



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

BANCO DE ENSAYOS PARA MOTORES ELÉCTRICOS EMPLEANDO UN FRENO DE HISTÉRESIS.

MEMORIA

Autor:

Santiago Alberto Ríos Vivanco

Directores:

Juan Antonio Tejero Gómez

Antonio Pardina Carrera

Grado en Ingeniería Eléctrica - Universidad de Zaragoza

2022-2023

Banco de ensayos para motores eléctricos empleando un freno de histéresis

Resumen

En este trabajo de fin de grado se presenta el diseño, construcción e implementación del software correspondiente para desarrollar un banco de ensayos para motores eléctricos. El objetivo principal de esta bancada será realizar ensayos en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza, con el propósito de aprender y comprender en profundidad el funcionamiento de los motores en un entorno educativo.

En un principio, se desarrolla el banco de ensayos para un motor asíncrono trifásico que se encuentra acoplado a un freno de histéresis. Posteriormente, este banco también podrá ensayar cualquier tipo de motor de baja potencia ajustando el acoplamiento.

Este banco de ensayos servirá como complemento práctico para aquellas asignaturas en las que se imparta docencia de máquinas eléctricas, de modo que ayudará a los estudiantes a conocer y visualizar características de los motores ensayados, tales como: Curvas de par-velocidad, potencias y rendimientos con la finalidad de analizar estos datos posteriormente.

En este caso concreto, se ha utilizado para controlar la operación y funcionamiento del banco de ensayos un Arduino de la familia UNO-R3, que además de ofrecer las cualidades para desarrollar este proyecto está extendido ampliamente en el ámbito tecnológico.

Durante este proyecto se han empleado conocimientos adquiridos en asignaturas del grado de ingeniería eléctrica tales como: Electricidad, Magnetismo, Electrónica, Informática y Programación.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Presentación del problema.....	1
1.3. Objetivos del proyecto.....	1
1.4. Antecedentes	2
1.4.1. Banco de pruebas para máquinas eléctricas “De Lorenzo”	2
1.4.2. Banco de pruebas para máquinas eléctricas “Magtrol”	3
1.4.3. Freno de histéresis “Magtrol”	3
2. Descripción de componentes.....	4
2.1. Componentes externos	4
2.1.1. Autotransformador	4
2.1.2. Analizador de redes.....	4
2.1.3. Motor	5
2.1.4. Arduino.....	5
2.1.5. Fuente de alimentación	6
2.2. Componentes propios	6
2.2.1. Acople de eje.....	6
2.2.2. Freno de histéresis	7
2.2.3. Celda de carga	8
2.2.4. Encoder/optoacoplador.....	8
3. Desarrollo	9
3.1. Diseño de soporte para los motores a ensayar	9
3.2. Diseño de etapas	9
3.2.1. Control de par.....	9
3.2.1.1. Diseño mecánico.....	10
3.2.1.2. Diseño eléctrico.....	10
3.2.2. Control de velocidad	11
3.2.2.1. Diseño mecánico.....	11
3.2.2.2. Diseño eléctrico.....	11
3.2.3. Lectura de magnitudes eléctricas	13
3.2.3.1. Diseño eléctrico.....	13
3.2.3.1.1. Lectura de tensión	13

3.2.3.1.2. Lectura de Intensidad	18
3.2.3.1.3. Potencia	21
3.3. Programación.....	21
3.3.1. Control de par.....	21
3.3.1.1. Calibración de la báscula	21
3.3.1.2. Programa final de la báscula	22
3.3.2. Control de velocidad.....	22
3.3.3. Lectura de magnitudes eléctricas	23
3.3.3.1. Lectura de tensión.....	23
3.3.3.1.1. Conversión de una señal analógica a digital	23
3.3.3.1.2. Teorema de Nyquist	24
3.3.3.1.3. Valor eficaz de la tensión.....	26
3.3.3.1.4. Lectura de intensidad	27
3.3.3.1.5. Potencia	28
3.4. Adaptación y aplicación de etapas al banco de ensayos.....	28
3.4.1. Control de par.....	29
3.4.1.1. Limitación del sistema	30
3.4.2. Control de velocidad.....	31
3.4.3. Lectura de magnitudes eléctricas	32
4. Ensayo y verificación.....	32
4.1. Caracterización del freno de histéresis.....	33
4.2. Curva par-velocidad.....	34
4.3. Influencia de la tensión de alimentación.....	35
4.4. Ajuste del ensayo.....	37
4.5. Ensayo.....	38
4.6. Resultado.....	39
5. Conclusiones.....	40
6. Bibliografía y lugares de búsqueda.....	41

1. Introducción

1.1. Motivación

Al encontrarme cursando el último año de carrera y por consiguiente tener que desarrollar un trabajo de fin de grado, buscaba un tipo de proyecto que no simplemente se quedara expuesto sobre el papel, sino, que englobara una parte práctica y/o experimental, que además me permitiera emplear y demostrar los conocimientos obtenidos a lo largo de este periodo universitario.

Sin duda, el tema que me fue expuesto por parte del director de este proyecto me atrajo inmediatamente. Y aún más cuando me trasladaron la posibilidad de que este proyecto se podría adecuar para desarrollar un guion de prácticas de una de las asignaturas impartidas en la escuela.

1.2. Presentación del problema

Se ha realizado el Trabajo de Fin de Grado: Diseño e implementación de un banco de ensayos para motores eléctricos empleando un freno por histéresis regulado mediante una fuente de corriente continua.

El objeto del proyecto persigue fines principalmente didácticos que ayuden a la comprensión de conocimientos teóricos mediante el análisis de los datos obtenidos durante el ensayo de una forma práctica y tangible.

1.3. Objetivos del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo principal el diseño e implementación de un banco de ensayos a partir de un sistema controlado por un microcontrolador, que permita obtener las características mecánicas y eléctricas de motores eléctricos (par, velocidad, potencia mecánica y eléctrica, factor de potencia, rendimiento).

Se puede describir el desarrollo del proyecto en cuatro objetivos secundarios que están relacionados directamente con las etapas de ejecución:

1. Diseñar y desarrollar las etapas electrónicas para el control de par, velocidad y de magnitudes eléctricas (tensión, intensidad y potencia).
2. Programar el código ejecutable del microcontrolador que permita obtener los parámetros de las etapas electrónicas.
3. Adaptar y aplicar el código programado al conjunto del banco existente en el laboratorio para el desarrollo de pruebas de experimentación.
4. Comprobar y verificar los resultados obtenidos.

1.4. Antecedentes

Las máquinas eléctricas en forma de generadores producen cantidades significativas de energía eléctrica dentro del ámbito industrial y doméstico, y un elevado porcentaje de esta es consumida por motores eléctricos, cualquier mejora en la eficiencia de construcción de las máquinas eléctricas se refleja en una reducción significativa en el uso y consumo de energía y por lo tanto, en la reducción de emisión de contaminantes. Por ello existe la necesidad de conocer el funcionamiento y las características de las máquinas eléctricas que empleamos principalmente en el ámbito industrial ya sean de corriente alterna o corriente continua, asíncrona o síncrona, motores o generadores.

En la actualidad existen bancos de ensayos que se comercializan a nivel industrial, el banco desarrollado en este proyecto busca acercarse a estos bancos de pruebas que generalmente son prácticamente automáticos y controlados por ordenador. A continuación se muestran algunos ejemplos:

1.4.1. Banco de pruebas para máquinas eléctricas “De Lorenzo”



Figura 1. Banco de ensayos, fabricante: “De Lorenzo”

El DL EM-TEST es un banco multipropósito para el estudio y caracterización de las máquinas eléctricas utilizando un enfoque de prueba automatizado.

1.4.2. Banco de pruebas para máquinas eléctricas “Magtrol”



Figura 2. Banco de ensayos, fabricante: “Magtrol”

El sistema de prueba de acoplamiento de Magtrol es un sistema de prueba independiente diseñado para controlar y medir el par de detención, el par de acoplamiento y el par de fricción.

1.4.3. Freno de histéresis “Magtrol”



Figura 3. Freno de histéresis, fabricante: “Magtrol”

Con los dinamómetros de motor de Magtrol, los fabricantes y usuarios de motores pequeños pueden probar motores de alto rendimiento.

2. Descripción de componentes

2.1. Componentes externos

Al ser un proyecto de tipo experimental se ha tenido que adecuar y adaptar alguno de los mecanismos que conforman el banco de pruebas, además se emplean elementos externos para conseguir su funcionamiento.

2.1.1. Autotransformador



Figura 4. Autotransformador disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas.

Se ha utilizado un autotransformador para conseguir ensayar los motores asíncronos trifásicos en distintos regímenes de tensión, además de su tensión nominal.

2.1.2. Analizador de redes



Figura 5. Analizador de redes

Posterior al autotransformador se ha colocado un analizador de redes que nos permitirá conocer magnitudes como: voltaje, intensidad, potencia tanto activa como reactiva, factor de potencia, de modo que podemos comprobar los resultados obtenidos a través de los ensayos del banco de pruebas. Se trata de un analizador de la marca

Circuito mecanizado en una caja estanca con conectores de tipo banana para facilitar las conexiones.

2.1.3. Motor



Figura 6. Placa de características del motor utilizado

El motor disponible actualmente para realizar los ensayos en el banco es un motor asíncrono trifásico de la marca DAVI, conectado en triángulo, por tanto, sus devanados reciben una tensión alterna de 230 V, el arranque de este motor se hace a través del autotransformador regulable mencionado anteriormente. Se trata de un motor de baja potencia ($2\text{ CV} = 1,47\text{ kW}$), al estar conectado en triángulo por sus devanados circulará una corriente igual a 6,2 A cuando trabaje en régimen nominal con un $\cos\varphi = 0,81$.

2.1.4. Arduino



Figura 7. Arduino UNO

Es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. Cuenta con una serie de entradas/salidas analógicas y digitales con las que interactuar con el entorno, y se programa en un lenguaje basado en Processing, una variante de Java y C++, también de software libre.

2.1.5. Fuente de alimentación



Figura 8. Fuente de alimentación CC.

Para el control de la corriente que recorre el freno de histéresis se emplea una fuente de tensión regulable disponible en el laboratorio.

2.2. Componentes propios

2.2.1. Acople de eje



Figura 9. Acople de eje

Para anclar el eje del motor al eje del freno de histéresis se emplea un acople del tipo: *SRL – 75* del fabricante Industrias ALBERT. Este acoplamiento permite conectar los ejes giratorios del motor y del freno absorbiendo grados de desalineación y errores de montaje entre los dos ejes, permite también una rotación suave y proporciona flexibilidad mecánica.

2.2.2. Freno de histéresis

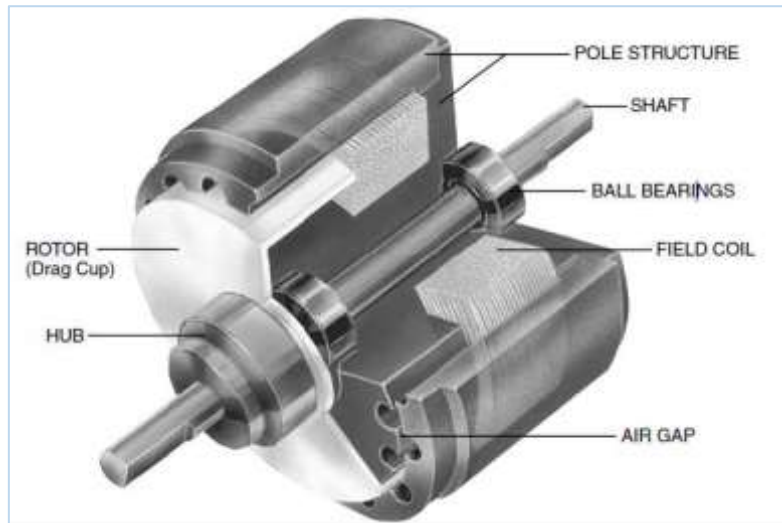


Figura 10. Freno de histéresis

Se trata de un freno de la marca Magtrol, de la serie HB/MHB, Ideal para aplicaciones de bajo par y alta velocidad. El efecto de histéresis en el magnetismo se aplica al control de par mediante el uso de dos componentes básicos: una estructura de polos reticulada y un conjunto rotor/eje de acero especial, unidos pero sin contacto físico.

Hasta que se activa la bobina de campo, la copa de arrastre puede girar libremente sobre la bola de arrastre. Cuando una fuerza magnetizadora de una bobina de campo o de un imán se aplica a la estructura de polos, el entrehierro se convierte en un campo de flujo. El rotor es frenado magnéticamente, proporcionando una acción de frenado entre la estructura de polos y el rotor. Dado que el par se produce estrictamente a través de un entrehierro sin utilizar fuerzas de fricción o fuerzas de cizallamiento, los frenos de histéresis Magtrol proporcionan cargas de par absolutamente suaves, cargas de par infinitamente controlables, independientes de la velocidad, y funcionan silenciosamente sin contacto físico entre los componentes.

2.2.3. Celda de carga

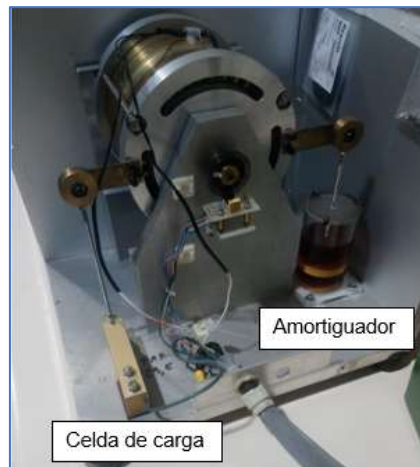


Figura 11. Celda de carga dispuesta en el banco de ensayos

El control de par en el banco de ensayos se ha realizado mediante una celda de carga que es un transductor capaz de convertir una fuerza en una señal eléctrica, esto lo hace a través de una o más galgas internas que posee configuradas en un puente Wheatstone, la celda que se empleará en este proyecto tiene valor nominal de 5 kg , se encuentra anclada mecánicamente a un extremo de la carcasa del freno de histéresis, por tanto, cuando el freno empiece a desarrollar fuerza para intentar detener el eje del motor, en su carcasa se generará un movimiento que se extenderá mediante el anclaje mecánico sobre la galga. Para compensar o evitar vibraciones por esfuerzos repentinos, en el extremo opuesto a donde se encuentra anclada la galga se acopla mecánicamente un amortiguador de aceite.

2.2.4. Encoder/optoacoplador



Figura 12. Encoder y optoacoplador

Para el control de velocidad final en el eje se ha instalado un encoder de 60 ranuras que pasa a través de un optoacoplador, de modo que en cada vuelta se producirán 60 conmutaciones del fototransistor.

3. Desarrollo

Las fases de desarrollo de este proyecto están relacionadas directamente con los objetivos secundarios expuestos en el apartado 1.3 de esta memoria.

3.1. Diseño de soporte para los motores a ensayar

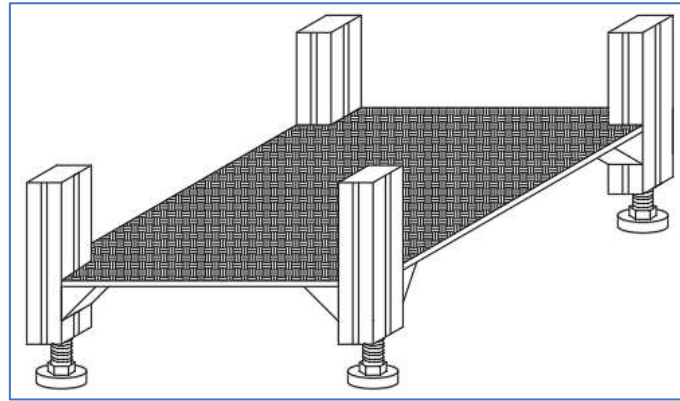


Figura 13. Soporte para motores a ensayar

Previo al diseño de las etapas electrónicas se ha realizado el soporte para ubicar y anclar los motores a ensayar, se ha fabricado mediante un sistema de perfiles ranurados de aluminio del fabricante RS PRO, este tipo de perfil admite una serie de accesorios que permiten llevar a cabo montajes estructurales complejos de una forma sencilla, en este caso se han empleado como accesorios: tapas finales y patas regulables para facilitar la nivelación y alineación del motor y así evitar vibraciones.

Para completar la estructura se ha mecanizado una chapa galvanizada de tal forma, que permita el anclaje de motores de baja potencia.

Se adjunta un esquema estructural en el documento de anexo.

3.2. Diseño de etapas

3.2.1. Control de par

Con el control de par como objetivo y teniendo como herramienta una celda de carga o galga extensiométrica para conocer la fuerza que ejerce el freno de histéresis sobre el eje del motor se ha modelado esta parte del proyecto partiendo de la idea remota de que se trata de una báscula a la cual se le aplica un peso.

3.2.1.1. Diseño mecánico

Los primeros ensayos de la báscula se han realizado con una plataforma mecanizada para permitir colocar objetos de peso conocido sobre la celda de carga y poder verificar su correcto funcionamiento (figura 14).

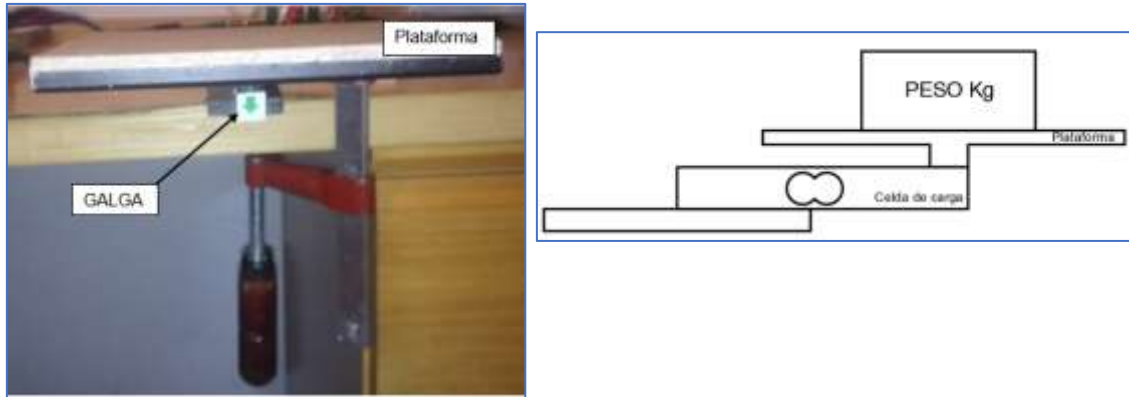


Figura 14. Conjunto plataforma y celda de carga

3.2.1.2. Diseño eléctrico

Con el fin de transmitir la señal eléctrica desde la celda de carga hacia el microcontrolador es necesario emplear un módulo externo que permite leer el peso de manera sencilla. Este módulo recibe la lectura del puente de Wheatstone formado por la celda de carga convirtiendo la lectura analógica a digital con su conversor A/D interno de 24 bits. Se trata del transmisor de celda de carga **HX711**. Se comunica con el microcontrolador mediante 2 pines (Clock y Data).

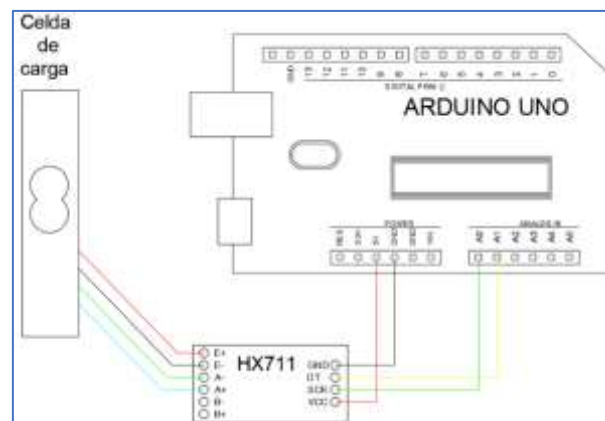


Figura 15. Conexiones de transmisor HX711

3.2.2. Control de velocidad

La velocidad de giro del motor se ha controlado colocando un encoder sobre el eje del freno de histéresis.

La modelización del control de velocidad se ha desarrollado mediante un contador de pulsos, los cuales, serán provocados por las ranuras del encoder al atravesar el haz luminoso del sensor fotoeléctrico.

3.2.2.1. Diseño mecánico

Con la finalidad de analizar el comportamiento optimizado del encoder junto con el sensor, en esta etapa se han fabricado dos encoder; el primero con una única ranura y el segundo con cuatro ranuras, para colocarlos sobre el eje del freno de histéresis y realizar los primeros ensayos.

3.2.2.2. Diseño eléctrico

En cuanto a la parte eléctrica se ha dispuesto un sensor óptico el cual combina un LED emisor y un fototransistor que detecta cuando el haz de luz es interrumpido. Este sensor óptico nos servirá como base para la medición de velocidad, combinado con un temporizador y un objeto adecuado que provoque opacidad alterna y transparencia.

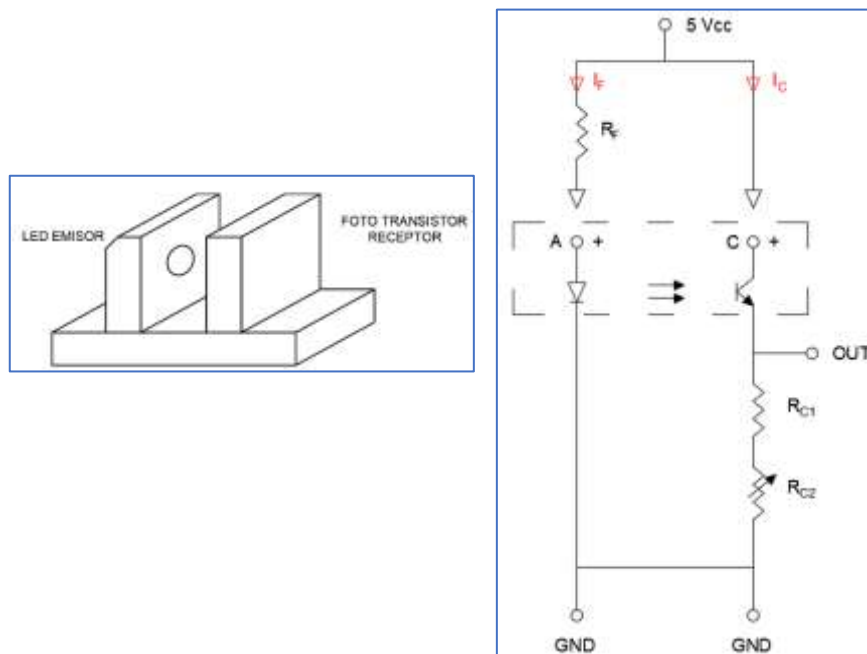


Figura 16. Sensor fotoeléctrico y circuito electrónico

Empleando el “datasheet” del sensor facilitado por el fabricante se obtienen sus parámetros de funcionamiento y a partir de estos se calcularán los componentes resistivos del circuito.

LED emisor			
Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
V_R	Tensión inversa máxima	6	V
I_F	Corriente directa máxima	60	mA
V_F	Caída de tensión directa para $I_F = 60$ mA	1,25 a 1,5	V

Fototransistor detector			
Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
V_{CEO}	Tensión colector-emisor	70	V
I_C	Corriente de colector	100	mA
P_C	Potencia de colector	150	mW

Tabla 1. Parámetros eléctricos de fotosensor

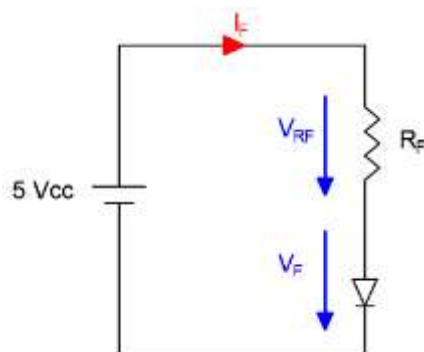
Cálculo de resistencias

Arduino ofrece dos niveles de tensión: 3,3 V y 5 V de corriente continua, en este caso se empleará una tensión de 5 V_{cc}.

Cuando el emisor se encuentra en funcionamiento, según el fabricante presenta una caída de tensión de entre 1,25 V y 1,5 V, se considera $V_F = 1,38$ V al tomar un valor intermedio.

La intensidad máxima que puede soportar el emisor debe ser menor a 60 mA.

Mediante el análisis de la siguiente malla se obtiene el valor de R_F



$$R_F = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} = \frac{5 - 1,38}{0,060} = 60,3 \, \Omega$$

Se opta por instalar una resistencia de **82 Ω** al ser un valor de resistencia comercial, en consecuencia la intensidad disminuirá.

$$I_F = \frac{V_{CC} - V_F}{R_F} = \frac{5 - 1,38}{82} = 44 \, \text{mA}$$

$$I_F = 44 \, \text{mA}$$

Conociendo este valor se consultan las curvas características facilitadas por el fabricante y se obtiene que para unas condiciones de trabajo normalizadas, a una corriente de emisor igual a 44 mA le corresponde una corriente de colector de ≈ 1 mA.

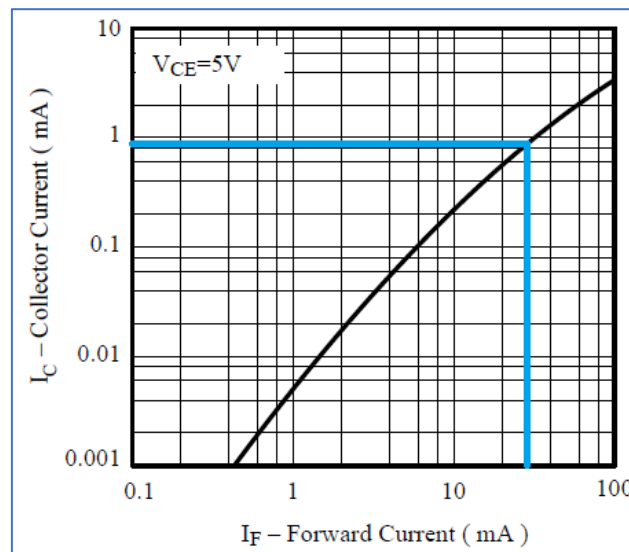


Figura 17: Intensidad de emisor frente a intensidad de colector

Para el cálculo de R_{C1} y R_{C2} se ha de considerar toda la tensión de entrada, con ello se tiene:

$$R_{C1} + R_{C2} > \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{5}{0,001} = 5000 \, \Omega$$

$$R_{C1} + R_{C2} > 5000 \, \Omega$$

Empleando las resistencias disponibles en el laboratorio se han instalado: una resistencia fija de valor 2,2 k Ω y una resistencia variable o potenciómetro de 5 k Ω .

$$R_{C1} = 2,2 \, k\Omega$$

$$R_{C2} = 5 \, k\Omega$$

3.2.3. Lectura de magnitudes eléctricas

3.2.3.1. Diseño eléctrico

Con el objetivo de medir las principales magnitudes eléctricas que confluyen durante el funcionamiento del banco de ensayos se han propuesto las etapas que se describen en los siguientes subapartados.

3.2.3.1.1. Lectura de tensión

La red de alimentación de los laboratorios es de 230/400 V a frecuencia de 50 Hz, tres fases con neutro. Con el propósito de medir la tensión durante el

funcionamiento del banco de ensayos se ha planteado monitorizar únicamente una de las fases de alimentación del motor, ya que se trata de una carga equilibrada, es decir, trabajar a 230 V con respecto a neutro para la medida de tensión.

Por otra parte, se debe analizar el rango de tensiones admisibles del microcontrolador, en este caso Arduino puede detectar o medir tensiones de tipo digital o analógico que estén comprendidas entre 0 y +5 V, siempre positivos, esto crea las siguientes necesidades:

1. Reducir el valor de pico de la tensión a medir por Arduino.
2. Desplazar la tensión alterna hacia valores que sean siempre positivos.
3. Que los valores obtenidos en el punto 2 se encuentren dentro del rango de tensiones admisibles de Arduino.

Dando respuesta a estas necesidades se han planteado sus correspondientes soluciones:

1. Emplear un transformador reductor.
2. Una vez reducida la componente de tensión alterna adicionarle un nivel de tensión continua, que permita desplazar la senoide hacia valores positivos.
3. Regular la tensión obtenida en el punto 2 mediante el empleo de divisores de tensión implementando elementos resistivos de valor fijo y/o variable.

Se propone el siguiente circuito (figura 18).

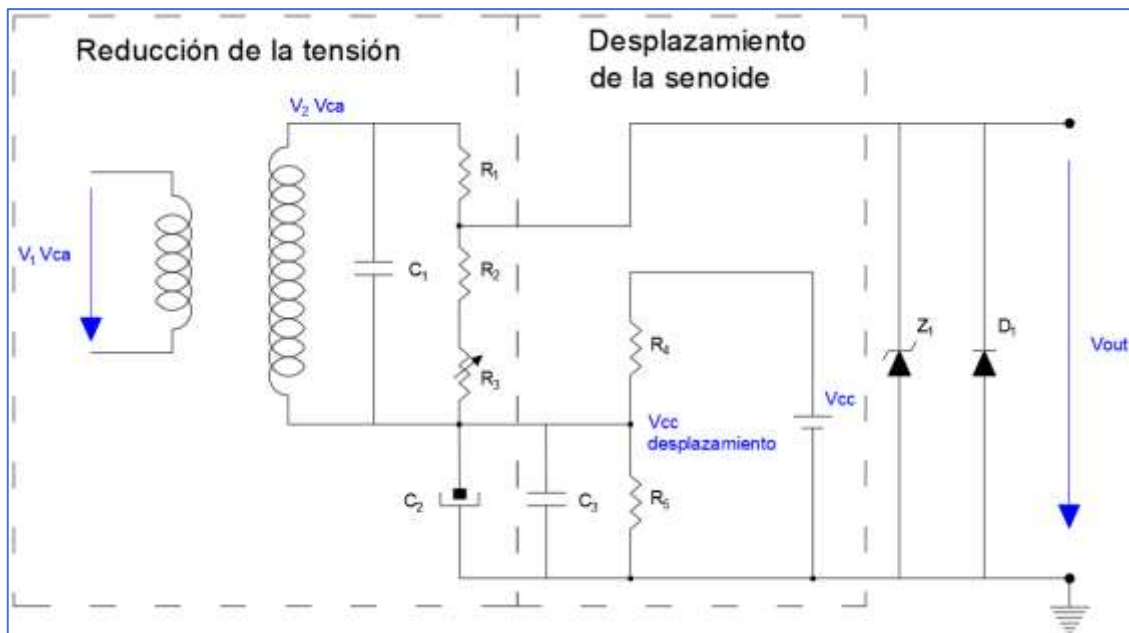


Figura 18. Circuito electrónico para medida de tensión

Cálculos:

Reducción de la tensión

Se toma medida real de la tensión de alimentación del laboratorio, obteniendo un valor de 228,3 V, como este valor puede variar se ha colocado un estabilizador de tensión.

Por otra parte, según el REBT se ha de considerar que puede existir una fluctuación del 7 % en los valores de tensión de la red de distribución eléctrica, por tanto V_1 de pico podría llegar a ser:

$$V_{1_pico} = 228,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 1.07 = 345,47 \text{ V} \rightarrow V_{1_pico} = \mathbf{345,47 \text{ V}}$$

Al conectar el transformador reductor disponible (230 V: 9 V) a la red de 228 V, se obtiene una tensión en el secundario de 14,17 V, la tensión de secundario es superior a la nominal ya que el transformador está trabajando en vacío, conocidos los valores tanto de primario como de secundario la relación de transformación del transformador empleado es:

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{228,3}{14,17} = 16,11 \text{ adimensional}$$

$$\mathbf{m = 16,11}$$

Por tanto, considerando la relación de transformación :

$$V_{2_pico} = \frac{V_{1_pico}}{m} = \frac{345,47}{16,11} = 21,44 \text{ V}$$

$$\mathbf{V_{2_pico} = 21,44 \text{ Vca}}$$

Se consideran las tensiones de pico porque se trata del caso más desfavorable para el diseño propuesto.

Cálculo de resistencias

Teniendo en cuenta el valor de tensión admisible del microcontrolador se propone realizar el cálculo de las resistencias para obtener una senoide de amplitud 2 V a una frecuencia de 50 Hz, con la finalidad de mantener alejada la señal de los rangos impuestos por el microcontrolador 0 y 5 V (Figura 19).

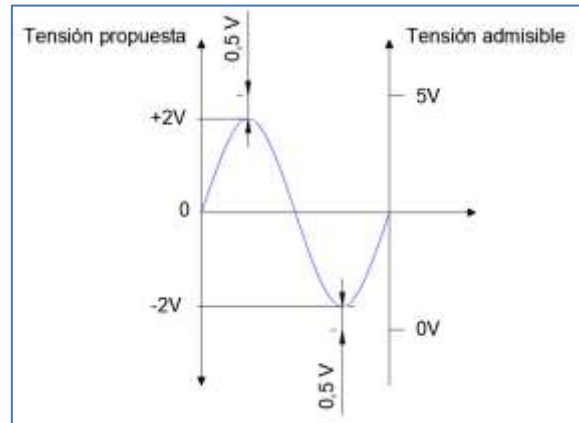


Figura 19. Tensión senoidal dentro del rango admisible

$$V_{2_pico} = V_{R1} + V_{R23} \rightarrow V_{R1} = V_{2_pico} - V_{R23}$$

$$V_{R1} = 21,44 - 2 = 19,44 \text{ V}$$

Si se tiene en cuenta la relación que existe en las magnitudes de V_{R1} y V_{R23} , V_{R1} es aproximadamente 10 veces mayor que V_{R23} , en consecuencia la relación entre las resistencias debe mantenerse. Al tomar valores de resistencias comerciales se ha dispuesto como punto de partida para R_1 una resistencia de $100 \text{ k}\Omega$, también con el propósito de limitar la intensidad que atraviesa el circuito.

$$R_1 = 100 \text{ k}\Omega$$

Aplicando un divisor de tensión se obtienen los valores de las resistencias de la primera rama, considerando que R_3 es un elemento resistivo variable y se empleará para regular la tensión, se calculará en conjunto R_2 y R_3 :

$$V_{R23} = V_{2_pico} \cdot \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} \rightarrow 2 \geq 21,44 \cdot \frac{R_{23}}{R_{23} + 100 \text{ k}}$$

$$R_{23} \leq 10,288 \text{ k}\Omega$$

Al emplear material disponible del laboratorio se han colocado resistencias de $8,2 \text{ k}\Omega$ para R_2 y un potenciómetro de $5 \text{ k}\Omega$ para R_3 .

$$R_2 = 8,2 \text{ k}\Omega \quad R_3 = 5 \text{ k}\Omega$$

Ajustando mediante el potenciómetro a $10,288 \text{ k}\Omega$, la relación de resistencias en el circuito reductor:

$$k_a = \frac{10,288 \text{ k}\Omega}{110,288 \text{ k}\Omega} = 0,0932830$$

$$V_{R23} = 21,44 \cdot k_a \approx 2 \text{ V}$$

Desplazamiento de la senoide a valores positivos

En búsqueda de desplazar la señal senoidal hacia valores positivos se ha propuesto aportar una tensión continua para conseguirlo. Para calcular el valor de esa tensión se seguirá considerando el rango de tensiones admisibles del microcontrolador, además de un nivel apropiado de seguridad, para este caso se ha tomado 0,5 V de rango de seguridad por tanto el nivel de tensión continua a aportar será 2,5 V.

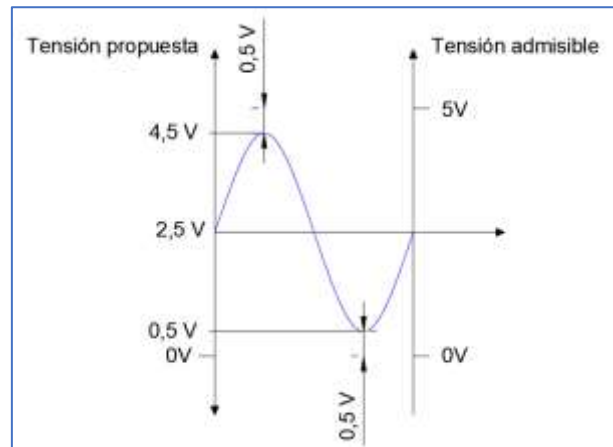


Figura 20. Senoide desplazada a valores positivos

Empleando una fuente de tensión continua de 5 V e incorporando un divisor de tensión que emplee dos resistencias de igual valor, $R_4 = R_5$, se obtiene el nivel de tensión continua propuesto, 2,5 V.

$$V_{R_4} = 5 \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_5} = 2,5 \text{ V}$$

Se ha tomado:

$$R_4 = R_5 = 10 \text{ k}\Omega$$

Comprobando la disipación de potencia en cada una de las resistencias propuestas todas ellas trabajan por debajo de 250 mW, por lo tanto, se seleccionan resistencias de potencia nominal de $\frac{1}{4}$ W.

Para reducir posibles interferencias de “ruido” se han colocado los condensadores multicapa de filtrado C_1 y C_3 :

$$C_1 = C_3 = 100 \text{ nF}$$

En el caso de C_2 , se trata de un condensador electrolítico, que ante micro cortes de tensión, garantizaría la estabilidad de esta en el caso de que la etapa de

desplazamiento de la senoide se alimentara mediante una fuente de tensión externa distinta a la del Arduino.

Para limitar la tensión en la entrada analógica del microcontrolador en caso de que produzca una sobretensión, se ha dispuesto un diodo Zener (Z_1) de 5,6 V. En este caso si se produjera una tensión superior a la admisible de la entrada analógica, el diodo Zener entrará en conducción recortando la misma.

Por último, si llegara a producirse una tensión negativa, el diodo D_1 entrará en conducción recortándola.

Todos estos elementos actúan solamente como protecciones para el circuito electrónico propuesto.

Una vez calculados los componentes del circuito se realiza su montaje de sobre una protoboard, se comprueban las conexiones realizadas y con la ayuda de un polímetro de la marca FLUKE, modelo 177 se verifica su correcto funcionamiento.

Con la ayuda de un osciloscopio se comprueba que en todo momento la tensión a la salida de la etapa se encuentra en valores positivos.

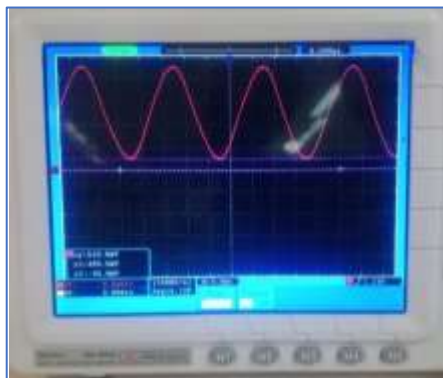


Figura 21. valor mínimo de tensión senoidal:
520 mV.

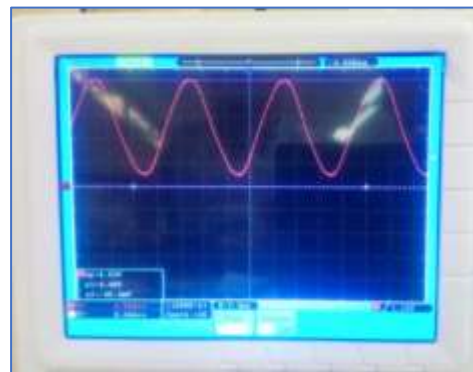


Figura 22. valor máximo de tensión senoidal
4,52 V

3.2.3.1.2. Lectura de Intensidad

La medida de intensidad tiene mucha similitud con la medida de tensión, habrá que añadir un transformador de intensidad conectado en paralelo a una resistencia (R_u) de un valor aproximado al que indica el fabricante del transformador en sus especificaciones, las cuales se pueden encontrar en el documento anexo.

Se propone el siguiente circuito:

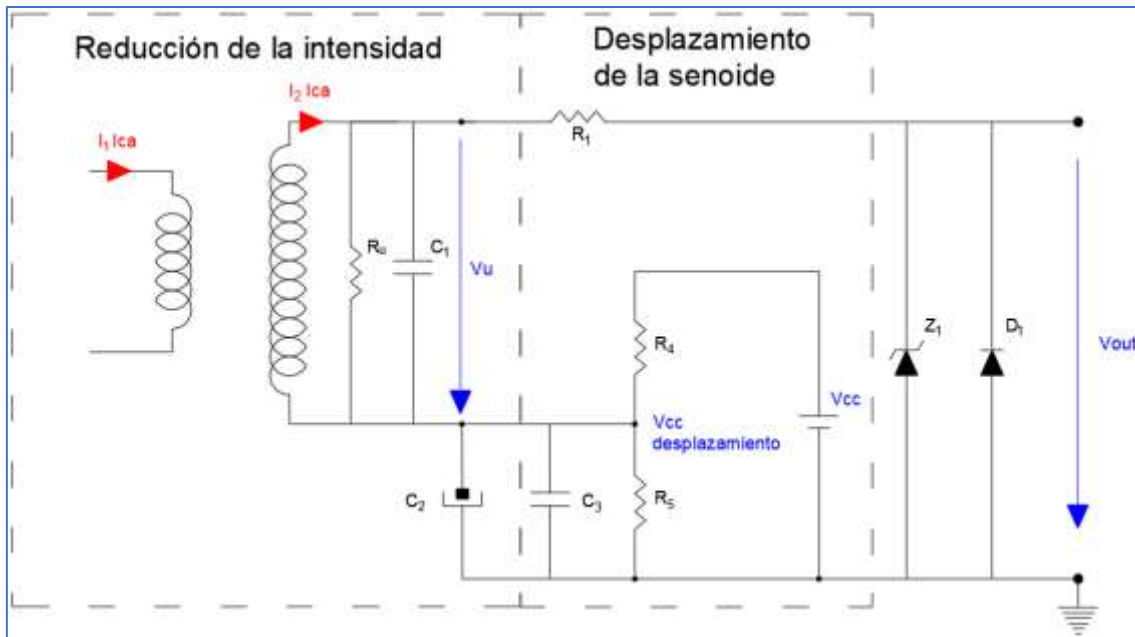


Figura 23. Circuito electrónico para medida de intensidad

Según el fabricante el transformador de intensidad para el modelo empleado: TA152023 25/0.05 A, recomienda conectar una resistencia en paralelo al transformador de valor $R_{u_{fab}} = 40\Omega$ para obtener una tensión de salida: $V_{u_{fab}} = 2V$, cuando por el primario circulen 25 A.

En este caso, se ha utilizado una resistencia normalizada de 39Ω de 1% de precisión. Por tanto:

$$R_{u_{empleada}} = R_u = 39\Omega \rightarrow V_u = 1,95V$$

Al igual que en el circuito electrónico de medida de tensión se ha desplazado la senoide a valores positivos mediante la inyección de un valor de 2,5 V de corriente continua.

Los elementos de protección indicados en el esquema anterior poseen las mismas características que los empleados en el circuito de medida de tensión.

Cálculos:

Según se expone en el apartado 3.4.1.1 de este documento, el banco de ensayos presenta una limitación impuesta por la celda de carga, ya que la misma admite un peso máximo de 5 kg, por tanto, el par máximo que puede soportar la celda será:

$$M_{m\acute{a}x_{celda}} = 5\text{ kg} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0,12\text{ m} = 5,88\text{ Nm}$$

$$\mathbf{M_{m\acute{a}x_{celda}} = 5,88\text{ Nm}}$$

La potencia mecánica desarrollada por el motor es proporcional al par y a la velocidad de giro del eje.

$$P = M \cdot \omega$$

$$P_{m\acute{a}x_mec} = M_{m\acute{a}x_celda} \cdot \omega = 5,88 \cdot \frac{n}{60} \cdot 2\pi \underset{n=3000}{=} 1847,5 \text{ kW}$$

$$P_{m\acute{a}x_mec} = 1847,5 \text{ kW}$$

Tomando como referencia datos de catálogos de fabricantes de motores de potencias nominales similares, se han extraído parámetros orientativos indicados en la tabla 2.

Motores III, 230 V de 1,5kW hasta 2,2kW		
n [rpm]	Rendimiento	Cosφ
3000	0,85	0,87
1500	0,86	0,8
1000	0,86	0,8
750	0,86	0,8

Tabla 2: Tabla modificada a partir de características de varios motores

La tabla anterior es un resumen de las tablas disponibles en el anexo.

Con estos datos se ha calculado la mayor intensidad absorbida que podría llegar a leer la etapa propuesta en el caso más desfavorable.

$$P = \sqrt{3} V I \cos\varphi$$

Por tanto,

$$I_{m\acute{a}x_abs} = \frac{\frac{P_{m\acute{a}x_mec}}{\eta}}{\sqrt{3} V \cos\varphi} = \frac{\frac{1847,5}{0,85}}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 0,87} = 6,27 \text{ A}$$

Con el valor de esta intensidad eficaz calculada, se determina su valor de pico.

En este caso disponemos de un transformador de 25 A de corriente nominal y la máxima intensidad a medir es de 6.27 A.

Para obtener la máxima resolución en la medida, es conveniente realizar un arrollamiento en el primario del transformador. El número de vueltas optimo se justifica a continuación:

$$\frac{I_{N_primario}}{I_{N_secundario}} = n^{\circ} \text{ de vueltas} \rightarrow \frac{25}{6,27 \cdot \sqrt{2}} = 2,81 \approx 3 \rightarrow \mathbf{n^{\circ} \text{ de vueltas} = 3}$$

Así cuando durante un ensayo el motor absorba una intensidad de pico de $6,27 \cdot \sqrt{2}$ amperios, el transformador conectado será atravesado por:

$$6,27 \cdot \sqrt{2} \cdot 3 = 26,6 \text{ A}$$

Se han realizado ensayos tanto con cargas resistivas como con cargas inductivas obteniendo resultados positivos.

3.2.3.1.3. Potencia

La potencia eléctrica absorbida se obtendrá a partir de las etapas de lectura de tensión y de corriente.

3.3. Programación

3.3.1. Control de par

La primera propuesta es codificar el control de par, como ya se ha mencionado está basado en la idea de una báscula en la que se deposita un peso.

Para el desarrollo de este código se debe implementar el uso de una de las **librerías** disponibles en la plataforma Arduino, en este caso la correspondiente al transmisor de celda de carga **HX711**.

3.3.1.1. Calibración de la báscula

Como primer paso se ha de calibrar la báscula que es básicamente hallar el valor de la escala que se usará; es decir hallar el factor de conversión que permita a partir de un valor de lectura obtener un valor en unidades de peso. **La escala es diferente para cada celda** y cambia de acuerdo con: la forma de instalar, el peso máximo o el modelo de celda de carga, incluso así se trata del mismo modelo de celdas no necesariamente tienen el mismo valor de escala.

Empleando un objeto de peso conocido y cercano al valor máximo del rango de trabajo de la celda de carga, para este caso cercano a 5 kg, se ejecuta el programa denominado *Bascula_0* que se encuentra disponible en el documento anexo a esta memoria.

El programa debe ejecutarse sin el peso colocado, pues al inicio el programa calcula la tara.

A continuación se abre el monitor serial de Arduino IDE y habrá que esperar a que la tara sea restada, se coloca el objeto de peso conocido con el que se esté trabajando. En el monitor serial se mostrarán las lecturas del peso, son lecturas sin escalar, por lo que aparecerán números de muchas cifras.

Con el promedio de varias lecturas mostradas se calcula el valor de la escala a emplear:

$$Escala = \frac{\text{Promedio de valores de lectura}}{\text{Peso real del objeto}}$$

El valor del peso real del objeto debe estar en las unidades con las que se desee trabajar en la báscula, para este caso se ha empleado kg.

3.3.1.2. Programa final de la báscula

Una vez calculado el valor de escala de la celda de carga empleada se ha de implementar un nuevo programa basado en el que se ha empleado para la calibración, las modificaciones se muestran en el código *Bascula_1* disponible en los anexos.

Para comprobar el correcto funcionamiento de nuestra báscula se colocan pesos conocidos. Los resultados son positivos y la lectura obtenida coincide con el peso de los objetos colocados.

3.3.2. Control de velocidad

Una vez cumplida la primera propuesta de control de par, se procede a programar el código que nos permitirá controlar la velocidad. Como primer acercamiento a un contador de pulsos, que es la idea en la que está basada esta etapa del programa, se ha realizado un programa sencillo que me permitiera entender el funcionamiento de dicho contador, en esta ocasión no se considera el periodo de tiempo en el cual suceden dichos pulsos.

Para mejorar el código y con el propósito de implantarlo al banco de ensayos es preciso controlar el periodo en el que son contados los pulsos, técnicamente es necesario implementar un temporizador.

En Arduino existen instrucciones para la gestión de tiempos como “*delay*”, “*delayMicroseconds*”, “*millis*” y “*micros*”.

También es necesario introducir una herramienta vital en el desarrollo de códigos ejecutables del microcontrolador, las interrupciones.

Las interrupciones son un tipo de “*mecanismo*” que interrumpe la ejecución normal de un programa para atender a un evento, son similares a una función; la diferencia estriba en que las funciones que hemos programado tienen que ser “*llamadas*” desde una parte del programa. Una interrupción no es más que una función que se ejecutará, no por ser “*llamada*” sino porque se configura para que, ante un evento se ejecute. Los eventos que puede atender un Arduino son:

- Evento por señal
- Tiempo
- Comunicación

Antes de continuar hay que considerar ciertas peculiaridades de este tipo de interrupciones:

- No se pueden atender interrupciones en todos los pines: en el caso de Arduino UNO disponemos de los pines 2 y 3 y el parámetro correspondiente se configurará como 0 o 1.

Para definir una interrupción es necesario configurar 3 parámetros:

- El pin donde se puede producir el evento
(en nuestro caso **0**)
- El nombre la función que se ha de ejecutar si ocurre el evento
(en nuestro: **contador**)
- El tipo de evento que ha de ocurrir.
(en nuestro caso **FALLING**), contaremos los flancos de BAJADA de la señal.

Con estas consideraciones se procede a codificar el programa inicial del control de par que se puede consultar el programa denominado “*ContadorPulsos_0*” en el apartado de anexos.

Se comprueba el funcionamiento del código primero empleando un generador de señales obteniendo resultados positivos y finalmente se comprueba empleando los distintos encoder fabricados durante el diseño mecánico los resultados también son positivos.

3.3.3. Lectura de magnitudes eléctricas

3.3.3.1. Lectura de tensión

3.3.3.1.1. Conversión de una señal analógica a digital

En este apartado es necesario entender cómo se realiza la conversión de una señal analógica en una digital. Arduino tiene capacidad de leer magnitudes de tipo analógico y convertirlas en digitales mediante un conversor A/D de 10 bits, como ya se ha comentado el rango de tensión admisible va de 0 a 5 V.

Si el conversor A/D disponible es de 10 bits, podrá mostrar la señal digitalizada entre 0 y 1023. Con un rango de 10 bits el número de valores binarios que se puede obtener es $2^{10} = 1024$.

La resolución del conversor es el voltaje necesario para provocar un cambio de bits, en este caso considerando una tensión de entrada $V_{in} = 5 V$.

$$Resolución = \frac{V_{in}}{2^{10} - 1} = \frac{5}{2^{10} - 1} = 0.00488758553275 V$$

$$Resolución = 0.00488758553275 V$$

Así por ejemplo: Si la señal analógica es de $2,5 V$, el número digital entero aproximado será:

$$2,5 / 0.00488758553275 \approx 512$$

3.3.3.1.2. Teorema de Nyquist

Con la señal analógica de la medida de tensión ya digitalizada es preciso reproducir la senoide original para muestrearla, esto implica restarle el nivel de tensión continua que se le había aportado antes de que fuera medida con Arduino, se habían adicionado $2,5 V$, por tanto, para restarlos en la señal digital habrá que restar en cada uno de los muestreos 512 unidades.

Para reproducir la senoide original se podría pensar en representar una gran cantidad de puntos durante su período, lo cual requeriría mucha capacidad de procesamiento, sin embargo podemos acotar el número de muestras atendiendo al teorema de Nyquist:

El Teorema de Muestreo de Nyquist explica la relación entre la velocidad de muestreo y la frecuencia de la señal medida. Afirma que la velocidad de muestreo f_s debe ser mayor que el doble del componente de interés de frecuencia más alto en la señal medida. Esta frecuencia por lo general se conoce como la frecuencia Nyquist, f_N .

$$f_s > 2 \cdot f_N$$

Aplicando el teorema de muestreo de Nyquist al caso que nos ocupa:

$$f_N = 50 \text{ Hz} \rightarrow f_s > 100 \text{ Hz}$$

Expresando la frecuencia de muestreo por su inversa:

$$\frac{1}{T_s} > 100 \text{ Hz} \rightarrow \frac{1}{100 \text{ Hz}} > T_s$$

$$T_s < 10 \text{ ms}$$

En este caso los periodos de muestreo deben ser menores a 10 ms para conseguir reproducir la senoide original de 50 Hz , se ha iniciado ensayando la programación con cuatro muestras, así el periodo de muestreo en una onda senoidal será de:

$$T_{s1} = \frac{T_N}{N} = \frac{20ms}{4} = 5ms$$

$$T_{s1} = 5ms$$

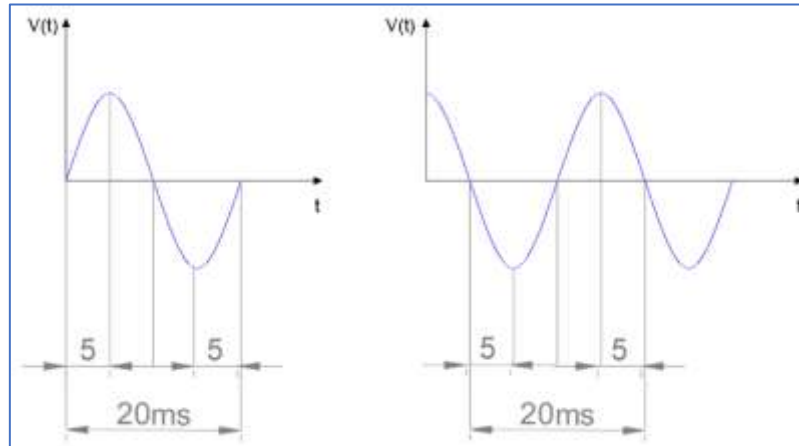


Figura 24. Periodos de muestreo sobre la senoide

Como se puede observar en la figura 24, la senoide puede empezar perfectamente en cero, evento poco probable o estar desplazada en el tiempo. Es necesario comprobar que la suma de los periodos de muestreo es igual al periodo total de la senoide, para ello, se ha empleado la ayuda del reloj del sistema Arduino y un bucle “for” para controlar; tanto el número de muestras como el tiempo en el que se produce la toma de estas muestras, además de almacenarlas en un “string” de tipo vector.

Se realizan los primeros ensayos mediante un generador de funciones, el código funciona, pero los tiempos de muestreo no son adecuados, debido a que el microcontrolador también emplea cierto tiempo en realizar la lectura de tensión, almacenar las muestras en un vector, sumar los tiempos y mostrar los resultados por el monitor serial. Al estar trabajando con magnitudes de tiempo tan bajas (*ms*), el tiempo que utiliza el microcontrolador para realizar la rutina propuesta es determinante.

Como solución se ha optado por reducir el periodo de muestreo.

La red eléctrica que alimenta el motor puede llegar a contener armónicos provocados por cargas no lineales, tales como rectificadores, inversores, variadores de velocidad, lo cual origina corrientes periódicas no senoidales. Estas corrientes están formadas por una componente fundamental 50 *Hz*, más una serie de componentes superpuestas de frecuencias múltiplos de la fundamental.

Contemplando los principales armónicos que pueden llegar a afectar al circuito propuesto y ateniéndonos al teorema de muestreo de Nyquist.

$$\begin{cases} \text{comp. fundamental} \rightarrow f_N = 50\text{Hz} \rightarrow 3 \text{ muestras} \\ 3\text{er armónico} \rightarrow 3 \cdot f_N = 150\text{Hz} \rightarrow 9 \text{ muestras} \\ 5\text{to armónico} \rightarrow 5 \cdot f_N = 250\text{Hz} \rightarrow 15 \text{ muestras} \end{cases}$$

Finalmente se decide tomar **20 muestras** de la senoide monitorizada con lo cual podemos obtener información completa de señales que contengan hasta el quinto armónico.

Para evitar el error introducido por eventos esporádicos durante el muestreo de un ciclo, se tomarán lecturas de varios ciclos y se promediara el valor de estas. En este caso se ha decidido la toma de 20 ciclos, al considerar que el tiempo de procesamiento está entorno a medio segundo (tiempo adecuado para el refresco de la visualización de la lectura).

3.3.3.1.3. Valor eficaz de la tensión

Una vez se han obtenido los valores instantáneos suficientes para reproducir la senoide de tensión es necesario calcular su valor eficaz.

El valor eficaz de una corriente alterna, es el valor que tendría una corriente continua que produjera la misma potencia que dicha corriente alterna sobre una resistencia.

La expresión matemática que determina el valor eficaz de la tensión es:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t)^2 dt}$$

Donde:

- $T = \text{período [s]}$
- $t_0 = \text{tiempo inicial [s]}, \text{por simplicidad} = 0$
- $u(t) = \text{valor instantaneo de la onda, muestreo.}$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt}$$

Discretizando la expresión anterior:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N u(i)^2 \Delta t} \stackrel{\Delta t = cte}{\cong} \sqrt{\frac{\Delta t}{T} \sum_{i=1}^N u(i)^2}$$

Por otra parte:

$$\Delta t = \frac{T}{N} \rightarrow \frac{\Delta t}{T} = \frac{1}{N}$$

- $N = \text{número de muestras}$

Ahora se tiene:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u(i)^2}$$

Habría que expresar esta ecuación dentro del código ejecutable para obtener el valor eficaz de la senoide muestreada y posteriormente aplicar la constante de tensión K_v , que viene dada por la relación de transformación del transformador de tensión (m) y la relación de resistencias del circuito reductor (k_a), estos dos parámetros se han calculado en el apartado 3.2.3.1.1. de este documento.

$$m = 16,11$$

$$k_a = 0,0932830$$

Por tanto, la constante de tensión K_v :

$$K_v = \frac{m}{k_a} \approx 172,7$$

Es un valor teórico, habrá que ajustarlo durante los ensayos. Se puede consultar el código desarrollado “*LecturaMagnitudesEléctricas*” en el documento anexo.

3.3.3.1.4. *Lectura de intensidad*

De forma similar a la programación de lectura de tensión se puede desarrollar el código correspondiente a la medida de intensidad, incluso se ha propuesto incluir las dos medidas en un mismo código. “*LecturaMagnitudesEléctricas*”

Para el cálculo de la constante de intensidad se ha considerado: la relación de transformación del transformador de intensidad (25/0.05), el número de vueltas que atraviesan el toroide 3 y la resistencia de 39 Ω .

$$K_I = \frac{25}{0.05} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{39} = 4,2735$$

$$K_I \approx 4,28$$

Es un valor teórico, habrá que ajustarlo durante los ensayos.

3.3.3.1.5. Potencia

Empleando las lecturas de tensión e intensidad se calcula la potencia activa del sistema mediante el producto de las componentes de los vectores tensión e intensidad, con el fundamento teórico de la siguiente expresión:

$$P_{act} = \frac{E}{t} = \frac{\int_0^T u(t) \cdot i(t) dt}{T}$$

Donde:

- P_{act} = Potencia activa
- E = energía
- t = tiempo
- T = periodo
- $u(t) \cdot i(t)$ = producto de tensión instantánea e intensidad instantánea

Discretizando la expresión anterior:

$$P_{act} = \frac{\Delta t}{T} \sum_{i=1}^N u(i) \cdot i(i)$$

Por otra parte:

$$\Delta t = \frac{T}{N} \rightarrow \frac{\Delta t}{T} = \frac{1}{N}$$

- N = número de muestras

Entonces:

$$P_{ef} = \frac{\Delta t}{T} \sum_{i=1}^N u(i) \cdot i(i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u(i) \cdot i(i)$$

$$P_{ef} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u(i) \cdot i(i)$$

Que es la expresión desarrollada y se puede consultar en el código ejecutable “*LecturaMagnitudesEléctricas*” adjunto en el documento anexo.

3.4. Adaptación y aplicación de etapas al banco de ensayos

Una vez elaboradas las etapas bases para el funcionamiento del banco de ensayos llega el momento de aplicarlas en conjunto, antes hay que adaptar lo desarrollado en las fases anteriores.

3.4.1. Control de par

Recordando que la celda de carga empleada en el banco de ensayos es distinta a la celda de carga con la que se ha configurado el programa de control de par, es necesario calibrar nuevamente la “báscula”, se repiten los pasos expuestos en el punto 3.3.1.1. de este documento, para primero hallar el valor de escala de la “báscula” y posteriormente comprobar su correcto funcionamiento empleando un objeto de peso conocido.



Figura 25. Plataforma modificada



Figura 26. Cilindro de hormigón,
peso 1839,8 gramos

En este caso se ha utilizado un cilindro de hormigón, se ha empleado una báscula de precisión para referenciar su peso antes del ensayo. Para conseguir comprobar lo expuesto se ha modificado la plataforma diseñada en el apartado 3.2.1.1. añadiéndole un brazo vertical que permita adaptarla al banco de ensayos. Se muestran a continuación una imagen capturada en el momento de la comprobación.

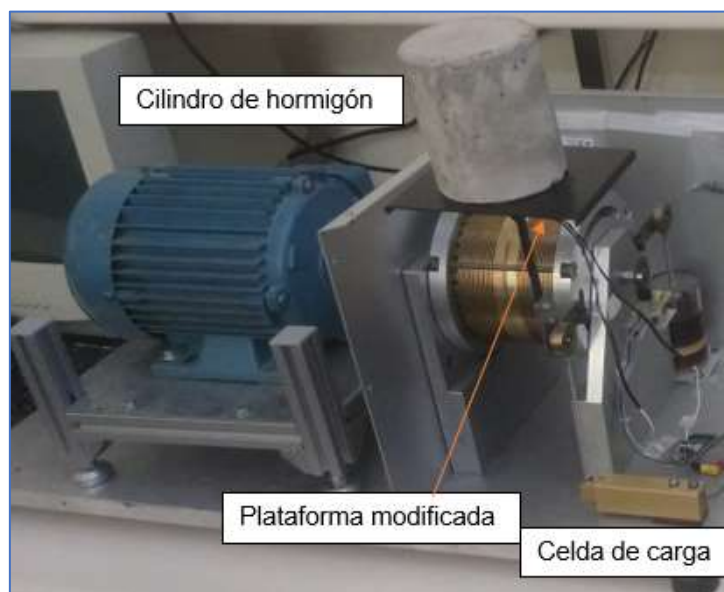


Figura 27. Montaje de comprobación del control de par

La siguiente adaptación se ha realizado sobre el código ejecutable, hasta ahora solo se ha medido mediante la “báscula” el peso depositado sobre la celda de carga. Es el momento de expresar este peso en unidades de par, para ello es necesario conocer la distancia existente entre el punto de anclaje de la celda de carga en el freno de histéresis y el eje del freno, con la ayuda de un calibre pie de rey se obtiene: 120 mm

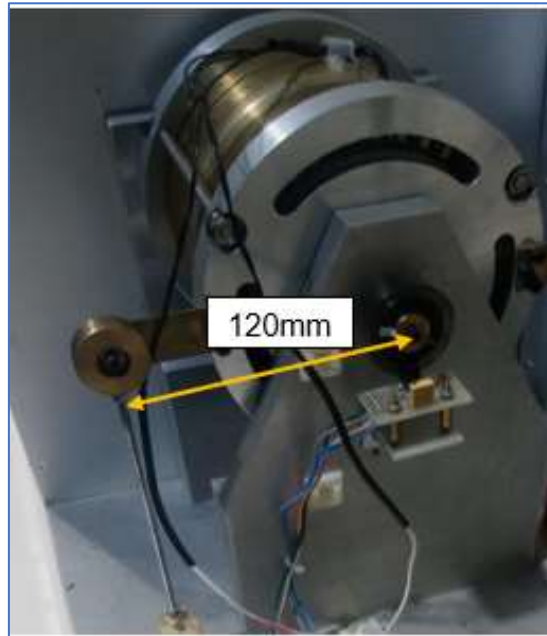


Figura 28. Distancia entre eje de celda de carga y eje de freno 120 mm

Considerando el efecto de la gravedad la constante de par será:

$$K = 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0,120 m = 1,176 \frac{m}{s^2} m$$

En consecuencia la expresión a emplear es **par = peso · 1,176**, tal y como se expresa en el programa a ejecutar.

3.4.1.1. Limitación del sistema

Dado que la celda de carga dispuesta presenta una carga nominal de 5 kg, el sistema quedará limitado a la medición de un par máximo dado por la siguiente expresión:

$$Par_{m\acute{a}x_{celda}} = carga_{m\acute{a}x_{celda}} \cdot 1,176$$

Siendo:

$$Par_{m\acute{a}x_{celda}} = 5 kg \cdot 1,176 \frac{m}{s^2} m = 5,88 Nm$$

$$\mathbf{Par_{m\acute{a}x_{celda}} = 5,88 Nm}$$

3.4.2. Control de velocidad

En el caso de la velocidad se ha considerado el número de ranuras del encoder a instalar como un factor determinante. Esta bancada está diseñada para realizar ensayos en motores cuya velocidad nominal puede ser próxima a 3000 rpm.

Considerando esta velocidad de sincronismo:

$$n_{vueltas/s} = \frac{N}{t} = \frac{3000 \text{ rpm}}{60 \text{ s}} = 50 \frac{vueltas}{s}$$

Donde:

- $n_{vueltas/s}$ = número de vueltas por segundo
- N = velocidad de sincronismo

El encoder determinará la resolución de la velocidad en función del número de sus ranuras.

$$n_{pulsos/s} = N \cdot n_{ranuras}$$

Donde:

- $n_{pulsos/s}$ = número de pulsos por segundo
- $n_{ranuras}$ = número de ranuras del encoder

$$N = n_{pulsos/s} \cdot \frac{60 \text{ s}}{n_{ranuras}}$$

Se realizan los primeros ensayos con el motor asíncrono trifásico de dos pares de polos (velocidad de sincronismo 1500 rpm) y con el encoder de 4 ranuras. Se observan que el sistema funciona correctamente pero la precisión en la medida es insuficiente, ya que se está trabajando con motores de velocidades nominales muy próximas a las de sincronismo y un encoder de pocas ranuras.

Es necesario emplear un método más efectivo, que nos permita tener un mayor número de pulsos de referencia. Se ha decidido colocar un encoder de **60 ranuras**. En esta ocasión la resolución se emplea directamente.

$$N = n_{pulsos/s} \cdot \frac{60 \text{ s}}{n_{ranuras}} = 1410 \cdot \frac{60}{60} = 1410 \text{ rpm}$$

Para contrastar las medidas de velocidad mostradas por pantalla por el programa codificado, se han realizado ensayos de verificación mediante el uso de un tacómetro digital por infrarrojos y un elemento reflectante colocado sobre el encoder.



Figura 29. Velocidad del motor trabajando en vacío 1471 rpm

3.4.3. Lectura de magnitudes eléctricas

Sobre la medida de tensión, intensidad y potencia no se han realizado adaptaciones, su aplicación se ha realizado de forma directa.

4. Ensayo y verificación

El siguiente apartado es el resultado de fusionar las fases anteriores de este proyecto, tanto etapas electrónicas como de programación para conseguir el funcionamiento del banco de ensayos al completo.

Se han realizado las conexiones pertinentes para comprobar su evolución, se observan resultados positivos. El sistema completo funciona, pero cuando se regula el autotransformador al mínimo, tanto la etapa de tensión como el analizador de redes marcan una tensión distinta de cero ($\approx 70\text{ V}$). Posteriormente se ha decidido cambiar de analizador trifásico por uno monofásico que monitorice únicamente la fase sobre la cual se está realizando la toma de muestras. Se trata de un analizador monofásico de la marca "Metrix" modelo PX120, pero la tensión residual se mantiene.

Con la ayuda de polímetros se comprueban las tensiones de alimentación del pupitre donde se va a colocar la bancada, se detecta que el conductor de neutro de la red de alimentación no se encuentra correctamente referenciado a tierra, razón por la cual se cuenta con dicha tensión residual. Al desconocer la configuración de la red de alimentación anterior al pupitre, es necesario cambiar el tipo de conexión del motor, es decir, pasar de triángulo a estrella, se ha accedido a las bornas de conexión del motor para conseguir un neutro adecuado a partir de la conexión en estrella. Ahora al regular el autotransformador a tensión mínima se obtiene una tensión cercana a 0 V .

Para continuar con los ensayos y documentar la experimentación realizada, es necesario conocer el comportamiento del freno empleado para crear el par resistente sobre el eje del motor.

4.1. Caracterización del freno de histéresis

Con el fin de realizar los ensayos empleando el freno de histéresis, es necesario caracterizarlo para conocer su comportamiento en función de la tensión regulada a través de la fuente de alimentación, o bien, en función de la intensidad absorbida por el mismo.

Se han realizado ensayos proporcionando distintos de valores de par, en función de la tensión suministrada al freno. Se muestra a continuación una gráfica con la ecuación que permitirá conocer la relación entre la tensión sobre el freno y el par que esta produce.

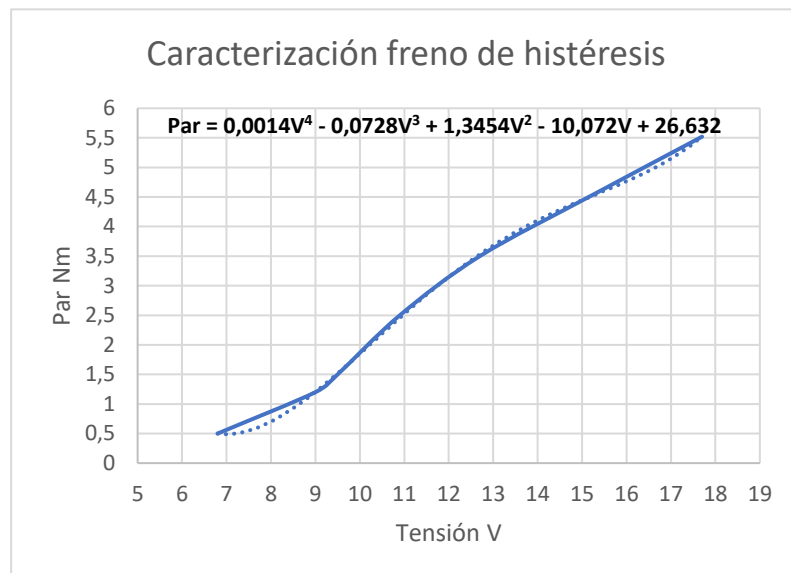


Figura 30. Caracterización freno de histéresis "Tensión-Par"

A partir de la resistencia del devanado del freno de histéresis ($46 \, \Omega$), se puede obtener el par en función de la corriente suministrada (figura 31). Esa resistencia de $46 \, \Omega$ ha sido obtenida a una temperatura de trabajo en régimen nominal.

Si en el futuro se planteara una regulación automática en lugar de manual, el control del par se realizaría a partir de la función par-intensidad, mediante una fuente de corriente controlada por el microcontrolador.

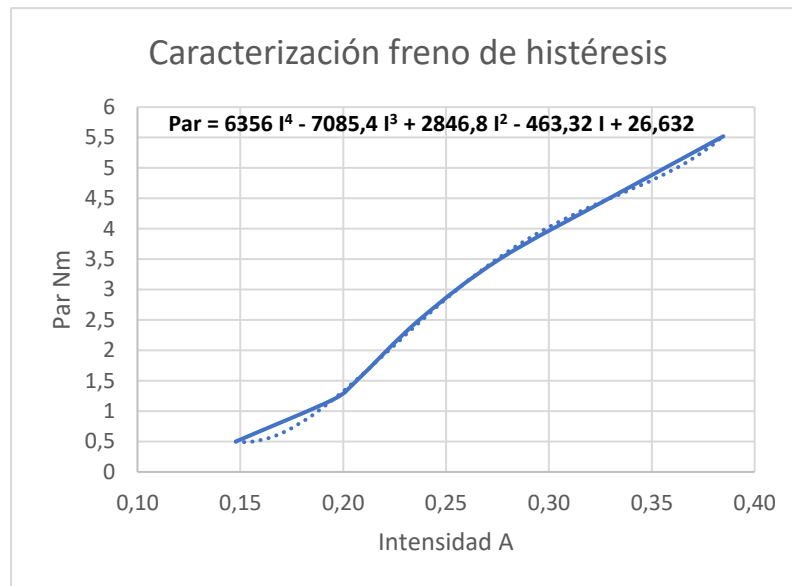


Figura 31. Caracterización freno de histéresis "Intensidad-Par"

4.2. Curva par-velocidad

Para poder analizar el comportamiento del motor en diferentes regímenes de carga o para poder estimar el tiempo de arranque, es necesario conocer como varía el par motor en función de la velocidad de giro. Aunque matemáticamente esta función resulta complicada, en la práctica generalmente se expresa mediante la curva par-velocidad tal como se indica en la figura 31. A esta relación entre el par del motor y su velocidad de giro se denomina característica mecánica

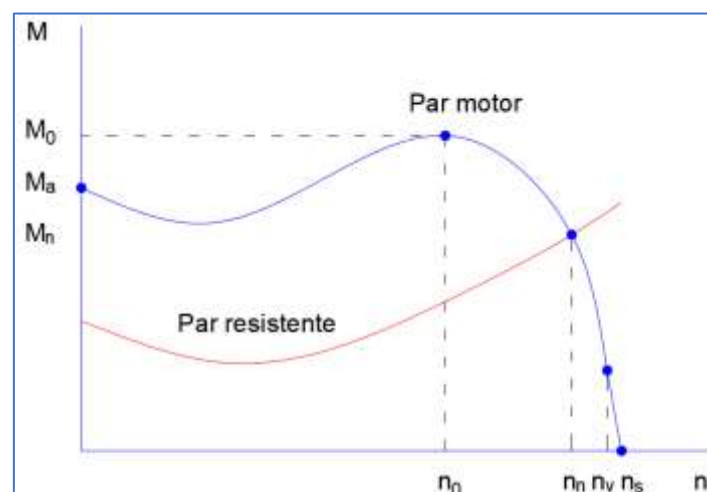


Figura 32. Curva par-velocidad

En la curva par-velocidad podemos distinguir los siguientes puntos característicos:

a) Punto de sincronismo (n_s):

Es el punto en el que el rotor giraría a la misma velocidad que el campo magnético estatórico (velocidad de sincronismo). En este punto par motor ejercido es nulo.

b) Funcionamiento en vacío (n_v):

En el funcionamiento en vacío de un motor, el único par resistente que tiene que vencer es el de los rodamientos y el del ventilador, de modo que la potencia que suministra en el eje es muy pequeña. En esta situación la velocidad del rotor es ligeramente inferior a la de sincronismo y por lo tanto el punto de funcionamiento en vacío es muy próximo al punto de sincronismo.

c) Carga nominal (M_n):

Cuando un motor tiene que suministrar la potencia nominal en su eje capaz de vencer el par resistente de la carga, entonces disminuye la velocidad del rotor para que aumenten las corrientes rotóricas hasta que se alcance el par nominal correspondiente. Por lo tanto, en carga se produce un deslizamiento que en los motores asíncronos puede estar comprendido entre un 3 y un 5 %.

d) Par máximo (M_0):

A medida que aumenta el deslizamiento de un motor se va produciendo un aumento del par mecánico hasta alcanzar un valor máximo M_0 que puede estar comprendido entre 2 y 3,5 veces el par nominal M_n . A la velocidad para la cual se presenta dicho par máximo se denomina velocidad crítica n_0 y con velocidades inferiores a la crítica el par se mantendrá por debajo de su valor máximo M_0 .

e) Punto de arranque (M_a):

El arranque de un motor corresponde al instante en el cual encontrándose el rotor parado se conecta el motor a la red de alimentación. En ese instante la velocidad del rotor es cero y por lo tanto el deslizamiento es máximo. El par de arranque de un motor asíncrono de rotor en cortocircuito puede ser de 1,8 a 2,5 veces el par nominal.

4.3. Influencia de la tensión de alimentación

Cuando se producen variaciones de la tensión en bornes de un motor esto origina que se modifique la corriente que absorbe y por lo tanto la potencia y el par mecánico suministrados. En el estudio de máquinas eléctricas se deduce que el par mecánico varía proporcionalmente con el cuadrado de la tensión.

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2}$$

Como consecuencia de la modificación del par mecánico, se produce una variación de la potencia útil también directamente proporcional al cuadrado de la tensión. Esto puede deducirse fácilmente tal como se muestra:

Según hemos visto anteriormente $P_u = M \cdot \omega$; y como la frecuencia permanece constante (despreciando el deslizamiento), también permanecerá constante la velocidad ($\omega_1 = \omega_2$), por lo tanto,

$$\frac{P_{u1}}{P_{u2}} = \frac{\omega_1 M_1}{\omega_2 M_2} = \frac{\omega_1 M_1}{\omega_1 M_2} = \frac{M_1}{M_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2}$$

$$\frac{P_{u1}}{P_{u2}} = \frac{U_1^2}{U_2^2}$$

Para ver como varía la corriente en función de la tensión partiremos de la expresión de la potencia total absorbida por el motor ($P = \sqrt{3}UI\cos\varphi$). Como el factor de potencia y el rendimiento varían ligeramente para diferentes regímenes de carga próximas a la carga nominal, podremos suponer que estos parámetros se mantienen prácticamente constantes. ($\eta_1 = \eta_2 = \eta$) y ($\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi$), por lo tanto:

$$P_{u1} = \eta_1 P_1 = \eta_1 \sqrt{3} U_1 I_1 \cos\varphi_1 = \eta \sqrt{3} U_1 I_1 \cos\varphi$$

$$P_{u2} = \eta_2 P_2 = \eta_2 \sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2 = \eta \sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi$$

Dividiendo miembro a miembro las dos expresiones anteriores:

$$\frac{P_{u1}}{P_{u2}} = \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2}$$

Pero tal como hemos visto:

$$\frac{P_{u1}}{P_{u2}} = \frac{U_1^2}{U_2^2}$$

En consecuencia tendremos:

$$\frac{U_1^2}{U_2^2} = \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} \rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Por lo tanto, según la expresión anterior la corriente varía proporcionalmente con la tensión.

4.4. Ajuste del ensayo

Considerando lo expuesto en los apartados anteriores y recordando la limitación de este sistema (apartado 3.4.1.1), es necesario ajustar los ensayos por debajo de los límites máximos que permite obtener este banco de pruebas, por lo tanto, la curva par velocidad vendrá restringida por estos límites.

Partiendo de la placa de características del motor disponible para el ensayo (figura 6 del apartado 3.2.1) y de la tabla 3, se han obtenido parámetros adecuados que nos permitirán ajustar el ensayo a las restricciones comentadas anteriormente.

Motores asíncronos trifásicos con rotor en jaula de ardilla: 4 polos, 50 Hz, 1.500 r.p.m											
Potencia nominal		Velocidad nominal (r.p.m.)	Características a carga nominal			Par mecánico			Corriente arranque I_a/I_n	Momento inercia (kg m ²)	Peso (kg)
kW	CV		η (%)	$\cos \varphi$	I_a (A) a 400 V	Nominal M_n (Nm)	Arranque M_a/M_n	Máximo M_0/M_n			
0,37	0,5	1.370	65,0	0,80	1,03	2,6	1,9	2,1	3,3	0,0008	6,0
0,75	1,0	1.395	72,0	0,81	1,86	5,1	2,3	2,3	4,2	0,0018	9,4
1,5	2,0	1.420	77,0	0,82	3,45	10,0	2,4	2,8	5,0	0,0035	15,6
3,0	4,0	1.420	81,5	0,83	6,40	20,0	2,6	2,8	5,5	0,0058	26,0
5,5	7,5	1.455	86,0	0,81	11,40	36,0	2,4	3,1	6,3	0,018	45,0
7,5	10,0	1.455	87,5	0,82	15,10	49,0	2,7	3,2	6,7	0,024	56,0
15,0	20,0	1.460	90,0	0,84	28,50	98,0	2,8	3,2	6,5	0,052	93,0
22,0	30,0	1.460	91,2	0,84	41,00	144,0	2,3	3,0	7,5	0,15	126,0
37,0	50,0	1.470	92,9	0,87	66,00	241,0	2,8	3,2	7,0	0,32	215,0
75,0	100,0	1.480	94,7	0,86	132,00	484,0	2,5	2,7	6,7	1,4	610,0
110,0	150,0	1.485	94,8	0,86	194,00	707,0	2,5	2,7	6,7	2,2	830,0

Tabla 3: Algunos motores asíncronos trifásicos de dos pares de polos

El par máximo del motor viene dado por:

$$P_{u_max} = M_{max} \cdot \omega = M_{max} \cdot \frac{n}{60} 2\pi \rightarrow M_{max} = \frac{P_{u_max}}{\frac{n}{60} 2\pi}$$

Tomando datos de la placa de características del motor disponible ($P_{u_max} = 1470 \text{ W}$, $n = 1410 \text{ rpm}$):

$$M_{max} = \frac{P_{u_max}}{\frac{n}{60} 2\pi} = \frac{1470}{\frac{1410}{60} 2\pi} = 9,95 \text{ Nm}$$

$$M_{max} \approx 10 \text{ Nm}$$

Según tabla 3 para un par nominal $M_n = 10 \text{ Nm}$ los pares de arranque y máximo serán:

$$\frac{M_a}{M_n} = 2,4 \rightarrow M_a = 24 \text{ Nm}$$

$$\frac{M_0}{M_n} = 2,8 \rightarrow M_0 = 28 \text{ Nm}$$

Los valores de par obtenidos anteriormente exceden considerablemente el valor de par máximo admisible de la celda de carga ($5,88 \text{ Nm}$). Tal como se ha deducido el par es proporcional al cuadro de la tensión, por tanto, será necesario reducir la tensión de alimentación para poder disminuir el par.

Se ha decidido tomar una tensión igual al 40% de la tensión nominal.

$$V_{\text{ensayo}} = 0,4 \cdot V_n = 0,4 \cdot 380 = 152 \text{ V}$$

Si la tensión de ensayo es un 40 % de la tensión nominal, el par de ensayo será 16 % del par nominal ($0,4^2 = 0,16$).

Entonces el par de arranque y nominal respectivamente serán:

$$M_{a_{\text{ensayo}}} = M_a = 0,16 \cdot 24 = 3,84 \text{ Nm}$$

$$M_{0_{\text{ensayo}}} = M_0 = 0,16 \cdot 24 = 4,48 \text{ Nm}$$

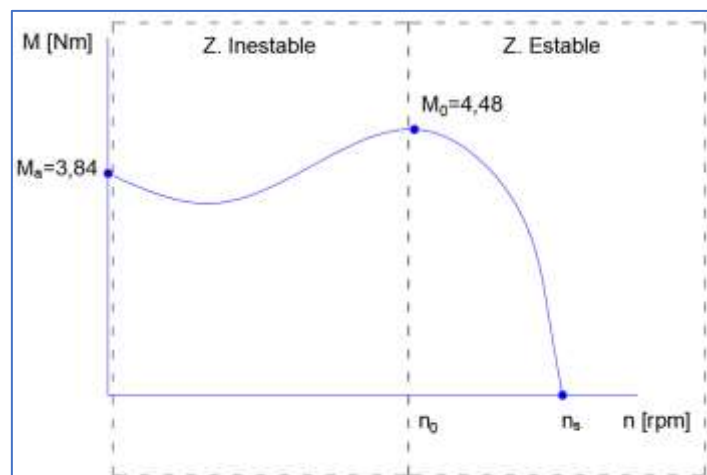


Figura 33. Zonas de ensayo

Según la figura anterior por las prestaciones del banco actual se han definido dos zonas durante el ensayo. El sistema actual permite conocer puntos de la zona estable junto con el par de arranque.

4.5. Ensayo

Con los ajustes realizados a partir de las prestaciones del banco, se ensaya el motor asíncrono disponible. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Compilar y ejecutar el código que permite realizar el ensayo mediante la IDE Arduino.
2. Abrir el monitor serial prestar atención al mensaje mostrado:

- **Comprobar ausencia de par**, habrá que comprobar que la fuente de tensión que regula el accionamiento del freno de histéresis se encuentre regulada a 0 V. Con esto garantizamos que el sistema realiza su tarado inicial con un par nulo.
3. Conexión del autotransformador, colocando el cursor de regulación al mínimo (tensión de salida mínima).
 4. Accionamiento del motor regulando el cursor del autotransformador a una tensión aproximada de 152 V (40 % de V_n). Este valor de tensión se puede comprobar en el monitor serial.
 5. Aumentar progresivamente la tensión de la fuente de regulación del freno hasta alcanzar los valores de par deseados, esto provocará que el motor se vaya frenando. Las magnitudes características se pueden tomar de forma instantánea o al finalizar el ensayo mediante un archivo de texto.
 6. Al alcanzar el par máximo el motor se detendrá, en este punto se ha alcanzado el punto más alto de la zona estable del ensayo.
 7. Disminuir paulatinamente la tensión de la fuente de regulación del freno hasta que el motor vuelva a girar de nuevo, este punto corresponde al par de arranque.
 8. El motor puede ensayarse a distintos niveles de tensión, siempre recordando las limitaciones del sistema. Se puede encontrar un guion de prácticas resuelto en el documento anexo.

4.6. Resultado

Tomando datos representativos del ensayo se ha elaborado la curva que se muestra en la figura 34, en la que se puede observar un desarrollo aceptable de la curva par-velocidad dentro de la zona estable, pero, cuando ya se ha alcanzado el punto de par máximo el motor pierde velocidad hasta llegar a una velocidad nula, esto indica que la curva ha entrado en la zona inestable donde el par resistente es mayor que el par motor. También en esta figura se ha incluido el punto correspondiente al par de arranque indicado en el punto 7 del ensayo.

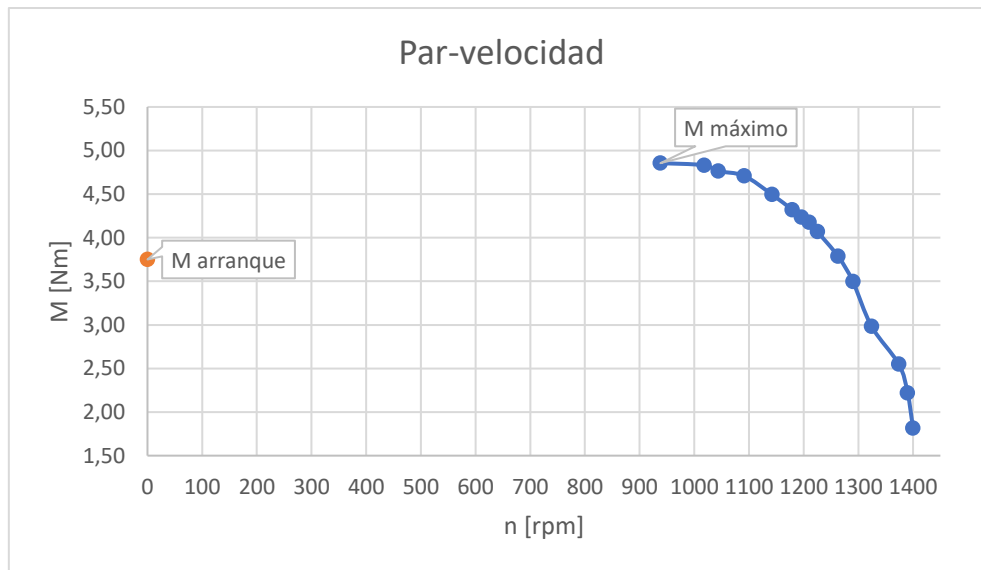


Figura 34. Curva par-velocidad

5. Conclusiones

El resultado final cumple con los objetivos planteados al inicio de este proyecto.

- El sistema realiza de forma correcta la medición tanto de magnitudes eléctricas como mecánicas. Además de mostrar los resultados de manera instantánea, se puede obtener un archivo de texto, el cual puede ser empleado posteriormente para representaciones y análisis.
- Las etapas electrónicas diseñadas son de fácil instalación, empleando conectores de seguridad es posible acoplarlas o desacoplarlas fácilmente. Además su tamaño reducido permite ubicarlas próximas al banco de ensayos, reduciendo el espacio necesario dentro del pupitre.
- Arduino es una de las plataformas más extendidas actualmente, entre sus principales ventajas se encuentran su bajo coste y flexibilidad que lo hacen adecuado para usos didácticos.
- La programación desarrollada para este proyecto cumple perfectamente con los objetivos planteados inicialmente. Además, por tratarse de una plataforma muy versátil y modular, esto nos puede permitir mejoras y ampliaciones posteriores.
- La elección de los elementos utilizados en la creación del banco de ensayos se considera acertada. Se ajustan adecuadamente a las necesidades planteadas, de manera que la relación entre el coste de los elementos y su utilidad es muy eficaz.
- Durante el desarrollo de este proyecto han sido considerados diversos conceptos estudiados durante el grado de ingeniería eléctrica, lo que refuerza la necesidad del conocimiento teórico anterior al práctico.

- Además de la satisfacción personal que ha supuesto comprobar el funcionamiento del banco de ensayos, está la gratificación de saber que los conocimientos adquiridos durante este periodo universitario se encuentran plasmados en un proyecto tangible.
- El proyecto descrito en este documento está totalmente operativo y en disposición de ser utilizado por alumnos, que como yo, realicen prácticas en los laboratorios de máquinas eléctricas de la escuela.

6. Bibliografía y lugares de búsqueda

- ✓ Carod Pérez, E. S. (2007) “*Máquinas eléctricas*”. Zaragoza Copy Center.
- ✓ Fraile Mora, J. (2016) “*Máquinas eléctricas*”, 8va edición. Garceta grupo editorial.
- ✓ Hart, D.W. (2001) “*Electrónica de potencia*”. Prentice Hall.
- ✓ Pardina, A. (2006) “*Tecnología eléctrica*”.
- ✓ Palacios Bregel, J. (1977) “*Prácticas de laboratorio de máquinas eléctricas*”, 2da edición. Paraninfo.
- ✓ Plonus, M. A. (1992) “*Electromagnetismo aplicado*”. McGraw-Hill.
- ✓ “*Apuntes de la asignatura Maquinas eléctricas - Colección de enunciados de problemas - Cuaderno de prácticas de laboratorio*”.
- ✓ <https://delorenzoglobal.com/>
[Accedido: Abril 2023]
- ✓ <https://www.directindustry.es/prod/magtrol/product-7124-1881956.html>
[Accedido: Abril 2023]
- ✓ <https://www.vishay.com/en/product/83765/>
[Accedido: Mayo 2023]
- ✓ <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>
[Accedido: Mayo 2023]
- ✓ <https://electronicadelmilagro.blogspot.com/>
[Accedido: Mayo 2023]
- ✓ <https://sensoricx.com/microcontroladores/microcontroladores-conversion-adc-de-10-bits/>
[Accedido: Mayo 2023]
- ✓ <https://es.rs-online.com/>
[Accedido: Mayo 2023]
- ✓ <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/bancomot.htm>
[Accedido: Mayo 2023]
- ✓ <http://www.luisllamas.es/2014/09/entradas-analogicas-en-arduino/>
[Accedido: Mayo 2023]