

## Comprobación del diseño de un motor BLDC, contraste entre los resultados de simulación y los ensayos experimentales

Marcelo J. Kelm\*, Luis A. Urbani, Diego A. Kelm, Gabriel Y. Aguirre

*LABSE, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina*

e-mails: marcelomw21@gmail.com, ctt.urbani@gmail.com, kelmdiego@gmail.com, gabrielaguirre@fio.unam.edu.ar.

---

### Resumen

En el trabajo se presenta un motor de corriente continua, del cual se conocen los parámetros de diseño y construcción, con el mismo por un lado se realiza una serie de ensayos experimentales y por el otro se realiza un conjunto de simulaciones mediante el software JMAG-Express Public, con la finalidad de contrastar los resultados obtenidos en ambos ensayos. Al realizar experimentos y simulaciones se obtienen resultados similares, con lo cual se comprueba el correcto diseño del motor. Además, permite relevar las curvas de velocidad del motor en lazo abierto para encontrar un modelo matemático que permita realizar el posterior control en lazo cerrado.

*Palabras Clave* – BLDC motor, Ensayos, JMAG-Express Public, Motor de corriente continua sin escobillas, Simulaciones.

### 1. Introducción

Los motores Brushless DC o motor de corriente continua sin escobillas BLDC (de las siglas en inglés *Brushless Direct Current*), son uno de los impulsores eléctricos que están ganando popularidad rápidamente, debido a su alta eficiencia, buena respuesta dinámica y bajo mantenimiento. Son ampliamente utilizados en muchas aplicaciones de motores que desarrollan alto torque con buena respuesta de velocidad [1].

El motor BLDC es un tipo de motor DC con imanes permanentes en el cual la conmutación del campo se realiza de forma electrónica. El motor BLDC sin escobillas, posee imanes permanentes en el rotor y un bobinado en el estator, similar a un motor de inducción trifásico con bobinado conectado en estrella.

Al energizar las bobinas del estator en la secuencia adecuada se puede obtenerse un campo rotante que permite el arrastre del rotor. No obstante, el par producido en el eje aumenta si el campo del estator se encuentra en cuadratura con el campo producido por los imanes del rotor. Para asegurar esto, es necesario conocer la posición del rotor y energizar las bobinas siguiendo una secuencia determinada. Por lo tanto, es necesario determinar la posición del campo del rotor, y esto se obtiene mediante sensores de posición de efecto Hall.

El objetivo del trabajo es realizar una comparativa entre los resultados de simulación que arroja el software JMAG con los resultados obtenidos experimentalmente, con el objetivo de corroborar la herramienta de diseño de motores y así poder emplear en otros prototipos.

El trabajo presenta primeramente un detalle del funcionamiento de los motores *brushless*, los drivers empleados y las características constructivas del prototipo ensayado; luego se exhiben los

\*Autor en correspondencia.

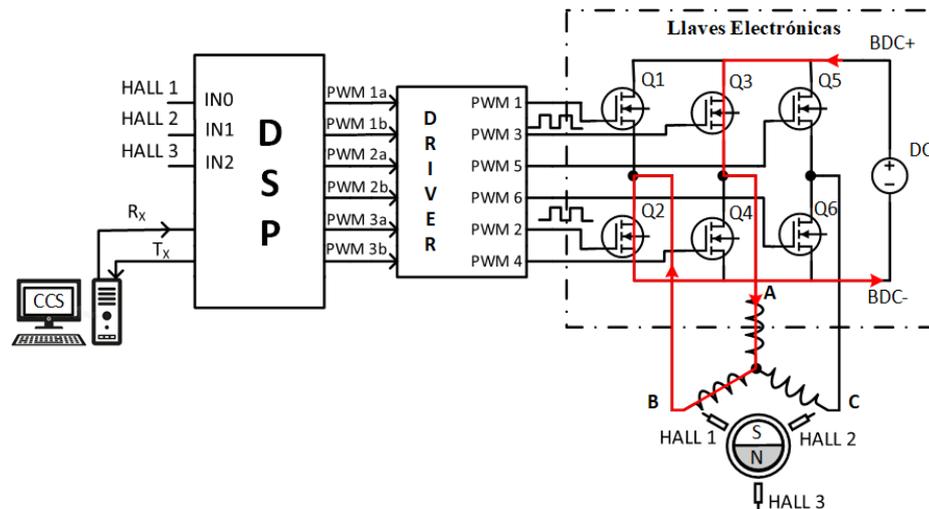
ensayos de la simulación y finalmente los resultados de los ensayos experimentales. Para cerrar el escrito se expresan las conclusiones del trabajo.

## 2. Desarrollo

### 2.1. Esquema para Ensayo del Motor BLDC

Para llevar a cabo los ensayos del prototipo de motor BLDC es necesario una etapa de potencia. La cual está constituida básicamente por un controlador o driver y un inversor con transistores del tipo IGBT (del inglés *Insulated Gate Bipolar Transistor*); estas llaves permiten manejar niveles de tensión y corrientes elevadas y permite realizar conmutaciones en el orden de los KHz. Sin embargo, para hacer conducir a los IGBTs se requiere de un impulso de corriente, este impulso de corriente necesario para activar dichos transistores es suministrado por los drivers integrados. Además, dicho driver contribuye en una etapa de aislación galvánica entre las salidas de la plataforma digital y el inversor.

Por otro lado, el inversor consta de seis llaves electrónicas conformado tres brazos como se observa en la Fig. 1; la tensión aplicada al bus es del tipo continua, la cual es modulada por cada par de llaves, generando una tensión de salida sobre cada las bobinas del estator del motor. La forma de la tensión sobre el motor es una terna trifásica, obtenida mediante modulación por ancho de pulso (PWM). En la Fig. 1, se observa un paso o secuencia de conmutación, para este caso en particular las llaves Q3 y Q2 se encuentran modulando la tensión del Bus DC.



**Fig. 1. Paso de Conmutación.**

Para llevar a cabo una conmutación correcta, se implementa un algoritmo de control en una plataforma digital empleando la información proveniente de los sensores de efecto Hall [2]. Así dos llaves producirían un campo en el estator en cuadratura con la posición angular actual del rotor.

## 2.2. Aspectos del funcionamiento y diseño del Motor BLDC

Para llevar a cabo el análisis, tanto en lo que responde la parte de simulaciones mediante software, como así también el ensayo, se requiere de un prototipo de motor tipo BLDC. Para ello se dispone de un prototipo diseñado y ensamblado con la finalidad de someterlo a diversos ensayos y simulaciones para contrastar los parámetros constructivos teóricos con la práctica experimental. De modo general se describirá los aspectos y características del diseño vinculado al prototipo con el que realizó los ensayos y simulaciones.

El motor BLDC posee un bobinado de tipo trifásico en conexión estrella definidos por UVW, donde la inducción de las fuerzas magneto matices ( $F_{mm}$ ) del estator se realiza haciendo circular corriente por dos de las tres bobinas presentes. Es por ello, que la  $F_{mm}$  resultante del estator se corresponde siempre a la combinación de  $F_{mm}$  inducidas por dos bobinas. En la Fig. 2 se presenta el caso donde se excitan las bobinas  $U$  y  $V$  y resulta en la  $F_{mm}$  R. En este caso, se puede apreciar que el ángulo entre la  $F_{mm}$  generada por el estator y la  $F_{mm}$  generada por los imanes permanentes ( $I_p$ ) del rotor es máximo.

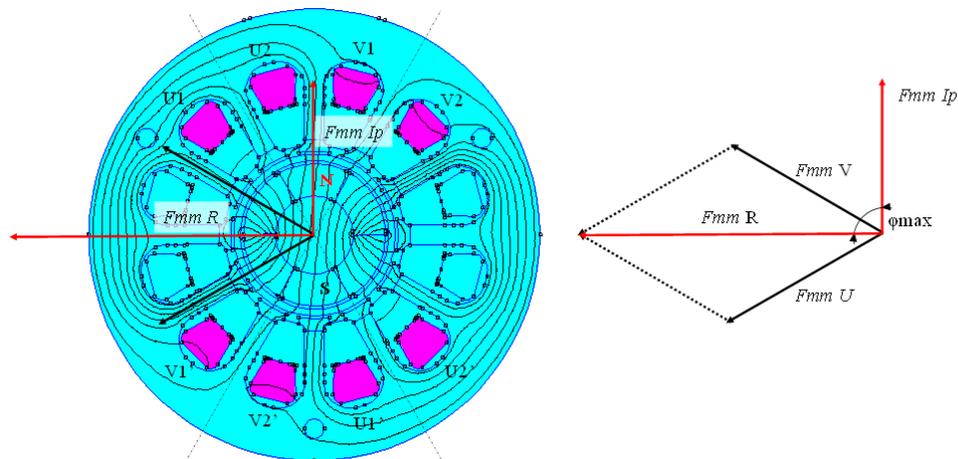


Fig. 2. Ángulo máximo entre  $F_{mm}$  rotor y  $F_{mm}$  del estator.

Basándose en el principio de funcionamiento del motor existe un ángulo límite o máximo, entre la  $F_{mm}$  del estator y de los imanes permanentes, en los cuales puede operar el mismo. El primero de ello se corresponde al ángulo máximo  $\phi_{max}$  que ocurre un instante después del disparo de la llave electrónica implementando mediante un control donde la  $F_{mm}$  del estator se encuentra próximo a la cuadratura con respecto a la  $F_{mm}$  de los imanes permanentes y para la cual se obtiene el torque máximo desarrollado por el motor, Fig. 2.

El ángulo límite puede considerarse aproximadamente constantes tanto para régimen permanente como para estados de aceleración, debido a que el control es de tipo electrónico y a medida que se incrementa la velocidad de rotación la contra  $F_{mm}$  inducida en el estator tiende a disminuir la corriente circulante por las bobinas y en consecuencia disminuye la  $F_{mm}$  resultante del estator. Bajo estas consideraciones, se plantea para el análisis de fuerzas radiales que la máxima corriente circulante por las bobinas es de 5A de pico, siendo este un parámetro relevante para la etapa de simulación, como así también los demás parámetros que se detallan posteriormente.

**Tabla 1: Parámetros de diseño del motor.**

BOBINADO		DIMENSIONES DEL ROTOR		
Tipo de conexión	Conexión Estrella	ROTOR	DIMENSIONES	
Numero Serie	4	ESTATOR ROTOR	Diámetro Exterior, mm	70
Numero Paralelo	1		Espaciado Rotor-Estator, mm	2
Numero de Vueltas	100		Altura de Apilado, mm	37.5
Espesor del Aislante, mm	0.1	ESTATOR	Numero de Ranura	12
Numero de Hilos	1		Diámetro Exterior, mm	70
Espesor del aislamiento, mm	0.1		Diámetro Interno, mm	26
Factor de relleno de ranura, %	71		Ancho de Dientes, mm	3
Max. Factor de relleno de ranura, %	75		Ancho de apertura de ranura, mm	1.966
Factor de Corrección	1		Ancho del núcleo, mm	7.47
Área de ranura, mm <sup>2</sup>	106.5		Profundidad de espiga dental, mm	1
Área del Conductor, mm <sup>2</sup>	37.8		Numero de polos	2
Resistencia de Fase, ohm	1.692	Diámetro del Rotor con imán, mm	22	
Bobinado	Bobinado Manual	ROTOR	Diámetro del rotor sin imán, mm	18
Numero de capas	2		Espacio entre unión de imanes, mm	0.1
Paso de Bobina	1			
Densidad de corriente del conductor (@1A), A/mm <sup>2</sup>	2.646			

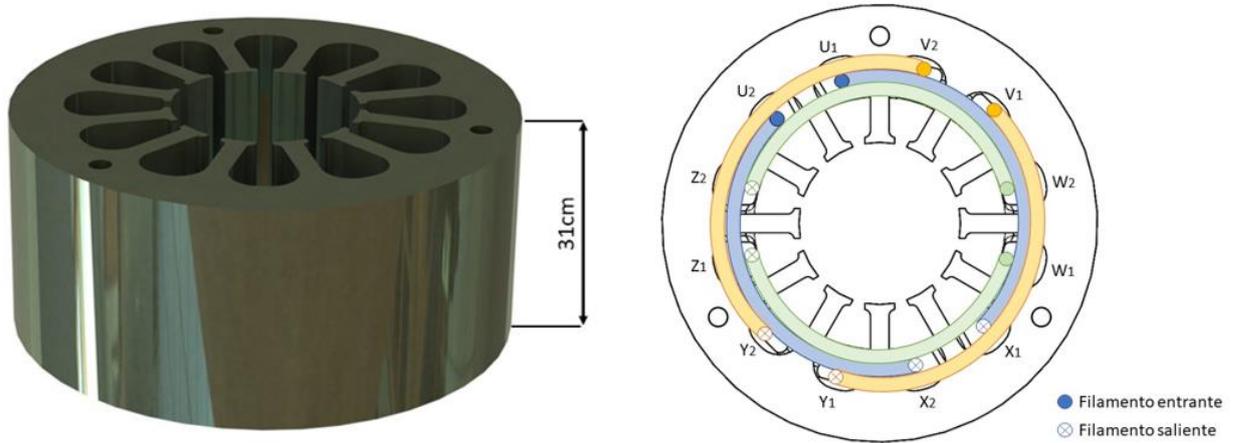
Los parámetros fijados para llevar a cabo las simulaciones con JMAG- Express en Quick Mode, se observan en la Tabla 2.

**Tabla 2: Parámetros del modo para simulación.**

PARAMETROS DEL SOFTWARE DRIVE	
Modo	Corriente
Corriente de línea (pico), A	5
Fase de la Corriente, grados	120
Velocidad, rpm	50000
Eje-X	Velocidad en, rpm

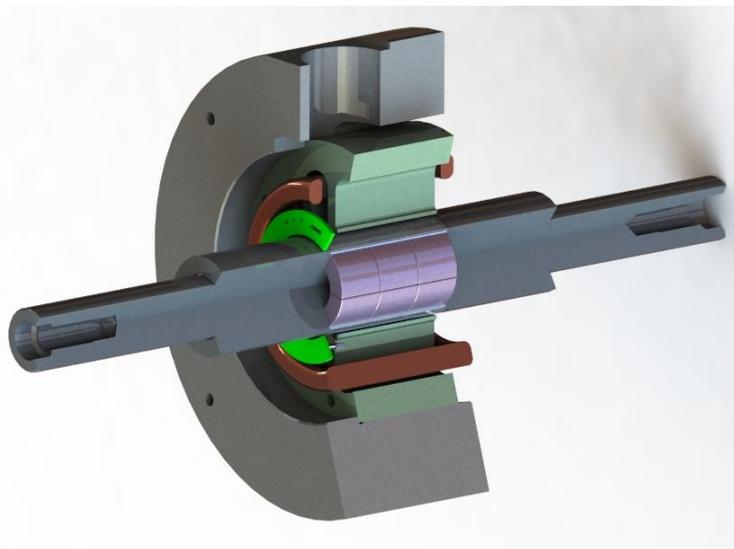
Los aspectos o características constructivas del estator y rotor del motor que se ha utilizado para llevar a cabo el diseño y construcción como así también las simulaciones correspondientes se detallan en la Tabla 1.

Posteriormente se observan las partes que contemplan el prototipo como se visualiza en la Fig. 3, el estator del motor BLDC conformado por chapas de acero al Silicio, y una configuración de 12 polos con su respectiva distribución.



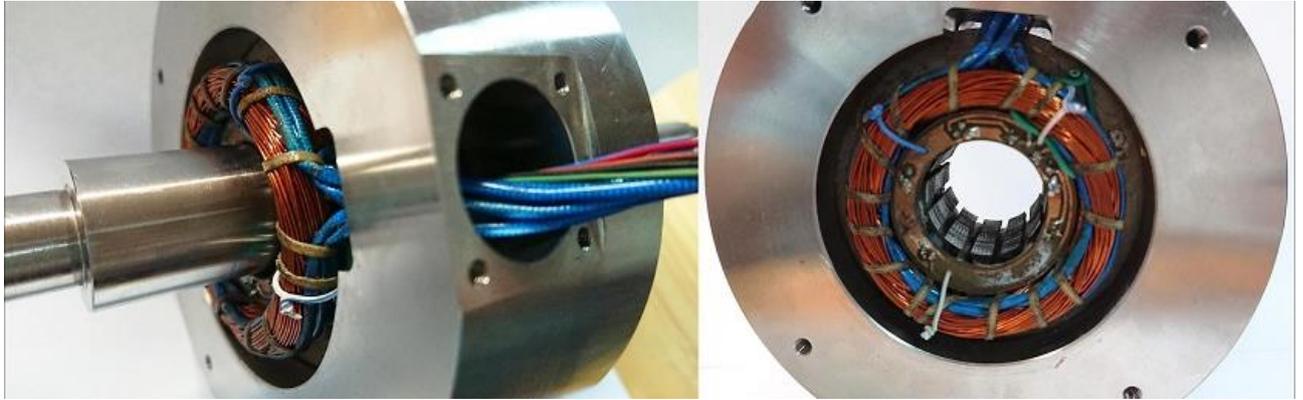
**Fig. 3. Chapas y distribución del bobinado del estator del motor.**

El bobinado del motor se llevó a cabo con filamento AWG 24 y consta de 100 vueltas, con bobinado trifásico distribuido en conexión estrella. El rotor consta de dos polos con imanes permanentes de neodimio de 5mm de espesor con una remanencia magnética de 1Tesla, el diseño del prototipo surge con la finalidad de obtener un motor que presente características de alta velocidades, rendimiento y además eficiencia. En la Fig. 4, se observa una vista del diseño en 3D del prototipo.



**Fig. 4. Vista 3D del motor BDLC.**

En la Fig. 5, se observa el prototipo del motor ya finalizado, donde se aprecia el tipo de bobinado, los polos del estator y además los sensores de efecto Hall que determinan la posición del rotor en cada instante.



**Fig. 5. Prototipo utilizado.**

### **3. Resultados de Simulaciones y Ensayos**

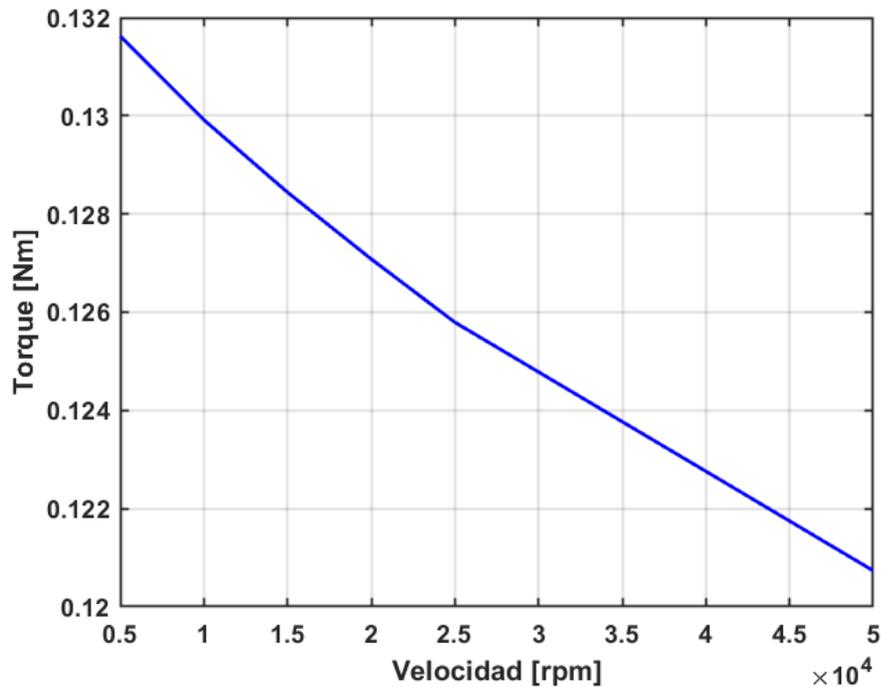
El software JMAG - Express Public, es una versión pública de uno de los múltiples productos de JMAG. Constituye una herramienta para el diseño de motores que presenta dos modos de trabajo en función de la velocidad y precisión que se requiera para el proceso de análisis, permitiendo en ambos casos seleccionar la geometría, dimensiones y materiales de la máquina, así como su posterior análisis [3]. Para llevar a cabo el estudio se utiliza JMAG- Express Quick Mode, este nos permite crear de forma rápida y fácil un modelo de diseño, proporcionado la geometría deseada, los materiales empleados, y caracterizando los devanados y las condiciones de funcionamiento. Sobre este modelo es posible analizar las curvas de funcionamiento y evaluar las características de la máquina.

Las simulaciones se llevaron a cabo con la finalidad de observar las respuestas del motor, como ser la tensión de línea requerida en el Bus DC, torque, eficiencia, potencia entre otros. Estos resultados simulados nos permitirán corroborar con las curvas obtenidas en los ensayos experimentales del prototipo. Las simulaciones se obtuvieron partiendo de los parámetros constructivos del motor, fijando la velocidad máxima a 50000rpm con un nivel de corriente pico de 5 A, configurado en modo corriente para obtener las diferentes curvas como función de la velocidad.

Posteriormente se presentan los resultados obtenidos en la simulación y a continuación los ensayos realizados con el prototipo experimental.

#### *3.1. Resultados Simulados*

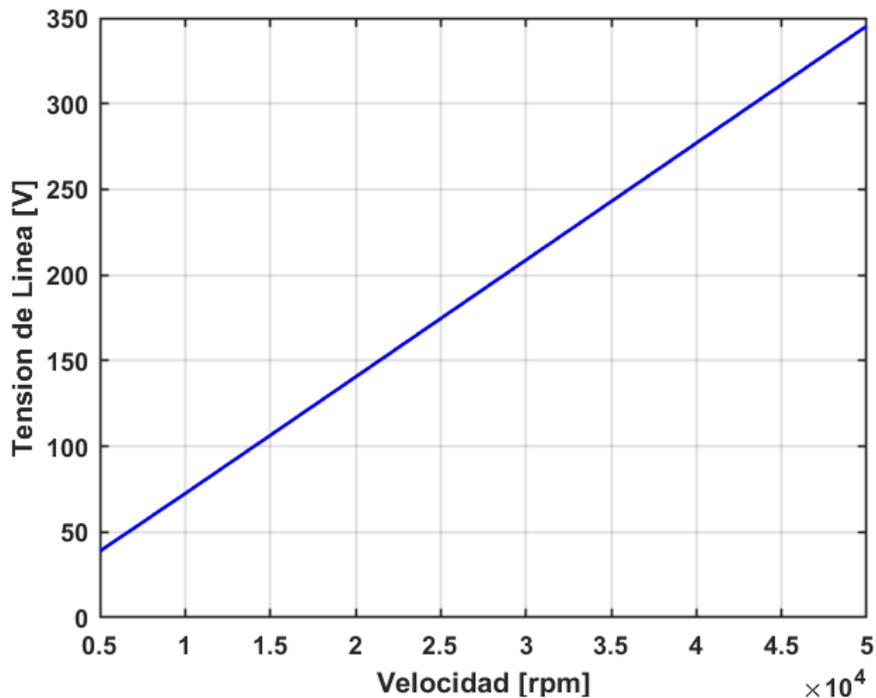
A continuación, se presentan las curvas más relevantes que nos permitirá contrastar con los resultados experimentales. En la Fig. 6, se observa la curva de torque desarrollado por el motor como función de la velocidad.



**Fig. 6. Torque como función de la velocidad.**

En la misma se observa que cuanto menor es la velocidad mayor es el torque, pero se observa que la variación en el lapso de 5000 a 50000 rpm el torque cae 0,01 Nm aproximadamente.

En la Fig. 7, se observa la tensión de línea aplicada al Bus DC del inversor trifásico como función de la velocidad del motor; partiendo de los parámetros constructivos antes mencionado correspondiéndose al actual prototipo. Para los ensayos realizados la curva de tensión no permite corroborar o bien contrastar con la respuesta del sistema obtenida en los ensayos.



**Fig. 7. Tensión de línea como función de la velocidad.**

En dicha figura se observa que la tensión requerida para obtener una velocidad de 50000rpm es de aproximadamente 350V. Estos niveles de tensión se deben corroborar con los datos obtenidos en el ensayo presentado posteriormente.

### 3.2. Resultados de Ensayos Experimentales

Posteriormente se presenta el resultado de los ensayos realizados con el sistema, estableciendo una referencia de velocidad para cada ensayo realizado, donde podemos observar las diferentes respuestas del motor sin un previo compensador. Inicialmente se obtuvo un conjunto de respuestas para diversos valores de tensión media aplicada al Bus DC del inversor trifásico, expresando la tensión como función de la velocidad. Para ello, se establecieron dos valores de tensión en el Bus DC, siendo estos valores de 60V y 97V para los llevar a cabo los ensayos.

La tensión media aplicada en la terna del estator se obtiene mediante la variación del ciclo útil de trabajo del PWM desde 0% al 100%. 0% corresponde con una tensión media nula sobre la carga y 100% corresponde a la tensión media igual a la tensión del Bus DC.

Estos ensayos nos permiten observar el desempeño del sistema a lazo abierto, el tiempo de establecimiento del sistema, velocidad de régimen para diferentes valores de tensión media y con ello elaborar las curvas para contrastar con las simulaciones realizadas mediante el software.

En la Fig. 8, se observa las curvas de velocidad como función de la tensión media aplicada para los dos casos de la tensión del Bus DC; en la misma se observa que no existen diferencias sustanciales.

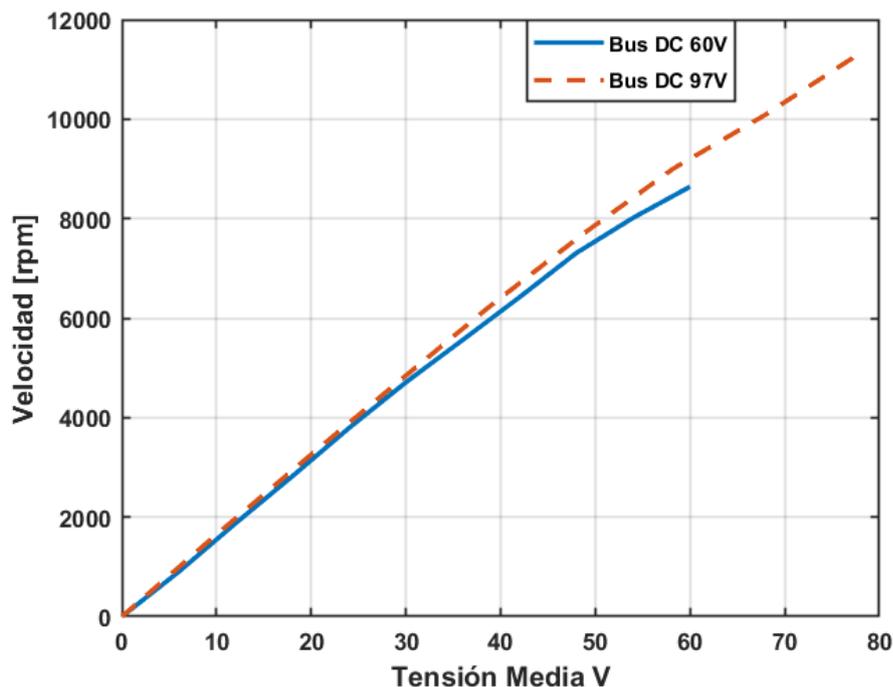
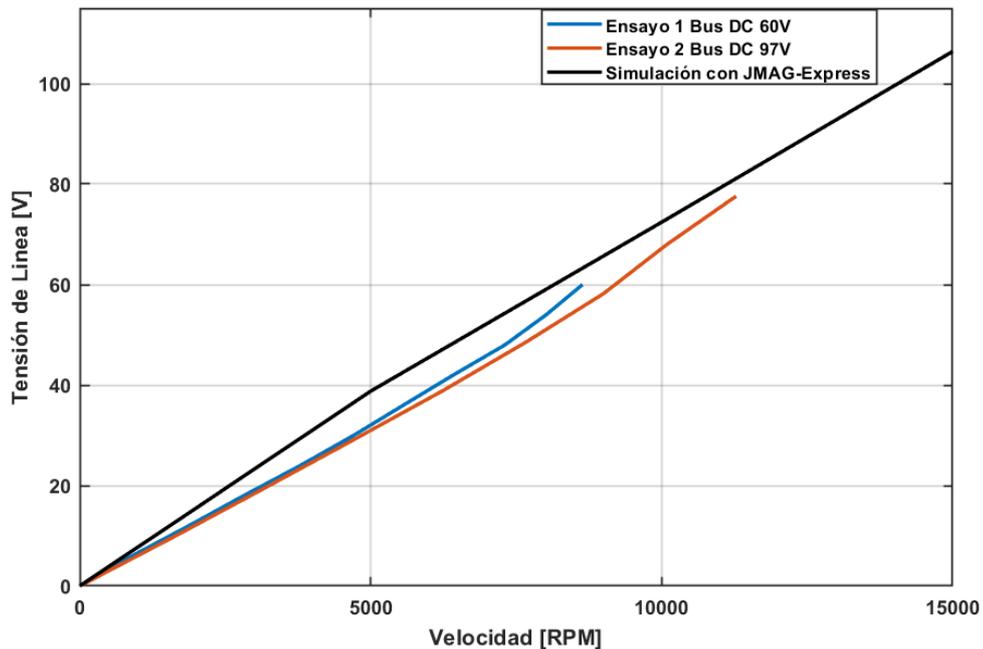


Fig. 8. Tensión como función de la velocidad.

## 4. Contraste de los Resultados Simulados y Ensayados

Partiendo de los datos obtenidos en los ensayos antes mencionados, se lleva a cabo un contraste de los resultados simulados y realizados experimentalmente, centrándonos en las curvas de tensión media como función de la velocidad. Cabe mencionar que los ensayos no se realizaron a mayor

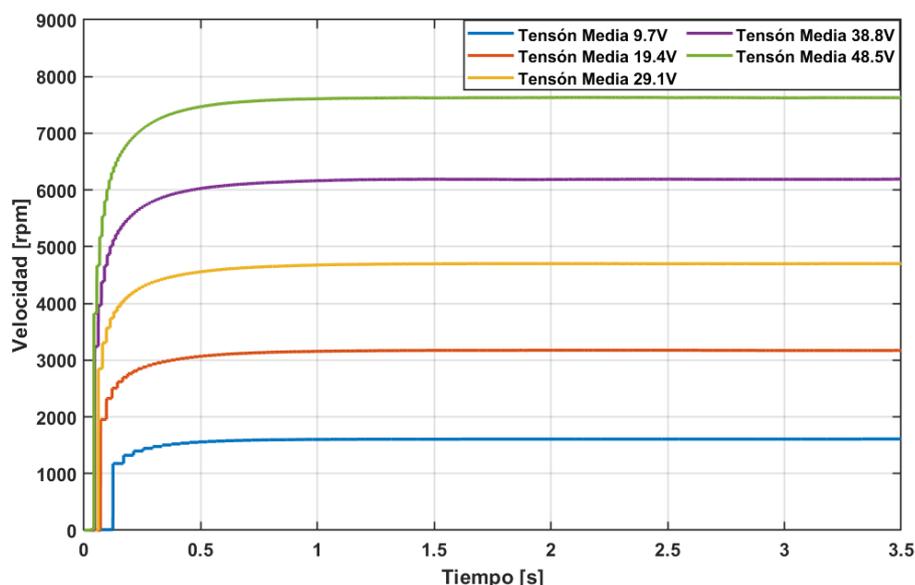
tensión por cuestiones de seguridad debido a que el rotor se encuentra sujeto a rodamientos mecánicos con ciertas limitaciones.



**Fig. 9. Contraste entre resultados de ensayos y simulaciones.**

Como podemos observar en Fig. 9, las curvas de tensión velocidad obtenidas en los respectivos ensayos, presentan un error respecto a la curva obtenida en la simulación, una de las razones se debe al apoyo de los extremos del rotor, este se encuentra sujeto a rodamientos de contacto mecánicos permitiendo un grado de rozamiento importante. Pero en definitiva posee valores muy próximos que permitirían extrapolar el crecimiento de la curva. Con lo cual se puede comprobar que para obtener una velocidad de 50000rpm es necesaria una tensión del Bus DC superior a los 300V. Tensión que supera altamente los límites que se desean alcanzar, debido a los riesgos que implica trabajar con tensiones del tipo continua de alta tensión y además de que no se consiguen fácilmente en el mercado. Por lo tanto, con los resultados obtenidos nos permite analizar ciertos parámetros que se requieren modificar para reducir la tensión de línea. Esto se logra modificando las características de los imanes y el entrehierro del rotor estator del motor.

Otros resultados de ensayos se observan en la Fig. 10, donde se presentan las respuestas del motor obtenidas mediante la variación del ciclo útil del PWM, esta variación del ciclo útil de trabajo se refleja como un valor de tensión aplicado al inversor trifásico permitiendo de este modo variar la referencia de velocidad del motor. Para estos ensayos se mantuvo la tensión del Bus DC a 97V, variando el ciclo útil desde se varió del 10 al 50%, estos valores se corresponden a los niveles de tensión de 9,5V a 48,5V aplicado sobre a la terna del motor por medio del inversor trifásico, obteniendo de este modo una serie de respuestas del sistema ante una variación de tensión.



**Fig. 10. Respuesta del motor para diferentes niveles de tensión.**

Este último ensayo permite obtener el modelo matemático del motor para realizar un posterior control de velocidad en lazo cerrado.

## 5. Conclusiones

Partiendo de las diferentes curvas obtenidas en los ensayos y las correspondientes simulaciones realizadas podemos concluir que los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que nos permite corroborar con cierto grado de certidumbre los datos obtenidos en simulación con los respectivos ensayos realizados. Esto es de gran importancia ya que se pueden realizar los diseños o ajustes de los diseños mediante software y llevar a la práctica un motor similar al obtenido en las simulaciones.

Además, para este motor específico, podemos observar que los niveles de tensión que se deben aplicar en el Bus DC del inversor trifásico para lograr la velocidad objetivo se consideran muy elevados por tratarse de una tensión del tipo continua. Este parámetro debe reducirse, para lograrlo se debe modificar el número de vueltas del bobinado o reducir la intensidad de los imanes del rotor; estos cambios presentarán un efecto sobre los demás parámetros del motor afectando el torque, potencia, eficiencia entre otros aspectos.

## Referencias

- [1] Dr. Duane Hanselman, “*Brushless Permanent Magnet Motor Design*” *Electrical and Computer Engineering University of Maine Orono, ME 04469 USA 2003.*
- [2] Ward Brown, “Brushless DC Motor Control Made Easy”, Microchip Technology Inc AN857, 2002-2011.
- [3] Ana Fdez-Navamuel del Olmo, “JMAG- Express based design of a pre-prototype of induction motor” Septiembre -2016.
- [4] Padmaraja Yedamal, “Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals”, Microchip Technology Inc AN885. 2003-2011.