



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

Autor:

Díez Bravo, Diego

Tutor:

Mansilla Gallo, Alberto
Departamento de
CMeIM/EGI/ICGF/IM/IPF

Valladolid, Julio de 2014.

Índice

Índice.....	1
Resumen	3
Palabras clave	3
Introducción.....	5
Objetivos	5
1. Curva característica de un motor.....	7
1.1. Medición del par	7
1.2. Medición del régimen de giro	10
1.3. Control de un motor asíncrono.....	12
2. Descripción del Banco de Ensayos	15
2.1. Motor trifásico	16
2.2. Servomotor	17
2.3. Panel de control	18
2.4. Fuente de Alimentación.....	19
2.5. Ordenador.....	20
2.6. Acoplamiento motor-freno.....	20
3. Obtención de la Curva Característica con el Banco de Ensayos	21
3.1. Introducción.....	21
3.2. Parámetros de configuración del programa	22
3.3. Estudio de los parámetros con posible influencia en la Curva Característica ..	27
3.4. Conclusiones	40
4. Utilización del Banco de Ensayos para simular una carga. Aplicación a Volante de Inercia	43
4.1. Introducción.....	43
4.2. Simulación de un Volante de Inercia	46
4.3. Modelado de la aceleración de un Volante de Inercia	48
4.4. Comparación entre los datos medidos en el Banco de Ensayos y el Modelo Matemático.....	50
4.5. Estudio de los parámetros con posible influencia en la simulación de un volante de inercia.....	59

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

4.6.	Conclusiones.....	61
5.	Definición de una práctica experimental	63
5.1.	Introducción	63
5.2.	Práctica experimental	64
6.	Conclusiones y líneas futuras de actuación	71
6.1.	Conclusiones generales.....	71
6.2.	Líneas futuras de actuación	71
7.	Bibliografía	73
7.1.	Libros, manuales y apuntes.....	73
7.2.	Artículos	73
7.3.	Páginas web.....	73

Resumen

El objetivo fundamental de este TFG es la obtención experimental de la curva característica de un motor eléctrico asíncrono mediante el Banco de Pruebas Lucas-Nüelle CO2663-6V. Se ha analizado experimentalmente los parámetros que influyen en la obtención de esta curva característica. Se ha realizado un modelo matemático del banco de ensayos utilizando el servomotor para simular un volante de inercia acoplado al motor eléctrico y se ha comparado con los resultados experimentales. Por último, se ha elaborado el guion de una práctica experimental para el Departamento que permitirá a los alumnos validar las ecuaciones matemáticas que describen el sistema con resultados experimentales obtenidos mediante el banco de ensayos.

Palabras clave

- Curva característica
- Motor eléctrico
- Servomotor
- Volante de inercia
- Práctica experimental

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

Introducción

En el presente Trabajo de Fin de Grado se utilizará un Banco de Ensayos para medir, en función del régimen de giro, el par proporcionado por un motor. Se analizará su funcionamiento, así como todos los parámetros, tanto del software como externos al Banco de Ensayos, que pueden influenciar en los resultados obtenidos.

Además, el Banco de Ensayos también permite simular cierto tipo de cargas debido a los elementos por los que está compuesto. Con ello es posible observar el comportamiento que tiene un motor ante dichas cargas, todo ello en un laboratorio y controlando los parámetros que puedan resultar de interés. Aprovechando esto se realizará un modelo matemático de un volante de inercia, se utilizará el Banco de ensayos para simular el volante calculado mediante el modelo matemático y se compararán los resultados.

Finalmente, con los resultados obtenidos, se elaborará una Práctica de Laboratorio.

Objetivos

Los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado son los siguientes:

- Identificar los parámetros que influyen en la obtención de la curva característica de un motor eléctrico.
- Utilización del Banco de Ensayos para simular un volante de inercia y evaluar su comportamiento.
- Modelar matemáticamente el sistema y compararlo con los resultados experimentales.
- Elaboración de una Práctica de Laboratorio experimental utilizando el Banco de Ensayos para los alumnos de la asignatura Máquinas y Mecanismos.

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

1. Curva característica de un motor

La Curva Característica de un motor muestra el par producido por el motor en función del régimen de giro al cual se encuentra funcionando.

Para obtener dicha curva, es necesaria una máquina capaz de medir tanto la velocidad angular del eje del motor, como el par que produce el motor; mientras que se mantiene un control sobre el par o el régimen de giro.

A continuación se presentan los métodos más habituales de obtener el par y la velocidad de giro, seguido de cómo se realiza el control en un Banco de Ensayos como el utilizado en este TFG.

1.1. Medición del par

Existen varios métodos para medir el par entregado por un motor de cualquier tipo. Pueden agruparse en tres familias:

1.1.1. Medición mediante transductor colocado en eje [1]

Una posible manera de medir el par es mediante un sensor de torsión colocado en el eje. (Fig 1). La conexión entre el transductor y el aparato de medida no puede realizarse por escobillas, ya que el ruido creado por ellas no permitiría obtener una buena lectura. Por ello es necesario colocar un transmisor de radio en el propio eje.

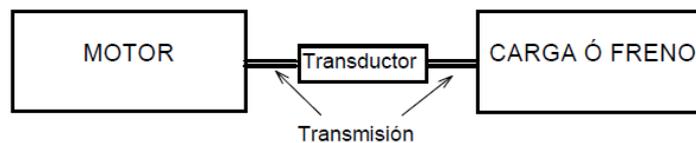


Figura 1: Medición por transductor [1]

Toda esta complejidad hace que no sea un sistema muy usado.

1.1.2. Medición mediante balanceado de freno

Lo más habitual es medir el par entregado acoplando el motor a un freno. El freno consiste en un rotor que gira dentro de un estator. El estator está

balanceado y está dotado de un sensor de carga en un brazo, por lo que es posible saber el momento aplicado (Fig 2).

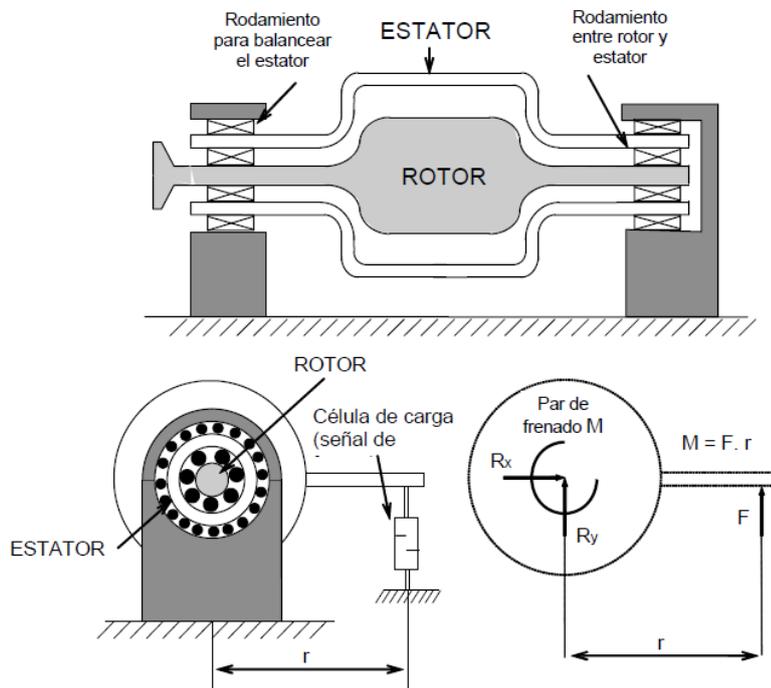


Figura 2: Funcionamiento de un freno [1]

Los frenos se dividen en varios tipos según la naturaleza de la fuerza utilizada para generar el momento opuesto al del motor. Los principales tipos de freno son [2]:

- **Freno de fricción:** En este tipo de freno se aplica una fuerza al rotor con unas zapatas solidarias el estator. El par aplicado se varía cambiando la presión aplicada a las zapatas. Debido a su simplicidad, fue el primer freno en ser usado.
- **Freno hidráulico:** Consiste en un rotor con palas que genera un movimiento toroidal en el agua contenida en el interior del freno. La alta turbulencia provoca una disipación de la energía en forma de calor. La regulación se puede hacer de dos maneras: variando la cantidad de agua en el interior de la turbina, o cerrando o abriendo compuertas entre rotor y estator.

- **Freno de aceite [1]:** Formado por una bomba que bombea aceite a través de una válvula de laminación. Posteriormente se refrigera (Fig 3). La regulación se realiza modificando la presión de salida del aceite con la válvula de laminación.

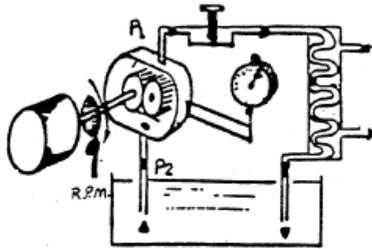


Figura 3: Freno de aceite [1]

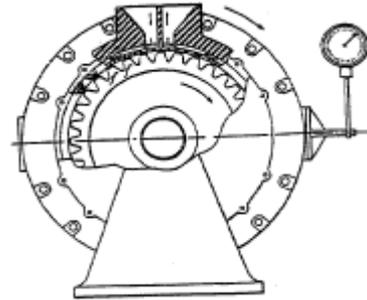


Figura 4: Freno electromagnético [1]

- **Freno electromagnético:** Consiste en un rotor con aspecto de engranaje con dientes anchos y paso elevado (Fig 4). El estator contiene bobinas que son excitadas con una pequeña corriente eléctrica continua. Esta corriente genera un flujo magnético que se opone al movimiento del rotor (corrientes de Foucault). La regulación se realiza variando la intensidad de la corriente que recorre las bobinas, lo que permite una respuesta rápida.
- **Dinamofreno:** Se trata de un generador de corriente continua que actúa como freno. La regulación del par de frenado se realiza variando la tensión del generador. Pueden ser usados en sentido inverso como motor de arrastre.

1.1.3. Medición mediante variables eléctricas

Aunque este método se puede aplicar en un dinamofreno, su principal uso se da en los frenos asíncronos. Un freno asíncrono consiste en esencia en un motor de inducción que hace las veces de freno. La principal diferencia con un

dinamofreno es que el freno asíncrono tiene un momento de inercia menor, haciendo posible su uso posible para ensayos en transitorio.

Dado que el banco de ensayos con el que se ha realizado el Trabajo de Fin de Grado es de este último tipo, su regulación se explicará posteriormente de manera más detallada que en los casos anteriores.

La medida del par se realiza de manera indirecta, partiendo de la medida de las variables eléctricas con las que se alimenta el motor y otra serie de datos. La potencia producida viene dada por la ecuación 1. El par se puede calcular a partir de la potencia si se conoce el régimen de giro.

$$P = I \cdot V \cdot \cos\varphi \cdot \eta = M \cdot \omega \quad (1)$$

Mientras que la intensidad, el voltaje y el factor de potencia se pueden medir de manera directa, el rendimiento es a priori desconocido. La solución a esto es medir el rendimiento para todas las condiciones en un banco de ensayos. Estas medidas pueden ser realizada acoplando dos motores iguales [8], o realizando mediciones a lo largo de un ciclo y procesándolas de manera numérica [9]. Todo este proceso lo lleva a cabo el fabricante, el cual con los datos obtenidos realiza un mapa de la potencia o el par en función de las distintas variables.

1.2. Medición del régimen de giro

Aunque tradicionalmente esta labor solía recaer en dispositivos mecánicos como reguladores centrífugos, en la actualidad esta tarea la desempeñan sensores electrónicos. Los más utilizados son el codificador angular (encoder) y el resólver.

- **Codificador angular (encoder):** Se trata de un sistema digital. Consiste en un disco solidario al eje con una serie de marcas, y un dispositivo óptico que lee dichas marcas (Fig 5). Las marcas pueden llevar una codificación de Gray, o bien pueden ser marcas únicas y alternas. En este último caso será necesaria una marca de cero para conocer la posición del eje. La frecuencia con la que se leen las marcas es proporcional a la velocidad de giro.

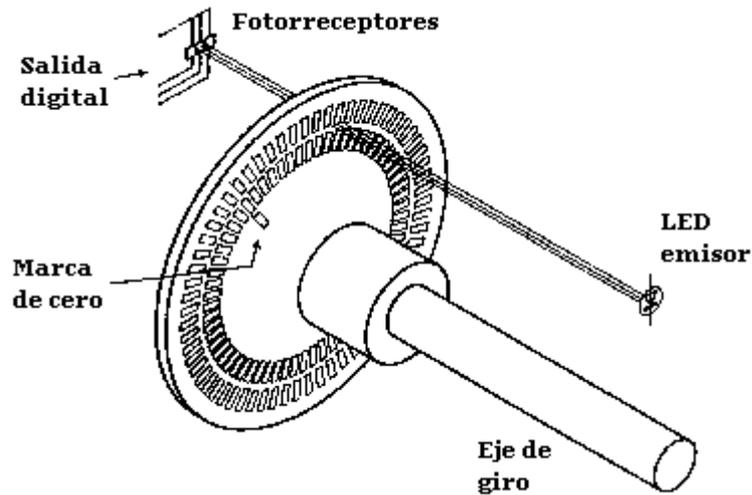


Figura 5: Codificador angular o encoder [10]

Su principal ventaja es que al ser un sistema digital, no es necesario un acondicionamiento de la señal.

- **Resólver:** Está compuesto por una bobina que gira solidaria al eje. Esta bobina excita a otras bobinas que están desfasadas 90° (Fig 6). Este sistema es analógico ya que la señal generada es de tipo sinusoidal, por lo que es necesario un circuito que acondicione la señal. Su principal ventaja es que mecánicamente es más robusto que el encoder.

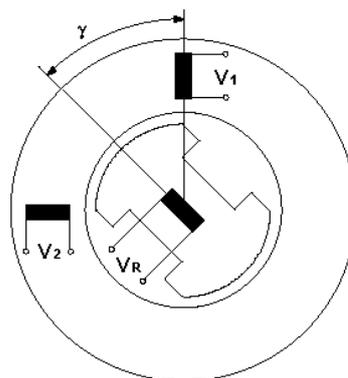


Figura 6: Resólver [8]

1.3. Control de un motor asíncrono

El control de un motor asíncrono se realiza habitualmente con un variador de frecuencia. El esquema de control puede observarse en la figura 7

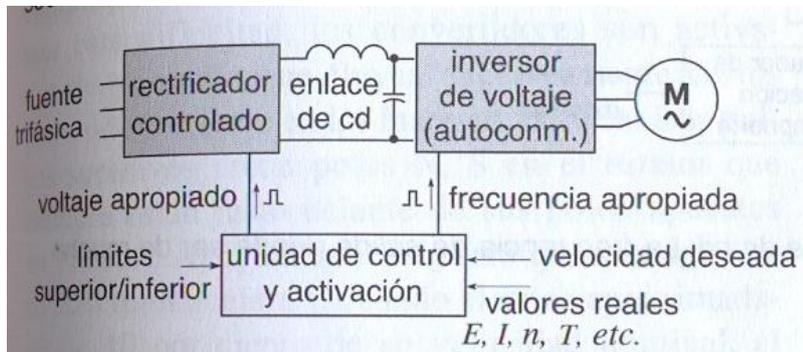


Figura 7: Control de velocidad de un motor asíncrono [3]

Si tenemos un motor con p polos, su velocidad síncrona n_s será (Ec 2):

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2)$$

Introduciendo la frecuencia de alimentación f en Hz y obteniendo la velocidad síncrona en rpm.

Con esto se puede calcular la frecuencia de alimentación necesaria para que el motor gire a la velocidad deseada sin producir par.

Para controlar el par generado es necesario definir el deslizamiento del motor (S) como el valor de la Ec 3:

$$S = n_s - n \quad (3)$$

Siendo n la frecuencia del rotor.

Para el control del par se tiene en cuenta que el par también es proporcional al deslizamiento, como muestra la figura 8. En ella aparece el par producido por el motor para una misma frecuencia de alimentación. Es de interés observar que si la frecuencia de rotación del rotor es mayor que la frecuencia de alimentación, el motor pasa a actuar como generador (tiene par negativo) y, por lo tanto, actúa como freno.

Además de controlar la frecuencia, es necesario controlar también el voltaje para evitar una saturación magnética excesiva [6].

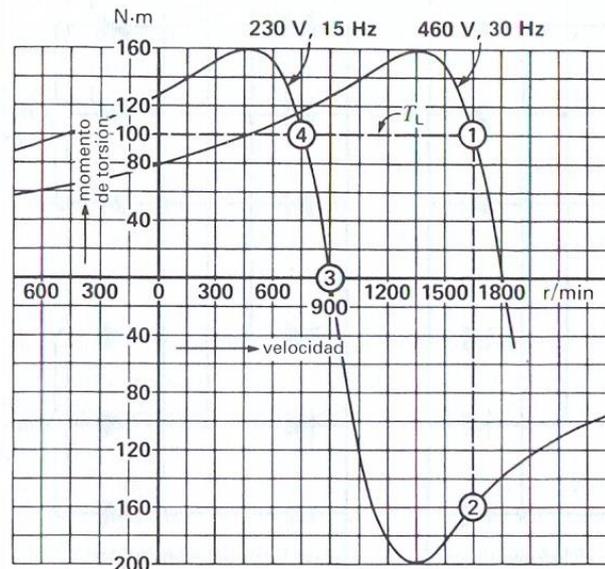


Figura 8: Par frente a velocidad de giro [3]

Con esto puede concluirse que es posible regular un motor asíncrono, tanto en velocidad como en par, siempre que dicho motor esté bien caracterizado.

La regulación puede hacerse en lazo abierto controlando la tensión y la frecuencia de alimentación. Sin embargo, este método presenta una respuesta lenta. Para aplicaciones como puede ser el uso como freno en un banco de ensayo de motores, se opta por una regulación en bucle cerrado. Esto otorga mayor precisión y un tiempo de respuesta mucho más reducido [4].

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

2. Descripción del Banco de Ensayos

El Banco de Ensayos del que trata este Trabajo de Fin de Grado se trata del Banco de Pruebas de Servomotor Lucas-Nüelle CO2663-6V. Está formado por los siguientes componentes (Fig. 9 y 10):

1. Motor trifásico
2. Servomotor.
3. Panel de Control.
4. Fuente de Alimentación.
5. Ordenador.
6. Acoplamiento motor-freno.

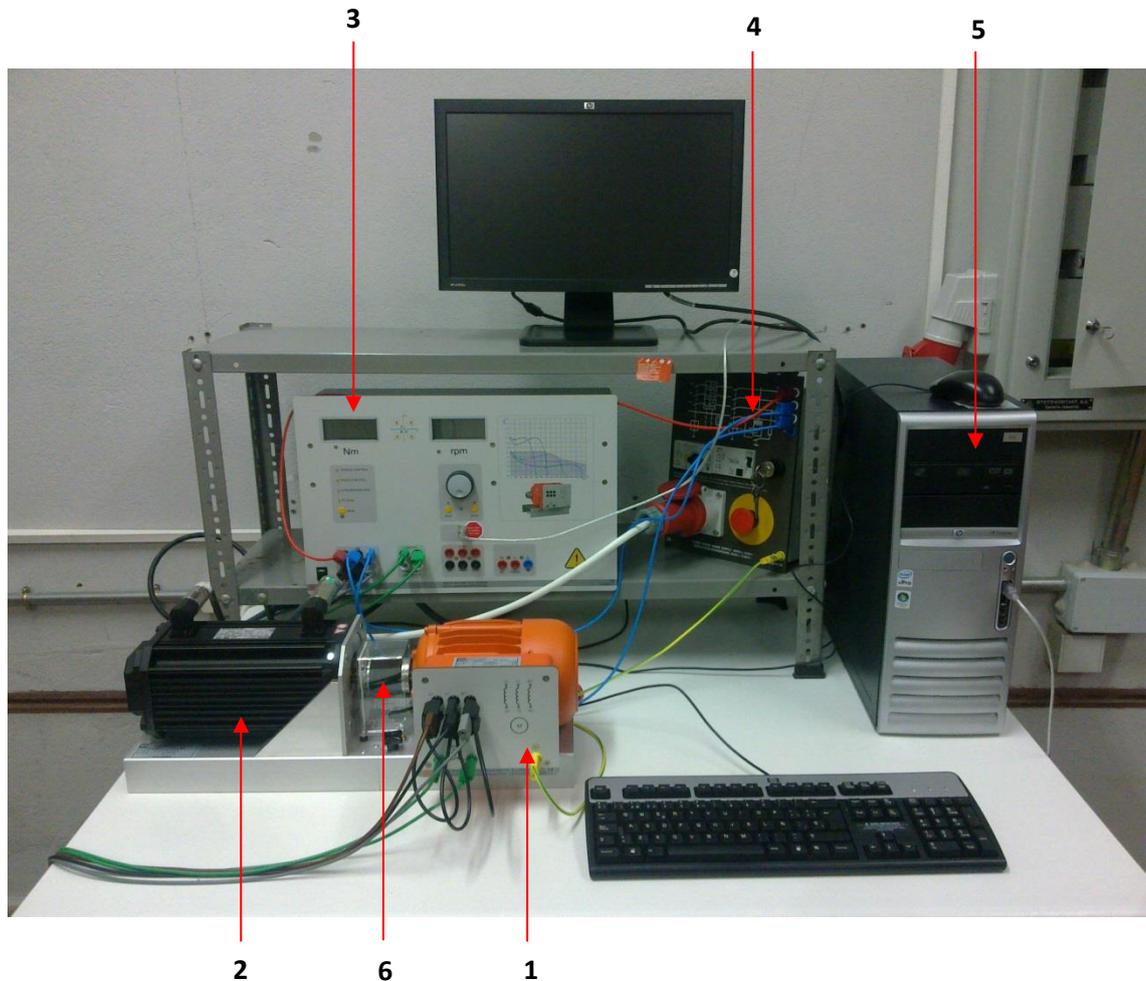


Figura 9: Componentes de la instalación

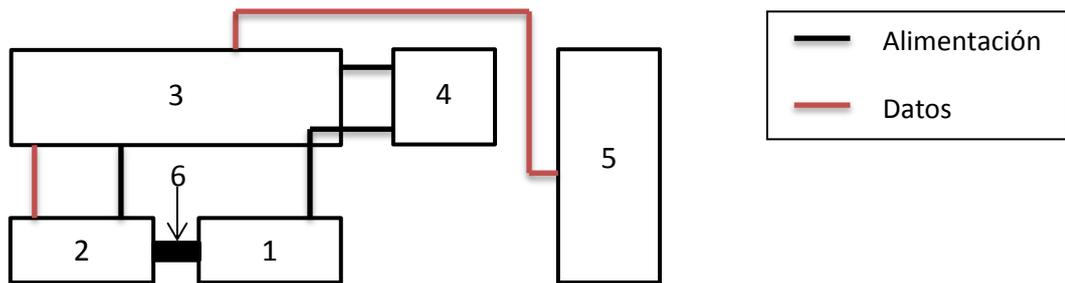


Figura 10: Esquema de conexiones entre los componentes

Las conexiones existentes entre los distintos componentes aparecen reflejadas en la figura 10.

A continuación se describen por separado los distintos componentes:

2.1.Motor trifásico

Se trata de un motor asíncrono de jaula de ardilla que funciona en red trifásica de 400 voltios. El motor se encuentra conectado en configuración delta (Δ)

LN Lucas-Nuelle GmbH Germany - 50170 Kerpen - Siemensstr. 2			
SE2672-3G	VDE 0530	IP: 20	Is.Kl.: F
Δ / Y	U: 400 / 690 V	I: 1,0 / 0,6 A	
Mot. DS	0,37 kW	cos: 0,83	
	2800 1/min	f: 50 Hz	
U _e :	I _e :	Made in Germany	
C _A :	C ₀ :		

Figura 11: Placa de características del motor

Como se puede ver en la figura 11, al estar trabajando con una red de 400 V y estar conectado en configuración delta, el motor tiene las siguientes características:

- Potencia: 370 W
- Intensidad nominal: 1 A
- Velocidad nominal: 2800 rpm
- Factor de potencia ($\cos \varphi$): 0,83

Al estar trabajando en una red de 50 Hz, su velocidad de sincronismo será de 3000 rpm.

2.2.Servomotor

Se trata de un servomotor de tipo asíncrono. Se encarga de generar el par de frenado necesario para la caracterización del motor, y los pares necesarios para simular una carga en el modo de simulación. De su placa de características (Fig 12) y con la clave que aparece en el catálogo del fabricante [5] se puede obtener la siguiente información:

Lenze		Hans-Lenze-Straße 1 31855 Aerzen GERMANY		Made in Germany		CE E210321 EN60034		
3~MOT	Typ MCA 13141-RS080-B19N-ST5800N-R0SU							
390 V~	1.7 kW	4.0 Nm		140 Hz	4050 1/min			
4.4 A	2.3 HP	Mo 4.6 Nm		cos φ 0.76	C86: 1364			
	IP 54	I.CL. F		Ta 40°C	KTY			
Geber Feedback RS	C416:51885476			Id.Nr. 15035820				
Bremse Brake	V-	A	Nm					
SN	1503582010000172645965							

Figura 12: Placa de características del servomotor

- Voltaje de conexión: 390 V
- Características nominales:
 - Intensidad: 4,4 A
 - Par: 4 Nm
 - Potencia: 1700 W
 - Velocidad: 4050 rpm
 - Factor de potencia ($\cos \varphi$): 0,76
- Par con rotor bloqueado: 4,6 Nm

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

- Codificador angular: Resólver
- Freno: Sin freno
- Diámetro de eje: 19 mm
- Conexiones eléctricas: 2 clavijas redondas
 - Potencia
 - Codificador angular + sensor térmico
- Grado de protección: IP54: Protección contra polvo y chorros de agua
- Refrigeración: Natural, sin ventilador
- Sin volante de inercia

La medida de par se realiza por medio de las variables eléctricas, tal y como se explicó anteriormente.

2.3. Panel de control

Se encarga de alimentar y controlar el servomotor, así como de recoger todos los datos y mandarlos al ordenador por conexión USB o por salida analógica.

La figura 13 recoge los principales componentes del Panel de Control.

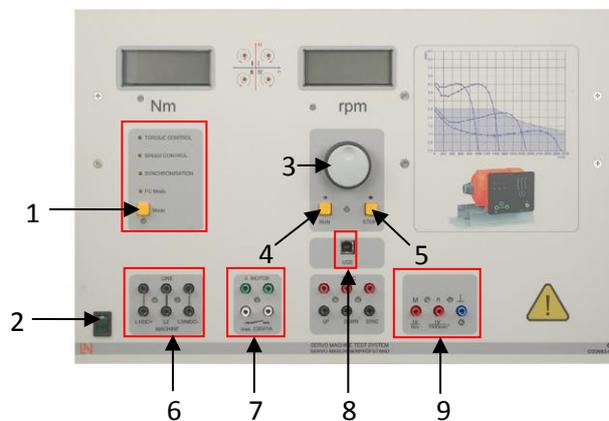


Figura 13: Panel de control

1. **Selección de modo:** Control de velocidad, control de par, sincronización con la red o conexión con ordenador.
2. **Botón de encendido.**
3. **Ruleta de selección:** Permite variar la velocidad o el par en los modos correspondientes.
4. **Botón RUN:** Pone en marcha el servomotor.
5. **Botón STOP:** Desactiva el servomotor.

6. **Conexiones del motor:** Entrada y salida de corriente hacia el motor. Su fin es medir la tensión, corriente y factor de potencia del motor.
7. **Conexiones de seguridad:** Miden la conductividad del motor y la posición de la protección que cubre el acoplamiento motor-freno. Si el motor se sobrecalienta o la protección está abierta, se para todo el equipo.
8. **Conexión USB:** Conexión con el ordenador.
9. **Salida analógica de datos.**

2.4.Fuente de Alimentación

Suministra corriente tanto al motor como al servomotor. Como se ve en la figura 14, contiene una serie de interruptores para interrumpir la alimentación en caso de mal funcionamiento, así como una llave para evitar un encendido no deseado y un botón de parada de emergencia.

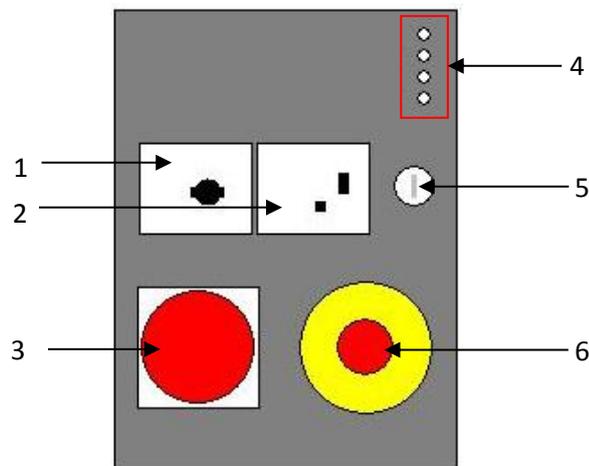


Figura 14: Fuente de Alimentación

- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1: Interruptor 1 | 4: Alimentación a motor |
| 2: Interruptor 2 | 5: Llave |
| 3: Alimentación a Panel de Control | 6: Botón de parada de emergencia |

2.5.Ordenador

Está provisto de un software específico para controlar el equipo de forma más completa. Permite realizar la caracterización de motores, así como la simulación de diferentes máquinas. Su funcionamiento se explicará más adelante.

2.6.Acoplamiento motor-freno

Unión semirrígida entre el motor y el servomotor. Se encarga de no transmitir las vibraciones torsionales entre ambos. Está protegido por un elemento transparente para evitar posibles accidentes. Si se quita esta protección, el Panel de Control paraliza todo el equipo por motivos de seguridad.

3. Obtención de la Curva Característica con el Banco de Ensayos

3.1.Introducción

Un uso de este Banco de Ensayos es la obtención de la curva característica de un motor, es decir, del par producido en función del régimen de giro.

El Banco de Ensayos con el que se ha trabajado está provisto de un programa para ordenador que permite la obtención de dicha curva de manera sencilla. Dicho programa va variando la velocidad de giro del motor mediante el freno, a la vez que toma una medida del valor del par para cada velocidad de giro. Aparte de esto, mide otras variables, como pueden ser la intensidad de corriente y la diferencia de potencial en el motor o el factor de potencia.

Este programa presenta dos modos de operación para obtener la curva característica:

- Regulación de par: Varía el par de frenado y mide la velocidad.
- Regulación de velocidad: Varía la velocidad y mide el par de frenado.

El modo de regulación de par es adecuado para motores de corriente continua, mientras que para los motores de corriente alterna se utiliza el modo de regulación de velocidad [3].

Dado que el motor que se ensaya funciona con corriente alterna, siempre se utilizará el modo de regulación de velocidad.

Para hacer funcionar el programa es necesario introducir una serie de datos. Unos vienen impuestos por las características del motor, mientras que otros los define el usuario.

3.2. Parámetros de configuración del programa

El programa dispone de una ventana para modificar todos los parámetros necesarios para obtener la Curva Característica: la ventana Propiedades (Fig 15).

Dicha ventana está dividida en una serie de pestañas:

- Máquina
- Circuito
- Rango de medición
- Rampa
- Opciones

3.2.1. Máquina

Esta pestaña, representada en la figura 15, permite introducir las características del motor eléctrico que se va a ensayar.

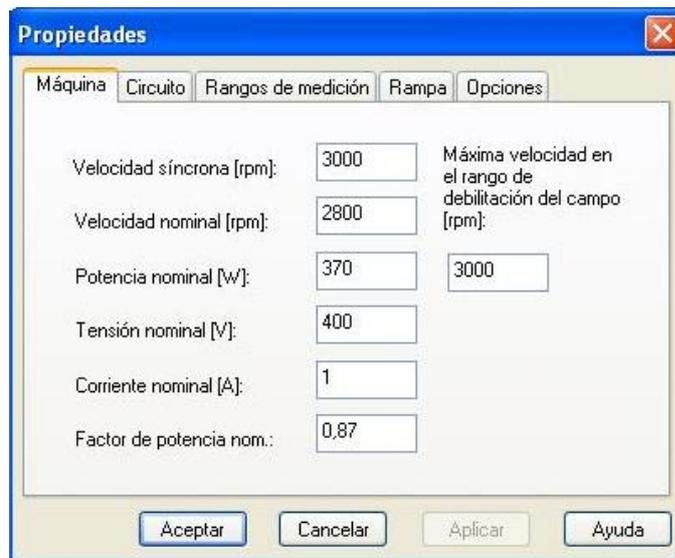


Figura 15: Propiedades. Pestaña Máquina

Los diferentes datos se pueden obtener de la Placa de Características del motor. Teniendo en cuenta que el motor está conectado en configuración Delta (Δ), y observando la figura 11, obtenemos los siguientes valores:

- **Velocidad síncrona:** Como estamos trabajando en una red de 50 Hz:
 $50 \frac{rev}{s} \cdot 60 \frac{s}{min} = 3000 \text{ rpm}$
- **Velocidad nominal:** Obtenida directamente de la placa: 2800 rpm.
- **Potencia nominal:** De la placa: $0,37 \text{ kW} = 370 \text{ W}$
- **Tensión nominal:** Aunque en realidad es el valor que suministrado por la red, este sufre pequeñas variaciones, por lo que se introduce el valor que aparece en la placa para configuración Delta (Δ): 400 V.
- **Corriente nominal:** Obtenida directamente de la placa, para configuración Delta (Δ): 1,0 A.
- **Factor de potencia nominal:** Obtenido directamente de la placa: 0,87.
- **Máxima velocidad en rango de debilitación del campo:** De interés para motores de corriente continua. En este caso se puede introducir 3000 rpm, ya que el motor nunca la va a superar porque es la velocidad síncrona.

3.2.2. Circuito

Aquí se puede elegir el tipo de conexión que se ha establecido en el motor que se ensaya (Fig 16), tanto para corriente monofásica directa o alterna como para corriente trifásica.

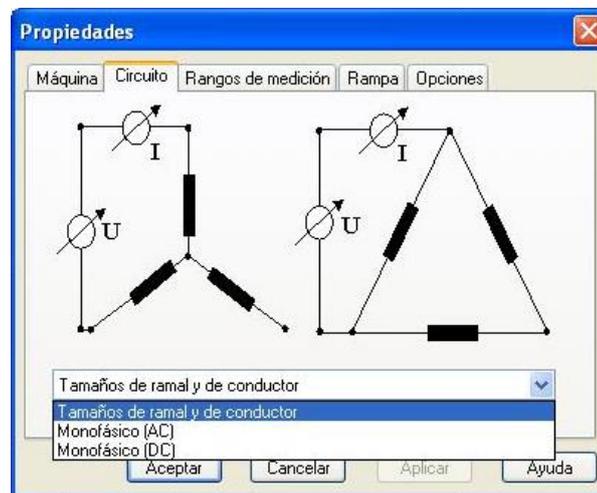


Figura 16: Propiedades. Pestaña Circuito

Es importante seleccionar esta opción correctamente, ya que de no hacerlo los valores medidos de factor de potencia serán erróneos.

3.2.3. Rangos de medición

Establece los máximos valores de tensión e intensidad de corriente que se pueden dar en el motor. Por seguridad se toman los valores mayores (Fig 17)



Figura 17: Propiedades. Pestaña Rangos de medición

Estos parámetros no tienen ninguna influencia en la obtención de la curva característica, sólo en la medición de variables eléctricas en el motor.

3.2.4. Rampa

En esta pestaña se puede cambiar el modo en el que se obtienen los valores de velocidad de giro en los que se mide el par. Puede hacerse de dos maneras: introduciendo los puntos de uno en uno, marcando la opción Tabla; o de manera más automática, fijando el rango de velocidades de giro (Fig 18).



Figura 18: Propiedades. Pestaña Rampa

Trabajando en la opción Calcular se puede definir una velocidad de giro de inicio, o bien marcar la opción Velocidad actual. Con esta opción marcada, al hacer el ensayo el motor parte desde la velocidad que posee al no haber ningún par resistente, es decir, desde la velocidad síncrona. Es aconsejable marcar esta opción para realizar ensayos en frenado. Para realizar ensayos en aceleración hay que deseleccionar esta casilla e introducir el valor 0 en el campo Inicio.

También es necesario marcar la velocidad en la que se realiza la última medición. Para obtener todo el rango completo de velocidades se introduce el valor 0 cuando se parte de la velocidad síncrona para realizar ensayos en frenado, o la velocidad síncrona (3000 rpm) cuando se parte de 0 para realizar ensayos en aceleración.

En el campo Pasos se indica el número total de mediciones que se desea que el sistema realice. El programa las reparte de manera equidistante entre la velocidad de inicio y la velocidad final. Si se desea otra distribución de velocidades, hay que hacerlo con la opción Tabla.

Con “Tiempo de espera tras cambio en la velocidad” se indica el tiempo que tiene que retener el freno al motor a la velocidad de medición antes de medir el par. El objetivo de esto es hacer que la aceleración angular del motor sea 0 para que no influya en la medición del par.

La influencia de los parámetros de esta pestaña se estudiará más adelante, ya que su influencia en la curva característica puede llegar a ser notable.

3.2.5. Opciones

El objetivo de esta pestaña es acotar las velocidades en el modo de regulación de par, y de poner un valor de par máximo en el modo de regulación de velocidad. Como en este Trabajo solo se utiliza el modo de velocidad, los dos primeros valores no tienen ninguna función real (Fig 19). El valor del tercer valor tiene que ser mayor que el par máximo que produce el motor, porque sino no se podría medir.

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

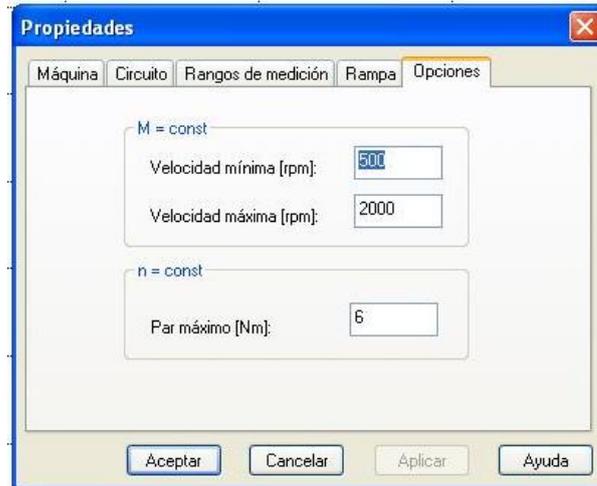


Figura 19: Propiedades. Pestaña Opciones

Al ser estos parámetros limitaciones de seguridad, no tendrán influencia en la obtención de la curva característica.

3.3. Estudio de los parámetros con posible influencia en la Curva Característica

Existen una serie de parámetros, tanto relacionados con la configuración del programa, como externos a éste, que pueden modificar los resultados obtenidos en la curva característica.

A continuación se recogen los parámetros que tienen una mayor influencia.

3.3.1. Tiempo de espera tras cambio en la velocidad

En las figuras 20 y 21 se puede apreciar el efecto de dicho parámetro. Los ensayos se realizaron tanto en frenado como en aceleración.

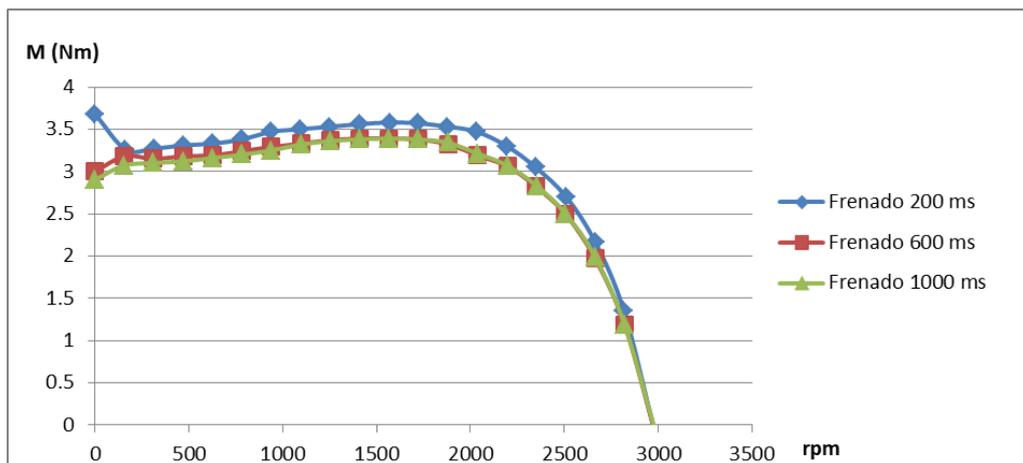


Figura 20: Influencia del Tiempo de espera tras cambio en la velocidad en frenado

Se puede ver como para la práctica totalidad de valores, tanto en frenado como en acelerado, el momento medido con un tiempo de espera corto es mayor que el medido con un tiempo de espera largo.

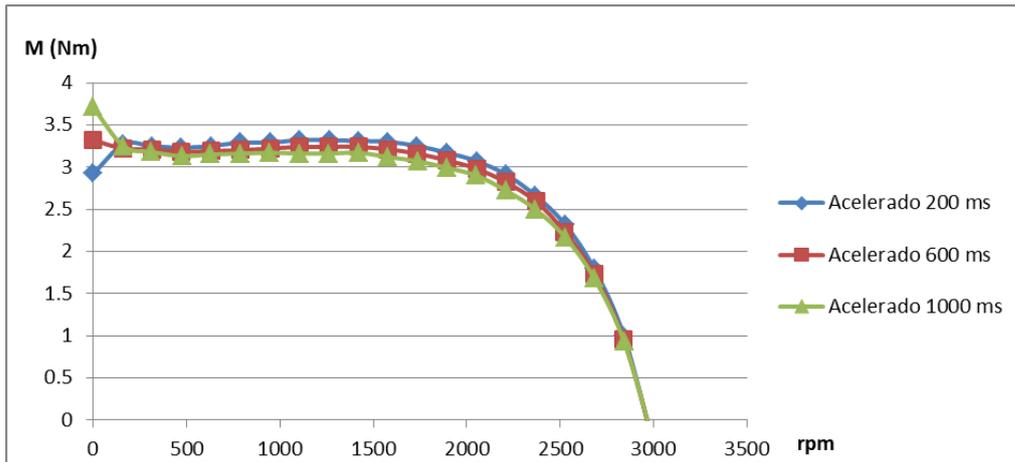


Figura 21: Influencia del Tiempo de espera tras cambio en la velocidad en acelerado

A continuación se estudiará si dicha variación es debida a que la aceleración angular no es nula en el momento de la medición:

El movimiento del conjunto motor-freno responde a la ecuación 4:

$$M_m - M_f = I \cdot \alpha \quad (4)$$

Siendo M_m el momento generado por el motor, M_f el momento generado por el freno, I el momento de inercia del conjunto y α la aceleración angular.

El sistema mide M_f , por lo que para obtener una medición correcta, α tiene que ser 0 para que M_m se iguale con M_f .

La figura 20 contiene datos tomados en mediciones en frenado, por lo que podría considerarse que para valores de tiempo de espera demasiado bajos, la aceleración angular es negativa. Aplicando la ecuación 4 a esto, obtenemos que $M_f > M_m$, por lo que el par medido será mayor que el par real producido por el motor siempre que α no haya tenido el tiempo suficiente para llegar a 0. Al aumentar el tiempo de espera, α se acercará a 0 y el par medido corresponderá con el producido con el motor. Es decir, al aumentar el tiempo de espera, el par medido por el freno se reduce. Esto mismo aparece reflejado en la figura 20.

Si aplicamos esto mismo a un motor en aceleración tenemos que α es mayor que 0, por lo tanto $M_f < M_m$, y el par medido será menor si α no es 0. Por lo tanto, al aumentar el tiempo de espera, el par medido aumentará. Sin embargo, lo recogido por la figura 21 muestra justo lo contrario.

Es por ello que se volvió a realizar unas nuevas mediciones con un tiempo de espera de 200 ms. Los resultados aparecen en la figuras 22 y 23:

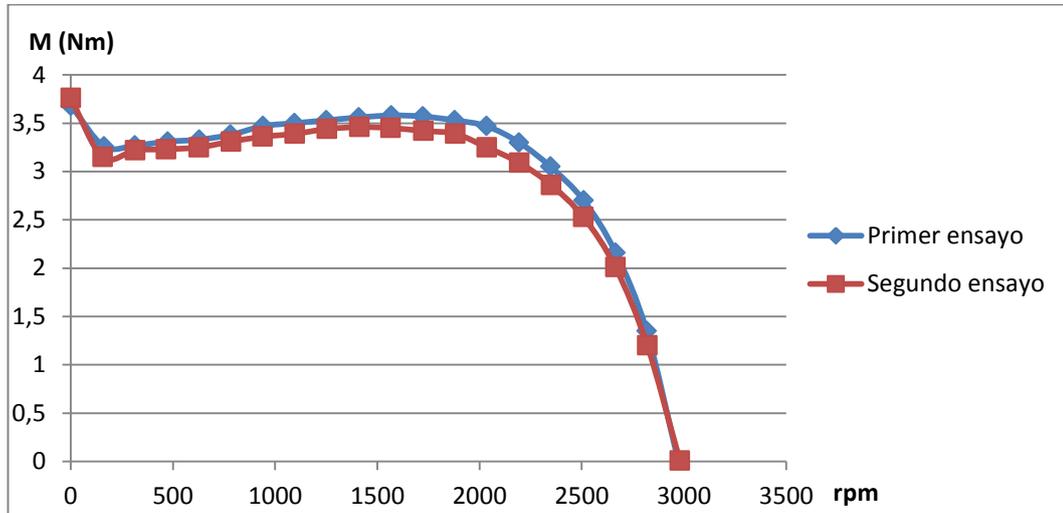


Figura 22: Dos ensayos con tiempo de espera 200 ms en frenado

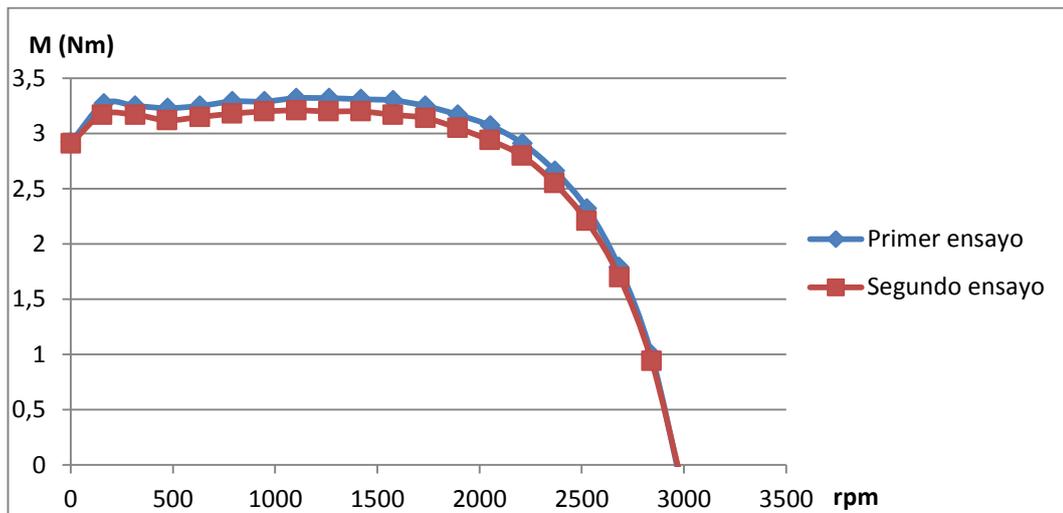


Figura 23: Dos ensayos con tiempo de espera 200 ms en acelerado

Se puede observar que tanto para los ensayos realizados en frenado como para los ensayos realizados en acelerado, el par medido en el segundo ensayo es menor que el par medido en el primer ensayo.

Una posible respuesta a esto es que en el primer ensayo el motor estaba frío; mientras que antes de realizar el segundo ensayo, el motor había realizado otros tantos con los distintos tiempos de espera, por lo que su temperatura había

aumentado. Al ser el bobinado del motor de un metal conductor, al aumentar la temperatura, también aumenta su resistencia, por lo que las pérdidas internas aumentan. Por lo tanto, disminuye el par entregado.

Para comprobar si esta hipótesis es correcta se realizó el siguiente experimento: se llevaron a cabo varios ensayos con el motor de manera bastante seguida, de modo que el motor no tuviera tiempo de enfriarse. Los resultados obtenidos pueden observarse en la figura 24.

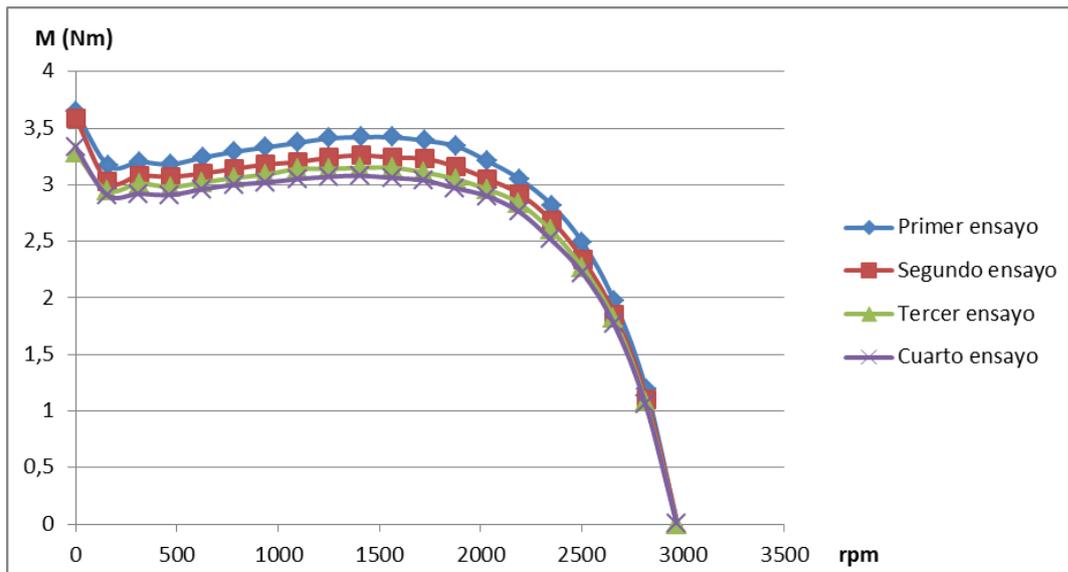


Figura 24: Varios ensayos seguidos

Se puede comprobar en dicha figura como el par decrece de manera notable al verse aumentada la temperatura del motor. Esto confirma la hipótesis introducida anteriormente.

Por lo tanto, la temperatura del motor debería ser tenida en cuenta para una caracterización precisa del mismo.

Otra conclusión que puede obtenerse es que, con este motor en particular, el tiempo de espera parece no tener una influencia significativa en la obtención de la curva característica, ya que las pequeñas diferencias pueden ser imputadas a la diferente temperatura del motor en los distintos ensayos.

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

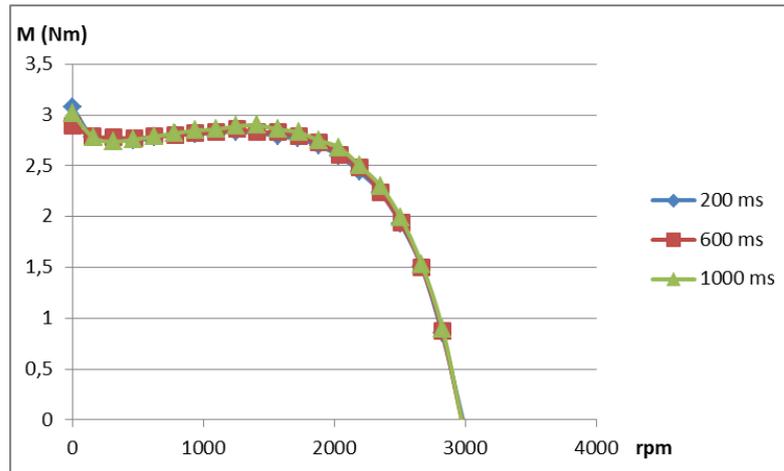


Figura 25: Influencia del Tiempo de espera en frenado, con el motor caliente

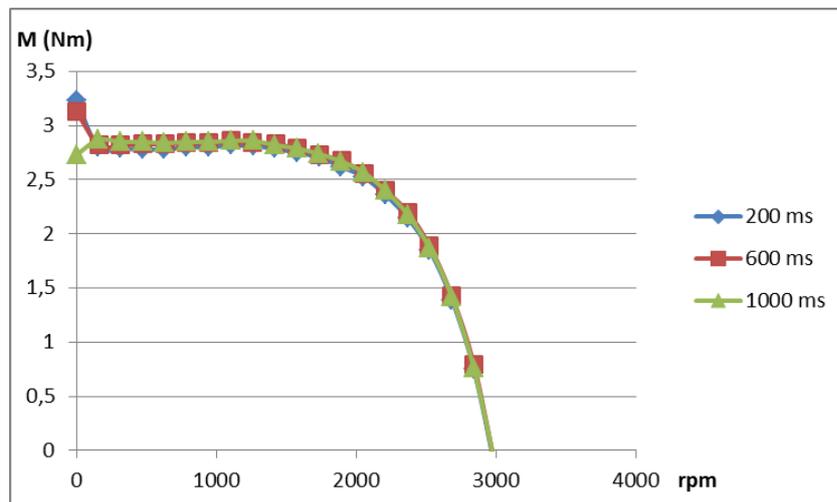


Figura 26: Influencia del Tiempo de espera en acelerado, con el motor caliente

Esto puede comprobarse en las figuras 25 y 26, en la que se ha realizado el mismo ensayo que en las figura 20 y 21, pero con el motor caliente. Aquí el par medido es prácticamente el mismo sin importar el valor del tiempo de espera.

Hay que recordar que esta conclusión sólo es válida para el ensayo de este motor. Si se ensayase otro motor con mayor momento de inercia es posible que fuese necesario aumentar el valor del Tiempo de espera para evitar que la aceleración angular no fuese 0 en el momento de la medida, y sus consiguientes lecturas erróneas del par comentadas anteriormente.

3.3.2. Influencia del Número de pasos

La mayor influencia que tiene el número de pasos en la Curva Característica es su resolución. Como puede comprobarse en la figura 27, apenas hay cambios perceptibles en la curva.

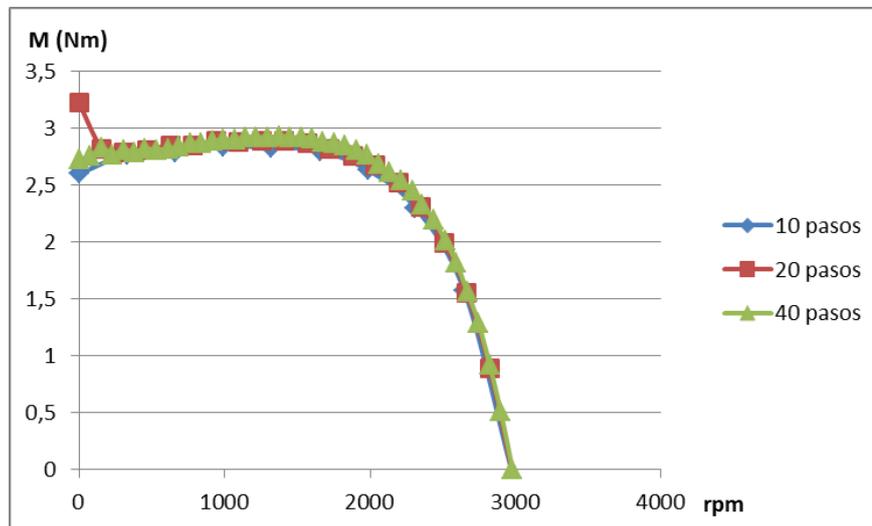


Figura 27: Influencia del Número de pasos

Hay que tener en cuenta que un número de pasos elevado tiene la desventaja de que el ensayo es más largo. Por ello, y especialmente a bajos regímenes de giro, el ventilador del motor no es capaz de evacuar todo el calor generado, lo que puede dar lugar a un sobrecalentamiento del motor.

Por lo contrario, un número de pasos elevado trae consigo la obtención de una curva característica con mayor resolución, por lo que será más fiel al comportamiento real del motor.

3.3.3. Temperatura del motor

Como ya se ha comentado anteriormente, la temperatura del motor tiene una gran influencia en el par entregado por el motor. Esto puede comprobar en la figura 28.

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

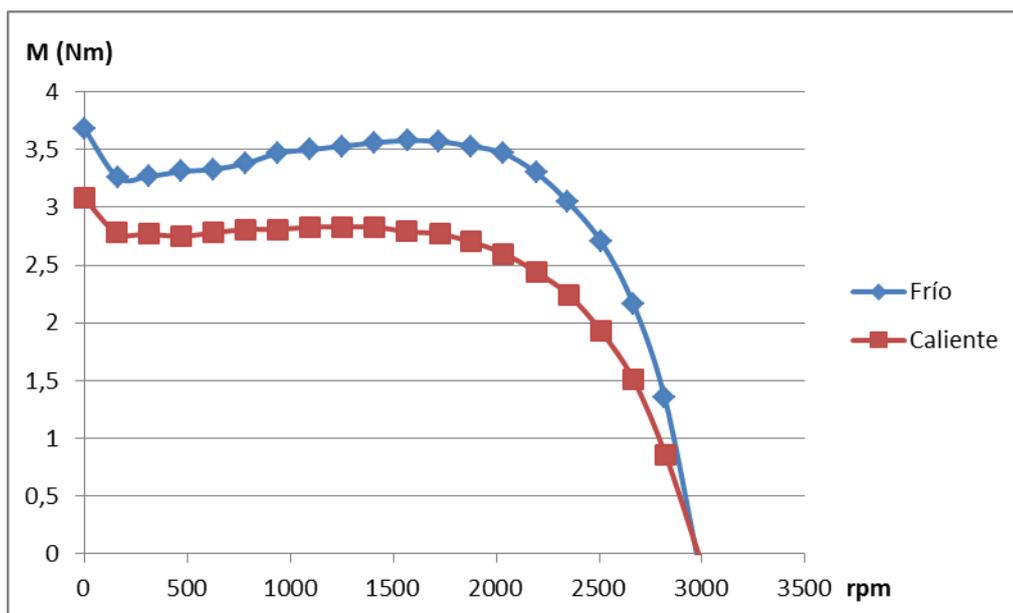


Figura 28: Comparación entre motor frío y motor caliente

En ella se ha realizado el mismo ensayo, con tiempo de espera de 200 ms, 20 pasos y en frenado, al motor de pruebas. La diferencia es más que evidente, y puede verse ilustrada en la figura 29, en tanto por ciento referido al valor de par con el motor frío.

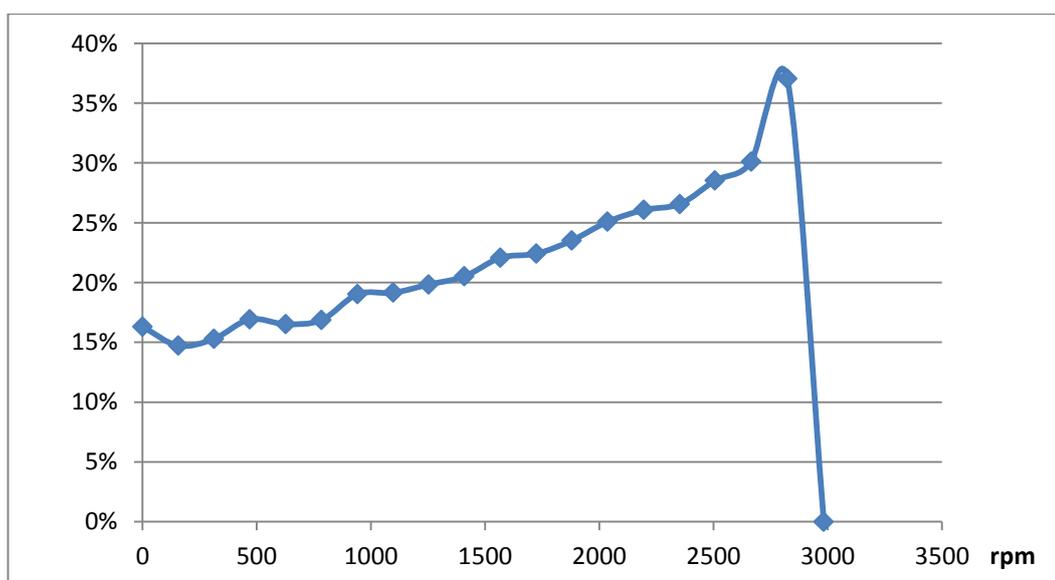


Figura 29: Diferencia de par entre motor frío y motor caliente

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

Se puede ver como el par entregado es hasta un 37% menor. Precisamente la zona de velocidad nominal es la que mayor caída de par presenta, por lo que una buena refrigeración del motor es fundamental para obtener un par elevado.

Esto ocurre por lo siguiente: Si en un motor aumenta su temperatura, aumenta también su resistividad. Si tomamos la ley de Ohm (Ec 5), vemos como un aumento de la resistencia conlleva una disminución de la intensidad.

$$I = \frac{V}{R} \quad (5) \quad N = \sqrt{3} \cdot I \cdot V \cdot \cos \phi \cdot \eta \quad (6)$$

La expresión que sirve para calcular la potencia aparece en la ecuación 6, siendo N la potencia en W; I la intensidad en Amperios, V la diferencia de potencial en el motor en Voltios, $\cos \phi$ el factor de potencia y η el rendimiento del motor.

La diferencia de potencial es constante, ya que viene impuesta por la red. Si consideramos que el factor de potencia y la eficiencia del motor permanecen constantes, tenemos que un aumento en la resistencia del motor conlleva una pérdida de potencia, y por lo tanto, de par.

Para comprobar si la hipótesis de que el factor de potencia es constante, se ha representado en la figura 30 el valor medido en el ensayo anterior.

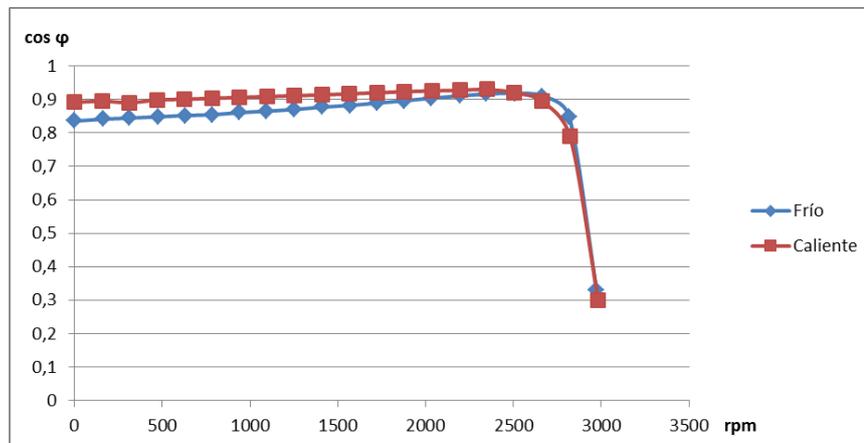


Figura 30: Factor de potencia en motor frío y motor caliente

A la vista de los resultados, la hipótesis puede ser tomada como válida en una primera aproximación, y más si lo comparamos con la magnitud de la diferencia obtenida en par.

Para comprobar la hipótesis de que el rendimiento se mantiene constante, se ha calculado, mediante la ecuación 7, para el ensayo anterior

$$\eta = \frac{\dot{W}_{eje}}{\dot{W}_{consumida}} = \frac{M_{eje} \cdot \omega}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi} \quad (7)$$

Los resultados han sido representados en la figura 31:

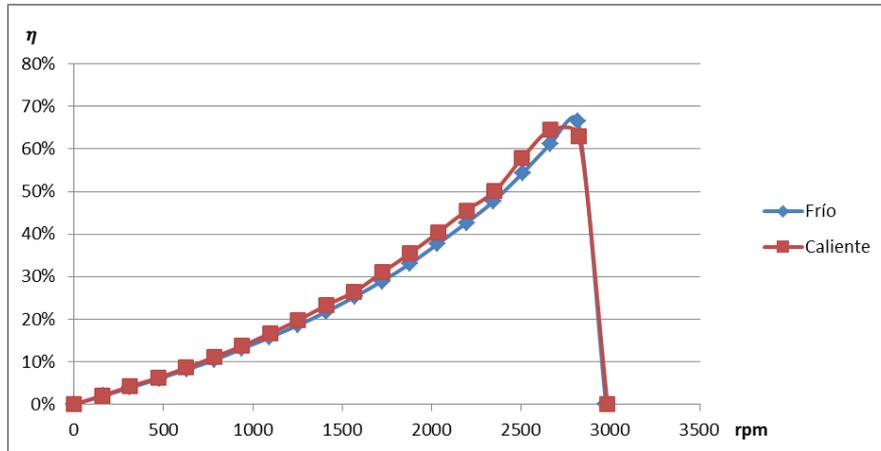


Figura 31: Rendimiento en motor frío y motor caliente

Las diferencias son bastante reducidas, por lo tanto se puede considerar la hipótesis como cierta. Por lo tanto, un aumento en la temperatura conlleva una disminución de la corriente que recorre el motor, como puede verse en la figura 32; y esto conlleva una disminución de la potencia y del par (Fig 28).

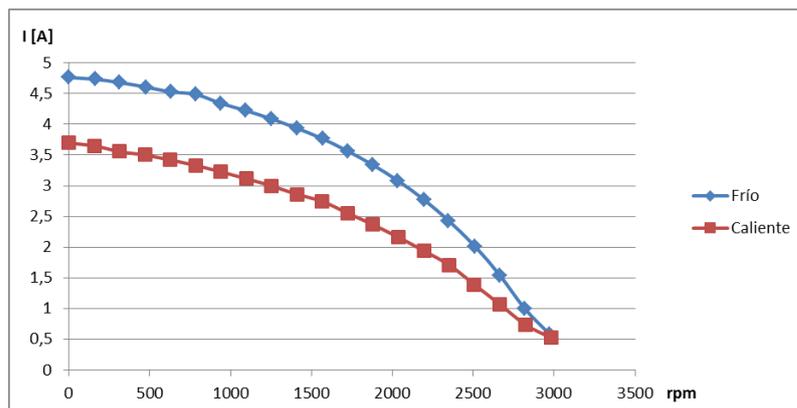


Figura 32: Intensidad en motor frío y motor caliente

Este resultado coincide con lo expuesto en una amplia bibliografía, como por ejemplo el libro [7] de la bibliografía.

3.3.4. Tensión de red

Como se vio anteriormente en la ecuación 6, la potencia entregada por el motor depende directamente de la tensión de red. De todos modos, la tensión de red tiene variaciones relativamente pequeñas, por debajo del 5%, por lo que este parámetro no tiene una relevancia extraordinaria en condiciones normales de funcionamiento de la red.

La figura 33 muestra esta tendencia. Hay que tener en cuenta que la diferencia de par para un aumento de tensión de 4 V es de poco más de 0,03 Nm.

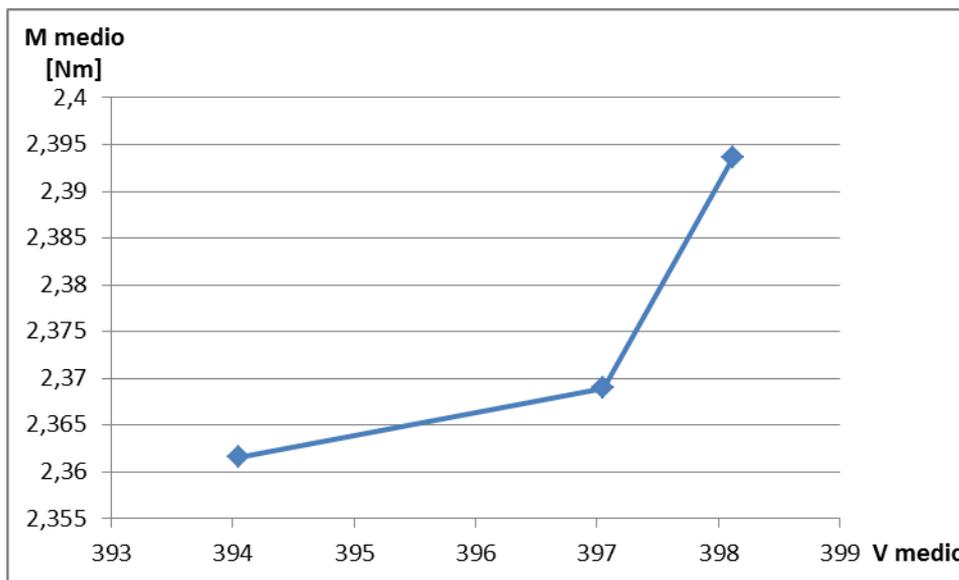


Figura 33: Efecto de la tensión de red en el par medio del motor

3.3.5. Aceleración o deceleración

En principio los resultados obtenidos tanto en aceleración como en deceleración deberían ser los mismos. Sin embargo, dada la imposibilidad de controlar la temperatura del motor, los datos pueden diferir ligeramente.

Estas diferencias están debidas al calentamiento que tiene lugar en el motor durante la realización del ensayo.

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

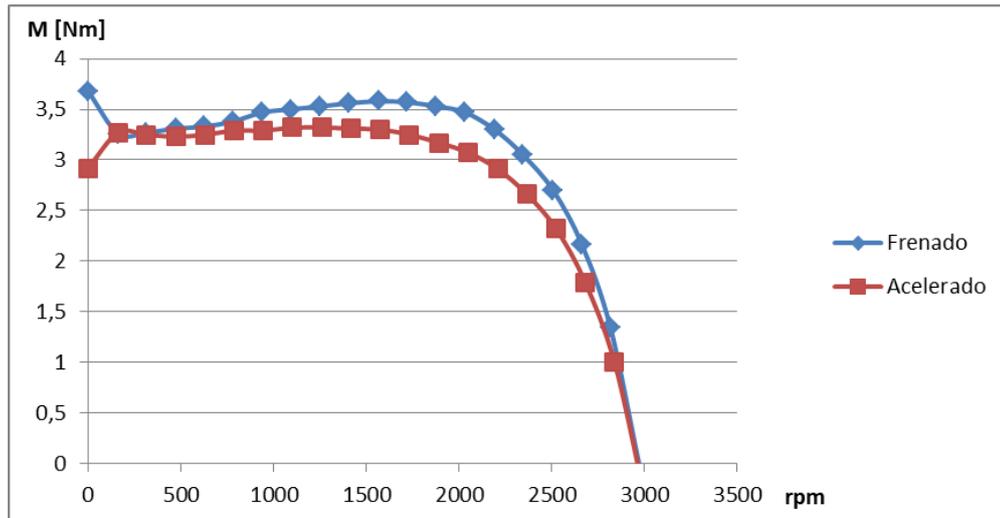


Figura 34: Diferencias entre frenado y acelerado con motor frío

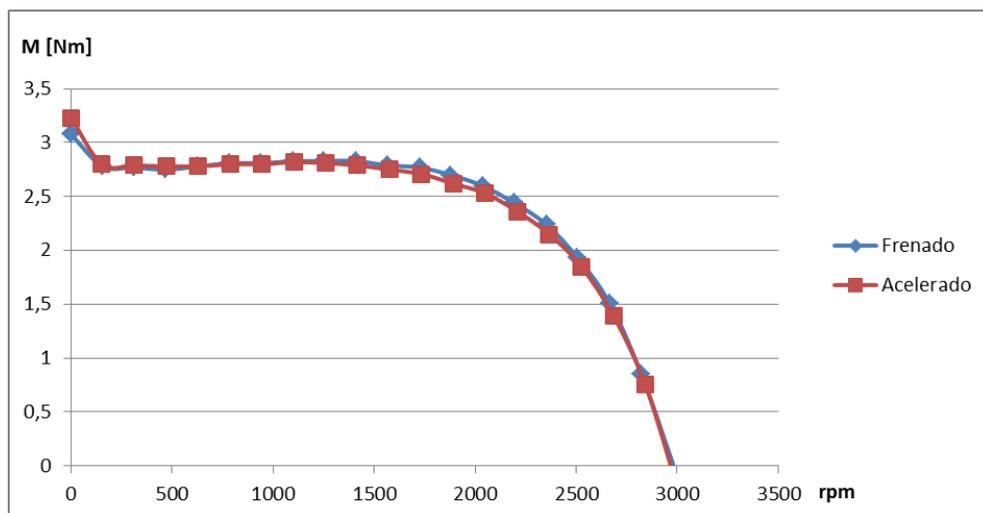


Figura 35: Diferencias entre frenado y acelerado con motor caliente

Las diferencias se dan especialmente con el motor frío (Fig 34), siendo mucho menores con el motor caliente (Fig 35)

Estas diferencias están debidas al sistema de refrigeración del motor: Se trata de un ventilador unido directamente al eje del motor. Es por ello que la cantidad de calor evacuada aumenta con el régimen de giro.

En el ensayo en aceleración se parte con el motor parado, por lo que durante los primeros pasos del ensayo el calor generado no puede ser evacuado en su totalidad y la temperatura del motor aumenta. Es por ello que el par producido a

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

regímenes de giro medios y altos es menor que el obtenido en un ensayo en frenado. También es apreciable un par ligeramente mayor a bajos regímenes en el ensayo en aceleración, cuando el motor no ha tenido tiempo suficiente para calentarse.

Si se miran las curvas de la figura 35 se observará una gran similitud con la curva en aceleración de la figura 34, ya que en todas ellas el motor se encuentra caliente.

3.3.6. Posición con rotor bloqueado [3]

En todas las curvas características se puede observar que el valor de par para velocidad de giro nula presenta una gran variabilidad.

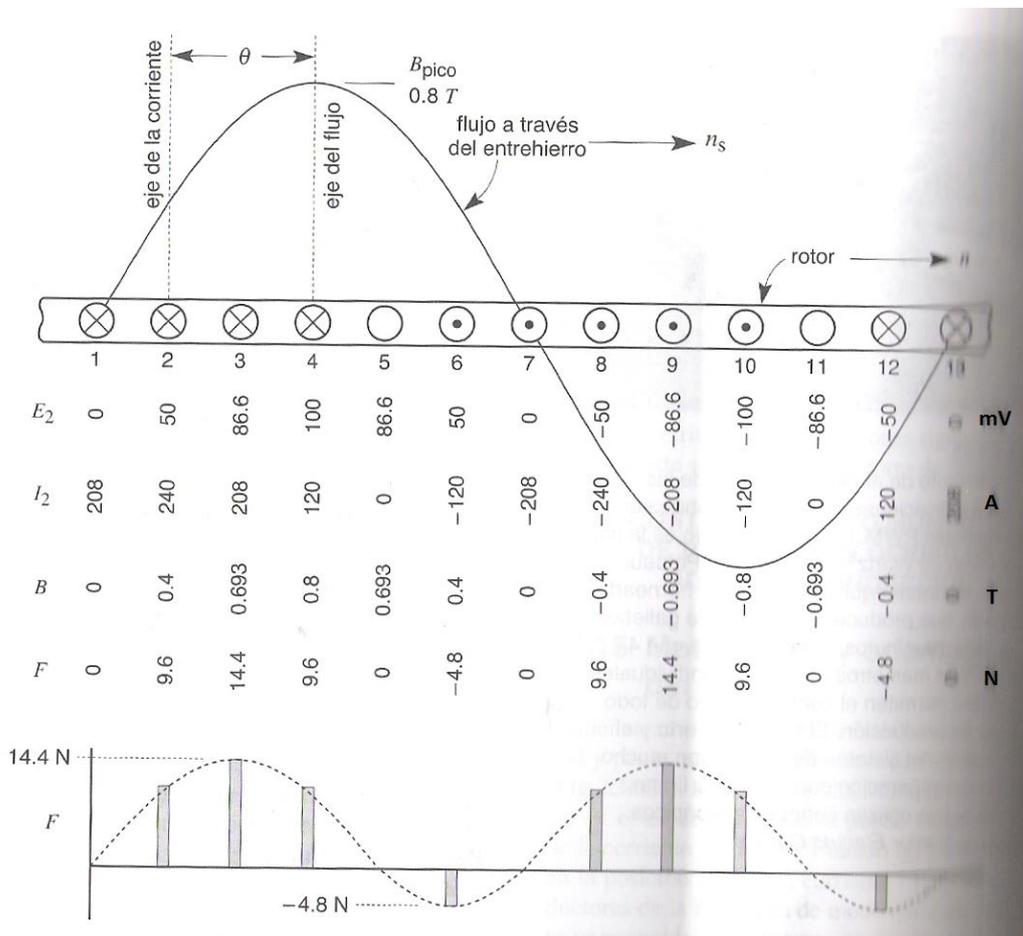


Figura 36: Fuerzas producidas en el rotor [3]

La fuerza ejercida en las barras del rotor viene dada por la ecuación 8.

$$F = B \cdot L \cdot I \quad (8)$$

Dado que tanto el campo magnético (B) como la intensidad (I) varían según se recorre el estator, la fuerza sobre cada una de las barras no es constante, sino que varía según se indica en la figura 36. El valor del momento producido es igual al sumatorio de la fuerza sobre las barras multiplicado por su distancia al centro de giro.

En la realización del ensayo, cuando se mide el par a velocidad nula, el rotor queda bloqueado en una posición aleatoria. Dado que las barras del rotor están repartidas de manera discreta, el valor de la suma de las fuerzas ejercidas sobre ellas varía dependiendo de su posición, e igualmente lo hace el par.

3.4.Conclusiones

Con el motor con el que se ha realizado este Trabajo, hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Debido a la gran influencia de la temperatura del motor en la obtención de la curva característica, es conveniente realizar los ensayos con el motor caliente.
Para calentar el motor, se trabajará en el modo de Control de Velocidad (Speed Control). Se frenará el motor hasta las 2500 rpm y se mantendrá a esta velocidad hasta que el par descienda a 1,97 Nm. Entonces se considerará que el motor está caliente y se podrá apagar el servofreno y conectar el programa de ordenador para realizar las mediciones.
Conviene realizar esta operación antes de efectuar cualquier medición.
- En la configuración inicial del programa sólo se deberán modificar datos en las pestañas *Máquina* y *Rampa*. En el resto de pestañas conviene no modificar los datos de origen.
- En la pestaña *Máquina* se deberán introducir los datos disponibles en la plaquita del motor para configuración Delta.
- En la pestaña *Rampa* se seleccionarán las velocidades de inicio y fin, las cuales dependerán de si el ensayo se desea realizar en acelerado o en frenado.
- Con este motor, el *Tiempo de espera tras cambio en la velocidad* que aparece por defecto (200 ms) es adecuado.
- Se puede modificar el *Número de pasos* para obtener una mayor o menor resolución en la curva. Conviene no elegir un número de pasos demasiado elevado para evitar un calentamiento excesivo del motor.
- Se intentará realizar los ensayos de manera rápida, ya que durante el tiempo en el que el motor está sin carga, se está enfriando.

En caso de que se ensaye un motor diferente, habrá que hacer lo siguiente:

- Calentar el motor hasta una temperatura adecuada para realizar los ensayos.
- Estudiar si es necesario aumentar el *Tiempo de espera tras cambio en la velocidad*.
- Introducir los datos pertinentes en la pestaña *Máquina*.

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

- Seleccionar como está conectado a la red en la pestaña *Circuito* en caso de que el motor no funcione con red trifásica.

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

4. Utilización del Banco de Ensayos para simular una carga. Aplicación a Volante de Inercia

4.1.Introducción

El programa que incorpora el Banco de Ensayos, además de servir para la caracterización de motores, permite la simulación de varias máquinas. Esto permite simular cómo se comportaría el motor si estuviera acoplado a dichas máquinas, pudiendo variar de forma sencilla algunos de los parámetros más representativos de dichas máquinas.

Las máquinas que pueden simularse son:

- **Compresor:**

En este modo de servicio, el comportamiento del par corresponde al de un compresor de émbolo con recipiente a presión. El par aumenta en la fase de compresión hasta alcanzarse un par máximo, para caer repentinamente en la fase de aspiración.

Aparte de este efecto, se puede observar un par en aumento lineal, que es causado por la presión ascendente en el recipiente a presión.

Se puede controlar el volumen del recipiente a presión, así como vaciarlo pulsando un botón.

- **Bomba/Ventilador:**

El freno presenta el comportamiento de par de una bomba o de un ventilador. Al aumentar la velocidad de giro se da un aumento cuadrado del par. El modelo corresponde a la curva característica ideal, es decir no se tienen en cuenta ni la fricción ni masas volantes.

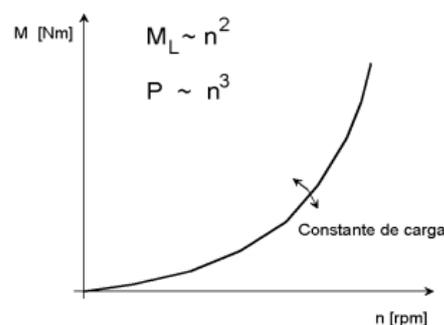


Figura 37: Constante de carga en una bomba/ventilador

Es posible modificar la constante de carga de la bomba, según muestra la figura 37.

- **Calandria:**

En este modo, el par se incrementa linealmente con respecto al número de revoluciones (Fig 38). El modelo corresponde a la curva característica ideal, o sea, no se tienen en cuenta ni la fricción ni masas volantes.

Se puede modificar la constante de carga de la calandria, variando así su pendiente, tal y como aparece en la figura 38.

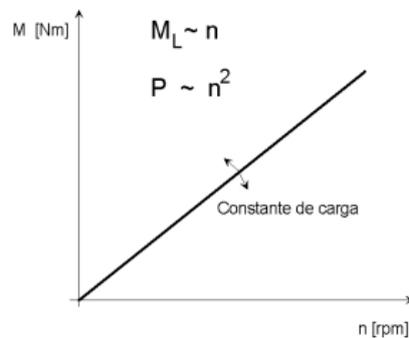


Figura 38: Constante de carga en una calandria

- **Accionamiento elevador:**

Este modo de servicio sirve para cargar motores con un par constante sobre todo el margen del número de revoluciones (Fig 39).

Este par puede ser ajustado, tanto con valor positivo como negativo, lo que permite simular tanto subida como bajada de cargas.

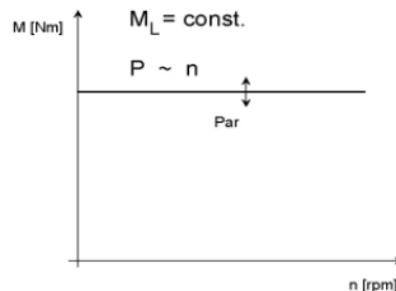


Figura 39: Constante de carga en un accionamiento elevador

- **Accionamiento bobinador:**

En este caso, el par aumenta con el ángulo girado de forma lineal. El modelo corresponde a la curva característica ideal, es decir no se tienen en cuenta ni la fricción ni masas volantes.

El parámetro que se puede modificar es el espesor del material, lo que afecta a la inclinación de la curva (Fig 40)

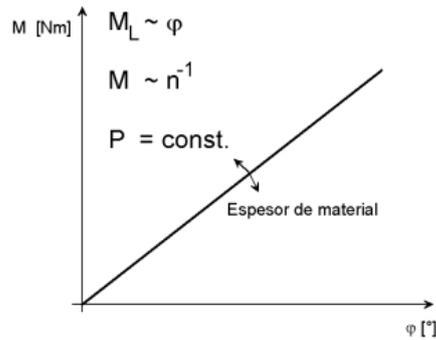


Figura 40: Constante de carga en un accionamiento bobinador

- **Curva en función del tiempo:**

En el caso de esta máquina de carga se puede definir previamente una curva de par de giro en función del tiempo. De esta manera se pueden analizar saltos de carga, entre otras muchas posibilidades.

- **Volante de inercia:**

El servomotor se comporta como un volante de inercia, lo que permite estudiar tanto el arranque como la parada de una máquina pesada o un propio volante de inercia.

Se puede modificar tanto el momento de inercia del volante como su fricción, teniendo este último aspecto mayor importancia en operaciones de frenado.

A continuación se estudiará cómo se simula el volante de inercia, cuál es el modelo matemático que sigue un motor unido a un volante de inercia y cómo se comporta el conjunto motor-servomotor cuando este último simula un volante de inercia.

4.2.Simulación de un Volante de Inercia

La ecuación que sigue un sólido rígido sometido únicamente a movimiento de rotación es la siguiente (Ec. 9):

$$\sum M = I * \alpha \quad (9)$$

Particularizando la ecuación 9 para el conjunto formado por un motor y un volante de inercia (Fig 41), y despreciando los rozamientos (tal y como lo simula el programa informático), obtenemos la ecuación 10.

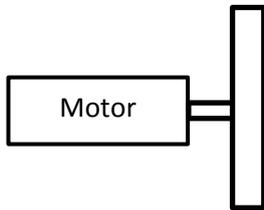


Figura 41: Motor-Volante Inercia

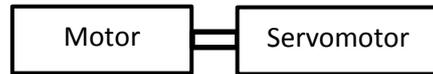


Figura 42: Motor-Servomotor

$$M_{motor} = (I_{Volante} + I_{motor}) \cdot \alpha \quad (10)$$

La ecuación que rige el conjunto motor-servomotor (Fig 42) es la siguiente:

$$M_{motor} - M_{servomotor} = (I_{motor} + I_{servomotor}) \cdot \alpha \quad (11)$$

Despejando el momento del motor:

$$M_{motor} = (I_{motor} + I_{servomotor}) \cdot \alpha + M_{servomotor} \quad (12)$$

Si se igualan las ecuaciones 10 y 12 se obtiene la ecuación 13:

$$(I_{Volante} + I_{motor}) \cdot \alpha = (I_{motor} + I_{servomotor}) \cdot \alpha + M_{servomotor} \quad (13)$$

Despejando, el par que tiene que ejercer el servomotor para simular un volante de inercia es:

$$M_{servomotor} = (I_{Volante} - I_{servomotor}) \cdot \alpha \quad (14)$$

El momento de inercia del volante es un dato que introduce el usuario, mientras que el momento de inercia del servomotor es un dato conocido que posee el

programa. La aceleración angular puede ser calculada de manera numérica con los datos de velocidad angular previos.

Por lo tanto, es posible simular un volante de inercia con un servomotor, sin requerir de datos o dispositivos adicionales.

4.3. Modelado de la aceleración de un Volante de Inercia

Se supone un motor de momento de inercia despreciable unido a un volante de inercia con momento de inercia I , tal y como aparece en la figura 41. Este conjunto responde a la ecuación 15.

$$M = I \cdot \alpha = I \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (15)$$

Si integramos la ecuación 15, obtenemos:

$$\int dt = \int_{\omega_i}^{\omega_f} \frac{I}{M} \cdot d\omega$$
$$\Delta t = I \cdot \int_{\omega_i}^{\omega_f} \frac{1}{M} \cdot d\omega \quad (16)$$

Ya que los datos son discretos, hay que integrar utilizando un método numérico. En él se utilizarán los n pasos obtenidos en la caracterización del motor. Los diferentes pasos están separados una distancia de h rad/s. Al estar los pasos equiespaciados y al ser $\omega_i=0$, h es constante y se puede obtener dividiendo la velocidad máxima entre $n-1$.

Si se hace mediante la regla del trapecio compuesta, se obtiene la ecuación 17.

$$\Delta t = I \cdot \frac{h}{2} \cdot \left[\frac{1}{M(\omega_i)} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{M(\omega_j)} + \frac{1}{M(\omega_f)} \right] \quad (17)$$

También se puede realizar el cálculo utilizando la regla de Simpson compuesta. Tiene la ventaja de tener mayor exactitud, pero sin embargo necesita de un mayor número de puntos y que el número de nodos sea impar. Con esta regla se obtiene la siguiente ecuación (Ec 18):

$$\Delta t = I \cdot \frac{h}{3} \cdot \left[\frac{1}{M(\omega_i)} + 4 \cdot \sum_{j=1}^{n/2-1} \frac{1}{M(\omega_{2j})} + 2 \cdot \sum_{l=1}^{n/2-2} \frac{1}{M(\omega_{2j-1})} + \frac{1}{M(\omega_f)} \right] \quad (18)$$

En la tabla 1 aparecen los resultados obtenidos utilizando tanto la regla del trapecio compuesta como la regla de Simpson compuesta. El paso utilizado ha sido de 157 rpm, o lo que es lo mismo, 16,441 rad/s.

n [rpm]	M [Nm]	Trapezio [s]	Simpson [s]
0	3,08	0	0
157	2,78	0,836306153	
313	2,77	1,717013473	1,730755956
469	2,75	2,602515997	
627	2,78	3,48643166	3,502841991
784	2,81	4,360859307	
941	2,81	5,23059414	5,2454402
1098	2,83	6,097255705	
1253	2,83	6,960844002	6,974665639
1409	2,83	7,8244323	
1567	2,79	8,694211194	8,705969299
1725	2,77	9,57334303	
1880	2,7	10,46707436	10,47607419
2036	2,6	11,38964992	
2195	2,44	12,36045167	12,36498083
2353	2,24	13,40678774	
2507	1,93	14,58546231	14,57568879
2665	1,51	16,02786783	
2823	0,85	18,27474493	18,11421931

Tabla 1: Regla del Trapecio compuesta frente a regla de Simpson compuesta

Los resultados obtenidos por cada método son muy similares. Debido a esto, de ahora en adelante se utilizará la regla del Trapecio compuesto, ya que la mayor precisión de la regla de Simpson compuesta no compensa la mayor cantidad de datos necesarios para obtener el mismo número de resultados.

Esta fórmula también puede hacerse específica para realizar cálculos paso a paso con h distinto en cada paso. Para la serie de datos i, el tiempo que se tarda en llegar a ella es (Eq 19):

$$t(i) = t(i - 1) + I \cdot \frac{\omega(i) - \omega(i - 1)}{2} \cdot \left(\frac{1}{M(i)} + \frac{1}{M(i - 1)} \right) \quad (19)$$

Por lo tanto, el tiempo teórico que tarda un volante de inercia en ser acelerado por un motor puede calcularse con las ecuaciones 17 y 19.

4.4.Comparación entre los datos medidos en el Banco de Ensayos y el Modelo Matemático

En este apartado se estudiará cómo se comporta el conjunto motor-servomotor cuando este último simula un volante de inercia y si dicho comportamiento se ajusta al predicho por el modelo matemático.

4.4.1. Determinación del momento de inercia en unidades del Sistema Internacional

Para poder comparar los datos medidos con los indicados por el modelo es fundamental conocer el valor del momento de inercia con el que el programa simula el volante.

El primer problema que se presenta es que el programa no admite la introducción del valor del momento de inercia en unidades del sistema internacional ($kg \cdot m^2$). En su lugar, se puede modificar un parámetro sin unidades asociadas que varía de forma lineal el valor simulado del momento de inercia.

Es necesario conocer la relación entre el valor introducido en el programa y el valor que tendría el volante de inercia en unidades del SI. Para ello, se parte de los datos medidos y se utiliza la ecuación 20 para obtener el momento de inercia.

$$I = \frac{M}{\alpha} \quad (20)$$

La aceleración angular no es un dato proporcionado por el programa. Sin embargo, sí que lo son la velocidad angular y el tiempo, por lo que la aceleración angular se puede calcular de forma numérica. Se puede utilizar un método de tres nodos regresivo (Ec 21). Se utilizan datos separados entre sí h segundos. La aceleración angular para la serie de datos i es:

$$\alpha(i) = \frac{1}{2h} \cdot [3 \cdot \omega(i) - 4 \cdot \omega(i - 1) + \omega(i - 2)] \quad (21)$$

Otro método más sencillo es utilizar la derivada en dos nodos (Ec 22):

$$\alpha(i) = \frac{\omega(i) - \omega(i - 1)}{h} \quad (22)$$

En la figura 43 aparecen representadas las aceleraciones angulares calculadas por ambos métodos para distintos valores del momento de inercia. En ambas se puede observar como la derivada en dos nodos proporciona un resultado más suave.

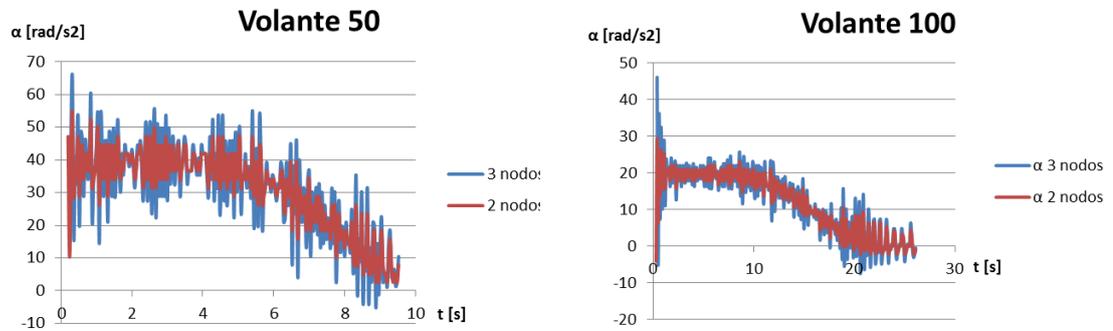


Figura 43: Diferencias entre métodos de derivación para calcular la aceleración angular

Esta suavidad dará lugar a menores picos al realizar el cálculo del momento de inercia. Esto se puede comprobar en la figura 44.

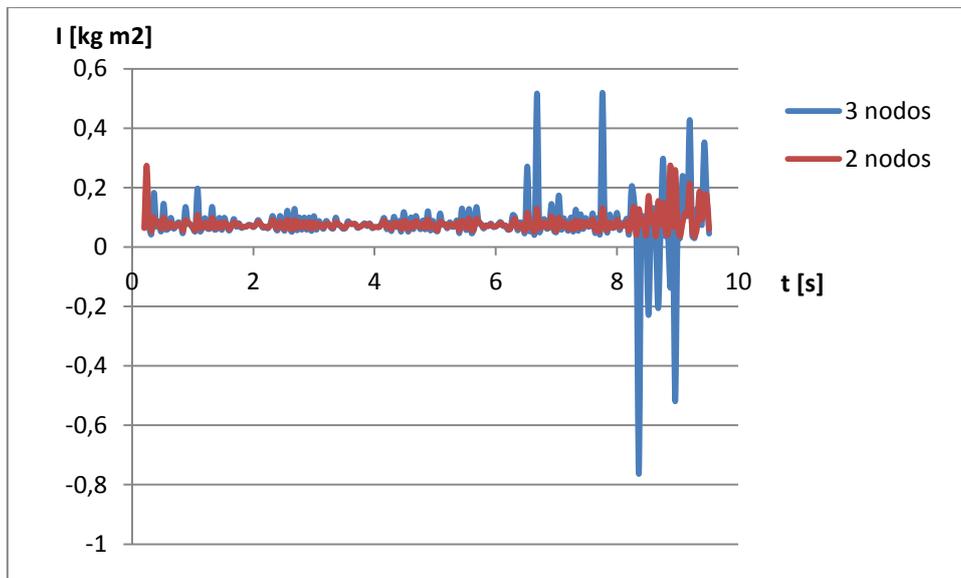


Figura 44: Influencia del método de cálculo de la aceleración angular en el cálculo del momento de inercia

Por lo tanto, se utilizará el método de dos nodos (Ec 21) para calcular el momento de inercia. Se despreciarán los primeros y los últimos datos, ya que en ellos el momento de inercia presenta mayor variabilidad. Para hacerlo de manera uniforme en todos los

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

cálculos, se tomarán los datos entre 500 y 1500 rpm. Se calculará el momento de inercia para cada serie de datos con la ecuación 18 y se hará la media para todos los datos, ya que el momento de inercia se supone constante.

Los resultados obtenidos son los siguientes (Fig 45). Estos resultados se han medido tanto con el motor como con el servomotor fríos:

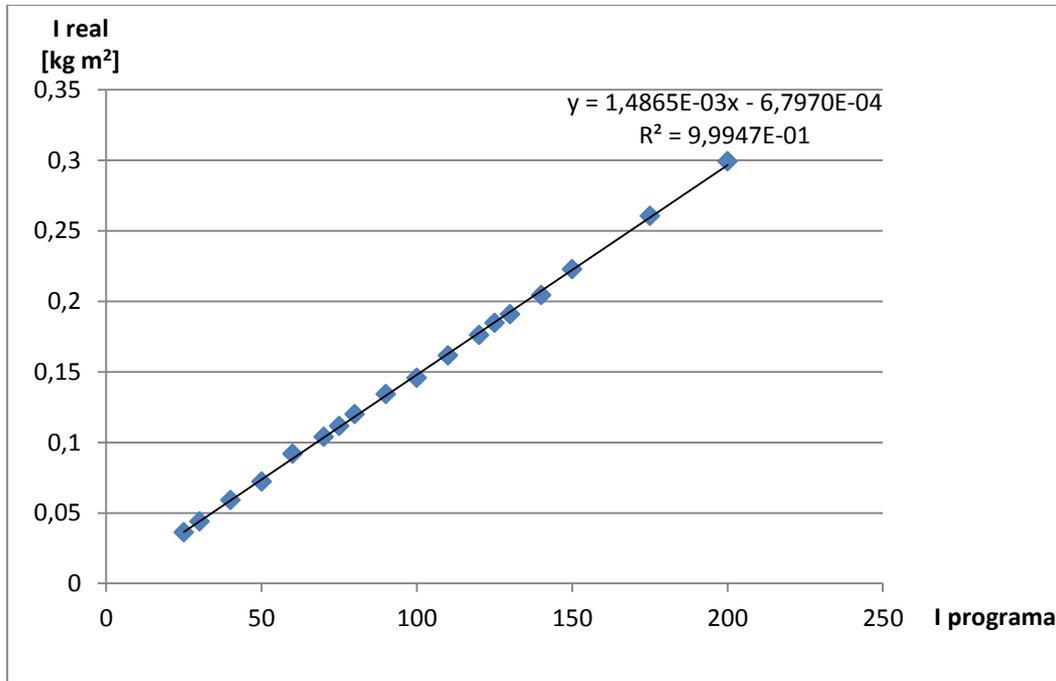


Figura 45: Momento de inercia simulado frente al introducido en el programa

En la figura 45 se puede comprobar como los datos se aproximan a una recta. Se puede considerar que dicha recta pasa por el origen de coordenadas, por lo que se puede afirmar que el valor del momento de inercia introducido obedece a la siguiente ecuación (Ec 23):

$$I_{real} [kg \cdot m^2] = 1.4865 \cdot 10^{-3} \cdot I_{programa} \quad (23)$$

La aproximación a la recta es del 99.95%, por lo que se puede considerar que la fórmula anterior obtiene un resultado suficientemente exacto.

4.4.2. Comparación de curvas

Una vez conocido el momento de inercia que se está simulando, ya es posible compararlo con el modelo matemático.

Para obtener el modelo matemático se parte de una curva característica obtenida en aceleración. Se ha elegido obtenerla, por similitud, con la operación de acelerado del volante de inercia. La velocidad síncrona se ha medido en 21 pasos equidistantes, de tal forma que un incremento de un paso supone un incremento de un 5% de la velocidad con respecto a la velocidad síncrona. Adicionalmente, se ha dividido el último intervalo en otros 5 intervalos más (1% respecto a velocidad síncrona) para obtener más detalle en esta región.

n [rpm]	M [Nm]	t matemático 50	t matemático 100	t matemático 150
0	2,76	0	0	0
153	2,87	0,423196812	0,846393623	1,269590435
299	2,81	0,823368643	1,646737286	2,47010593
450	2,8	1,242363795	2,484727589	3,727091384
600	2,79	1,660073314	3,320146628	4,980219942
750	2,81	2,077040907	4,154081815	6,231122722
898	2,81	2,486979618	4,973959237	7,460938855
1049	2,81	2,905227898	5,810455796	8,715683694
1199	2,81	3,320706322	6,641412643	9,962118965
1350	2,79	3,740453699	7,480907398	11,2213611
1499	2,77	4,157621354	8,315242707	12,47286406
1652	2,74	4,589882537	9,179765074	13,76964761
1802	2,67	5,021560859	10,04312172	15,06468258
1948	2,6	5,452893577	10,90578715	16,35868073
2104	2,48	5,931189658	11,86237932	17,79356897
2250	2,31	6,40626036	12,81252072	19,21878108
2398	2,1	6,929863896	13,85972779	20,78959169
2549	1,77	7,541691252	15,0833825	22,62507376
2699	1,33	8,31039958	16,62079916	24,93119874
2850	0,7	9,591717335	19,18343467	28,77515201
2881	0,52	9,996063829	19,99212766	29,98819149
2911	0,38	10,52781734	21,05563467	31,58345201
2942	0,18	11,51552213	23,03104425	34,54656638
2973	0,1	13,39216122	26,78432245	40,17648367

Tabla 2: Tiempos de aceleración según el modelo

Utilizando la ecuación 19 y los datos medidos, se pueden calcular los tiempos de aceleración de acuerdo con el modelo (Tabla 2).

La figura 46 compara los tiempos obtenidos con el modelo con los tiempos medidos en el ensayo.

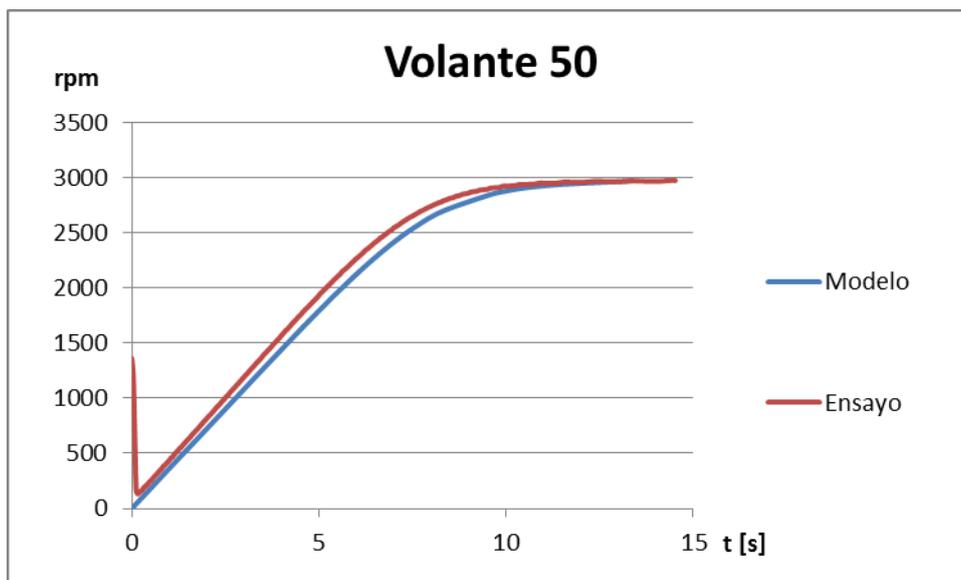


Figura 46: Comparación entre la curva medida en ensayo y la curva obtenida en el modelo matemático sin correcciones

Se puede apreciar cómo los datos tomados durante el ensayo no empiezan con velocidad cero. Esto es debido a que el motor no puede pararse ya que no dispone de un interruptor individual para este fin. Por lo tanto, el sistema simula el acoplamiento mediante embrague de un volante de inercia parado a un motor en movimiento. La solución más evidente para evitar este efecto sería usar un interruptor para poder encender y apagar el motor a voluntad; e iniciar el ensayo con el motor parado.

Ya que la instalación no dispone de interruptor, esto puede ser corregido de la siguiente manera: se toman los primeros datos en los que el volante de inercia ya se encuentra acoplado. Partiendo de la hipótesis de que estos datos se aproximan a una recta, se halla la intersección de dicha recta con el eje X. El resultado obtenido se resta al tiempo previamente medido para corregirlo.

Los resultados se muestran en la tabla 3.

Como se puede observar, el ajuste a la recta es muy próximo a 1, por lo que se puede asumir la hipótesis antes tomada como cierta.

Inercia volante	50	100	150
Ecuación recta	$373,312 \cdot t + 64,721$	$189,3158 \cdot t + 23,0947$	$130,2329 \cdot t + 46,4391$
R^2	0,9997	0,9998	0,9993
Corrección tiempo	-0,17337 s	-0,12199 s	-0,35659 s

Tabla 3: Corrección de tiempos

A continuación se presentan las comparaciones entre el modelo matemático y los ensayos con la corrección ya aplicada (Fig 47 – 49)

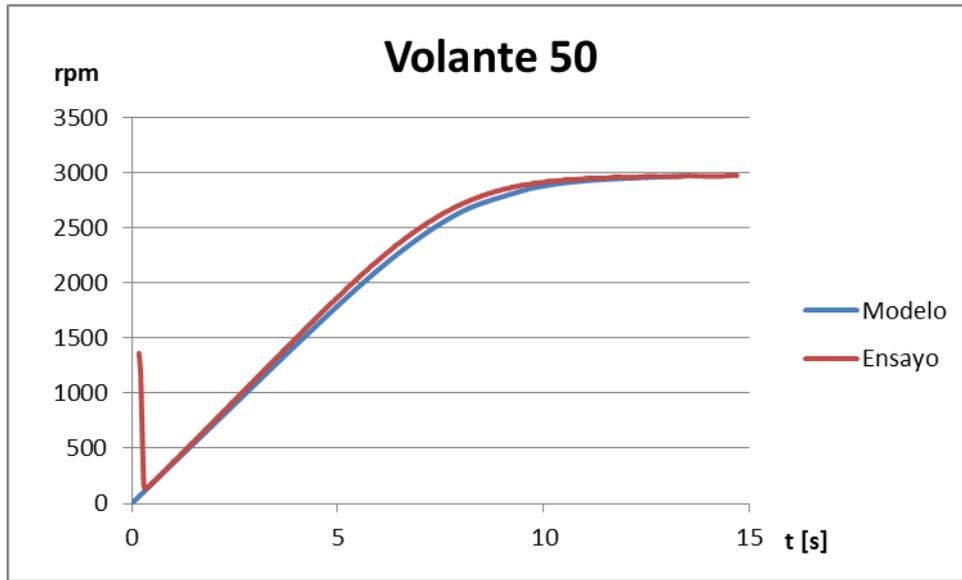


Figura 47: Comparación entre la curva del ensayo y la curva del modelo matemático para un valor de momento de inercia en el programa de 50, con corrección aplicada

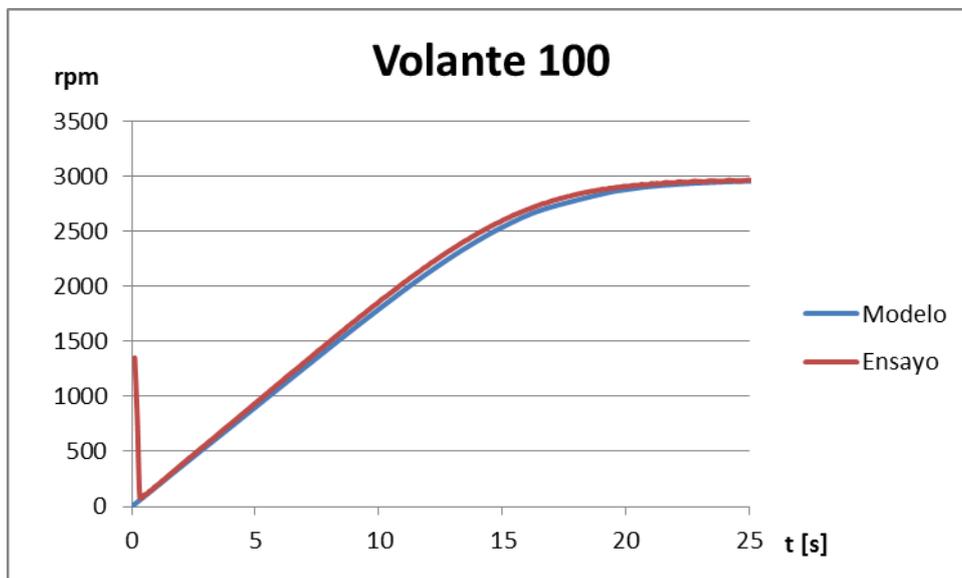


Figura 48: Comparación entre la curva del ensayo y la curva del modelo matemático para un valor de momento de inercia en el programa de 100, con corrección aplicada

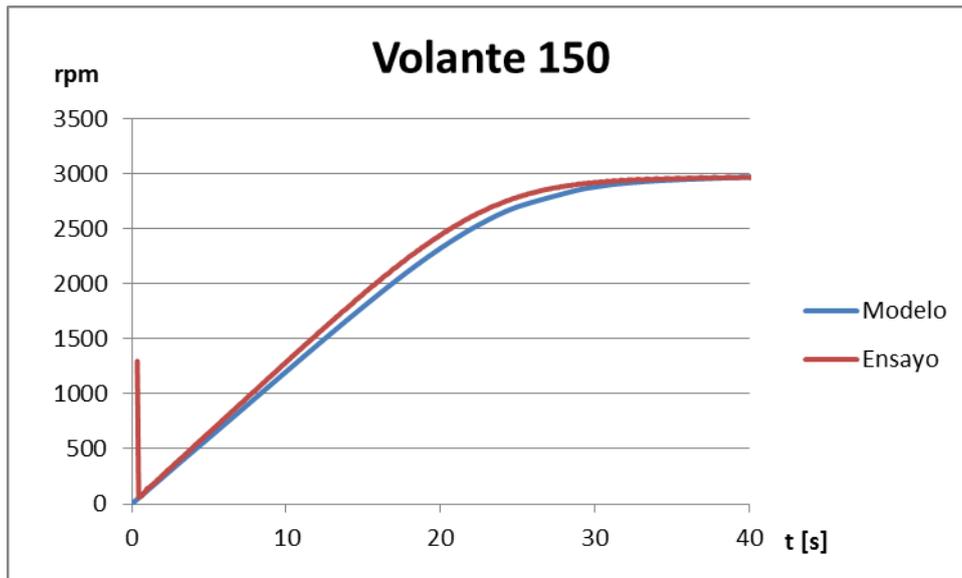


Figura 49: Comparación entre la curva del ensayo y la curva del modelo matemático para un valor de momento de inercia en el programa de 150, con corrección aplicada

Gracias a la corrección, las curvas coinciden con gran exactitud cerca del origen. En el resto de la curva, la aproximación es muy grande, pero sin embargo en la zona media de tiempos las curvas se separan ligeramente.

Se plantea si esto puede estar debido a pequeñas diferencias entre el par entregado por el motor durante el ensayo de aceleración del volante y el medido en la caracterización.

Para ello se aplica la ecuación 19 al momento que se midió durante el ensayo de aceleración. Ya que no se tiene ningún dato del momento para velocidad de giro 0 rpm, se toma como tal el momento a la menor velocidad de giro registrada.

Las figuras 50 – 52 muestran las tres curvas obtenidas superpuestas. En ellas las curvas recién obtenidas (curvas del modelo con los datos del par tomados durante el ensayo) se aproximan mucho más a la curva medida en el ensayo que las curvas anteriores (curvas que utiliza el par medido durante la caracterización).

En términos generales se puede considerar que la proximidad del modelo a los resultados experimentales es suficientemente alta.

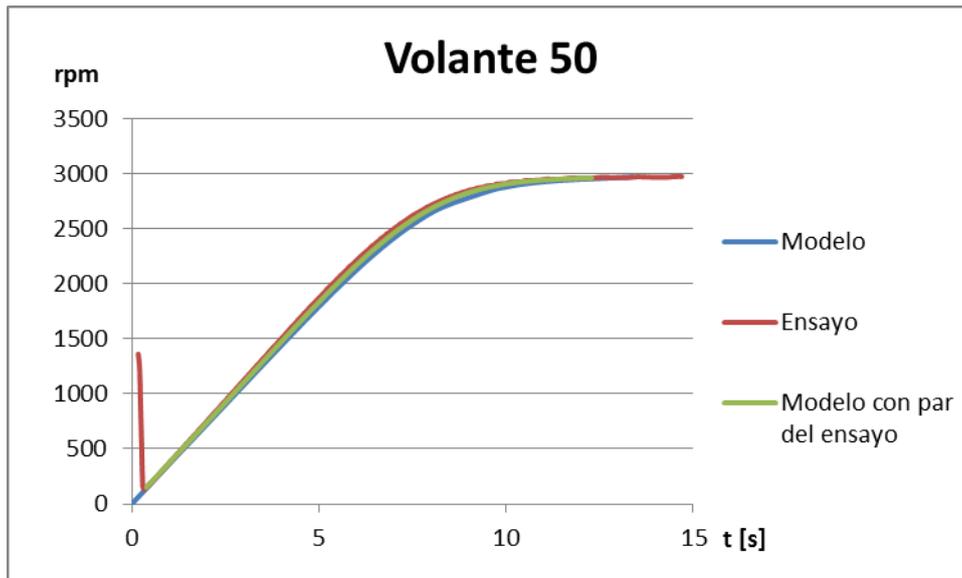


Figura 50: Efecto del uso del par medido durante el ensayo con el volante de inercia, para momento de inercia 50

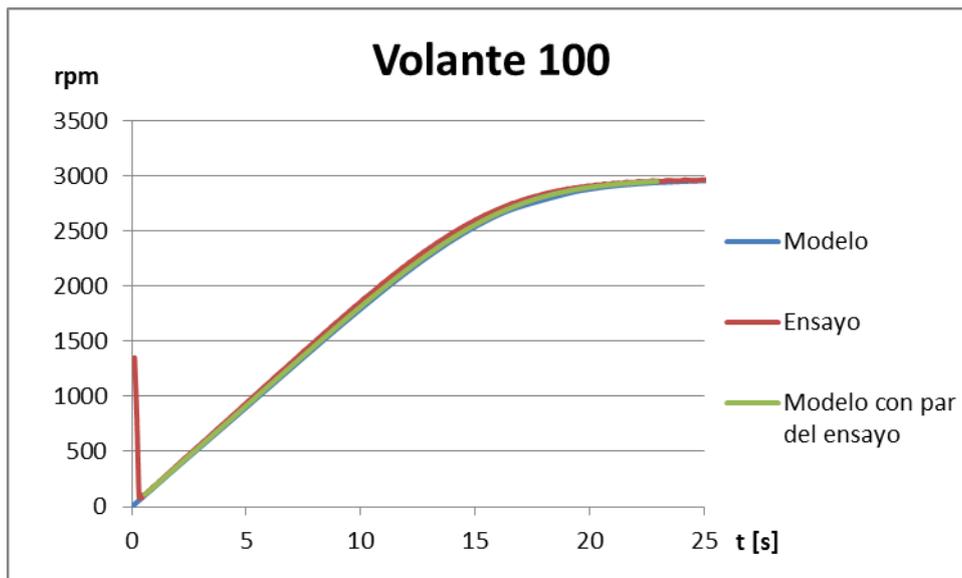


Figura 51: Efecto del uso del par medido durante el ensayo con el volante de inercia, para momento de inercia 100

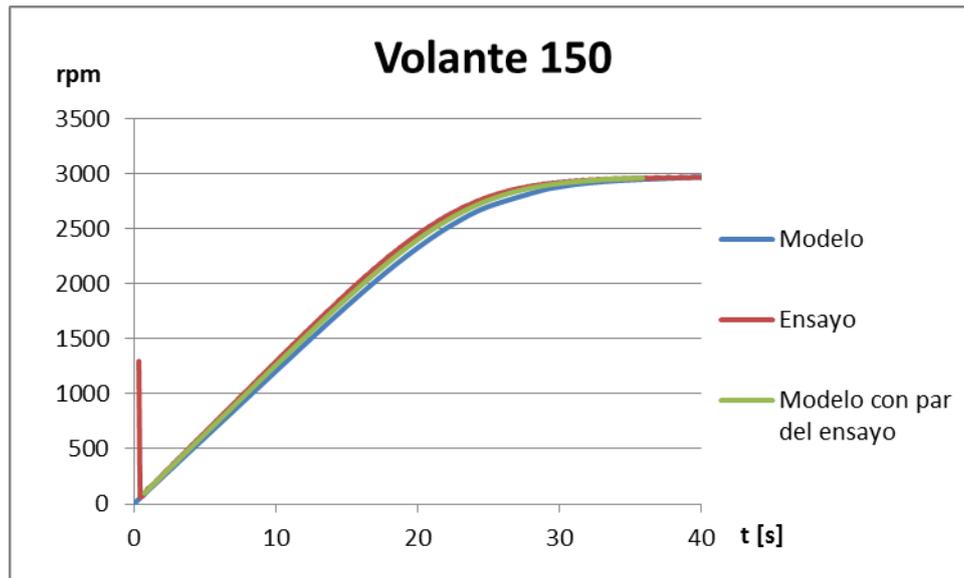


Figura 52: Efecto del uso del par medido durante el ensayo con el volante de inercia, para momento de inercia 150

4.5. Estudio de los parámetros con posible influencia en la simulación de un volante de inercia

Aparte de los parámetros característicos de la simulación, como son el momento de inercia del volante y la fricción, existen otros parámetros que pueden tener cierta influencia en los resultados obtenidos en la simulación.

4.5.1. Tiempo de medición

Este parámetro indica el tiempo durante el cual el ordenador guarda los datos.

Si se supera el tiempo indicado, el programa continuará el ensayo y la gráfica se seguirá dibujando en pantalla, aunque no será posible exportar los datos obtenidos durante este periodo.

La principal influencia que tiene este parámetro es que al aumentarlo se reduce la frecuencia con la que se toman datos. Esto se traduce en mediciones más separadas en el tiempo, y por lo tanto, datos menos detallados.

Los periodos de medición utilizados en cada tiempo de medición aparecen en la tabla 4.

Tiempo de medición [s]	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Periodo de medición [s]	0,0004	0,001	0,002	0,004	0,01	0,02	0,04	0,1	0,2

Tabla 4: Periodo de medición para cada tiempo de medición

Por lo tanto, es conveniente elegir el menor tiempo de medición posible, siempre que los datos de interés estén comprendidos dentro de ese tiempo. Para grandes momentos de inercia serán necesarios tiempos de medición altos, mientras que los tiempos de medición bajos serán adecuados para momentos de inercia reducidos.

4.5.2. Temperatura del motor y servomotor

Tal y como se observó en el apartado de la Curva Característica, la temperatura tiene una gran influencia sobre el para de un motor. Esto puede dar lugar a pensar que la temperatura también podría afectar a la simulación del volante de inercia.

Para comprobar esta hipótesis, se han repetido los cálculos de la figura 45, pero esta vez con el motor y el servomotor calientes (Fig 53). Si la ecuación de la recta obtenida

es similar a la de la figura 45, podrá decirse que la temperatura no tiene una influencia significativa en la simulación.

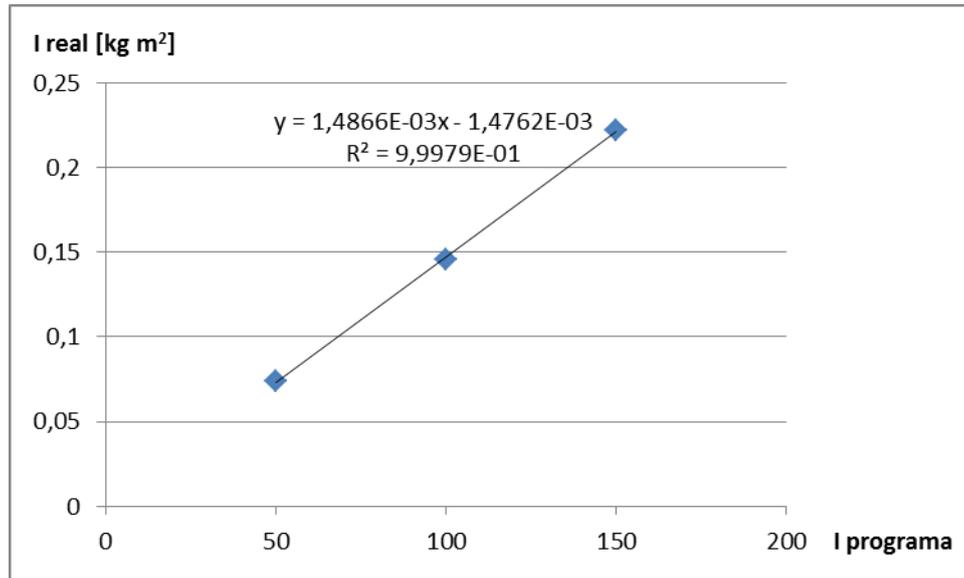


Figura 53: Momento de inercia simulado frente al introducido en el programa, con motor y servomotor calientes

Al igual que como se hizo anteriormente, se considera que la recta pasa por el origen de coordenadas. La inclinación de esta recta es de $1,4866 \cdot 10^{-3}$, mientras que la inclinación de la recta obtenida con el sistema frío es de $1,4865 \cdot 10^{-3}$. La diferencia entre pendientes es totalmente despreciable, por lo que se puede confirmar que la temperatura, aunque tenga efecto sobre el par entregado por el motor, no lo tiene en la simulación del volante de inercia.

4.6. Conclusiones

- Es posible simular un volante de inercia con un servomotor.
- Es posible modelar matemáticamente el comportamiento de un motor que acelera un volante de inercia tomando únicamente como datos la Curva Característica del motor y el momento de inercia del volante.
- Para obtener mayor exactitud, se pueden utilizar los pares medidos durante el ensayo en vez de los obtenidos en la caracterización del motor.
- Conviene elegir el menor tiempo de medición posible para obtener los datos en los ensayos.
- La temperatura a la que se encuentran el motor y el servomotor no influye en la calidad de la simulación.

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

5. Definición de una práctica experimental

5.1. Introducción

En este apartado se aprovecharán los resultados obtenidos hasta el momento para elaborar una práctica dirigida a los alumnos de la asignatura de Máquinas y Mecanismo, del tercer curso del Grado en Ingeniería Mecánica.

Con esta práctica, los alumnos podrán aplicar los conocimientos teóricos adquiridos en clase a los datos tomados por ellos mismos en una máquina real.

La práctica está dividida en un primer apartado en el que se explican los componentes que se utilizarán de la instalación y lo que se hará en la práctica en rasgos generales, además de cómo encender y apagar el equipo de forma correcta. Las prácticas se desarrollan en el siguiente apartado. Se explica de manera clara y paso a paso como llevarlas a cabo, con el fin de que surjan las menores dudas posibles. Las prácticas concluyen con una serie de problemas y cuestiones que los alumnos deberán resolver con los datos adquiridos durante la práctica.

Para la realización de estas prácticas es necesario un archivo, el cual se encuentra adjunto en los CD de este TFG.

5.2. Práctica experimental

5.2.1. Introducción

En esta práctica se trabajará con una instalación que está compuesta por varios elementos. La instalación consiste en un servomotor que permite la caracterización de un motor eléctrico, así como la simulación de diferentes máquinas. Los elementos que componen la instalación son los siguientes:

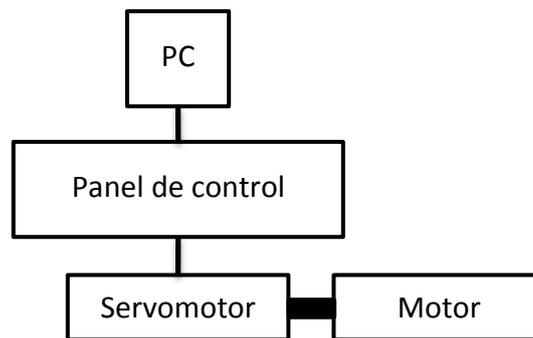


Figura 54: Esquema de la instalación

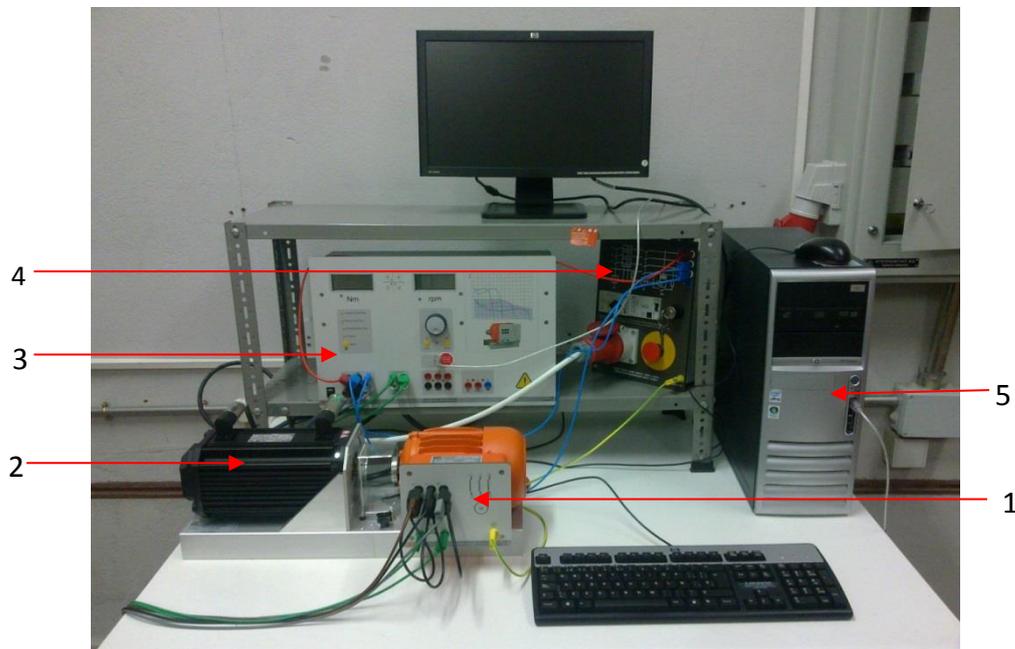


Figura 55: Imagen de la instalación

Los componentes señalados en las figuras 54 y 55 son:

1. Motor trifásico conectado en configuración Delta (Δ).
2. Servomotor.

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

3. Panel de Control.
4. Fuente de Alimentación.
5. Ordenador con software específico para el control de la máquina y la recogida de datos.

A continuación se detallan los elementos que se manejarán en el Panel de Control y en la Fuente de alimentación (Fig 56 y 57).

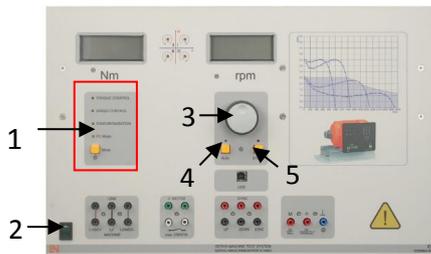


Figura 56: Panel de control

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1: Selección de modo | 3: Ruleta de selección |
| 2: Botón de encendido | 4: Botón RUN |
| | 5: Botón STOP |

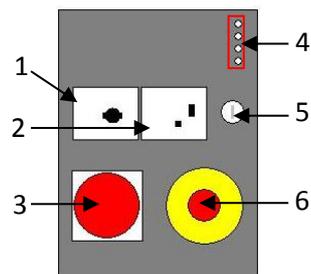


Figura 57: Fuente de alimentación

- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1: Interruptor 1 | 4: Alimentación a motor |
| 2: Interruptor 2 | 5: Llave |
| 3: Alimentación a Panel de Control | 6: Botón de parada de emergencia |

En esta práctica se realizará la caracterización de un motor. Posteriormente, y apoyándose en los datos obtenidos en la caracterización, se realizará una simulación de un volante de inercia y se comparará con su modelo teórico.

Para evitar problemas, el arranque y la parada de la instalación deberán realizarse como aparece a continuación:

Proceso de arranque

1. Verificar que el botón de encendido del Panel de Control está en posición de apagado.
2. Poner el interruptor 1 en apagado y el interruptor 2 en encendido.
3. Girar la llave.
4. Manteniendo la llave girada, poner el interruptor 1 en posición de encendido. El motor arrancará.
5. Soltar la llave. Esperar 2 minutos y encender el Panel de Control con el botón de arranque.

Proceso de parada

1. Salir del programa ActiveServo, si este estuviera abierto.
2. Poner el botón de encendido del Panel de Control en posición de apagado.
3. Poner el interruptor 1 de la fuente de alimentación en posición de apagado. El motor dejará de girar.

5.2.2. Toma de datos

1. Arrancar el equipo tal y como se indica en la introducción.
2. Situarse en el modo “Speed Control” y pulsar el botón RUN.
3. Establecer la velocidad del motor en 2500 rpm. Mantenerlo así hasta que el par descienda a 1,97 Nm.
4. Pulsar el botón STOP del Panel de Control. Seguidamente, abrir el archivo “Práctica.acts”, el cual se encuentra en el escritorio. Arrancará el programa ActiveServo con las configuraciones necesarias ya cargadas. El Panel de Control pasará automáticamente a modo “PC Mode”.
5. Asegurarse que el programa se encuentra en el modo “Características del motor” (figura 58). Pulsar el botón RUN del Panel de Control. Hacer clic en Inicio/Parada (Fig 59) o pulsar F5 en el teclado. El servomotor arrancará.

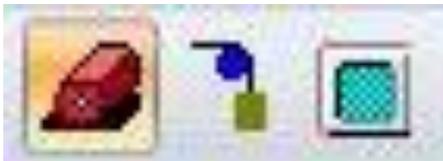


Figura 58: Modo Características del motor seleccionado



Figura 59: Botón Inicio/Parada

6. Para comenzar la toma de datos, hacer clic en el botón “Editar rampa” (Fig 60) o pulsar F6 en el teclado.



Figura 60: Botón Editar rampa

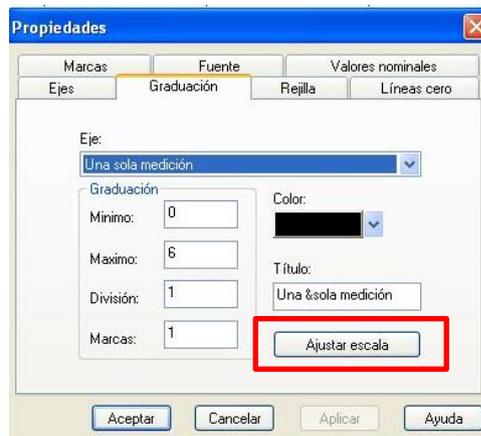


Figura 61: Ajustar escala

7. Una vez concluida la toma de datos, pulsar el botón STOP en el Panel de Control para parar el servomotor.
8. Para ajustar los ejes de la gráfica a los datos tomados, hacer doble clic en la gráfica. Ir a la pestaña Graduación y hacer clic en el botón Ajustar escala. Las escalas se adaptarán a los datos tomados (Fig 61).
9. Para trasladar los datos a un archivo de texto, ir a Archivo\Exportar. Seleccionar el formato "Valores de medida como texto". En el apartado Destino marcar Archivo (Fig 62). El nombre que se le dé al archivo debe terminar en ".txt".



Figura 62: Exportar datos



Figura 63: Botón Borrar

10. Una vez exportados los datos, se pueden borrar del programa. Para ello, hacer clic en el botón Borrar (Fig 63).
11. Si se desea realizar una nueva toma de datos, salir del programa y repetir desde el paso 2.



Figura 64: Modo Diagrama Temporal seleccionado



Figura 65: Momento de inercia y tiempo de medición

12. A continuación se realizará la simulación del volante de inercia. Seleccionar el modo Diagrama Temporal (Fig 64). Arriba a la izquierda del programa aparecerán los datos mostrados en la figura 65. Si no es así, hacer clic en Ajustes\Máquina de carga y seleccionar Volante de Inercia.
13. Introducir el valor 100 para el momento de inercia en el campo señalado en la figura 65. El valor introducido no corresponde a ninguna unidad real, por lo que habrá que determinar su magnitud. Elegir un tiempo de medición de 50 segundos
14. Hacer clic en el botón Iniciar/Detener osciloscopio (Fig 66).



Figura 66: Botón Iniciar/Detener osciloscopio

15. Pulsar el botón RUN del cuadro de control y hacer clic en el botón Inicio/Parada (Fig 59) o pulsar F5. Comenzará la simulación.
16. Cuando el motor alcance una velocidad superior a 2970 rpm, finalizar la toma de datos pulsando el botón STOP o haciendo clic en el botón Inicio/Parada (Fig 59).
17. Exportar los datos tal y como se indicó en el paso 9, teniendo cuidado de dar un nuevo nombre al archivo para no sobrescribir el anterior.

5.2.3. Memoria de resultados

Presentar los siguientes resultados, realizando los cálculos en Excel. Comentar los resultados.

Caracterización del motor

- 1) Presentar los valores de velocidad angular, par, tensión, intensidad y factor de potencia en una tabla.
- 2) A partir de estos datos, calcular la potencia en el eje, la potencia consumida y el rendimiento del motor para cada velocidad de giro. Recordar que la expresión para calcular la potencia consumida en un motor trifásico viene dada por la ecuación 24. Comparar con las características nominales, localizadas en la placa de características del motor.

$$\dot{W}_{consumida} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \quad (24)$$

- 3) Representar en una gráfica el par, la potencia en eje y el rendimiento en función de la velocidad de giro.

Simulación de un volante de inercia

- 1) Calcular el valor del momento de inercia utilizado en la simulación en unidades del Sistema Internacional. Para ello, tomar los datos comprendidos entre 500 y 1500 rpm. Calcular el momento de inercia para cada serie de datos, y hacer la media de todos los resultados. La aceleración angular se puede calcular con la ecuación 25.

$$\alpha(i) = \frac{\omega(i) - \omega(i - 1)}{t(i) - t(i - 1)} \quad (25)$$

- 2) Con el valor de I calculado, realizar el modelo teórico de aceleración del volante de inercia con los datos medidos en la caracterización del motor. Calcular el tiempo necesario para alcanzar cada velocidad medida. Para realizar las integrales, utilizar la regla del Trapecio (Ec 26). ¿Cuánto tiempo tarda el motor en alcanzar el 90 % de su velocidad síncrona? ¿Y el 99 %?

$$\int_a^b f(x)dx \cong (b - a) \frac{f(a) + f(b)}{2} \quad (26)$$

- 3) Representar en una gráfica los tiempos calculados en el apartado 2 junto con los datos obtenidos en la simulación del volante de inercia. ¿A que pueden deberse las diferencias entre ambos?

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

6. Conclusiones y líneas futuras de actuación

6.1. Conclusiones generales

- La temperatura tiene una gran influencia en la curva característica de un motor eléctrico. Se recomienda realizar los ensayos con el motor caliente.
- Para obtener la curva característica en el motor con el que se ha trabajado en este TFG, sólo es necesario introducir los datos del motor y las características de la rampa.
- Es posible simular un volante de inercia con un servomotor.
- Se puede modelar matemáticamente el comportamiento de un motor que acelera un volante de inercia tomando únicamente como datos la Curva Característica del motor y el momento de inercia del volante.
- El modelo se aproxima más a los ensayos si se utilizan el par medido durante el ensayo en lugar del par obtenido en la caracterización del motor.

6.2. Líneas futuras de actuación

En vista a futuros estudios, se recomienda realizar la instalación de un interruptor al motor. Esto permitiría realizar ensayos de frenado durante la simulación del volante de inercia.

Otra posible línea de actuación sería el estudiar la simulación de cualquiera de las otras cargas que tiene incorporadas el programa.

Por último, si se sustituyese el motor ensayado por un motor en el que se pudiera controlar la temperatura de su bobinado, sería posible obtener curvas características en función de la temperatura.

Determinación experimental de la curva característica de un motor eléctrico

7. Bibliografía

7.1.Libros, manuales y apuntes

- [1]: Melgar Bachiller, Andrés (2014). Apuntes de la asignatura *Motores de combustión interna alternativos*. Capítulo Ensayos.
- [2]: Payri, F. & J. M. Desantes (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial UPV.
- [3]: Wildi, Theodore (2006). *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. Editorial Pearson.
- [4]: Chauprade, R. & Milsant, F. (1983). *Control electrónico de los motores de corriente alterna*. Editorial Gustavo Gili.
- [5]: Lenze (2014): *Catálogo Servomotores asíncronos MCA Lenze*.
- [6]: Boldea, I. & Nasar, S. A. (1998). *Electric Drives*. Editorial CRC Press.
- [7]: Guevara Vicuña, Cristián (2008). *Métodos prácticos para lograr ahorros de energía eléctrica*. Editorial EMB.

7.2.Artículos

- [8]: Armando, E.; Villata, F.; Guglielmi, P. (2014). *Electric Loss Measurement Technique for Synchronous PM Brushless Machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, Nº 8.
- [9]: Mukherjee, S. ; Hoft, R.G. ; McCormick, J.A (1990). *Digital measurements of the efficiency of inverter-induction machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 26, Nº 5.

7.3.Páginas web

- [10]: Web 1: <http://www.forosdeelectronica.com/imagdoc/encoder21.gif>

[11]: Web 2:

http://www.parkermotion.com/dmxreadyv2/blogmanager/app_engine/assets/images/resolver.gif