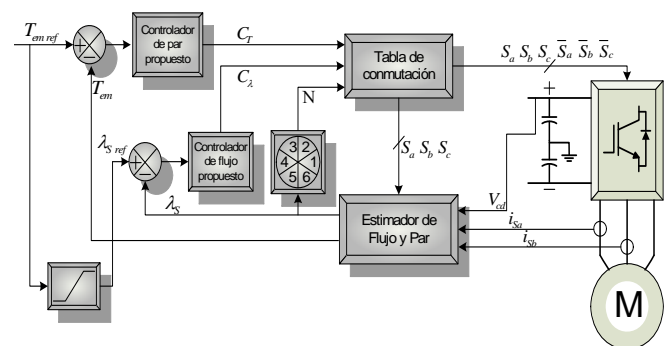


Figura 3. Modificación del DTC para cambiar de manera dinámica la referencia de flujo de estator.

En el esquema mostrado en la Figura 3, el valor de referencia del flujo de estator es determinado de acuerdo con el valor del par de referencia por medio de un controlador saturable. La banda superior de este controlador es determinada por el máximo valor del flujo de estator y la banda inferior se obtiene del mínimo valor de flujo de estator necesario para generar el par rotacional. El valor del flujo entre las bandas superior e inferior es determinado de acuerdo con la ecuación 1.

$$T_{emref} = P \frac{L_r}{L_1(L_1 + L_r)} |\lambda_s|^2 \quad (1)$$

Los resultados obtenidos de esta modificación se presentan en la Figura 4, donde puede observarse que la corriente tomada por el motor disminuye en amplitud, lo que asegura un incremento en la eficiencia debido a la disminución de la potencia de entrada, además de que también existe una disminución en el rizo del par del motor. Esta prueba se realizó para el 50% del par nominal de la máquina; donde en el primer resultado se mantiene la estructura clásica del DTC con una referencia de flujo constante de 1 Wb, y en el segundo caso se realiza la modificación propuesta dando como resultado en estado estable un valor de flujo de 0.77 Wb aproximadamente.

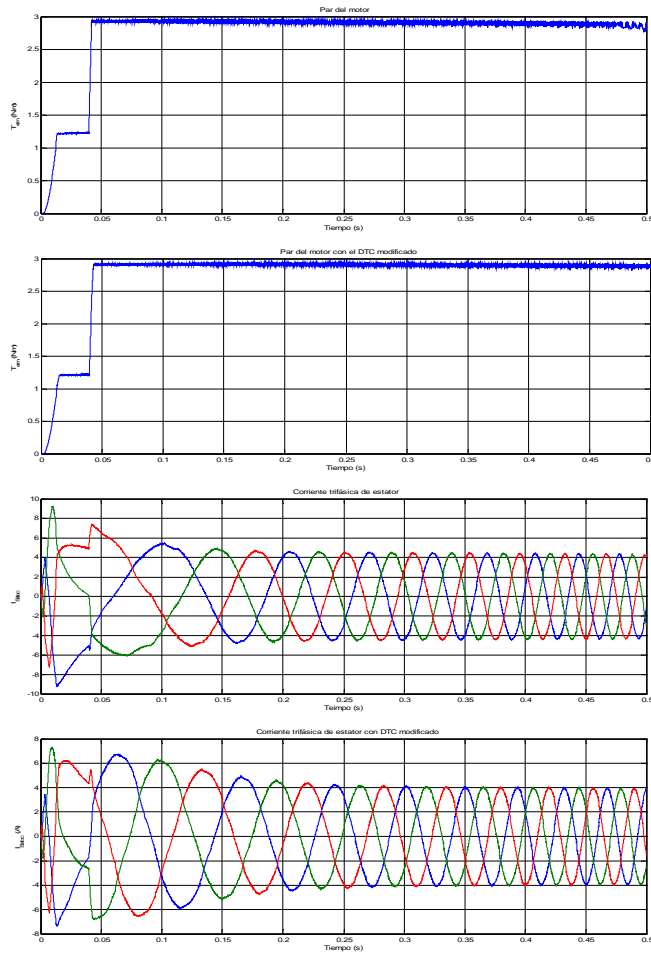


Figura 4. Resultados de la modificación del DTC para el mejoramiento de la eficiencia.

c) Control del flujo basado en un buscador del flujo óptimo.

En esta técnica, la potencia de entrada del accionador es minimizada ajustando el valor del flujo del motor. La principal ventaja de este método es que se basa en mediciones de algunas variables del motor para realizar la búsqueda del flujo óptimo, por lo cual se elimina el efecto de las variaciones de los parámetros de la máquina sobre el control (Kaboli, et al., 2005, 2007).

Básicamente este método utiliza la potencia de entrada del sistema como función objetivo y cambia el flujo de referencia para minimizar dicha potencia de entrada y así poder incrementar la eficiencia. Un ejemplo de la obtención de la función objetivo se muestra en la Figura 5, en donde se realiza una multiplicación de las componentes de los vectores tanto de corriente como de voltaje en el estator; una vez obtenida la función, se varía el flujo de manera escalonada hasta encontrar el mínimo de la misma (Kaboli, et al., 2004)

La velocidad de convergencia del buscador del flujo óptimo puede ser mejorada incrementando el tamaño de la variación del flujo, de esta manera, el algoritmo encuentra el flujo óptimo con mayor rapidez, sin embargo en estado estable, una variación de gran tamaño en el valor del flujo produce un rizo en el mismo flujo. En contraste, una pequeña variación en el valor del flujo resulta en un mejor comportamiento en estado estable, pero el tiempo de convergencia se vuelve muy largo. Existe un controlador que combina variaciones de flujo de diversas longitudes las cuales se adaptan según el lugar de la curva en el que se encuentren. Al comienzo, las variaciones de flujo son grandes provocando que el algoritmo de optimización converja al punto óptimo rápidamente. Cuando se realiza la aproximación al punto óptimo, la variación en el valor del flujo se disminuye a un pequeño valor que resulta en un mejor comportamiento en estado estable (Kaboli, et al., 2005, 2007).

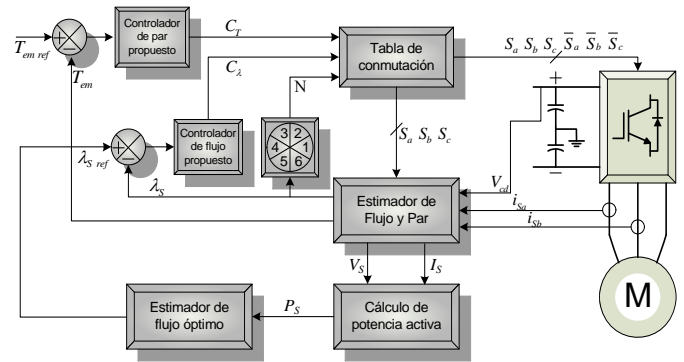


Figura 5. Modificación del DTC para variar el flujo de referencia con respecto a la potencia de entrada.

Para la misma prueba que se realizó con la técnica de control anteriormente citada con una carga de aproximadamente 50% de la nominal, se comparan las variaciones de flujo que realiza el buscador de flujo óptimo obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 6. En la primera gráfica de la Figura 6 se hacen variaciones pequeñas de flujo, lo que provoca un tiempo de convergencia mayor hacia el flujo óptimo, así como un valor más estable. En cambio en la segunda gráfica de la misma, la variación de flujo es más grande acelerando el tiempo de convergencia pero con un rizo en el nivel de flujo.



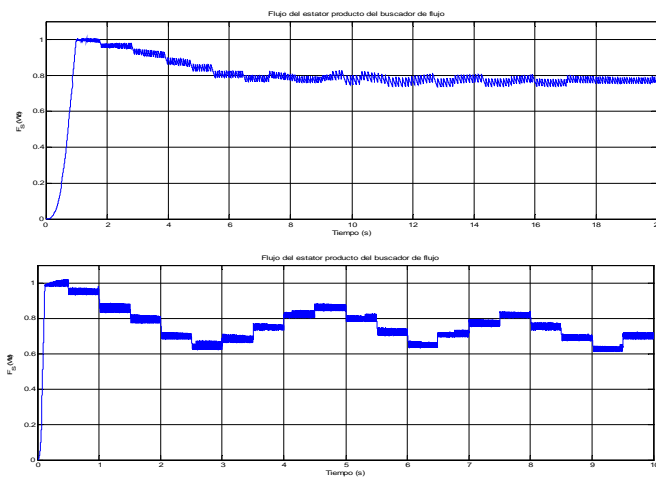


Figura 6. Comportamiento del flujo del estator forzado por el buscador de flujo con una variación pequeña y grande de flujo respectivamente.

d) Resultados experimentales del DTC de alto desempeño.

Describiendo brevemente el equipo utilizado en las pruebas experimentales, se utilizó un inversor de tensión trifásico para alimentar a un motor de inducción tipo jaula de ardilla controlado a través del sistema “dSPACE”. En este caso se utilizaron todos los algoritmos de control funcionando en tiempo real controlando directamente al inversor por medio de la “dSPACE”. Los algoritmos fueron programados en lenguaje C y relacionados con Simulink como funciones S obteniendo a la salida solo los pulsos que controlan directamente los interruptores requiriendo de las señales medidas de corrientes en el motor, voltaje de CD y posición proveniente de un encoder.

El sistema de potencia consta de un rectificador trifásico tipo puente a la entrada (construido con diodos), un par de capacitores que forman el bus de corriente directa, y finalmente el inversor de tensión trifásico tipo medio puente de seis interruptores de potencia, en este caso IGBT's. El sistema está diseñado para proveer un máximo de 30 Arms por fase, con un voltaje trifásico máximo de alimentación de 480 Vrms, y una frecuencia de conmutación de los interruptores de 20 kHz con la capacidad de entregar una potencia trifásica de salida de 20 kVA. Además se tiene una etapa de instrumentación, acondicionamiento y aislamiento para las señales que entran y salen a la tarjeta de control dSpace 1103.

Los parámetros del motor a controlar, los cuales fueron obtenidos mediante pruebas y algunos otros mediante identificación en trabajos previos, son los siguientes:  $R_S = 7.75 \Omega$ ,  $R_R = 2.95 \Omega$ ,  $\Lambda_S = \Lambda_R = 0.47 \text{ H}$ ,  $M = 0.44 \text{ H}$ ,  $\sigma = 0.1236$ ,  $J = 0.03 \text{ kg-m}^2$ ,  $p = 4$ , velocidad nominal 1750 rpm, voltaje de alimentación 220 V<sub>RMS</sub> a una frecuencia de 60 Hz, corriente a plena carga de 4.2 A<sub>RMS</sub> por fase, par a plena carga de 6.1 N-m, potencia nominal de 1.5 hp con factor de servicio de 1.

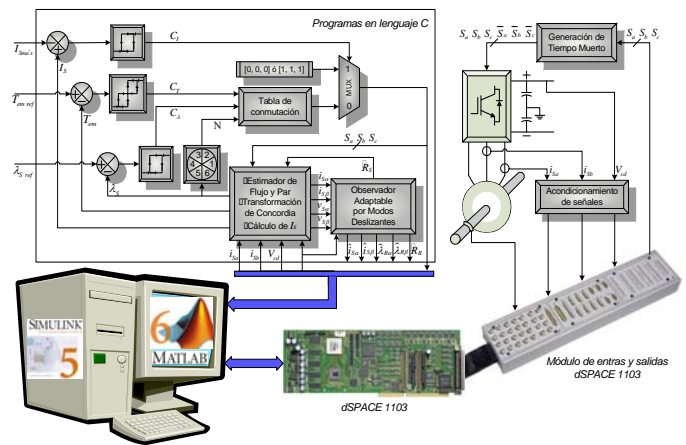
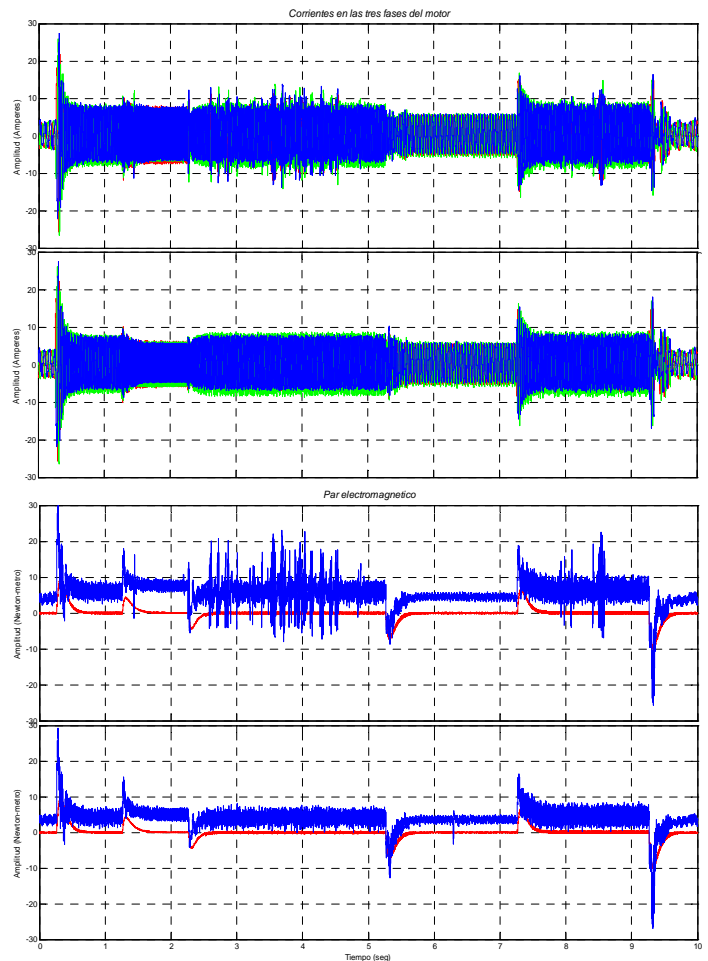


Figura 7. Esquema general del DTC de alto desempeño.

Como se mencionó anteriormente, las pruebas se realizan en tiempo real por medio de un sistema de adquisición de datos que funciona desde “Simulink” (Calzada Lara, 2005).

Finalmente se realizaron las pruebas experimentales de la técnica de control global propuesta que toma en cuenta todas las modificaciones realizadas al sistema de control DTC, además de la modificación que toma en cuenta el mejor aprovechamiento de la energía eléctrica de alimentación dependiendo de la carga conectada a la flecha del motor de inducción.



### III. CONCLUSIONES

Por medio de esta investigación se pretende hacer énfasis en que las estructuras de control utilizadas comúnmente en la industria como lo son el FOC y el DTC trabajando con motores de inducción, todavía pueden ser modificadas para obtener un mejor desempeño del sistema, además de que con dichas modificaciones se logra un ahorro importante de energía debido a que este tipo de motores son los más utilizados; con lo que se obtiene un importante beneficio energético ya que se disminuye la demanda, que en el terreno industrial se relaciona en términos de generación con la explotación de recursos no renovables, además de la disminución de la contaminación asociada al mismo proceso de generación.

Además de la posible modificación de las técnicas de control comúnmente utilizadas, se está trabajando en la síntesis de nuevos esquemas que permitan un mejor desempeño del conjunto motor-accionador de potencia, en cuestión energética, logrando de esta manera el funcionamiento de sistemas más eficientes que aprovechen de una mejor forma la energía consumida y puedan lograr así importantes ahorros energéticos, lo que tendría un impacto directo en materia ambiental.

### REFERENCIAS

- Boglietti A., Lazzari M., Profumo F., Villata F. (1986). About the selection of induction motors samples having representative character for energetic considerations. Proc. International Conference on Electrical Machines (ICEM), Munchen, Germany, pp. 223–226.
- Boglietti A., Cavagnino A., Ferraris P., Lazzari M. (2008). Energy-Efficient Motors. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 2, no. 4, pp. 32-37.
- Bonnett A. H. (1994). An Update on AC Induction Motor Efficiency. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 5, pp. 1362-1372.
- Bonnett A. H. (1996). Regulatory Impact on the Application of AC Induction Motors. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 2, no. 2, pp. 4-15.
- Bonnett A. H., Yung C. (2008). Increased Efficiency versus Increased Reliability. IEEE Industry Applications Magazine, vol.14, no. 1, pp. 29-36.
- Calzada Lara G. (2005). Elementos para la optimización del Control Directo del Par (DTC) aplicado a los motores de inducción. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Energy Information Administration (EIA, 2007), "International Energy Outlook 2007", [Online]. Available: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/>
- European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (CEMEP, 2003). Monitoring 2003 of the voluntary agreement on LV AC motors. Available: <http://www.cemep.org>
- Finley W. R., Veerkamp B., Gehring D., Hanna P. (2007). Advantages of using high efficiency motors such as NEMA premium around the world. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC) 2007, pp. 1–14.
- Fuchsloch J.F., Finley W. R., Walter R. W. (2008). The next generation motor. IEEE Industry Applications Magazine, vol.14, no. 1, pp. 37-43.

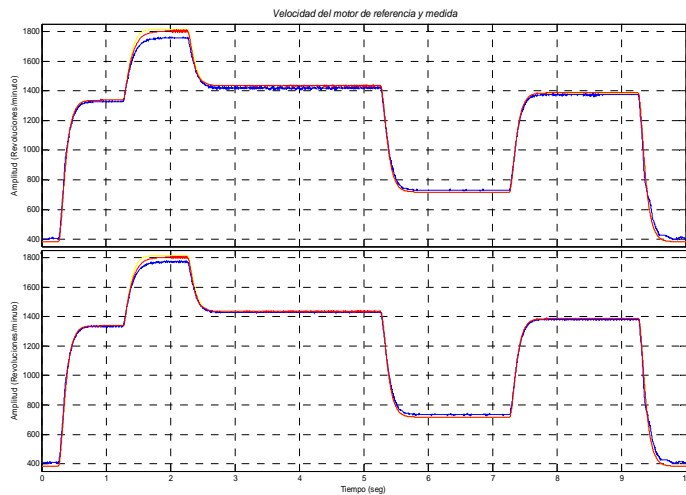


Figura 8. Resultados experimentales del DTC de alto desempeño.

Algunos resultados finales se presentan en la Figura 8, donde puede observarse la comparación realizada tanto en las corrientes del estator medidas (primer par de gráficas), la magnitud calculada del par de la máquina (en el segundo par de gráficas) y el seguimiento de la velocidad (tercer par de gráficas) entre el esquema DTC tradicional (gráficas superiores) y el esquema DTC de alto desempeño (gráficas inferiores). Como puede notarse con el esquema propuesto se obtiene un mejor seguimiento de velocidad con menor rizo en el par con corrientes ligeramente menores que las medidas en el esquema tradicional, por lo que con esto aseguramos que el motor consume menos potencia e incrementa su eficiencia. Donde además la tarea de control se cumple perfectamente ya que se mantiene el seguimiento de velocidad, la regulación de par y corrientes de funcionamiento reducidas aún a plena carga, que es la condición en la que se desarrollaron estas pruebas.

En el caso de la modificación del DTC para operar con una frecuencia de conmutación constante se obtienen varios beneficios tanto en desempeño de control como en el mejoramiento de la aplicación misma, ya que permite aprovechar mejor el tiempo disponible para resolver todas las ecuaciones por parte del DSP además del muestreo de las señales de entrada quitando la limitante de la frecuencia de conmutación variable ligada a dicho tiempo de ejecución fijando ahora la frecuencia de conmutación deseada por medio de la frecuencia de una señal portadora independizando así los efectos causados por la misma hacia los rizados de flujo y par y la distorsión armónica presente en la corriente del motor. De esta manera el esquema permitirá una estructura de control más amplia pensando en técnicas de optimización más complejas enfocadas al mejor aprovechamiento de la energía dentro del motor de inducción que puedan funcionar en conjunto con el control propuesto y no sean una limitante para la conmutación de los interruptores a frecuencias más altas.



- Haataja J., Pyrhonen J. (1998). Improving threephase induction motor efficiency in Europe. *Power Engineering Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 81–86.
- Hammons T. J., Kim C., Jennings J. S., Fresco P., Nasu S., Baker J. (1996). World Energy Council 16th Congress Review. *IEEE Power Engineering Review*, vol. 16, no. 3, pp. 11-18.
- Kaboli S., Zolghadri M. R., Haghbin S., Emadi A. (2003). Torque Ripple Minimization in DTC of Induction Motor Based on Optimized Flux Value Determination. *Proc. IEEE Industrial Electronics Conference*, pp. 431-435.
- Kaboli S., Zolghadri M. R., Roye D., Emadi A. (2004). Online Optimal Flux Controller for DTC Based Induction Motor Drives. *Proc. of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- Kaboli S., Zolghadri M. R., Vahdati-Khajeh E., Homaifar A. (2005). On the Performance of Optimal Flux Search Controller for DTC Based Induction Motor Drives. *Proc. International Electrical Machines and Drives Conference*.
- Kaboli S., Zolghadri M. R., Vahdati-Khajeh E. (2007). A Fast Flux Search Controller for DTC-Based Induction Motor Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 2407-2416.
- Malinowski J., McCormick J., Dunn K. (2004). Advances in construction techniques of AC induction motors: Preparation for super-premium efficiency levels. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 6, pp. 1665–1670.
- Moustafa Azab M. A. (2002). Estudio y realización del control directo del par (DTC) para accionamientos de motores de inducción con inversores de diferentes topologías. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Nik N. R., Toh C. L., Elbuluk M. E. (2006). A New Torque and Flux Controller for Direct Torque Control of Induction Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 6, pp. 1358-1366.
- Noguchi T., Takahashi I. (1985). A New Quick Response and High Efficiency Control Strategy of an Induction Motor. *Proceedings of the IEEE Annual Industry Applications Society Meeting*, pp. 496-502A.
- Toh C. L., Idris N. R. N., Yatim A. H. M. (2005). Constant and High Switching Frequency Torque Controller for DTC Drives. *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 76-80.