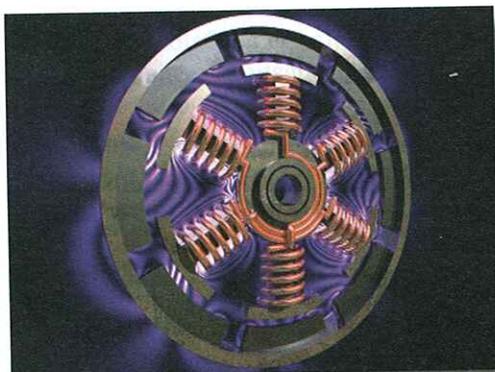


# Diseño de un banco de ensayo automatizado para motores Brushless



Alfonso Bachiller-Soler\*  
Francisco De Paula García-López\*  
Ramón Cano-González\*

Dr. Ingeniero Industrial  
Ingeniero Técnico Industrial  
Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial

\* Universidad de Sevilla. EPS. Dpto. Ingeniería Eléctrica. C/Virgen de África, 7 - 41011 Sevilla. Tfno: +34 954 552831. abs1hm@us.es, fragarlop@hotmail.com, ramoncano@us.es

Recibido: 30/11/2010 • Aceptado: 11/01/2011

## Design of an automated test bench for brushless motors

### ABSTRACT

- Because of the many advantages shown by the brushless DC motors, or brushless motors, there is currently a significant increase both in their development and also in their utilization in the industrial sectors such as the automobile, aerospace, and medical, as well as in automation and instrumentation equipment. This requires making a series of tests to establish a comparison of performance between machines from different manufacturers or with different innovations. This article describes the implementation of a test bench that allows full automation testing.
- **Keywords:** Brushless motor, test bench, PLC (programmable logic control).

### RESUMEN

Debido a las numerosas ventajas que presentan los motores de corriente continua sin escobillas, o motores *brushless*, en la actualidad se está produciendo un aumento importante en su desarrollo y empleo en los sectores industriales del automóvil, aeroespacial, sanitario, así como en equipos de automatización e instrumentación. Esto obliga a la realización de una serie de ensayos para poder establecer una comparativa de prestaciones entre máquinas de distintos fabricantes o con diferentes innovaciones. En este artículo se describe la implementación de un banco de ensayos que permite realizar el ensayo de forma totalmente automatizada.

**Palabras clave:** Motor brushless, banco de ensayo, PLC.

### 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se está produciendo un crecimiento en el empleo de los motores *brushless* en la industria en decremento de los motores clásicos de corriente continua. Esto se debe fundamentalmente al alto coste de mantenimiento que requieren estos últimos.

A nivel constitutivo, un motor *brushless* es básicamente un motor síncrono trifásico con rotor de imanes permanentes, aunque su principio de funcionamiento se asemeja más al de un motor de corriente continua [1]. En su funcionamiento como motor, el giro del rotor de la máquina se debe a la reacción del campo magnético giratorio creado por el devanado estatórico y el correspondiente a los imanes permanentes alojados en el rotor. Para generar dicho campo magnético giratorio, las bobinas estatóricas se deben alimentar mediante un sistema de tensiones apropiado obtenido a partir de un convertidor electrónico que, a su vez, se alimenta de una fuente de corriente continua [2], [3].

Según se ha comentado, el funcionamiento de los motores brushless es muy similar a los motores de corriente continua en los que los campos magnéticos generados por los devanados inductor e inducido se encuentran en cuadratura. Esto da lugar a un par constante en el eje. Para conseguir estas mismas condiciones en un motor *brushless*, es necesario un sistema de control apropiado que produzca una alimentación secuencial de cada una de las fases del estator de forma sincronizada con el movimiento del rotor. A diferencia del motor de corriente continua, el motor

*brushless* necesita disponer de los elementos apropiados que detecten la posición del rotor en todo instante, lo cual se hace generalmente mediante sensores de efecto Hall.

Las ventajas más importantes de los motores *brushless* frente a los motores clásicos de corriente continua son la supresión de las escobillas y el colector de delgas. Esto se traduce en un menor tamaño, mayor rendimiento, mayor vida útil y menor mantenimiento [1]. Además, la eliminación del colector reduce la inercia, reduce la distancia entre cojinetes y elimina las limitaciones de velocidad impuestas por éste. La principal desventaja respecto a los motores de corriente continua convencionales es que requieren de un control más complejo.

Para evaluar las prestaciones de este tipo de motores se recurre a curvas características similares a las de un motor de corriente continua clásico [4] en las que se relacionan las magnitudes más importantes de la máquina como son el par mecánico en el eje, la velocidad de giro, la intensidad, la potencia absorbida y el rendimiento. Así, se obtiene la curva característica de velocidad en la que se relaciona la velocidad de giro con la intensidad que absorbe el motor, la curva característica de par en la que se relaciona el par con la intensidad que absorbe el motor y la curva característica mecánica que relaciona el par con la velocidad de giro.

Además de estas curvas características, es interesante obtener otras que tienen en cuenta las condiciones energéticas del motor y que tienen mucha importancia a la hora de cumplir una serie de especificaciones de trabajo. Estas curvas relacionan el rendimiento y la potencia útil con la velocidad de giro del motor.

Un banco de ensayo es una plataforma que permite someter, en este caso particular, a un motor a distintos regímenes de funcionamiento y medir todas y cada una de las magnitudes anteriormente citadas como el par mecánico en el eje, la velocidad de giro y una serie de magnitudes eléctricas.

En este contexto surge la necesidad de modernizar un banco de ensayo existente cuyo funcionamiento era esencialmente manual. Un operario era el encargado de variar las condiciones de carga y de anotar las correspondientes medidas, lo cual suponía por un lado una gran inversión de tiempo así como los correspondientes errores en las medidas tomadas. Así mismo, esto también daba lugar a un calentamiento de la máquina durante el ensayo motivado por la inevitable duración de este.

El objetivo principal de este artículo es la descripción de un banco de ensayos totalmente automatizado, sin apenas la intervención del operador, de forma que permita reducir el tiempo de los ensayos y que disminuya los errores en las medidas. Este desarrollo se ha llevado a cabo en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla y es válido para cualquier tipo de motor *brushless*.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYO

En general, el desarrollo de cualquier sistema automatizado y en particular el banco de ensayo descrito en este artículo, requiere de un conjunto de sensores para la recogida de información, un sistema de procesado de la información y unos actuadores [5].

En este apartado se hará una descripción del banco de ensayo desarrollado, indicando y describiendo cada una de las partes constituyentes. A modo de diagrama de bloques, en la Figura 1 se ha representado de forma simplificada los elementos más importantes del banco así como la interconexión a nivel de señal y a nivel eléctrico entre ellos.

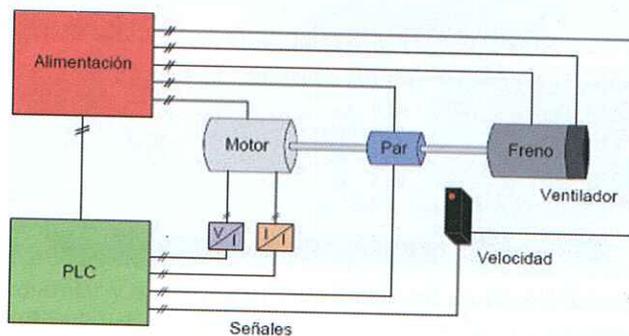


Figura 1: Diagrama de bloques del banco de ensayo

Constructivamente, el banco de ensayos consta de dos partes bien diferenciadas. La primera parte consiste en una bancada (Figura 2) donde se encuentran dispuestos los siguientes elementos: motor *brushless* a ensayar, freno, sensor de par, sensor de velocidad así como otros elementos auxiliares como acopladores de ejes.

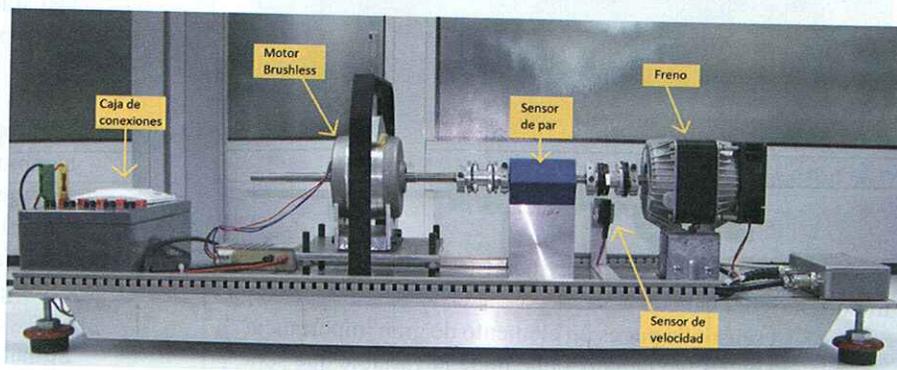


Figura 2: 1ª Parte del banco

La segunda parte (Figuras 3 y 4) consiste en un contenedor de chapa metálica fabricada a tal efecto que aloja a los equipos de adquisición y control del banco. En la parte frontal se encuentra dispuesto, sobre carril DIN, el PLC

(Programmable Logic Control) con el cual se realizan todas las operaciones lógicas, así como los distintos terminales de conexión de señales y de alimentación eléctrica. En la parte posterior se encuentran alojadas las fuentes de alimentación de los distintos elementos del equipo, los traductores de tensión e intensidad para las medidas eléctricas, relés para la activación y secuencia de las maniobras, así como los correspondientes elementos de soporte y conexión.



Figura 3: 2ª Parte del banco. Vista frontal

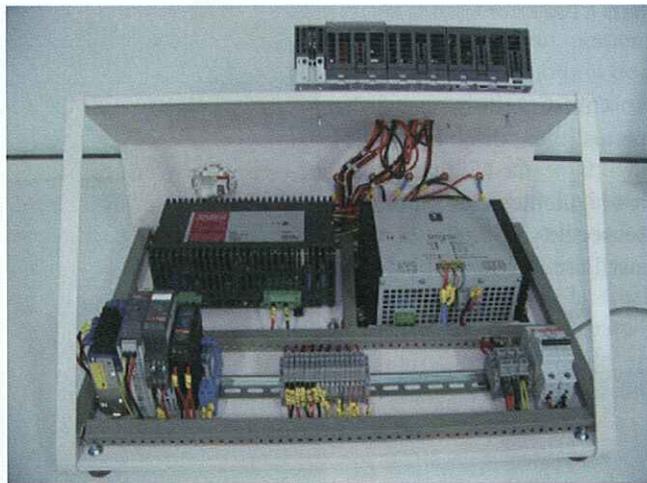


Figura 4: 2ª Parte del banco. Vista trasera

A continuación se describen los elementos más importantes del banco:

- El sensor de par es un elemento de gran importancia en el ensayo debido a que mide la variable que será referencia en la mayoría de las curvas características resultantes. En este caso se ha utilizado un sensor cuya señal digital es transmitida sin contacto desde el eje a la carcasa. En cuanto a sus características técnicas hay que destacar que tiene un rango de medida de 1Nm y una clase de precisión de 0.25 [8]. Esto quiere decir que el error relativo máximo respecto al fondo de escala (1Nm en este caso)

es inferior al 0.25 %, que en valores absolutos se traduce en un error absoluto máximo de 0.0025 Nm para cualquier medida dentro del rango de 1Nm. Este sensor proporciona una señal de tensión en el rango  $\pm 5V$  proporcional al par en el eje. Esta señal se conecta a una de las entradas analógicas del PLC.

- Aunque existen diversos métodos para la medida de velocidad, en este caso se ha optado por un sensor fotoeléctrico debido a su buena relación entre economía y precisión frente a otros, como los encoders, que, además de su elevado coste, requieren un acoplamiento mecánico al eje. Con este tipo de sensor y la disposición de una serie de elementos fotorreflexivos en el acoplamiento de ejes se genera un tren de pulsos proporcional a la velocidad del eje. Una de las entradas del PLC configurada como contador rápido es la encargada de traducir la frecuencia de los pulsos a la velocidad en rpm del eje. La precisión alcanzada con este método es del 0.5% a la velocidad máxima de 5000 rpm.

- El freno es el encargado de ofrecer un par resistente variable. En el mercado hay varios tipos de frenos aplicables en este caso, si bien es verdad que los más adecuados son los frenos electromagnéticos por su facilidad de control mediante señales eléctricas. En este caso particular, a nivel de prototipo se ha utilizado un motor monofásico de inducción modificado en el laboratorio para que pueda ser alimentado por corriente continua sin sufrir daños. Es importante destacar que los condicionantes técnicos que debe cumplir el freno es que sea capaz de proporcionar un par resistente en el eje adecuado con las características del motor a ensayar y que soporte el correspondiente aumento de temperatura sin dañarse. En la fabricación del banco a nivel industrial, será conveniente incorporar un freno electromagnético sin que esto provoque cambio alguno en la operatividad del banco. Hay que destacar que, en este caso particular, para evitar un excesivo calentamiento durante el ensayo, se ha acoplado un ventilador capaz de disipar el calor generado.

- Se han instalado una serie de fuentes de alimentación para los diferentes rangos de tensión requeridos: 0-65V, 24V y 15V. De entre todas estas fuentes destacan dos por su importancia. Por una parte, la encargada de alimentar al motor a ensayar es una fuente de 24V, 6A cuya tensión está autorregulada para compensar la caída de tensión, manteniendo de esta forma la tensión en bornes de la máquina. Por otra parte, la fuente que alimenta al freno es

una fuente regulable de 0-65V, 10A. El valor de la tensión de ambas fuentes se controla externamente mediante una salida analógica del PLC. El ventilador, el sensor de velocidad y el PLC se encuentran alimentados por una fuente de tensión fija de 24V. Por último, la fuente de 15V es la que suministra la alimentación al sensor de par. La potencia máxima del banco viene limitada por el freno, que puede llegar hasta los 500W.

AC500, con una serie de módulos de expansión para adaptarlo a las exigencias del proceso, tales como la entrada y salida de señales analógicas y digitales.

En la Figura 5 se puede ver el banco de ensayos completo.

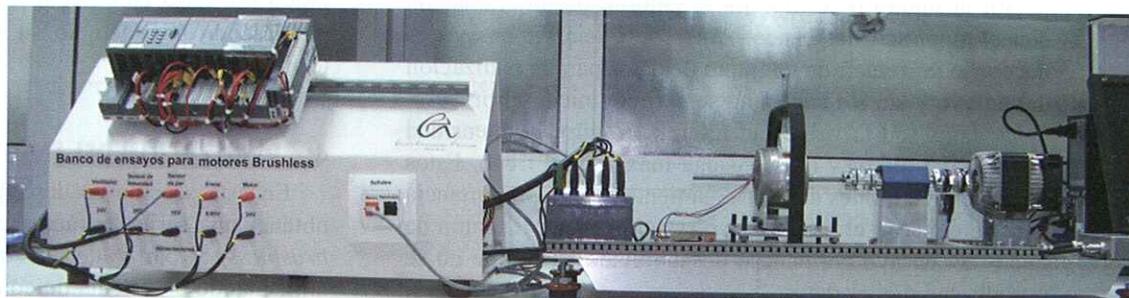


Figura 5: Banco de ensayos completo

- Los transductores de tensión e intensidad son necesarios para adaptar las distintas señales a los niveles adecuados de forma que puedan ser tratadas por el PLC. Concretamente, se han utilizado sendos transductores para convertir los valores de la tensión e intensidad del motor brushless al estándar de medida 4-20 mA.
- El PLC es un elemento fundamental en el proceso de ensayo debido a que es el responsable de toda la secuenciación del mismo. En este caso se ha optado por un autómata de la marca ABB de la serie

### 3. INTERFAZ GRÁFICA

Para facilitar la operación del banco, además del PLC, se ha diseñado un sistema SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) a partir del cual el usuario puede controlar y visualizar el estado del ensayo. Para ello se ha utilizado el software CoDeSys (Controller Development System o Sistema de desarrollo del controlador) [6]. Este software facilita por un lado la programación del PLC mediante distintos lenguajes como por ejemplo texto estructurado (ST), lenguaje de contactos (LD), lenguaje de bloques (FBD), etc., y por otro lado permite la creación de entornos gráficos.

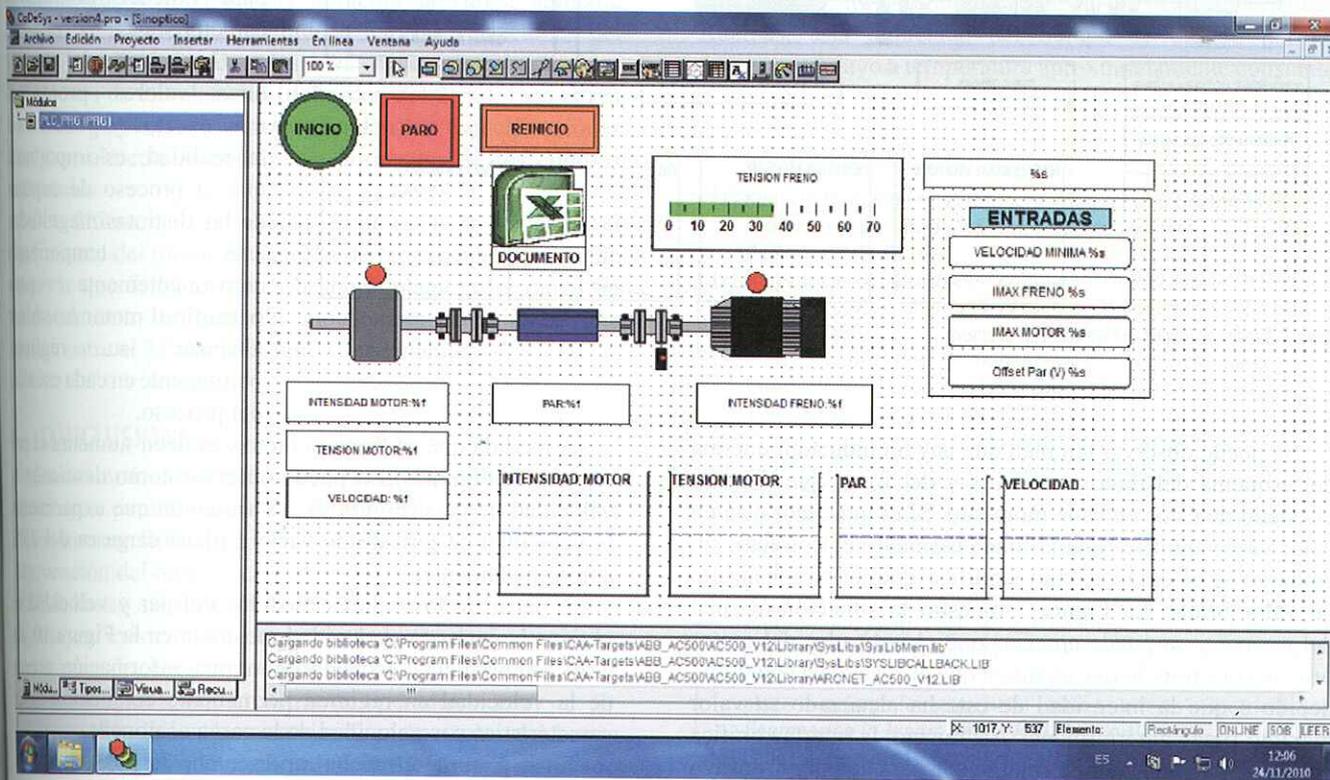


Figura 6: Interfaz de usuario del banco de ensayo

En este caso particular, toda la programación del PLC e interfaz de usuario se ha basado en redes de Petri [7] que posibilita la estructura secuencial del ensayo, dando lugar a unos estados que definen el proceso y los cuales habilitan las distintas fases y procedimientos a abordar.

En la Figura 6 se muestra el entorno de programación con el sinóptico del banco. Antes de iniciar el ensayo es necesario introducir un conjunto de datos para la realización del ensayo y sin los cuales no se permite iniciar el proceso. Tales datos son la velocidad mínima de giro, la intensidad máxima del motor y la intensidad máxima del freno. Estos datos definen límites de funcionamiento de gran importancia para no dañar ni el motor *brushless* ni el freno. El botón de inicio del ensayo permanece deshabilitado hasta que no se introduzcan dichos datos.

Una peculiaridad de esta interfaz gráfica es que, una vez iniciado el ensayo (Figura 7), se pueden visualizar los valores promedio, tanto de forma numérica como gráfica, de distintas magnitudes como la tensión e intensidad del motor *brushless*, el par en el eje, la velocidad de giro y la tensión e intensidad del freno.

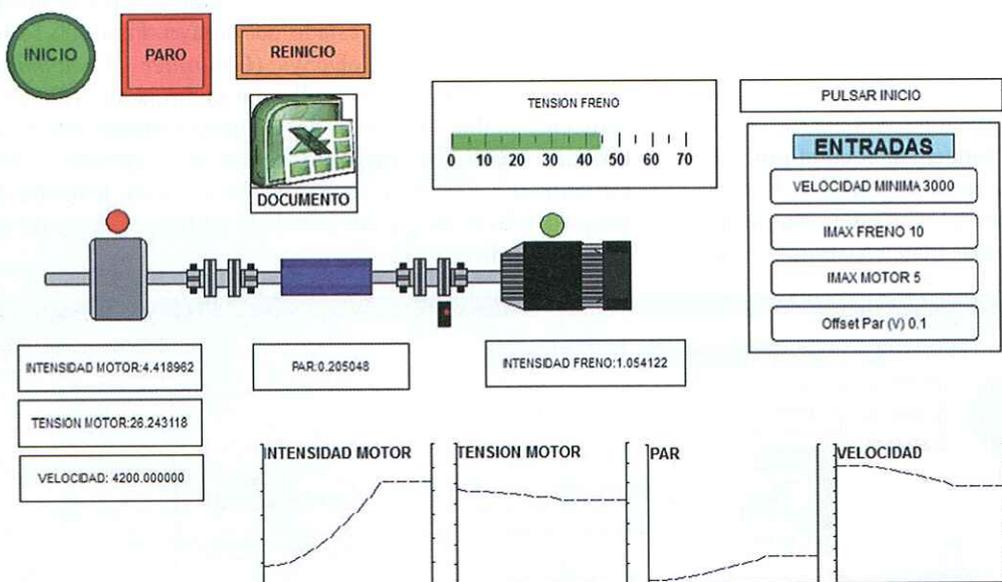


Figura 7: Interfaz de usuario una vez concluido el ensayo

Se puede observar también que hay un indicador encima del esquema del motor *brushless* y del freno que muestra el estado de éstos en cada momento. Si el indicador está en color verde significa que el funcionamiento es correcto, sin embargo si el color es rojo significa que se ha alcanzado un valor límite. La Figura 7 muestra la situación al final del ensayo y se puede apreciar que el indicador del motor *brushless* es rojo, lo que significa que el ensayo ha concluido debido a que la intensidad de este ha alcanzado su valor máximo fijado anteriormente. Así mismo, la interfaz gráfica cuenta con un pulsador de emergencia para detener el ensayo en cualquier momento.

Un valor añadido que proporciona el software utilizado es que permite tener acceso a una hoja de cálculo Excel en la que se tienen todos los valores almacenados. Mediante el tratamiento de estos datos convenientemente, se pueden generar de forma automática las curvas características del motor *brushless* tal y como se verá en el siguiente apartado, permitiendo por ejemplo su incorporación en un informe técnico.

#### 4. REALIZACIÓN DEL ENSAYO Y RESULTADOS

En esta sección se describe el proceso necesario para obtener una serie de curvas características de los motores *brushless* a partir de un único ensayo que comienza alimentando el sistema de control del motor *brushless* a su tensión nominal (mantenida durante todo el ensayo) siendo nulo el par resistente en el eje (excepto el par de pérdidas mecánicas). En esta situación el motor alcanza su máxima velocidad. A continuación, se varía progresivamente la tensión aplicada al freno en escalones predefinidos en la programación del PLC, estableciendo así un par resistente

en el eje y variando así su velocidad. Durante este proceso, el PLC almacena los valores promedio de distintas magnitudes como la tensión e intensidad del motor *brushless*, la velocidad de giro y el par, los cuales servirán para obtener las curvas características.

Con objeto de obtener unos valores promedios más exactos y próximos a la realidad, es importante que el proceso de captura de las distintas magnitudes esté temporizado convenientemente para permitir al motor *brushless* alcanzar su régimen permanente en cada escalón del proceso.

A medida que se frena el motor, es decir aumenta el par resistente (Figura 8), se puede observar como desciende la velocidad de giro (Figura 9). La variación que experimenta la velocidad de giro desde vacío a plena carga es del 25% aproximadamente.

A partir de los valores medidos del par y velocidad se obtiene la curva par-velocidad mostrada en la Figura 10, de gran importancia ya que proporciona información acerca de la velocidad en régimen permanente en función de la característica par-velocidad de la carga accionada.

En la Figura 11 se ha representado la potencia útil de motor *brushless* en función de la velocidad. Se puede

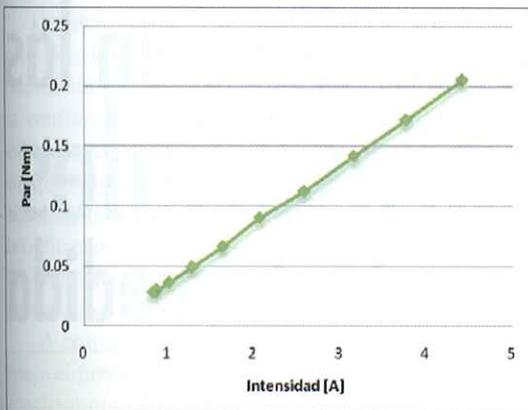


Figura 8: Curva Par-Intensidad

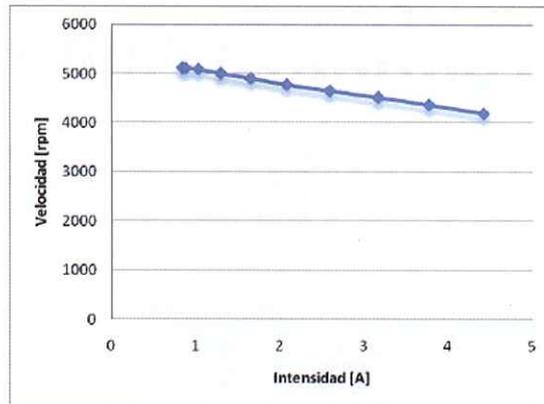


Figura 9: Curva Velocidad-Intensidad

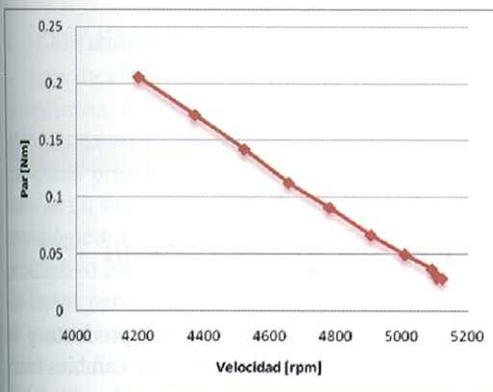


Figura 10: Curva Par-Velocidad

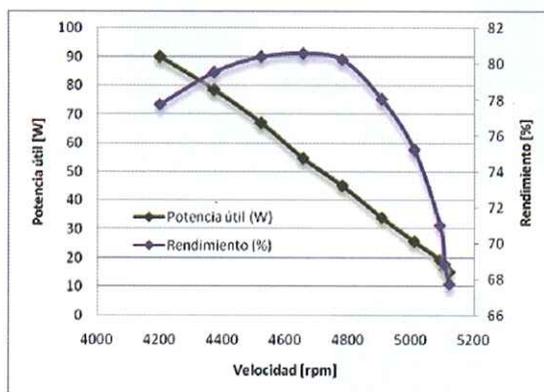


Figura 11: Curvas Potencia útil-Velocidad, Rendimiento-Velocidad

observar que a medida que aumenta la carga, aumenta también la potencia útil debido a que las variaciones del par son mucho más acusadas (del orden del 90%) que las variaciones de la velocidad (del orden del 25%). Esta curva se utiliza para verificar si se cumplen las especificaciones que generalmente imponen los fabricantes de los equipos accionados.

Por último, en la misma Figura 11 se muestra el rendimiento del motor en función de la velocidad. Se puede observar que dicha curva es bastante plana en el rango de funcionamiento normal del motor, con variaciones que oscilan entre el 78% y 80% aproximadamente.

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el diseño de un banco de ensayos para motores *brushless*, útil para obtener las curvas características de forma automatizada sin apenas la intervención del operador.

Este banco surgió como necesidad de sustituir un banco de ensayos existente en el que tanto las variaciones de las condiciones de carga como la lectura de las correspondientes magnitudes las tenía que realizar un operador.

Frente al anterior, las ventajas fundamentales del banco descrito en este artículo son la reducción del tiempo empleado en el ensayo, la disminución de los errores de medida así como la

obtención de forma automática de las curvas características. Además, esta reducción del tiempo de ensayo permite realizar el ensayo a temperatura aproximadamente constante.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kenjo T, Nagamori S. *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*. 1ª Edición. USA: Oxford University Press, 1985. 194p. ISBN: 0-19-856214-4
- [2] Hanselman DC. *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. 2ª Edición. USA: Magna Physics Pub., 2006. 392p. ISBN: 978-1881855156
- [3] Miller TJE. *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. 1ª Edición, USA: Oxford Science Publications, 1989. 224p. ISBN: 978-0198593690
- [4] Cyril GV. *Motores Eléctricos de Potencia Fraccionaria y Subfraccionaria*. 1ª Edición. España: Marcombo Boixareu Editores, 1978. 532p. ISBN: 84-267-0222-8
- [5] Faure B. *Máquinas y Accionamientos Eléctricos*. 1ª Edición. España: Fondo Editorial de Ingeniería Naval, 2000. 686p. ISBN: 84-921750-7-9
- [6] 3S-Smart Software Solutions GmbH. *User Manual for PLC Programming with CoDeSys 2.3* [en línea]. [ref. de 25 de noviembre 2010]. Disponible en Web: <<http://www.abb.es/>>.
- [7] Cai Y, Nishi I, Sekiguchi T. "Modelling by Petri nets with place invariants for sequential control systems". *Electrical Engineering in Japan*. 1995. Vol.115-5, p.100-111
- [8] Pallás R. *Sensores y Acondicionadores de Señal*. 4ª Edición. España: Marcombo, 2003. 480p. ISBN: 84-267-1344-0