

Medición de velocidad sin sensor en motores de inducción sumergibles conectados directamente a la línea

Antonio Zamarrón Ramírez

Instituto Tecnológico de León, Av. Tecnológico S/N, León, Gto, 477-710-52-00
zamarron@itleon.edu.mx

Salomón Rodríguez Carrera

Instituto Tecnológico de León, Av. Tecnológico S/N, León, Gto, 477-710-52-00
salo_rodriguez_c@hotmail.com

Daniel Zamarrón Barrón

Instituto Tecnológico de León, Av. Tecnológico S/N, León, Gto, 477-710-52-00
daniel_deoro@live.com.mx

Francisco Valdivia

Instituto Tecnológico de León, Av. Tecnológico S/N, León, Gto, 477-710-52-00
franciscovr_12@hotmail.com

Resumen

En este artículo se presenta una solución viable para medir sin sensor la velocidad en motores de inducción trifásicos sumergibles tipo jaula de ardilla conectados directamente a la red eléctrica. Para determinar en campo el punto de operación de un motor trifásico sumergible y determinar si se encuentra funcionando a su máxima eficiencia es necesario conocer su velocidad y compararla con la velocidad nominal de los datos de placa del motor. En este trabajo se utiliza la saliencia espacial generada por el efecto de ranurado entre estator y rotor para estimar la velocidad. Esta saliencia induce en los devanados del estator una corriente que se refleja como un armónico en

las corrientes de fase. Los resultados muestran que con los datos de corriente de una de las fases y conociendo el número de barras del rotor y el número de polos del motor es posible estimar su velocidad.

Palabra(s) Clave(s): motor de inducción, sin sensor, sumergible, velocidad.

1. Introducción

Los motores de inducción son el caballo de batalla en aplicaciones industriales donde se requiere impulsar una máquina o sistemas hidráulicos. Estos motores pueden ser instalados en la superficie, en el fondo de minas o dentro de pozos para la extracción de agua. En algunas aplicaciones es importante conocer la velocidad del motor ya que esta información es útil para saber el porcentaje de carga que tiene el motor o la eficiencia con la cual se encuentra trabajando. Si se conoce la velocidad (y por lo tanto el deslizamiento) también es posible detectar fallas por barras rotas en el rotor. En motores colocados sobre la superficie se pueden utilizar tacómetros mecánicos, ópticos o tacogeneradores para conocer su velocidad, sin embargo en aplicaciones donde el motor se encuentra en espacios reducidos o de difícil acceso (motores sumergibles a gran profundidad, por ejemplo), es complicado, costoso y con grandes probabilidades de falla medir la velocidad de forma directa. En la literatura se pueden encontrar muchas publicaciones en las que se estima la velocidad del rotor (o del flujo) para implementar el control vectorial [1-3] o control directo de par [4] en motores conectados a variadores de velocidad electrónicos. Sin embargo, se le ha dado poca importancia a la estimación de la velocidad de motores conectados directamente a la línea, tal vez debido a que en pocas aplicaciones es necesario conocer la velocidad del motor. En [5] se presenta la estimación de la velocidad de un motor sumergible conectado directo a la línea. Dicha estimación la realiza filtrando las corrientes del estator con la transformada ondícula (frecuentemente llamada transformada wavelet) y posteriormente utilizando una red neuronal. El autor indica que su técnica de estimación de velocidad podría ser usada en motores con control de lazo cerrado y para el diagnóstico de fallas. En [6] la velocidad del motor conectado directo a la línea se estima midiendo las fluctuaciones de

uno de los armónicos de la corriente del estator dependiente del rotor, mediante un análisis tiempo-frecuencia. En ese trabajo el autor asume que existen asimetrías constructivas en el rotor (como la excentricidad) para poder realizar la estimación. Lo anterior hace a este método dependiente de la magnitud de la asimetría del rotor. En el presente trabajo se utiliza la saliencia espacial creada por el efecto de ranurado entre estator y rotor. Mediante la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) se obtienen los armónicos de una de las fases de corriente del estator y usando un programa en LabView se identifica el armónico creado por ranurado para determinar la velocidad del rotor.

2. Desarrollo

Aunque a los motores de inducción se les considera como máquinas no salientes, éstas pueden presentar saliencias espaciales de origen mecánico y magnético. Las saliencias de origen mecánico generalmente provienen por el efecto del ranurado entre rotor y estator y/o por la excentricidad estática y dinámica del rotor. La primera depende del número de ranuras del rotor y las dos últimas del proceso de producción. Las saliencias de origen magnético son aquellas creadas por la saturación del núcleo, siendo su magnitud y fase dependientes del nivel de carga del motor.

En este trabajo se utilizará la saliencia espacial por ranurado para estimar la velocidad del rotor ya que no depende del proceso de producción ni del nivel de carga del motor. Aunque es necesario decir que la magnitud de la saliencia por ranurado si es afectada por el tipo de ranura, es decir, si ésta es cerrada, abierta o semi-cerrada; también es afectada por la inclinación de las barras del rotor. Afortunadamente, en general, las barras del rotor de motores sumergibles son rectas (no inclinadas), lo que hace que la magnitud de la saliencia por ranurado sea mayor; sin embargo esta magnitud disminuye si las ranuras del rotor son cerradas. En motores sumergibles es común que tanto las ranuras del rotor como del estator sean cerradas ya que evitan turbulencias en el agua contenida dentro del motor.

Como se mencionó anteriormente las saliencias espaciales se pueden manifestar en el espectro de las corrientes de fase del estator. Los armónicos que produce la saliencia por ranurado están dados por (1) [7].

$$f_{sh_k} = \left[(kR \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm v \right] f \quad (1)$$

donde R es el número de ranuras del rotor, $n_d = 0$ en caso de excentricidad estática, p el par de polos de la máquina, s el deslizamiento, f la frecuencia de la fuente de alimentación, k un valor entero y v el orden del armónico temporal del voltaje que alimenta al motor. Una vez que se localiza la frecuencia del armónico por ranurado se puede utilizar (2) [8] para calcular la velocidad del rotor en rad/s.

$$\omega_r = 2\pi * \left(\frac{f_{sh_k} \pm vf}{N_r} \right) \quad (2)$$

donde $N_r = R/p$. En la figura 1 se presenta la evolución en el tiempo y su espectro del voltaje inducido en una bobina exploradora de paso completo colocada en las ranuras del estator de un motor sumergible de 75 HP, 220 V, 60 Hz, 2 polos y 28 ranuras en el rotor que gira a una velocidad de 3538 rpm.

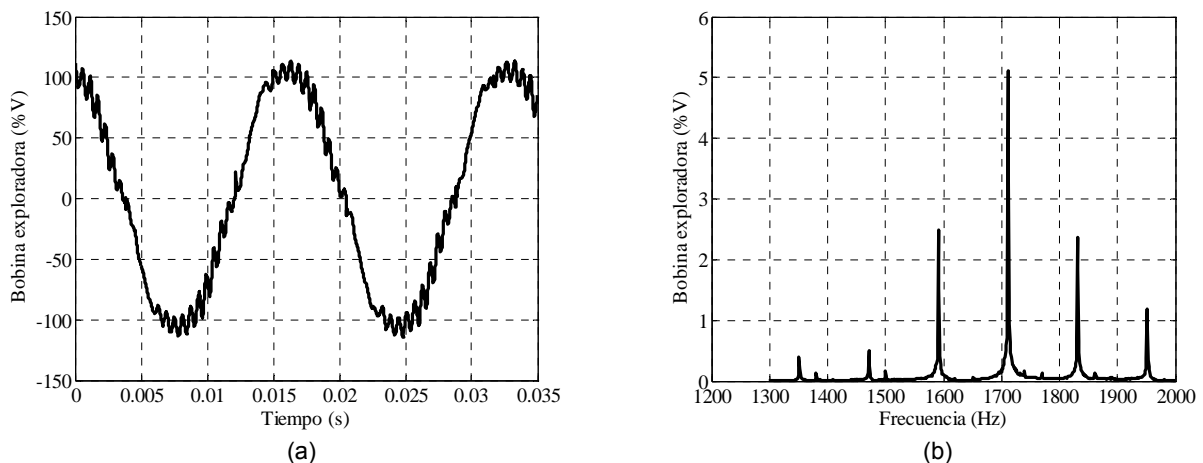


Fig. 1. a) Evolución temporal y b) espectro del voltaje inducido en la bobina exploradora.

En el espectro se presentan los armónicos producidos por ranurado para $v = \pm 1$, ± 3 y ± 5 . De acuerdo a (1) los armónicos para $v = \pm 1$ se ubican en las frecuencias de 1591 y 1711 Hz; para $v = \pm 3$ en 1471 y 1831 Hz y por último para $v = \pm 5$ en 1351 y 1951 Hz. Observar que la magnitud mayor se presenta en 1711 Hz. Utilizando esta frecuencia en (2) con $v = -1$ y multiplicando el resultado por $60/(2 * \pi)$ se obtiene la velocidad mecánica del rotor en rpm.

A.- Captura de datos

Los datos de la corriente de fase se obtuvieron de un motor sumergible de 75 HP que viene acoplado a una bomba de agua tal como se muestra en la figura 2. La corriente es sensada mediante un transformador de corriente (TC), acondicionada mediante una resistencia de precisión y capturada con una DAQ de National Instrument a una frecuencia de muestreo de 100 kHz.

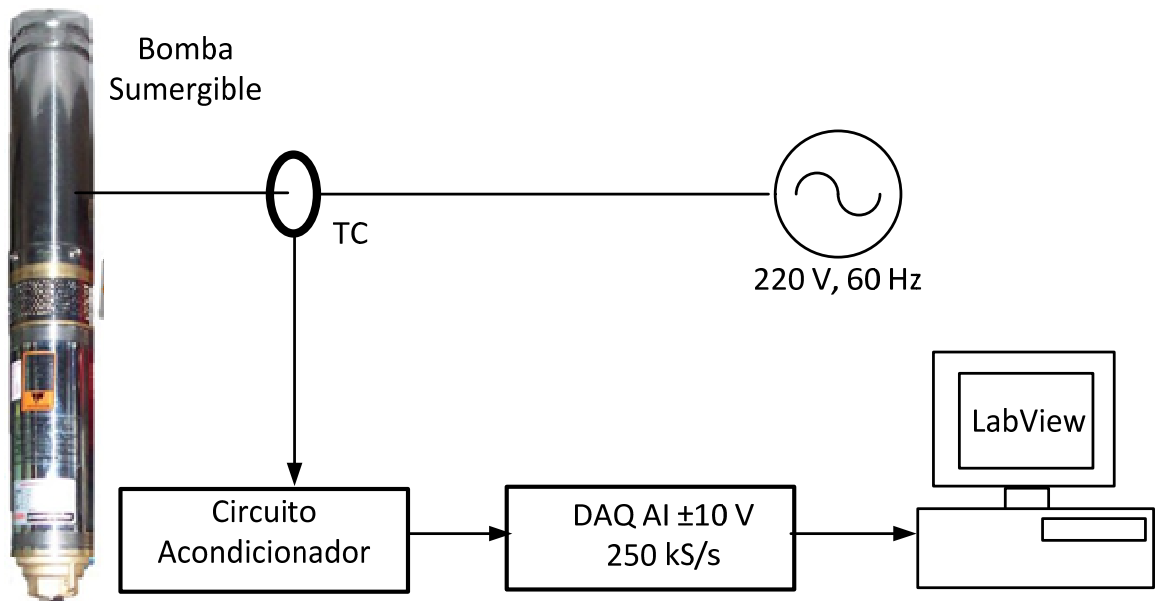


Fig. 2. Diagrama esquemático para la captura de la corriente de fase.

B.- Procesamiento de datos

Los datos capturados de la corriente son procesados utilizando la FFT para obtener la frecuencia del armónico de ranurado que se utiliza para calcular la velocidad del rotor. La velocidad se puede obtener utilizando el vector complejo de la corriente de estator I_{qds} , en coordenadas estacionarias. La desventaja que se tiene es que para obtener I_{qds} es necesario capturar las tres corrientes de fase del motor, lo que implica tener tres transformadores de corriente y tres circuitos acondicionadores de señal. En la figura 3a y 3b se presenta la evolución en el tiempo de las corrientes de fase y el espectro del vector complejo de la corriente de estator, respectivamente. Ya que el devanado del motor es simétrico, la diferencia que se observa en las magnitudes de las corrientes de fase en la figura 3a se puede deber a un desbalanceo de los voltajes de fase o diferencia de las ganancias en los circuitos acondicionadores.

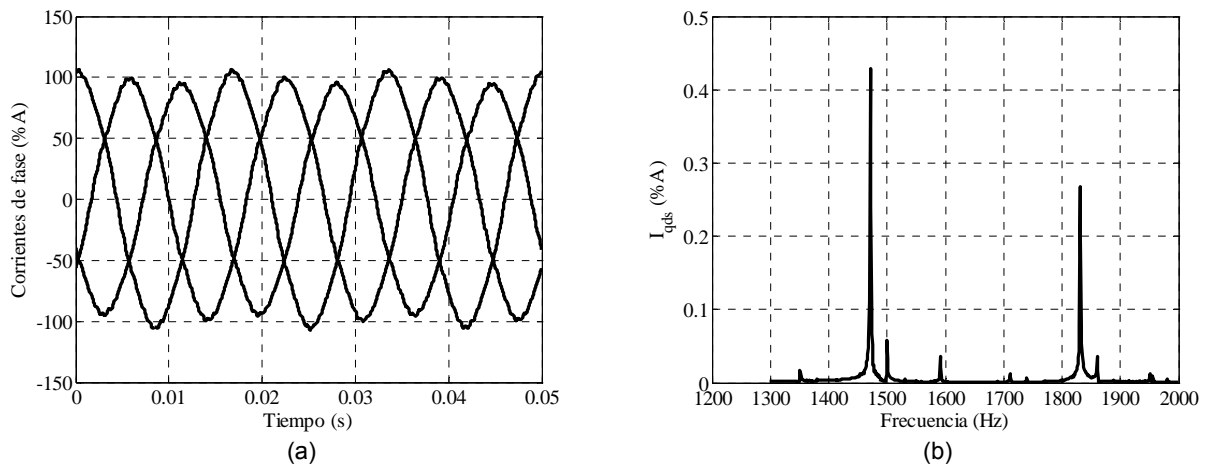


Fig. 3. a) Evolución temporal y b) espectro del vector complejo de corriente.

Como se puede ver en la figura 3b, cuando se utiliza el vector complejo de las corrientes de estator solo aparecen de forma significativa los armónicos correspondientes a $v = \pm 3$ (1471 y 1831 Hz) y el resto se ven notablemente disminuidos.

En la figura 4 se presenta el espectro de las corrientes de estator correspondientes a las fases A y B. Aunque tienen pequeñas diferencias, cualquiera de las dos fases se puede utilizar para calcular la velocidad del rotor. Se puede apreciar que aparecen cuatro armónicos dependientes de la velocidad debido al ranurado con magnitud significativa, en comparación a solo dos que aparecen cuando se utiliza el vector complejo de la corriente de estator. Al igual que en la figura 3b, el armónico cuando $\nu = -1$ (1591 Hz) se ve notablemente disminuido. Por el contrario, el armónico $\nu = -5$ (1351 Hz) es más grande aún que el mostrado para la bobina exploradora presentado en la figura 1b.

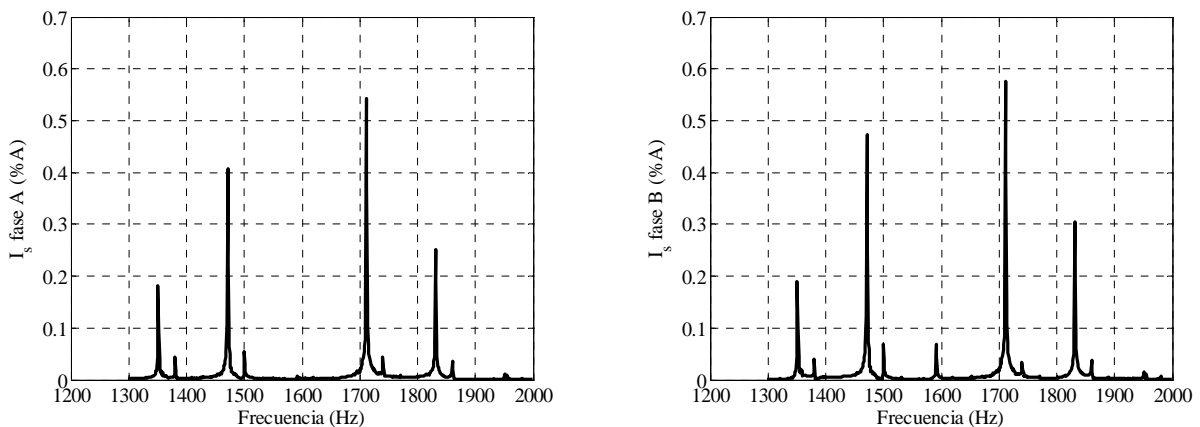


Fig. 4. Espectro de las corrientes de la fase A y B.

C.- Despliegue de datos

Para mostrar la velocidad calculada a través de uno de los armónicos por ranurado se implementó un programa en LabView. El diagrama a bloques de las partes principales del circuito de alambrado del programa se muestra en la figura 5. En primer lugar se capturan los datos acondicionados provenientes del TC a una frecuencia y tiempo de adquisición determinada por el usuario. Esta señal capturada se despliega en una de las ventanas del programa para observar, desde el punto de vista académico únicamente, la forma de onda de la señal. Posteriormente a esta señal se le aplica la

transformada rápida de Fourier y se despliega en una pantalla para observar los armónicos contenidos en la señal capturada. Una vez que se tiene la magnitud y frecuencia que le corresponde a cada armónico, se selecciona una ventana de rastreo, dentro de la cual se puede ubicar fácilmente el armónico de ranurado para calcular la velocidad ya que es el armónico de mayor magnitud. El rango de frecuencia de la ventana depende del número de polos y barras del motor. Una vez que se obtiene la frecuencia del armónico por ranurado, se aplica (2) y se multiplica por $60/(2 * \pi)$ para obtener la velocidad en rpm. Por último la velocidad es desplegada en la pantalla principal del programa.

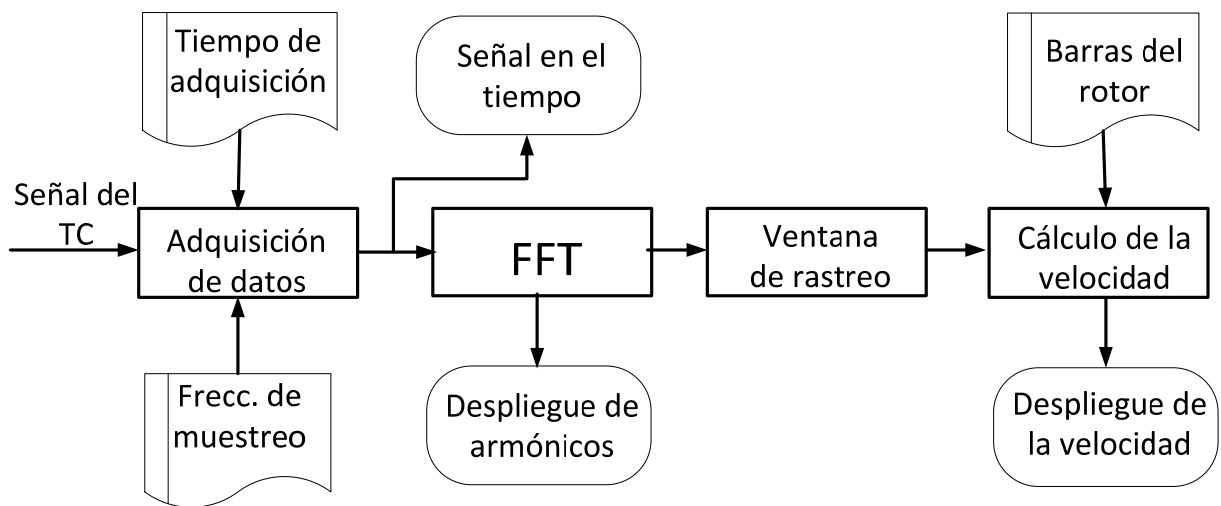


Fig. 5. Diagrama a bloques del programa implementado en LabView.

3. Resultados

En la figura 6 se presenta el diagrama de alambrado y panel de control principal de la interfaz desarrollada en LabView para el despliegue de información. El panel de control tiene tres pestañas, una para desplegar la señal en el tiempo, otra para mostrar los armónicos de la señal y la principal para mostrar la velocidad del motor.

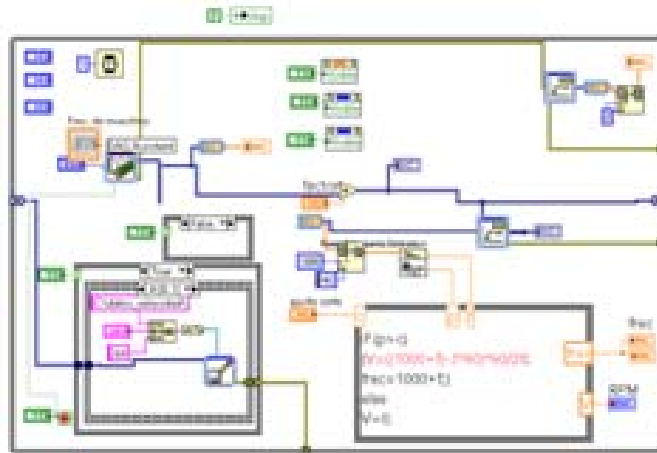


Fig. 6a. Diagrama de alambrado.



Fig. 6b. Panel de control principal.

En la figura 7 se presentan las pantallas que muestran la evolución en el tiempo de la señal capturada y el espectro de frecuencias. El espectro mostrado corresponde únicamente al rango determinado en la ventana de rastreo para la búsqueda del armónico por ranurado.

Con fines de comparación, la velocidad del motor también fue medida mediante un encoder de 1000 pulsos por revolución y desplegada con un pulsómetro de 50 kHz. Debido a la resolución que se tiene en el espectro, la velocidad calculada variaba en ± 1

rpm respecto a la medida. En la figura 8 se muestran dos momentos diferentes en las que la velocidad es calculada y medida para efectos de observar el error en rpm.

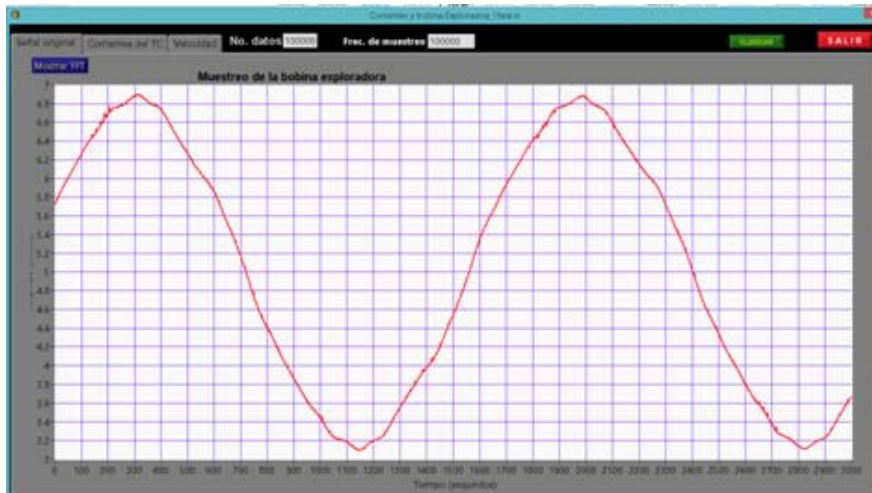


Fig. 7a. Evolución temporal de la señal.

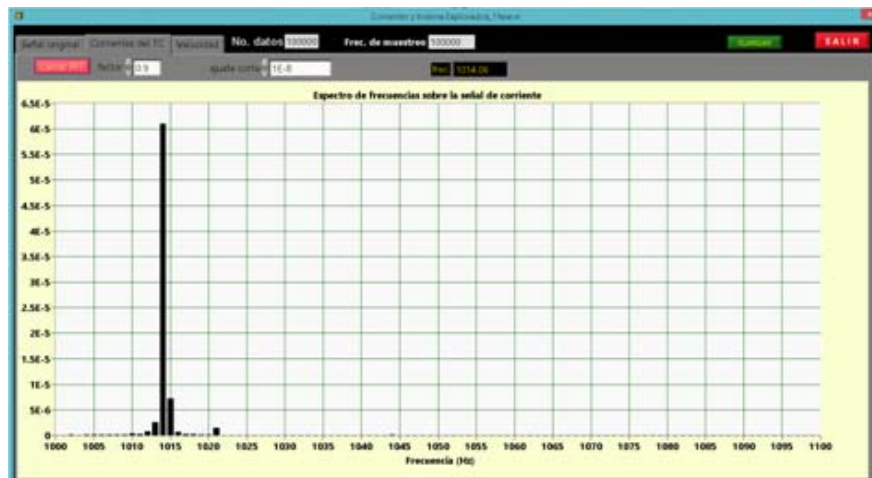


Fig. 7b. Espectro de frecuencias de la ventana de rastreo.



Fig. 8. Velocidad calculada y medida para un motor de cuatro polos, error ± 1 rpm.

4. Discusión

Estimar o calcular la velocidad en motores de inducción se ha realizado desde hace varias décadas para implementar el control sin sensor en accionadores electrónicos con control vectorial o con control directo de par. Sin embargo las técnicas utilizadas han sido poco utilizadas en motores trifásicos conectados directamente a la línea debido a que en apariencia no hay aplicaciones que lo requieran. En este trabajo se utiliza el armónico por ranurado para calcular la velocidad de un motor sumergible, motor que es de difícil acceso cuando se encuentra en grandes profundidades. Algunos autores han utilizado acelerómetros para calcular la velocidad por medio de la vibración, pero en estos casos la magnitud de la señal varía de motor a motor ya que depende del grado de desbalanceo que tenga el rotor (excentricidad dinámica) y en ocasiones la relación señal/ruido es muy pobre. El prototipo ha sido probado en una empresa que se dedica a la fabricación de motores y bombas sumergibles con excelentes resultados. Utilizar la bobina exploradora dentro de unos de los motores nos ha mostrado los armónicos creados por las saliencias espaciales. Aunque no se muestran en la figuras presentadas, en la bobina exploradora también se inducen algunos armónicos de bajo orden (180, 300 y 420 Hz, entre otros) producidos algunos de ellos por la saturación magnética del núcleo. También es posible obtener información de la velocidad del rotor con el vector complejo de la corriente de estator, sin embargo se tiene la desventaja de

necesitar tres transformadores de corriente y tres circuitos acondicionadores de señal, lo que lo hace más caro y con más fuentes de falla. Ya que con la corriente de una sola de las fases también se tiene información para calcular la velocidad del rotor, en el prototipo final solo se dejará la captura y despliegue de una de las fases. Para mejorar la resolución de la velocidad es posible disminuir la frecuencia de muestreo hasta un valor que nos permita capturar los armónicos de interés. Los motores de las bombas sumergibles generalmente son de dos polos, aunque raramente se encuentran de 4 polos para el bombeo de agua con lodos y arena. El prototipo en este caso no incluye la opción para el cambio de número de polos. Por otro lado, no todos los motores de bombas sumergibles tienen el mismo número de barras (ranuras) en el rotor, aunque los fabricantes intentan mantener el mismo tipo de rotor para varias potencias de motores alargando únicamente el paquete magnético. Una mejora que se le puede hacer al programa es incluir una caja de diálogo para introducir o seleccionar el número de barras.

5. Conclusiones

Sin duda existen aplicaciones en las que se requiere conocer la velocidad de motores conectados directamente a la línea. Los fabricantes de motores y bombas sumergibles lo requieren para trazar sus curvas hidráulicas y en algunas empresas, que se dedican a la extracción de agua, para obtener la eficiencia electro-hidráulica. En este trabajo se ha presentado una opción viable para calcular la velocidad de motores sumergibles mediante el procesamiento de los datos obtenidos de la corriente de una de las fases del estator. Los resultados han mostrado que se tiene al menos un armónico dependiente de la velocidad del rotor para obtener la información de su velocidad. El programa para la captura, procesamiento y despliegue de datos se ha implementado en el software LabView, aunque en un futuro se pretende tener el programa embebido en un circuito integrado y mostrar tan solo la velocidad del rotor en un display.

6. Referencias

- [1] M. G. Aydeniz, I. Senol, "A Novel Approach to Sensorless Control of Induction Motors". Electrical and Electronics Engineering. ELECO. International Conference, 2009.
- [2] K. Yamamoto, K. Iimori, H. Morita, "A Study of Digital Filter for Rotor Speed Detection with Slot Harmonic Current for Induction Motor". TENCON 2010.
- [3] F. Chen, R. Cheung, "Advanced Speed-sensorless Induction-motor Drive". Power Engineering, Large Engineering Systems Conference, 10-12 Oct 2007.
- [4] J. M. Aller, A. Bueno, J. A. R. V. M. G., M. I. Jiménez, "Técnica combinada de control de la máquina de inducción sin sensores de velocidad". Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V. 2004. 63-73 pp.
- [5] J. Yang, L. Wang, D. Xu, B. Xue, "Sensorless Speed Estimation for Line-connected Induction Motor Based on Recurrent Multilayer Neural Network". IEEE International Conference on Automation and Logistic. 2007.
- [6] A. BIEÑ, K. DUDA, "An induction motor speed measurement method based on supplying current analysis". Vol. 87. No. 3. 2011. 201-203 pp.
- [7] S. Nandi, S. Ahmed y H. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related

harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages". IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 16. No. 3. 2001. 253-260 pp.

- [8] G. Rață, M. R. I. Graur y D. L. Milici, "Induction motor speed estimator using rotor slot harmonics". Advances in Electrical and computer Engineering. 2009.

7. Autores

El Dr. Antonio Zamarrón Ramírez obtuvo su título de Ingeniero Electromecánico en el Instituto Tecnológico de León en 1990, su título de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de la Laguna en 1992 y su título de Doctorado por la Universidad de Oviedo, España en el 2003. Actualmente es profesor de tiempo completo y coordinador de Proyectos de Investigación en el Departamento de Metal Mecánica del Instituto Tecnológico de León.

El M.C. Salomón Rodríguez Carrera es egresado del Instituto Tecnológico de León y tiene un posgrado en Optomecatrónica por el Centro de Investigación en Óptica. Actualmente es profesor de tiempo parcial en la carrera de Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de León.

Daniel A. Zamarrón Barrón y Francisco Valdivia son estudiantes del 7° y 11° semestre respectivamente de la carrera de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de León.