



**Universidad
Europea**

Escuela de Ingeniería, Arquitectura y Diseño
Área Ingeniería Industrial

Grado en Ingeniería en Sistemas Industriales
Doble mención en Electrónica y Automática / Robótica

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN BANCO
DINAMOMÉTRICO PARA MOTORES
TÉRMICOS CON FRENADO POR
CORRIENTES PARÁSITAS**

Autor:

Erik Lesta López

Director:

Sergio Bemposta Rosende

Junio de 2025

Título: Diseño y fabricación de un banco dinamométrico para motores térmicos con frenado por corrientes parásitas

Autor: Erik Lesta López

Director del proyecto: Sergio Bemposta Rosende

Fecha: Junio de 2025

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado presenta el diseño, desarrollo y puesta en marcha de un banco de ensayos para motores térmicos, utilizando un freno de corrientes parásitas como sistema de carga. El objetivo principal es permitir la caracterización del comportamiento dinámico de distintos tipos de motores, mediante la medición de variables como par, velocidad y potencia. Este banco de ensayos resulta útil tanto con fines educativos como para empresas dedicadas al desarrollo de motores y sistemas electrónicos asociados.

Palabras clave: Banco de ensayos, Corrientes parásitas, Motores térmicos, Medición de potencia

Abstract

This Final Degree Project presents the design, development, and implementation of a test bench for internal combustion engines, using an eddy current brake as the load system. The main objective is to enable the characterization of the dynamic behavior of different types of engines by measuring variables such as torque, speed, and power. This test bench is useful both for educational purposes and for companies involved in the development of engines and associated electronic systems.

Key words: Test bench, Eddy currents, Internal combustion engines, Power measurement

Índice

1. Introducción	9
1.1. Objeto	9
1.2. Alcance	9
1.3. Antecedentes	9
1.4. Requisitos de diseño	10
1.5. Funcionamiento	10
2. Diseño mecánico	11
2.1. Unión entre módulos	11
2.2. Módulo de frenado	12
2.2.1. Bastidor	13
2.2.2. Freno	13
2.2.3. Célula de carga	13
2.2.4. Rodamientos	14
2.3. Ejes	15
2.3.1. Transmisión	16
2.3.2. Sensor RPM	17
2.3.3. Ventilación	17
2.3.4. Cuadro eléctrico	17
2.3.5. Carenados	17
2.4. Módulo motor	18
2.5. Fabricación	20
3. Diseño eléctrico y electrónico	22
3.1. Electrónica de control	22
3.1.1. Alimentación	22
3.1.2. Procesador	22
3.1.3. Lectura célula de carga	23
3.1.4. Lector revoluciones	24
3.1.5. Canbus	24
3.1.6. Conexión PC	24
3.1.7. Entradas digitales	24
3.1.8. Salidas digitales	24
3.1.9. Entradas analógicas	24
3.1.10. Salidas analógicas	24
3.1.11. Diseño	24
Bibliografía	25
Anexos	26
A. Planos mecánicos	26
B. Esquemas PCB	82
C. Presupuesto	101
D. Catálogo freno Telma CC250	108

Índice de figuras

1.	Método de unión entre módulos	11
2.	Cotas del sistema de unión	12
3.	Módulo del freno y su despiece	12
4.	Freno de corrientes parásitas Telma CC250	13
5.	Piezas para la medición de par	14
6.	Rodamiento tipo Y con bloque de apoyo	14
7.	Ejes del freno	16
8.	Palier utilizado	16
9.	Sensor de velocidad de giro	17
10.	Ventiladores y conductos	18
11.	Armario eléctrico y sus componentes	18
12.	Carenados del módulo del freno	19
13.	Módulo del motor y sus componentes	19
14.	Soporte regulable	20
15.	Fabricación de la brida del freno	20
16.	Soldadura de los bastidores	21
17.	Montaje del freno y la célula de carga	21
18.	Configuración de pines del microcontrolador	23
19.	Diagrama funcional del DAC AD7190 [1]	23

1. Introducción

El presente documento tiene como objetivo documentar todo lo realizado en el trabajo de fin de grado de la carrera de Ingeniería en sistemas industriales con mención en electrónica y automática. En este se incluyen justificaciones de diseño, cálculos, planos, esquemas y más documentación relacionada con el proyecto.

1.1. Objeto

Alana Engineering S.L. es una empresa de reciente creación dedicada al desarrollo de módulos electrónicos para motores térmicos, como centralitas de motor o de cajas de cambio. La empresa expone su necesidad de adquirir un banco dinamométrico de motores para poder desarrollar sus productos y ajustar los parámetros a diferentes motores. Debido a ser de reciente creación, la empresa no dispone de capital suficiente para adquirir una celda de pruebas de motores, por lo que recurren a una solución más simple y económica. Utilizando un freno de corrientes parásitas de camión se puede construir un banco de motores útil y a un bajo coste. Este proyecto trata de adaptar éste freno de camión a un banco dinamométrico para motores.



1.2. Alcance

Debido a la complejidad del proyecto y a la naturaleza de algunas de las tareas, éste proyecto no abarca todo lo necesario para su desarrollo. Las siguientes tareas se incluyen en el proyecto:

- Diseño de un chasis para soportar el freno
- Diseño de un chasis para soportar el motor y acoplarlo al freno
- Diseño de una transmisión para acoplar el motor al freno
- Diseño del algoritmo de control del freno
- Diseño de la electrónica de control

El software y la fuente de alimentación del freno quedan fuera del alcance del proyecto, ya que están siendo desarrollados por el equipo de Alana.

1.3. Antecedentes

Previo a la concepción de este proyecto se hizo una labor de investigación de mercado para comparar posibles alternativas. Debido a que estos dispositivos tienen un público objetivo muy pequeño, no hay demasiadas empresas que los fabriquen. Lo más común es contratar a una empresa de ingeniería para que lo diseñe a medida, de la misma forma que se está haciendo en este proyecto. Las pocas empresas que los venden como producto son SuperFlow y AVL. La primera tiene bancos de frenado por agua que empiezan en los 70.000 € y la segunda sólo vende proyectos de celdas de ensayo completas, que están por encima de los 600.000 €.

A diferencia de estas empresas, este proyecto propone un producto barato y fácil de utilizar, por un precio que está por debajo de los 10.000 €.

1.4. Requisitos de diseño

Para llevar el proyecto de manera organizada e implementar todo lo necesario, al inicio de éste se proponen los siguientes requisitos:

1. El dispositivo tiene que ser modular, es decir, que la estructura del motor se pueda separar del freno para poder trabajar en él más cómodamente. Esto también permite tener distintos motores en sus soportes y conectarlos cómodamente al freno cuando sea necesario. Por otro lado, si se quisiera adaptar un motor distinto que por algún motivo no se pudiera montar en el soporte propuesto, se puede diseñar un soporte distinto y acoplarlo al freno de manera fácil.
2. El soporte de los motores tiene que ser ajustable y adaptable al mayor número de motores posible.
3. Diseñar un soporte adaptable para motores de moto.
4. Diseñar un soporte con rodamientos para el freno.
5. Diseñar la electrónica requerida para controlar el freno y comunicarlo con el ordenador. A excepción de la fuente de alimentación.

1.5. Funcionamiento

Hay diferentes métodos para aplicar carga de manera controlada a un motor. Hoy en día el método más utilizado es el de los frenos de agua, que generan carga metiendo agua en una turbina que gira solidaria al motor. Éstos dispositivos son muy compactos y eficientes. El otro método más utilizado es el de frenado por corrientes parásitas, que se basa en hacer girar un disco de acero cerca de unas bobinas a las que se les envía corriente para que generen un campo magnético cerca del disco. Al pasar el disco por éste campo se crean unas corrientes internas que a su vez generan un campo contra electromotriz.

Para este proyecto se utiliza un freno de corrientes parásitas comprado en un desguace que pertenecía a un camión antiguo, se suele denominar como retarder. Debido a que no utiliza rozamiento para frenar, no generan desgaste y por lo tanto las unidades de desguace están en buenas condiciones. En caso de venderse como producto, se pueden adquirir nuevos como recambio del camión.

La principal desventaja de utilizar éste método es que el freno se calienta bastante al no ir montado en el camión, donde recibe mucho flujo de aire para refrigerarse. Esto implica que no se pueda usar el dispositivo de manera continuada, ya que hay que esperar a que el freno se enfríe entre ensayos. Otra desventaja de este sistema es que el freno solo llega a 3500 RPM, mientras que los motores que se quieren ensayar pueden llegar hasta las 11.000 RPM. La solución es incorporar una reductora entre el freno y el motor. Después de valorar muchas opciones, se tomó la decisión de montar cada motor con su caja de cambios, de tal forma que el diseño se simplifica mucho y el precio del producto también ya que las reductoras que cumplían los requisitos eran más caras que el propio producto.

2. Diseño mecánico

Este primer apartado detalla todos los cálculos y decisiones tomadas para realizar diseñar y fabricar el banco de ensayos.

2.1. Unión entre módulos

Uno de los requisitos de diseño mencionados expuestos en el *Capítulo 1.4* es la modularidad y la capacidad de utilizar soportes de motor diferentes. Esto implica crear un sistema formado a partir de módulos, en el que el principal será el freno y al que se irán añadiendo otros módulos que soporten los distintos motores y cajas de cambio. Para que todos los módulos encajen entre sí es importante definir de que manera será la unión entre ellos.

Para unir los distintos módulos se hace uso de tubo cuadrado de acero de distintos tamaños, de tal forma que los módulos acaben siempre con los extremos abiertos. En estos extremos se introduce un tubo de sección más pequeña (*Figura 1, Globo 2*) que hará de elemento de unión entre los módulos. Unos tornillos fijarán ambos módulos para que no se separen, pero las cargas serán absorbidas por el tubo de unión (*Figura 1, Globo 2*). En la (*Figura 1* se muestran los bastidores del módulo que soporta los motores y del módulo en el que se apoya en freno.

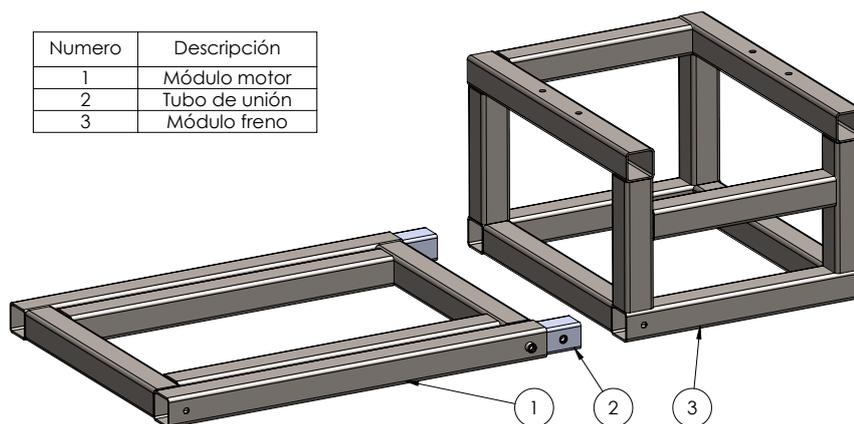


Figura 1: Método de unión entre módulos

Los bastidores están hechos de tubo cuadrado de 80 x 80 5mm por lo que para el tubo interior, se utiliza tubo cuadrado de 70 x 70 x 4mm. Hay que tener en cuenta que las medidas internas de los tubos no son precisas y es posible que no entre. También hay que tener en cuenta que los tubos llevan un cordón de soldadura por dentro que hace que no se pueda introducir uno dentro de otro. Para quitarlo basta con golpearlo con un cincel o lijarlo con una lijadora de dedo. En las pruebas realizadas, la medida interior del tubo grande es ligeramente superior a 70 por lo que los tubos entran bien. Este caso puede haberse dado solo en este lote de tubos y en otro lote ser al contrario por lo que hay que tenerlo en cuenta.

En la *Figura 2* se muestran las cotas más importantes en relación al sistema de unión entre módulos. Por ejemplo, la anchura de centro a centro de tubo, que son 750 mm, la altura del eje con respecto de la parte superior del soporte del freno, que son aproximadamente 500 mm, o la separación entre los tornillos de unión, de 100 mm que se muestra en la Sección I. Estas son las medidas necesarias para poder fabricar otro módulo que encaje con el freno. Los planos mecánicos de *Anexo A* reflejan todas estas medidas.

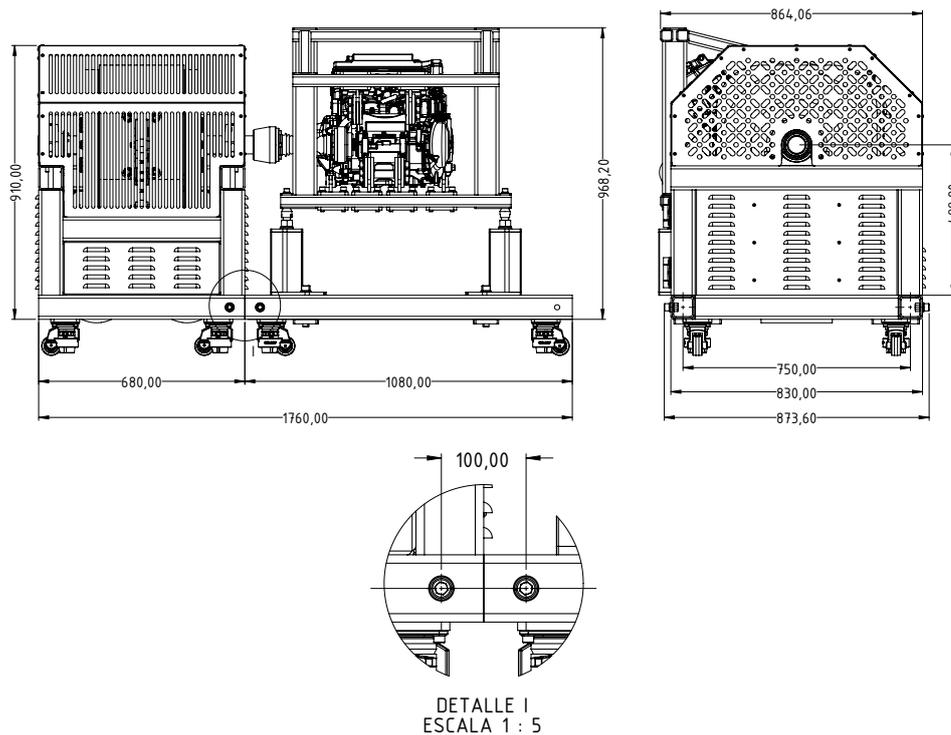


Figura 2: Cotas del sistema de unión

2.2. Módulo de frenado

El módulo del freno se compone del bastidor soldado, el freno con sus ejes, los rodamientos que lo soportan, la célula de carga, el sensor de RPM, cuadro eléctrico y carenados. A continuación se detallan cada uno de sus componentes. La *Figura 3* muestra el módulo del freno ensamblado y en vista explosionada. Para ver un despiece completo con referencias ver el *Anexo A*

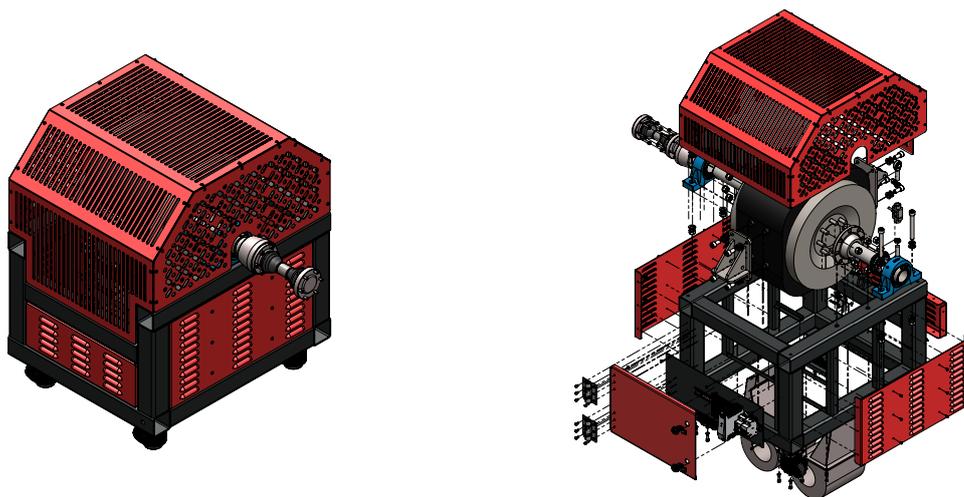


Figura 3: Módulo del freno y su despiece

2.2.1. Bastidor

El bastidor es la pieza que hace de elemento de unión con el resto de piezas. Se encarga principalmente de soportar el freno. Está hecho de perfiles tubulares y ángulos de acero S235JR. Para ver los planos completos, ver el *Anexo A*

2.2.2. Freno

La pieza más importante del banco es el freno en sí. El freno es de la marca Telma, modelo CC250. Tiene un par máximo de frenado de 2500 N/m y una velocidad de giro máxima de 3500 rpm. Tiene una masa total de 333 Kg y una masa rotativa de 86 Kg. [5] En este caso ha sido obtenido de un desguace por un precio muy reducido. Aun así, sus rodamientos están en muy buenas condiciones. Adjunto como *Anexo D* se encuentra el catálogo con todas sus medidas y datos técnicos.



Figura 4: Freno de corrientes parásitas Telma CC250

2.2.3. Célula de carga

Para poder medir el par de frenado, el freno se encuentra suspendido de unos rodamientos que le permiten rotar sobre su eje. Para evitar que rote, se sujeta de un lateral con la célula de carga (*Figura 5, Globo 3*), por lo que esta medirá la fuerza de tracción a una distancia de 350mm del centro de rotación, como se puede observar en la *Figura 5*. Teniendo esa fuerza se puede calcular el par producido por el freno con la *Ecuación 1*.

$$Par(N/m) = \frac{Fuerza(N)}{0,350(m)} \quad (1)$$

Introduciendo en la *Ecuación 1* el par máximo de frenada, 2500 N/m [5], obtenemos que la célula de carga tiene que aguantar como máximo 875 Kg. La célula elegida es de 1000 Kg.

Para sujetarla, se utilizan dos soportes fabricados en chapa de acero cortada por láser de 10 mm. Uno superior (*Figura 5, Globo 4*) y otro inferior que va soldado al chasis (*Figura 5, Globo 2*). Para unir la célula al soporte se utilizan unas rótulas MXML16 y unos tornillos rectificadas ISO 7379 16x40 para reducir el juego al mínimo posible. En el lado contrario se ha colocado un tope de seguridad (*Figura 5, Globo 6*) para evitar que el freno se pusiera a girar si la célula de carga se rompiera. En este caso, el tope se apoyaría en el chasis e impediría que el freno rotara.

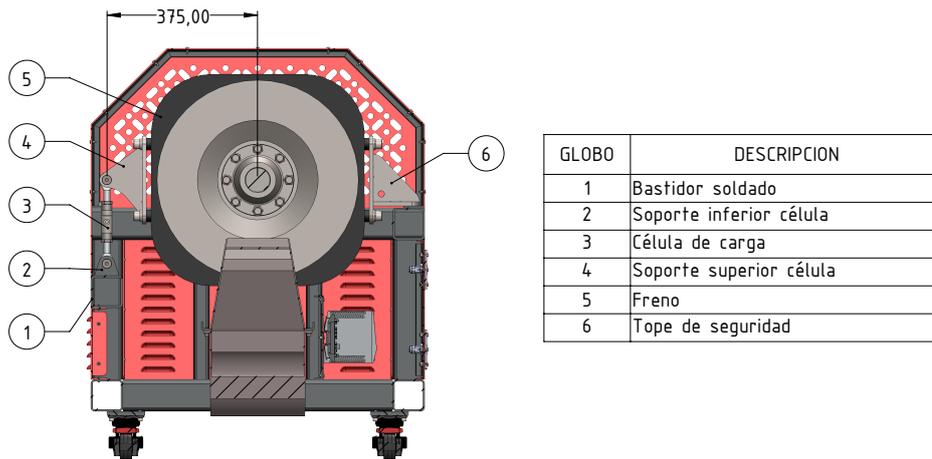


Figura 5: Piezas para la medición de par

2.2.4. Rodamientos

El freno se sujeta por su estátor al bastidor a través de la célula de carga y se apoya el rotor en el bastidor mediante unos rodamientos. Los rodamientos elegidos son rodamientos de bolas de tipo Y con bloque de apoyo. Este tipo de rodamiento viene ya con su soporte y son capaces de absorber desalineaciones angulares.



Figura 6: Rodamiento tipo Y con bloque de apoyo

Éstos rodamientos tienen que ser capaces de aguantar las cargas de frenado, y tener una vida útil considerable. Para ello se han seguido los pasos y cálculos mencionados en el catálogo de rodamientos aplicable de SKF. [2]

El primer paso para elegir un tamaño de rodamiento es definir las cargas. En este caso sólo existe una carga radial que estará compuesta del peso del freno, que son 333 Kg, y la fuerza que se producirá al frenar, que será igual a la que se mida en la célula de carga pero en sentido contrario. Debido a que será raro que el rodamiento experimente esa carga continuamente, se reducirá la carga derivada del frenado un 25 %. La carga estática P_0 en este caso estará compuesta únicamente por el peso del freno.

$$P_{max} = 333(Kg) + 875(Kg) = 1,208(Kg) = 11,85(kN)$$

$$P = 333(Kg) + 656(Kg) = 989(Kg) = 9,7(kN)$$

$$P_0 = 333(Kg) = 3,3(kN)$$

Debido a que este banco se utilizará de manera esporádica, la vida útil del rodamiento no es un factor clave. Según el manual de SKF [2], para máquinas que se usan por cortos periodos o intermitente-mente, una vida útil L_{10} de 1000 horas es suficiente. La velocidad rotacional n es un factor importante en la ecuación, el freno tiene una velocidad máxima de 3500 rpm pero elegiremos una velocidad media de 2000 rpm. Aplicando la fórmula de la vida útil obtenemos la carga dinámica del rodamiento.

$$L_{10}(h) = \frac{1,000,000}{60 \cdot n(\text{rpm})} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^3 \rightarrow 1000(h) = \frac{1,000,000}{60 \cdot 2000(\text{rpm})} \cdot \left(\frac{C}{9,7(kN)}\right)^3 \rightarrow C \geq 47,8(kN)$$

Otro aspecto a tener en cuenta es la capacidad de carga estática del rodamiento, ya que si se le aplica carga mientras está parado o girando a bajas revoluciones es posible que se deformen los elementos rodantes. El factor de seguridad s_0 se obtiene de una tabla proporcionada por SKF [2], en este caso siendo el entorno libre de vibraciones será de 1.

$$C_0 \geq P_0 \cdot s_0 \rightarrow C_0 \geq 3,3(kN)$$

Para funcionar correctamente, los rodamientos necesitan estar sometidos a una carga mínima de $0.01C$. A continuación se calcula la carga dinámica mínima que tiene que tener el rodamiento para cumplir con esta condición.

$$C \geq 0,01 \cdot P_0 \rightarrow C \geq 0,01 * 3,3(kN) \rightarrow C \geq 0,033(kN)$$

Una vez hechos los cálculos obtenemos los requisitos mínimos para elegir el rodamiento:

$$C \geq 47,8(kN) \quad C_0 \geq 3,3(kN)$$

El modelo elegido es un SKF SYJ 60 TF. Sus características son las siguientes:

$$C = 52,7(kN) \quad C_0 = 36(kN) \quad n_{max} = 3400(\text{rpm})$$

A parte de estos cálculos, es importante verificar que el diámetro del eje del rodamiento sea suficiente para soportar el par, esto se hace en la siguiente sección.

2.3. Ejes

Para unir el freno al resto de componentes, es necesario diseñar dos ejes y adaptadores. Uno que pase por un rodamiento y sea el eje de entrada que va conectado al motor y otro que soporte el freno en el otro rodamiento. Están compuestos de dos partes, una brida que va sujeta al freno y una barra calibrada que se acopla a la brida con un ajuste por interferencia y un cordón de soldadura. Es importante que el eje tenga una precisión h6 ya que según el catálogo de SKF [2] es necesaria para poder hacer girar el rodamiento a las máximas revoluciones. Para conseguir un ajuste rígido y preciso entre ambas partes es necesario que haya una ligera interferencia entre ambas, esto provocará que una vez montadas se queden unidas y el cordón de soldadura las reforzará para soportar el par. Sabiendo que el eje tiene una tolerancia h6, se puede usar una tolerancia M6 en el agujero, esto provocará un ajuste con una interferencia mínima de $5\mu m$ y una interferencia máxima de $43\mu m$.

El eje de acero F1252 42CrMo4 de 60 mm de diámetro estará sometido a un par máximo de 2500 Nm, a continuación se verifica que sea capaz de soportarlo:

$$W_T = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 0,06^3}{16} = 4,24 \cdot 10^{-5}(m^3)$$
$$\tau = \frac{T}{W_T} = \frac{2500}{4,24 \cdot 10^{-5}} = 59(MPa)$$

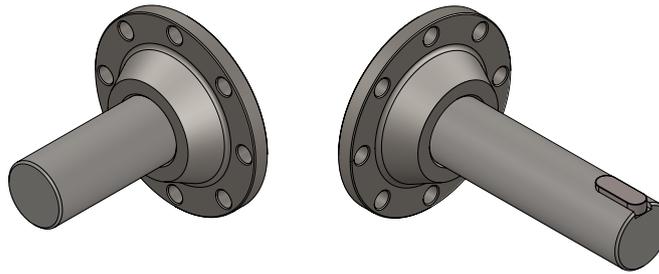


Figura 7: Ejes del freno

El valor límite elástico del acero usado está en torno a 1000 MPa por lo que el eje es capaz de soportar el par.

Para transmitir el par del freno al motor, ambos ejes se unen con una chaveta DIN 6885 18x11x50. A continuación se muestran los cálculos de resistencia de la chaveta. Para ello se calcula el par aplicado en el radio del eje y se divide entre el área de la chaveta.

$$F = \frac{T}{r} = \frac{2500}{0,03} = 83kN$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{83(kN)}{0,018(m) \cdot 0,05(m)} = 92MPa$$

Como la resistencia del acero utilizado para chavetas es de 600 MPa, la chaveta aguantará el par del freno.

2.3.1. Transmisión

Para transmitir el par del freno al motor es necesario disponer de un elemento que absorba desalineaciones angulares y axiales ya que es muy complicado colocar el motor en la posición exacta donde los ejes estén concéntricos. Para ello se han buscado varias soluciones como acoples elásticos, transmisiones de doble cardan telescópicas, etc. La solución adoptada es colocar un palier de coche OEN A4634100902 perteneciente a un mercedes G63. Los palieres son transmisiones compuestas por dos juntas homocinéticas, que a diferencia de las juntas cardan, transmiten a velocidad constante y reducen las vibraciones. También absorben desalineaciones axiales y son relativamente baratos ya que no hay que fabricarlos a medida. El mayor inconveniente es que no es posible encontrar el dato de par que aguantan, pero sabiendo del coche que viene, que tiene 600cv y una aproximación de sus relaciones de transmisión de la caja y el diferencial, podemos estimar un par en la rueda de uno 4.000 Nm, lo cual es superior a nuestros requerimientos.



Figura 8: Palier utilizado

2.3.2. Sensor RPM

Para poder hacer el cálculo de potencia y realizar el control en velocidad de giro, es necesario incorporar un sensor de velocidad de giro del freno. Existen varios tipos de sensores como encoders, sensores magnéticos y ópticos. En este caso se ha utilizado un sensor de barrera fotoeléctrica en miniatura EE-SX675-WR (*Figura 9, Globo 3*). También se ha diseñado una rueda fónica (*Figura 9, Globo 4*) que será la que active y desactive el sensor óptico mandando pulsos cuando se mueva el freno. La razón de utilizar un sensor óptico es que es mucho más barato que un encoder, aunque menos preciso también. Por otro lado se ha descartado un sensor magnético ya que al estar cerca del freno podría dar señales poco precisas.

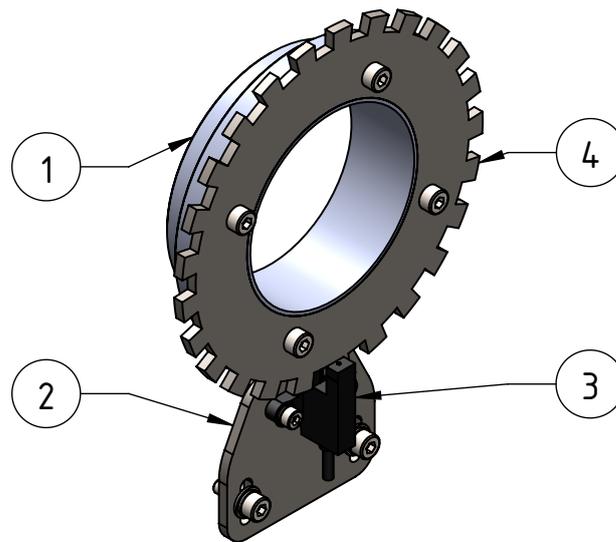


Figura 9: Sensor de velocidad de giro

2.3.3. Ventilación

Uno de los principales problemas de un freno como el utilizado en este proyecto es que al no moverse se calienta demasiado y pierde mucha eficiencia. Para intentar mitigar este problema se ha diseñado un sistema de ventilación compuesto por dos ventiladores radiales de 85W y $1,197m^3/h$ cada uno (*Figura 10, Globo 2*). Los ventiladores van acoplados a un conducto (*Figura 10, Globo 2*) fabricado con chapa de acero soldada que redirige el aire a las tomas de aire del freno.

2.3.4. Cuadro eléctrico

Para albergar todos los equipos eléctricos y electrónicos se ha colocado un soporte con una placa base a la que va atornillado un carril din y todos los equipos eléctricos y electrónicos. De derecha a izquierda se encuentra un magnetotérmico para proteger contra sobre-intensidades u cortocircuitos, un diferencial para proteger al operador en caso de derivaciones, una fuente de alimentación de 24v para alimentar la electrónica y la placa electrónica sobre un soporte para carril DIN.

2.3.5. Carenados

Para proteger al operario de atrapamientos y hacer el producto un poco más profesional, se han diseñado una serie de carenados o tapas que cierran los huecos que quedan entre los

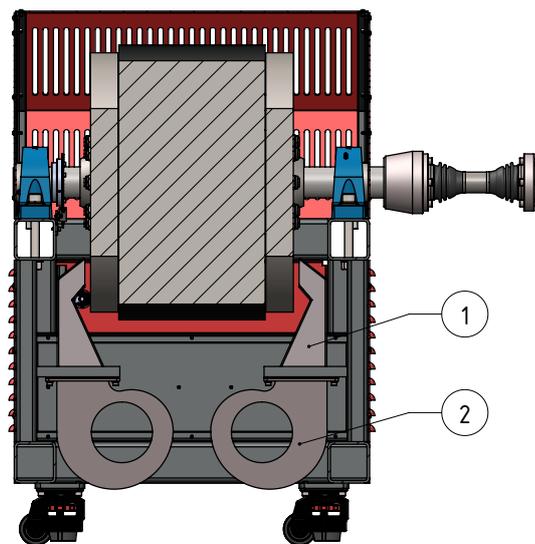
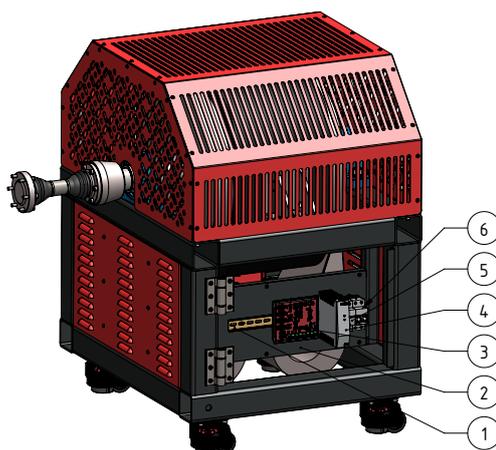


Figura 10: Ventiladores y conductos



GLOBO	DESCRIPCION
1	Carril DIN
2	Placa base
3	Electrónica de control
4	Fuente de alimentación 24V
5	Diferencial 32A 30mA
6	Magnetotérmico 16A

Figura 11: Armario eléctrico y sus componentes

perfiles del bastidor. Estos carenados también llevan unos agujeros para permitir la circulación de aire del freno. En el lado del armario eléctrico se ha diseñado una puerta con dos bisagras y dos cerraduras con llave triangular de armario. Los carenados laterales son de chapa de acero plegada y con ranuras de ventilación embutidas. La tapa superior está compuesta de un chasis de perfil L 20x20x3 de acero, unas placas inferiores con un tornillo soldado y las chapas laterales e inferior cortadas por láser con las ranuras de ventilación. Para unirlos al chasis, se utilizan los tornillos que lleva soldados y que encajan en unos agujeros mecanizados en la parte superior del módulo del freno. Una vez encajados, se pone una tuerca por dentro del perfil.

2.4. Módulo motor

Para poder ensayar cualquier motor en el banco se ha diseñado un soporte para motores totalmente modular y ajustable. Debido a la limitación de velocidad de giro del freno es necesario montar los motores con una caja de cambios y este conjunto puede llegar a ser muy largo por lo que los módulos son totalmente simétricos de tal forma que se pueden unir uno detrás de otro y así ampliar su capacidad. El componente principal es el bastidor de tubo cuadrado de 80x80x5

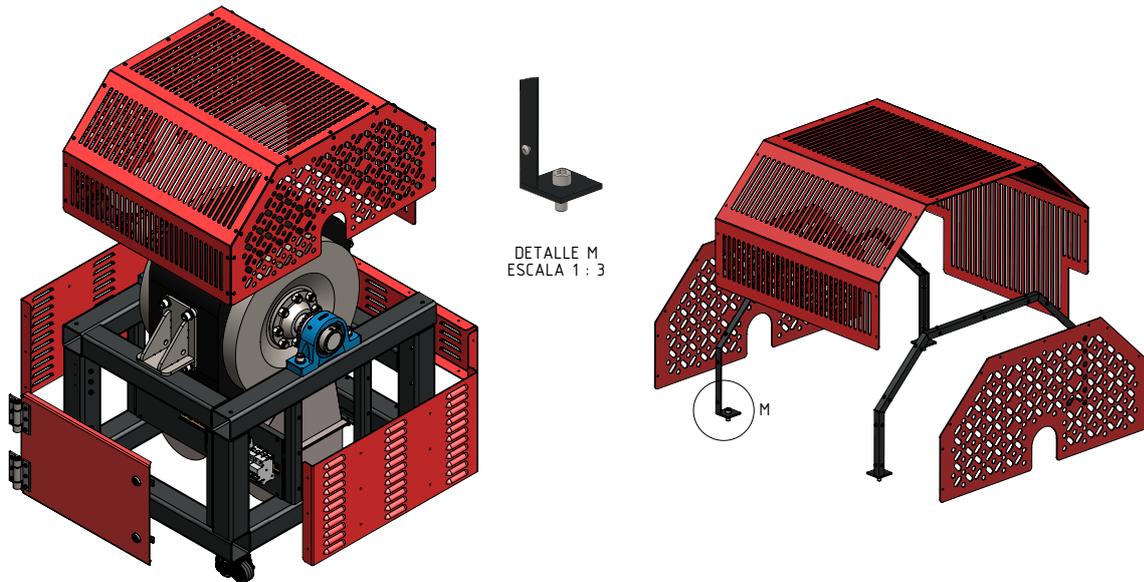


Figura 12: Carenados del módulo del freno

soldado (*Figura 13, Globo 1*). Sobre este bastidor se ponen los brazos ajustables en posición y altura mediante una varilla roscada que tienen en el extremo (*Figura 13, Globo 2*). Sobre estos brazos se puede apoyar directamente un motor longitudinal con su caja de cambios o poner el soporte para motores de moto, de tal forma que éste también se pueda mover por encima de la plataforma y elevarlo para que ambos ejes estén alineados. El soporte para motores de moto (*Figura 13, Globo 3*) está hecho con tubo cuadrado de acero de 80x80x5 y tubo cuadrado de acero de 40x40x3. Éste soporte lleva unas ranuras por las que se pueden mover los apoyos regulables que se atornillan al motor. Éstos apoyos regulables (*Figura 13, Globo 4*) rotan y se alargan para poder atornillar su extremo a los puntos de apoyo del motor que se quiera montar.

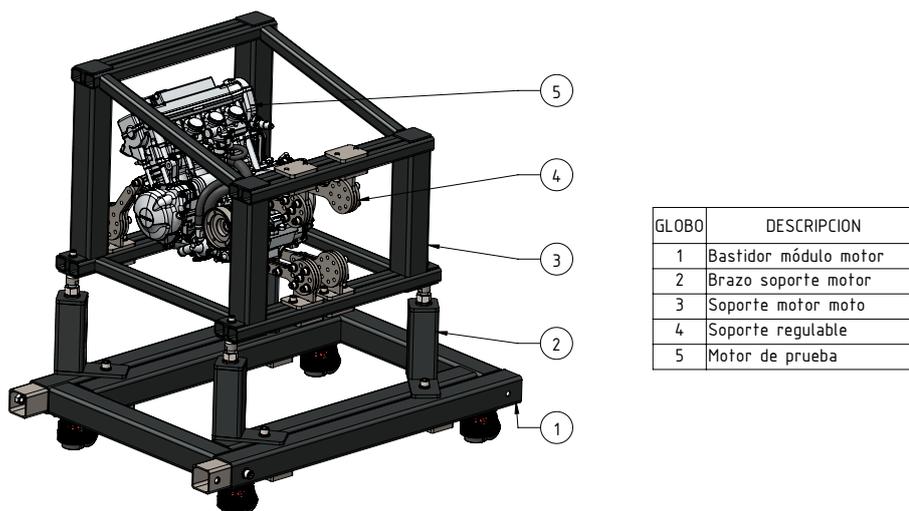


Figura 13: Módulo del motor y sus componentes

Como se puede ver en la *Figura 14*, la pieza intermedia con el globo número 2 tiene unas ranuras que permiten que las piezas número 3 y 4 roten. Se una manera similar, la pieza 5 tiene unas ranuras, de tal forma que se puede extender y contraer. La pieza 4 tiene dos juegos de agujeros de tal forma que cuando se llega al tope de la ranura se puede cambiar al otro juego

para que así pueda rotar 360°. El diseño incluye 3 diseños de la pieza 5 con distintas longitudes para poder aumentar o reducir el alcance. Para bloquear la posición se utilizan 7 tornillos que hacen presión sobre la pieza 2 y bloquean la posición.

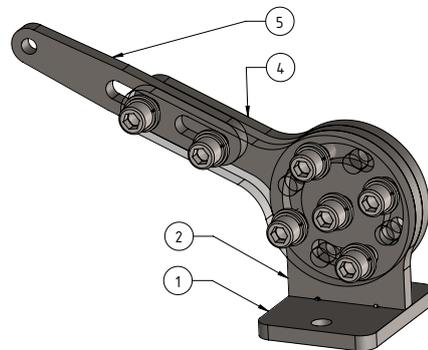


Figura 14: Soporte regulable

2.5. Fabricación

La fabricación del banco está en proceso y actualmente están construidos los bastidores, los ejes y los soportes de la célula de carga.

Para la fabricación de los ejes se partió de un bruto de acero y se mecanizó la forma primitiva en fresadora para posteriormente acabarlo en el torno. Mediante calor y con ayuda se la prensa se unió con el eje y posteriormente se le dio un cordón de soldadura.

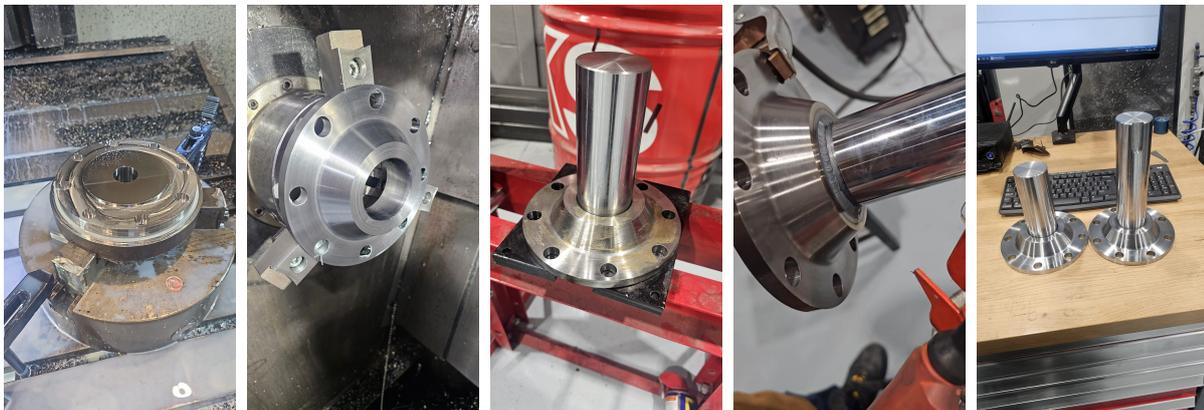


Figura 15: Fabricación de la brida del freno

Para los bastidores se cortaron los tubos de 6m en una sierra de cinta y posteriormente se soldaron con soldadura MIG en una mesa de soldadura para fijarlos en su posición. Una vez soldados, se realizaron todos los taladros con un taladro magnético.

Una vez soldados los bastidores y los ejes se montó el freno en el bastidor y se montó también la célula de carga.

Próximamente se acabara de fabricar el resto de piezas y se mandarán a pintar todas con pintura al polvo. También se han pedido los materiales para fabricar el soporte para el motor de moto.



Figura 16: Soldadura de los bastidores



Figura 17: Montaje del freno y la célula de carga

3. Diseño eléctrico y electrónico

Para poder utilizar el freno, es necesario disponer de una fuente regulable en voltaje que controle la corriente que pasa por las bobinas del freno. También es necesario disponer de un controlador que calcule el valor de voltaje que tiene que mandar la fuente y que se realimente con el valor de la célula de carga o el sensor de velocidad de giro para mantener un valor objetivo. La fuente de alimentación no entra dentro del objeto del proyecto, pero la electrónica de control sí.

3.1. Electrónica de control

Los requisitos de la electrónica de control son los siguientes:

- Amplificar y leer el valor de la célula de carga
- Leer el sensor de revoluciones
- Leer entradas analógicas para sensores de temperatura
- disponer de una salida analógica para controlar la fuente de alimentación del freno
- Disponer de entradas y salidas digitales a 24V
- Disponer de USB para comunicar con el PC.
- Disponer de un microcontrolador capaz de realizar el control
- Disponer de CanBus para leer valores de las centralitas de los motores

En el *Anexo B* se pueden encontrar los esquemas eléctricos y diseños de la electrónica con más detalle.

3.1.1. Alimentación

Para la alimentación de la placa se van a usar 24V. De esta entrada se producen los siguientes niveles de voltaje:

10V Se genera a partir de los 24V con un regulador lineal LDO y se utiliza para las salidas analógicas.

5V Se genera a partir de los 24V con una fuente SMPS conmutada y se utiliza para generar los 3.3V, alimentar el sensor de revoluciones, la célula de carga y el amplificador de la célula de carga.

3.3V Se genera a partir de los 5V con un regulador lineal LDO y se utiliza para alimentar el microcontrolador y el resto de elementos electrónicos.

2.52V Se genera a partir de los 5V y sirve como referencia para las entradas analógicas.

3.1.2. Procesador

La serie de procesadores elegida es la STM32 de ST Microelectronics. Esto es debido a que ya se disponen de las herramientas y el hardware de desarrollo para ella. Estos microcontroladores se basan en la arquitectura ARM por lo que el primer paso es decidir que núcleo de ARM utilizar. Dentro de la gama de ST, las únicas series que soportan CanBus FD son la M4, M7 y la M33. La M7 y M33 son de alto rendimiento y para este trabajo no se necesita mucha potencia de cálculo, por lo que se utilizará un procesador de la gama STM32G4, que incorpora núcleos

ARM Cortex M4y CanBus FD. [3]

Dentro de esta familia de procesadores se ha elegido uno pequeño de 48 pines, ya que no se necesitan muchas interfaces. En concreto el STM32G431C6T6. En la *Figura 18* se muestra la configuración de pines escogida para el proyecto mediante el uso de la aplicación STM32 Cube IDE y la guía de referencia del microcontrolador. [4]

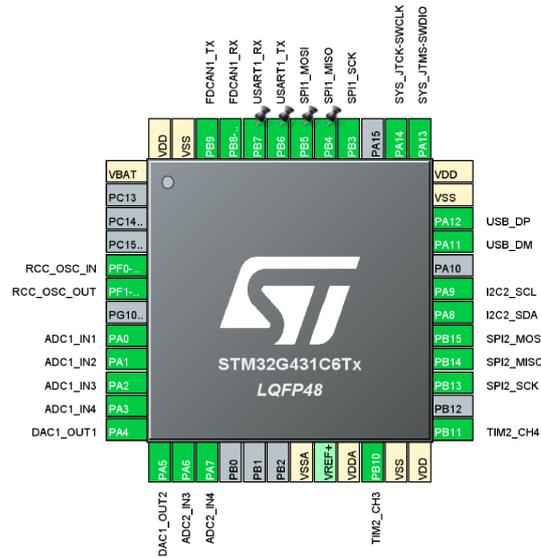


Figura 18: Configuración de pines del microcontrolador

3.1.3. Lectura célula de carga

Para leer el valor de la célula de carga es necesario disponer de un convertor analógico a digital pre-amplificado, como el de la *Figura 19*, ya que las señales de la célula son de muy poca amplitud. Para ello existen varios circuitos integrados como el famoso HX711. En este proyecto se ha utilizado un AD7190 de Analog Devices ya que tiene mucho menos ruido SNR, mayor frecuencia de muestreo y mayor precisión. Su precio es considerablemente mayor, pero tratándose este proyecto de un aparato de medición, es importante mantener una buena precisión. Otra particularidad de este DAC es que se comunica por SPI, a diferencia de otros que lo hacen por un protocolo propio, este es mas facil de utilizar.

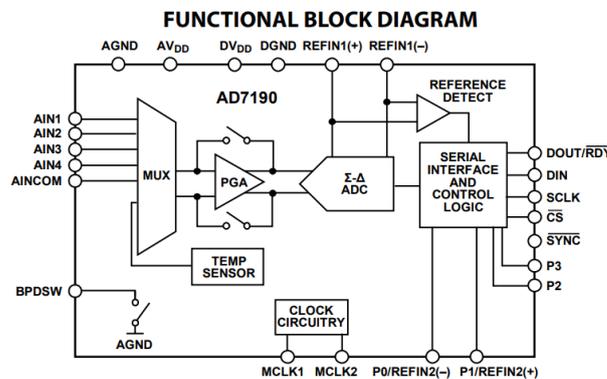


Figura 19: Diagrama funcional del DAC AD7190 [1]

3.1.4. Lector revoluciones

Para leer las revoluciones se ha utilizado uno de los contadores internos del microcontrolador, de esta forma, el contador envía por DMA a la memoria el tiempo que tarda en pasar cada diente de la rueda fónica.

3.1.5. Canbus

Uno de los requisitos importantes del controlador es que tuviera CanBus FD, ya que es el más usado por las centralitas. Para ello se ha hecho uso de la interfaz que trae el microcontrolador, a la que se le ha añadido una interfaz física TCAN3414 de Texas Instruments para pasar las señales de bajo voltaje del microcontrolador a los voltajes requeridos por el estándar CanBus. Para diseñar la placa se ha hecho uso de la referencia que trae el datasheet. [6]

3.1.6. Conexión PC

Para la conexión con el PC se ha incorporado un puerto USB tipo B. Esto se debe a que es más robusto y fácil de implementar que el tipo C. Como el microcontrolador dispone de interfaz física USB, sólo ha sido necesario conectar las líneas de datos y una señal que detecta si hay 5v en el puerto.

3.1.7. Entradas digitales

Para las entradas digitales se ha utilizado un simple circuito con un opto-acoplador para aislar la señal de entrada del microcontrolador y bajar también el voltaje de 24V a 3.3V.

3.1.8. Salidas digitales

Para las salidas digitales a 24V se ha utilizado un conmutador de nivel alto de cuatro canales que además incluye protecciones contra cortocircuitos y sobre intensidades. El circuito integrado es un TPS4H160AQPWPRQ1 de texas instruments.

3.1.9. Entradas analógicas

La placa incorpora cuatro entradas analógicas que pueden leer señales de 0-10V o de 0-20mA, según la posición de un jumper en la placa. Esto se realiza mediante un amplificador operacional y una serie de resistencias. El amplificador operacional protege la entrada del microcontrolador de altos voltajes, ya que su salida se limita al valor de su entrada de alimentación.

3.1.10. Salidas analógicas

Para las salidas analógicas se ha elegido una señal de 0-10V. Esta señal se genera con el DAC que lleva integrado el propio microcontrolador y un amplificador operacional para elevar el voltaje a un máximo de 10V.

3.1.11. Diseño

Una vez cumplidos todos los requisitos de diseño, se realiza el routing de la placa. En este caso dos capas, la superior de señal y la inferior de GND. Los diseños completos se pueden encontrar en el *Anexo B*.

Referencias

- [1] Analog Devices. *AD7190 Data Sheet*, 2013.
- [2] SKF Group. *Y-Bearings and Y-Bearing units*, 2013.
- [3] ST Microelectronics. *ARM Cortex M in a Nutshell*.
- [4] St Microelectronics. *STM32G431x6 Data Sheet*, 2021.
- [5] Telma Retarders. *Spare parts catalog of C and CC series retarders*, 1998.
- [6] Texas Instruments. *TCAN341x 3.3-V CAN FD Transceivers*, 2023.