



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Trabajo Fin de Grado

Diseño e Implementación del sistema de control electrónico para frenos por corriente de Foucault. Aplicación a bancos de potencia para automóviles

MEMORIA

Autor:

Pedro Fco Fernández Muñoz

Tutor:

Sergio García-Nieto Rodríguez

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática



Valencia, mayo 2017

ÍNDICE

1. Introducción y Antecedentes del Proyecto	1
1.1. Banco de pruebas de motor	1
1.2. Frenos por corrientes de Foucault	2
1.3. Unidad de control del motor (ECU)	3
1.4. Medida de RPM en un motor	4
2. Motivación y Alcance del Proyecto	6
2.1. Contexto	6
2.2. Motivación	7
2.3. Objetivo del proyecto	8
3. Componentes del Sistema de Frenado	9
3.1. Freno dinamométrico	9
3.2. Controlador manual	10
3.3. Módulo de potencia	12
4. Prototipo de Interfaz Digital con el Módulo de Potencia	16
4.1. Necesidad y utilidad del prototipo	16
4.2. Microcontrolador ARM CORTEX-M4	18
4.2.1. Placa de desarrollo NUCLEO-F303K8	18
4.3. Potenciómetro digital MCP41010	19
4.4. Amplificador operacional LM324	22
4.5. Transceptor de bus CAN SN65HVD251	23
4.6. Configuraciones del prototipo	25
4.6.1. Controlador manual	25
4.6.2. Módulo de adquisición de datos	25
5. Diseño del Sistema de Control	28
5.1. Tipos de control	28
5.1.1. Control en bucle abierto	28
5.1.2. Control en bucle cerrado	29
5.2. Proceso de identificación del sistema	30
5.2.1. Metodología	30
5.2.2. Consideraciones sobre el sistema	30
5.2.3. Selección de datos	31
5.2.4. Generación del modelo	31
5.2.5. Simulación del modelo	33
5.3. Controlador PID	36
5.3.1. Especificaciones	37
5.3.2. Diseño de un controlador PI	41
5.3.3. Simulación	44
6. Implementación del Controlador	46
6.1. Discretización	46
6.2. Implementación	47
6.2.1. Algoritmo de control	47
6.2.2. Implementación en lenguaje C	48
7. Diseño de la PCB	50
7.1. Placa de Circuito Impreso (PCB)	50
7.2. Esquemático	52
7.3. <i>Software</i> de diseño	53
7.4. Componentes	54

7.4.1. Regulador de voltaje 7805T	55
7.4.2. Regulador de voltaje LD1117S33	56
7.4.3. Diodos LED	57
7.4.4. Conectores	59
7.4.5. Jumper	61
7.4.6. Condensadores y resistencias	61
7.5. Consideraciones del Diseño	62
7.5.1. Tamaño de las pistas	63
7.5.2. Tamaño de las vías	63
7.5.3. Planos de masa	64
8. Diseño y Fabricación de la Carcasa	66
8.1. Diseño	66
8.2. Fabricación	69
9. Resultados	70
9.1. Resultados de la implementación electrónica	70
9.2. Resultados del control	70
10. Conclusiones	73
11. Bibliografía	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Banco de pruebas de motor	1
Figura 2 Vehículo sobre dinamómetro de rodillos	2
Figura 3 Diagrama de un freno por corrientes de Foucault	2
Figura 4 Freno por corrientes de Foucault	3
Figura 5 ECU Link G4+ Storm Black	3
Figura 6 Sensor de posición del cigüeñal	4
Figura 7 Representación un sensor de efecto Hall junto a su señal de salida	5
Figura 8 El monoplaza FSUPV03 compitiendo en Hockenheim	7
Figura 9 Diagrama de funcionalidad del controlador	8
Figura 10 Freno dinamométrico del FSUPV	9
Figura 11 Controlador manual	10
Figura 12 Conector del controlador manual	10
Figura 13 Interior de controlador manual	11
Figura 14 Diagrama de pines del controlador manual	11
Figura 15 Módulo de potencia	12
Figura 16 Interior del módulo de potencia	13
Figura 17 Paquete integrado VS-P402W	13
Figura 18 Bornera del módulo de potencia	14
Figura 19 Circuito equivalente controlador manual y módulo de potencia	15
Figura 20 Relación entre la señal de control y la salida	15
Figura 21 Esquema del prototipo y su entorno	17
Figura 22 Prototipo de controlador	17
Figura 23 Series de microcontroladores STM32	18
Figura 24 Placa de desarrollo NUCLEO-F303K8	19
Figura 25 Potenciómetro digital MCP41010	19
Figura 26 Pinout del MCP41010	20
Figura 27 Diagrama de temporización del MCP41010	20
Figura 28 Osciloscopio mostrando barrido en rampa de todos los valores del potenciómetro conectado a 3.3 V	22
Figura 29 Amplificador operacional LM324 en encapsulado DIP	22
Figura 30 Configuración clásica de buffer	23
Figura 31 Pinout del LM324	23
Figura 32 Transceptor CAN SN65HVD251 en encapsulado SOP	24
Figura 33 Pinout del SN65HVD251	24
Figura 34 Adaptador USB-UART	26
Figura 35 Trama de adquisición de datos	26
Figura 36 Interfaz del programa Terminal	27
Figura 37 Estructura en bucle abierto	28
Figura 38 Estructura en bucle cerrado	29
Figura 39 Datos de la identificación	31
Figura 40 RPM filtradas	32
Figura 41 Estimación de diferentes modelos	32
Figura 42 Estructura de modelo de tercer orden con polos imaginarios y retardo	33
Figura 43 Esquema de simulación del modelo en Simulink	34
Figura 44 Simulación del modelo	34
Figura 45 Comparación del modelo con datos experimentales	35

Figura 46 Comparación del modelo con datos experimentales 2	36
Figura 47 Esquema PID	37
Figura 48 Error de posición	38
Figura 49 Sobreoscilación	38
Figura 50 Tiempo de establecimiento	39
Figura 51 Ruido en la señal de RPM	40
Figura 52 Lugar de las raíces sin retardo	41
Figura 53 Aproximación de Padé de 1er orden	42
Figura 54 Lugar de las raíces con retardo	42
Figura 55 Lugar de las raíces con controlador PI	43
Figura 56 Respuesta ante escalón del sistema controlado	44
Figura 57 Esquema de simulación del sistema controlado	44
Figura 58 Simulación del sistema controlado	45
Figura 59 Diferencia entre señal continua y discreta	46
Figura 60 PCB insolada	50
Figura 61 Placa de circuito impreso	50
Figura 62 Capas de una PCB	51
Figura 63 Esquemático del proyecto	52
Figura 64 Visualización 3D del controlador	53
Figura 65 Diseño de la PCB en Altium Designer	54
Figura 66 Potenciómetro digital MCP41010 en encapsulado SMD	54
Figura 67 Regulador 7805T en encapsulado TO-220	55
Figura 68 Pinout del 7805T	56
Figura 69 Esquema de conexión del 7805T	56
Figura 70 Regulador LD1117S33 en encapsulado SOT-223	56
Figura 71 Pinout del LD1117S33	57
Figura 72 Esquema de conexión del LD1117S33	57
Figura 73 LED de alimentación	58
Figura 74 Esquema de conexión del LED de alimentación	58
Figura 75 LED superior	58
Figura 76 Esquema de conexión del LED superior	58
Figura 77 Conector principal Molex MX120G	59
Figura 78 Esquema de conexión del conector principal	59
Figura 79 Conector de programación JST PH x5	60
Figura 80 Esquema de conexión del conector de programación	60
Figura 81 Jumper	61
Figura 82 Esquema de conexión de jumper	61
Figura 83 Comparación de tamaños de componentes SMD	62
Figura 84 Controlador con todos los componentes soldados	62
Figura 85 Tabla de anchura de pistas IPC-2152	63
Figura 86 Plano de masa de la capa superior	64
Figura 87 PCB del controlador	65
Figura 88 Vista explotada de la carcasa	67
Figura 89 Vista de la carcasa cerrada	67
Figura 90 Vistas de la parte inferior de la carcasa	68
Figura 91 Vistas de la parte superior de la carcasa	68
Figura 92 Impresora 3D Zortrax M200	69
Figura 93 Carcasa impresa en 3D	69
Figura 94 Controlador final	70
Figura 95 Resultado del controlador	71

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES DEL PROYECTO

1.1. BANCO DE PRUEBAS DE MOTOR

Un banco de pruebas de motor es una instalación estática acondicionada para realizar ensayos con un motor, en el caso que acontece a este proyecto, de combustión interna. Durante los experimentos se realiza una adquisición de datos que permite obtener medidas sobre multitud de parámetros de interés. Los ensayos que pueden realizarse tienen gran utilidad para el desarrollo de los mismos motores, así como de los sistemas que los rodean (refrigeración, transmisión, etc.), consiguiendo así optimizarlos. Además, también sirven para realizar verificaciones, controles de calidad y obtención experimental de parámetros.



Figura 1 Banco de pruebas de motor

En un banco de pruebas de motor se fija el motor a ensayar en una estructura, junto con todos los sistemas que son necesarios para su funcionamiento, y se conecta mecánicamente a un freno dinamométrico.



Figura 2 Vehículo sobre dinamómetro de rodillos

A diferencia de un banco de pruebas, un dinamómetro de rodillos es otro sistema con fines similares, pero en el que se ensaya el conjunto del vehículo completo, colocándolo sobre rodillos inerciales.

1.2. FRENOS POR CORRIENTES DE FOUCAULT

El freno dinamométrico es un dispositivo del banco de pruebas que permite someter el motor a una carga determinada. Existen diferentes tipos de frenos para esta aplicación, cada uno con sus ventajas e inconvenientes: hidráulicos, asíncronos, por corrientes de Foucault, etc. Este último es con el que se cuenta para la realización del proyecto.

Las corrientes de Foucault o corrientes parásitas, se inducen en materiales conductores, aunque éstos no sean ferromagnéticos, cuando se mueven en un campo magnético. Lo mismo ocurre, pero al contrario, cuando un material magnético se mueve en las proximidades de un conductor.

La Figura 3 muestra un diagrama simplificado de un freno por corrientes de Foucault. Cuando el disco, arrastrado por el motor, gira en el seno del campo magnético se inducen corrientes parásitas. Estas corrientes crean sus propios campos magnéticos, que interactúan con el de los imanes. La interacción da lugar a fuerzas de atracción y repulsión que se manifiestan en un frenado del disco.

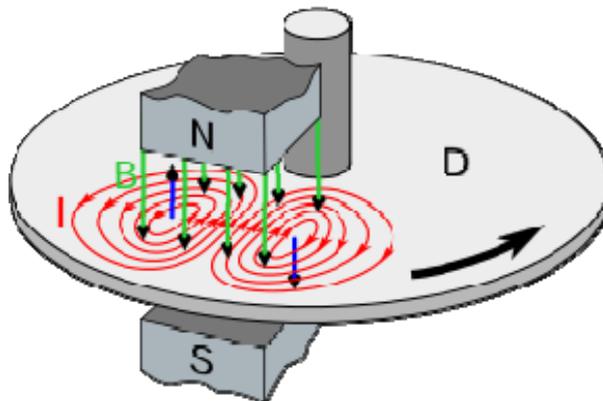


Figura 3 Diagrama de un freno por corrientes de Foucault

Un freno por corrientes de Foucault real, como el que se puede ver en la Figura 4 tiene exactamente el mismo funcionamiento descrito anteriormente.



Figura 4 Freno por corrientes de Foucault

El disco corresponde a un disco de acero y los imanes a unos potentes electroimanes que permiten al operario regular la potencia de frenado variando la alimentación eléctrica.

1.3. UNIDAD DE CONTROL DEL MOTOR (ECU)

La Unidad de Control del Motor (*Engine Control Unit, ECU*) es un sistema electrónico que se encarga, principalmente, de la gestión del motor en motores de combustión interna. Las ECUs son utilizadas por prácticamente la totalidad de los automóviles y motocicletas de la actualidad y hacen uso de complejos programas para realizar una gestión óptima del motor.



Figura 5 ECU Link G4+ Storm Black

La optimización del programa de la ECU que se puede conseguir con ensayos en un banco de pruebas repercute directamente en la mejora de las prestaciones del vehículo que la utiliza.

Su funcionamiento se basa en la lectura de diferentes sensores instalados en el motor, como el sensor de posición del árbol de levas o el sensor de posición del cigüeñal, con la que puede elaborar una respuesta y manejar actuadores como los inyectores o el ventilador del sistema de refrigeración.

Las ECUs utilizan una comunicación mediante el bus CAN, de manera que pueden enviar y recibir datos entre dispositivos que se encuentren en el mismo bus, configurados adecuadamente. De esta forma la ECU es capaz de retransmitir, por ejemplo, la información que adquiere de los diferentes sensores a otros dispositivos.

1.4. MEDIDA DE RPM EN UN MOTOR

Uno de los sensores disponibles de serie en la mayoría de motores de automóvil y motocicletas de la actualidad es el sensor de posición del cigüeñal, conocido en inglés como *crankshaft position sensor*.



Figura 6 Sensor de posición del cigüeñal

El sensor tiene dos finalidades principales:

- **Determinar la posición del cigüeñal de un motor**
Esto es imprescindible en motores con sistemas de inyección electrónica, para que la unidad de control del motor pueda inyectar combustible en el momento correcto. Además, si el encendido de los cilindros se realiza también electrónicamente, es necesario conocer el momento idóneo de activación de las bobinas de encendido.
- **Determinar la velocidad de rotación del cigüeñal**
Este dato permite realizar multitud de cálculos y se usa para gran variedad de tareas como visualización en el cuadro de instrumentos o estimación de la marcha engranada en conjunción con otros sensores.

El funcionamiento de este sensor se basa en el efecto Hall. La salida del sensor (digital) cambia de estado si se aproxima un metal o si se aleja. De esta forma el sensor es capaz de cambiar de estado según detecte o no los dientes de una corona dentada que gira solidaria al cigüeñal.

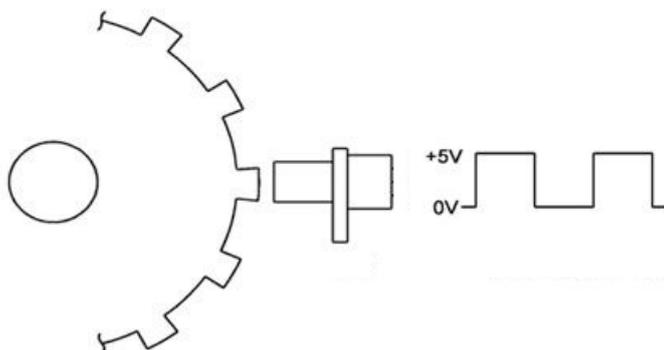


Figura 7 Representación un sensor de efecto Hall junto a su señal de salida

La salida del sensor es capturada por la ECU y procesada para obtener una cifra en RPM (Revoluciones Por Minuto) que corresponde a la velocidad de giro del cigüeñal.

Como con cualquier otro sensor, la ECU pone a disposición de cualquier dispositivo conectado al bus CAN la medida de RPM. De esta forma es posible conocer la velocidad de giro del motor sin necesidad de instalar ningún sensor extra.

2. MOTIVACIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO

2.1. CONTEXTO

Este trabajo se desarrolla dentro del equipo de Formula SAE de la Universidad Politécnica de Valencia, el FSUPV.

Formula SAE es una competición de ingeniería que consiste en el desarrollo de un vehículo de carreras, monoplace, con el objetivo, entre otros, de obtener el mayor número de puntos en diferentes eventos nacionales e internacionales. El desarrollo del monoplace se realiza íntegramente por estudiantes y abarca todo el proceso desde el diseño hasta la construcción, pasando por todas las etapas intermedias.

La competición se rige por una normativa moderadamente restrictiva, de manera que deja amplio lugar para la innovación y desarrollo. Una exhaustiva inspección técnica llevada a cabo en cada evento de FSAE es obligatoria antes de poder comenzar.

Los eventos de FSAE se dividen en diferentes pruebas que se clasifican en dos tipos:

- Pruebas estáticas

En estas se valoran exhaustivamente aspectos como el diseño del vehículo, el coste de producción o la estrategia empresarial (suponiendo que el equipo es una empresa que quiere producir el coche).

- Pruebas dinámicas

En estas se evalúan las prestaciones del vehículo, como aceleración, estabilidad, resistencia, fiabilidad o consumo.



Figura 8 El monoplaza FSUPV03 compitiendo en Hockenheim

FSAE promueve el desarrollo de habilidades como el trabajo en equipo, la resolución de problemas reales, la toma de contacto con el mundo de la competición etc.

El FSUPV es el primer equipo de FSAE de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Consta con una experiencia de 3 coches desarrollados y un cuarto en proceso en el momento de la escritura. El equipo está compuesto por entre 30 y 40 miembros que comparten la pasión por la ingeniería y el automovilismo.

2.2. MOTIVACIÓN

En el FSUPV es muy importante realizar el mayor número posible de kilómetros en pista para realizar pruebas con el coche y verificar sus diferentes elementos, ya que se trata de un vehículo diseñado 100% por el equipo. Existen numerosos factores que condicionan un día de pruebas. Por ejemplo, la disponibilidad de la pista, la disponibilidad de los miembros, el tiempo atmosférico o el transporte. Además, un día de pruebas en pista resulta económicamente muy costoso debido, por ejemplo, al gasto de neumáticos *slicks* de competición.

Aún con muchos kilómetros de pista resulta complejo afinar parámetros como la gestión del motor, que repercute directamente en el manejo y consumo del vehículo.

Debido a todo lo anterior y añadiendo más razones a favor, se ha optado por desarrollar dentro del equipo un banco de pruebas de motor.

El banco de pruebas del FSUPV consta de un motor más transmisión similares a los utilizados en el vehículo, junto con todos los sistemas auxiliares necesarios para su funcionamiento. Conectado a la salida de la transmisión se encuentra un freno dinamométrico por corrientes de Foucault. También se dispone de un sistema de adquisición de datos para recoger y analizar posteriormente los experimentos.

La disciplina de Motor necesita para la optimización del vehículo que el freno sea capaz de mantener el motor a unas RPM constantes durante los experimentos. De origen con el freno se provee un control manual sencillo que no satisface las necesidades del equipo porque no es capaz de lograr lo anterior, por esto se hace necesario desarrollar un dispositivo a medida que solucione el problema.

2.3. OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo de proyecto es desarrollar e implementar un controlador electrónico automático para un freno por corrientes de Foucault, capaz de mantener el motor a unas RPM de referencia.

El controlador debe, además:

- Recibir la referencia de RPM, así como otras órdenes, a través del bus CAN, que serán enviadas por otro dispositivo ajeno al proyecto. (Se trata de un ordenador con una interfaz gráfica).
- Recibir la velocidad el motor (RPM) a través del bus CAN, que será enviada por la ECU en lugar de usar sensores adicionales.
- Alimentarse a partir de una tensión continua de 12 V, al igual que el resto de equipos del banco.

El proyecto también debe:

- Adaptarse a los recursos y necesidades del equipo.
- Utilizar preferentemente y si es posible componentes previamente testeados en otros proyectos y que hayan dado buen resultado.

A continuación, se muestra un gráfico que resume esquemáticamente el cometido del controlador con el fin de clarificar:

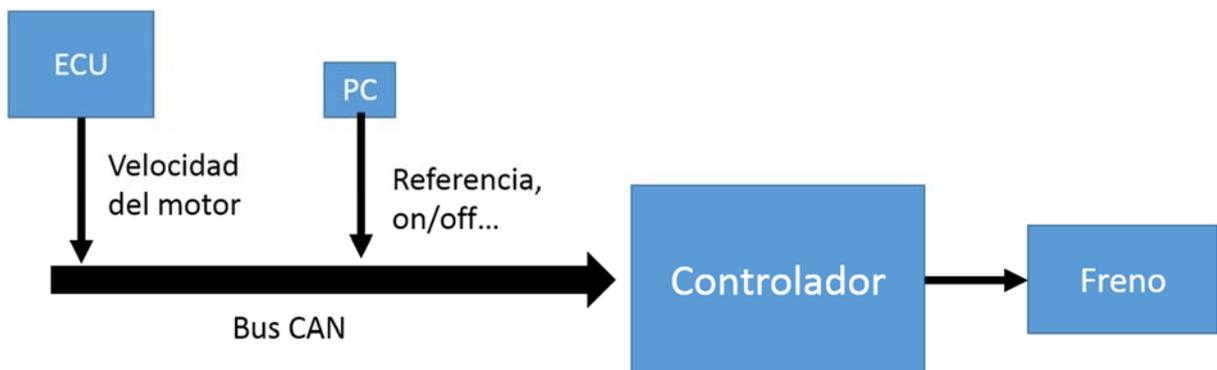


Figura 9 Diagrama de funcionalidad del controlador

En el diagrama se observa como la ECU transmite la velocidad del motor, a través del bus CAN, de igual forma que se comunica la referencia y otros parámetros al controlador.

Esta estructura será la que se desarrollará durante los próximos apartados.

3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE FRENADO

Con el objetivo de desarrollar un controlador automático que sea capaz de actuar sobre el sistema de frenado, es necesario realizar un estudio a fondo de todos los componentes del sistema. De ello versarán los siguientes apartados.

Además del freno dinamométrico propiamente dicho, el sistema está compuesto por el módulo de potencia y el controlador manual.

- El módulo de potencia recibe la señal del controlador y la eleva a niveles de tensión apropiados para el funcionamiento del freno.
- El controlador manual es un mando sencillo que envía la señal de control al módulo de potencia y permite ajustar la potencia de frenado.

3.1. FRENO DINAMOMÉTRICO

El freno con el que se cuenta para el proyecto está fabricado por la empresa Frenelsa.



Figura 10 Freno dinamométrico del FSUPV

El dispositivo consta de 12 bobinas conectadas en serie con una resistencia total de 25.54 ohmios. La potencia de frenado depende de la tensión que se le aplique, que como máximo ha de ser de

192 V en corriente continua según especifica el fabricante. La corriente que puede absorber el aparato a máxima potencia es de 7.5 amperios.

Los parámetros del freno han sido obtenidos del fabricante:

Voltaje nominal	192 V CC
Resistencia total	25.54 Ω
Corriente nominal	7.5 A

3.2. CONTROLADOR MANUAL

El controlador manual es un dispositivo de la marca ProTech, con una caja de plástico duro, ligera.



Figura 11 Controlador manual

No se dispone de ningún tipo de información sobre este dispositivo, por lo que se tiene que investigar su funcionamiento. Para ello se realiza una inspección visual.

El mando central no gira indefinidamente, sino que tiene topes a ambos lados, y aparenta ser un potenciómetro convencional. Al otro lado del cable se encuentra un conector con 3 terminales.



Figura 12 Conector del controlador manual

A continuación, se desatornilla la carcasa para inspeccionar el interior.

INTERIOR



Figura 13 Interior de controlador manual

A la vista del interior se puede apreciar la simplicidad del dispositivo y se confirma la existencia de un potenciómetro, de 4.7 k Ω . A falta de realizar medidas en el conector del módulo de potencia, ya se intuye que se trata de un divisor de tensión.

En la siguiente figura se muestra la relación de pines del controlador manual con su conector visto desde el mismo punto que en la Figura 12.

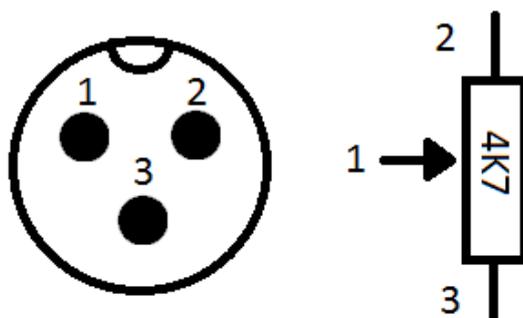


Figura 14 Diagrama de pines del controlador manual

Según el diagrama, los terminales 2 y 3 corresponderían a los extremos del potenciómetro, que se utilizarían para alimentar el divisor de tensión, mientras que el terminal 1 es el cursor, que es la salida del divisor.

3.3. MÓDULO DE POTENCIA

El módulo de potencia disponible para el proyecto está fabricado por la empresa Dynostar y va embebido en una caja de aluminio.



Figura 15 Módulo de potencia

Al igual que con el controlador manual, no se dispone de ninguna información aparte de la que se puede obtener de los adhesivos de la caja.

El módulo se conecta a la red eléctrica a través de un conector IEC C14 convencional. También posee un conector del mismo tipo, pero opuesto, al del controlador manual para su conexión (en la caja está rotulado erróneamente como "2 PIN", a pesar de que consta de 3 pines). Por último, sale del módulo una manguera de cable de sección considerable con tres hilos: marrón, azul y amarillo/verde. Los cables se conectan al freno, los dos primeros a las bobinas y el tercero, la tierra, a la estructura metálica.

A continuación, se desatornilla la carcasa metálica para inspeccionar el interior.

INTERIOR

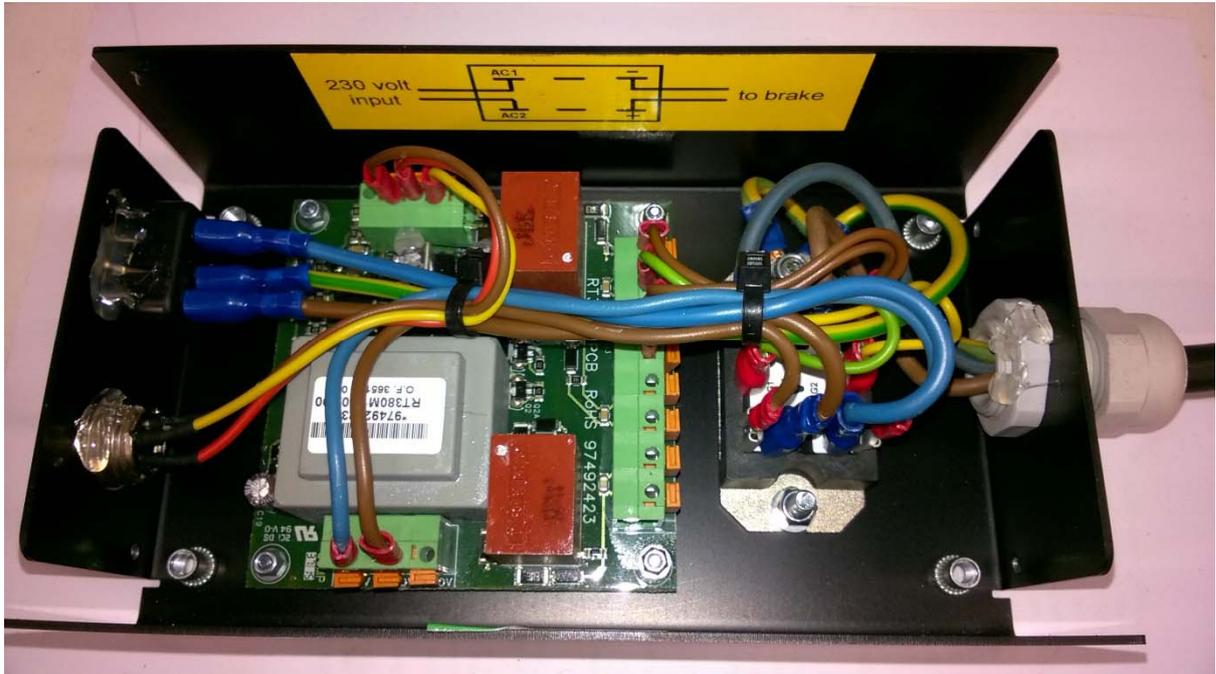


Figura 16 Interior del módulo de potencia

A la izquierda de la Figura 16 llama la atención una placa electrónica alimentada por un transformador (de color gris, en el centro), a la que se conectan los cables que proceden del conector del control manual.

A la derecha se puede observar un “módulo de potencia integrado” de la marca Vishay, modelo VS-P402W. De su *datasheet* se puede extraer su configuración interna.

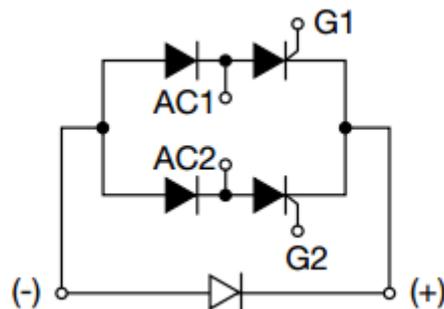


Figura 17 Paquete integrado VS-P402W

A la vista de la Figura 17 se observa que incluye dos diodos más un tercero “auxiliar” y dos SCRs, y se deduce que el módulo usa una configuración clásica de puente rectificador semicontrolado.

Con este dispositivo se consigue rectificar de manera sencilla y con bajo coste la corriente de la red eléctrica, que entraría por AC1 y AC2, y saldría rectificadas por (-) y (+). Tan sólo se necesita un circuito de control que provea las señales de disparo a los SCRs (G1 y G2). Dependiendo de cuándo se produzcan esos disparos la tensión eficaz de la salida aumenta o disminuye. De esta

forma se consigue variar la tensión continua que se aplica a las bobinas del freno, y por consiguiente la potencia de frenado.

El diodo extra que se encuentra en los extremos de la salida y que no forma parte del puente actúa como diodo "flyback", es decir, recircula los picos de tensión que se producen cuando el componente se conecta a una carga inductiva, y que pueden dañar el puente.

Aunque ha quedado claro el funcionamiento en términos generales del aparato, lo más relevante para el proyecto es la interacción del controlador manual con el módulo de potencia con el objetivo de conocer cómo actuar sobre este último a través del conector de 3 pines.

Siguiendo los 3 cables que proceden del conector de 3 pines se observa que se introducen en una bornera de la placa electrónica.

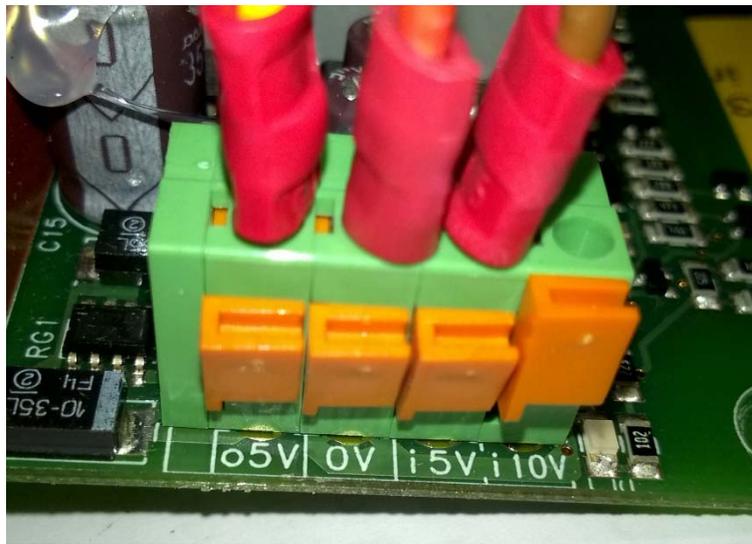


Figura 18 Bornera del módulo de potencia

Observando la serigrafía sobre la placa electrónica junto con las averiguaciones sobre el funcionamiento del controlador manual, y verificando con mediciones se obtiene lo siguiente:

Borne	Observaciones
o5V	Salida de 5 V
0V	0 V
i5V	Entrada de 0 a 5 V

Se confirma así que el potenciómetro del controlador manual se comporta como un divisor de tensión que proporciona una tensión variable de 0 a 5 V a partir de un rail de 5 V y otro de masa (0 V).

También, se mide y se verifica visualmente siguiendo el ruteado de la placa electrónica, desde la bornera de la Figura 18, que la impedancia de entrada del módulo de potencia equivale a 6 k Ω . Este dato es importante para el diseño de la etapa de salida del controlador automático.

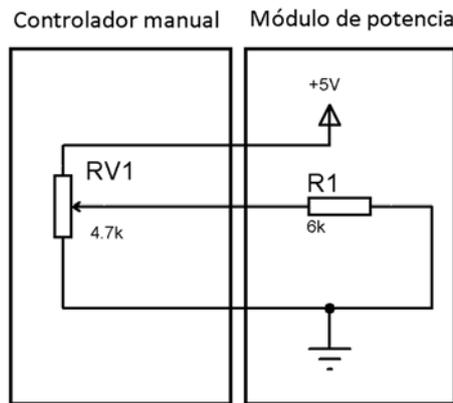


Figura 19 Circuito equivalente controlador manual y módulo de potencia

El circuito equivalente que corresponde al controlador manual más la etapa de entrada al módulo de potencia quedaría como en la Figura 19.

SALIDA VS ENTRADA

Para concluir con el estudio del módulo de potencia se realiza una medida de la salida del módulo en función de la señal de entrada de 0 a 5 voltios, de la que se obtiene la siguiente gráfica.

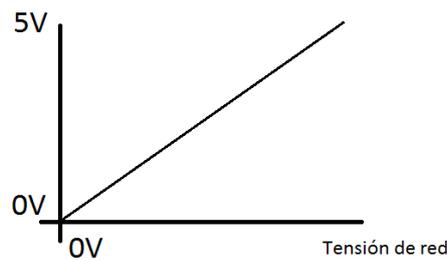


Figura 20 Relación entre la señal de control y la salida

Se observa que cuando la entrada son 5 voltios la salida es la tensión de red eficaz (220-240 V) (en realidad, aproximadamente). Esto es muy importante porque significa que el módulo de potencia del que se dispone es capaz de producir una tensión superior a la nominal del freno (192 V), por lo tanto, habrá que tener esto en cuenta para el diseño del controlador.

4. PROTOTIPO DE INTERFAZ DIGITAL CON EL MÓDULO DE POTENCIA

4.1. NECESIDAD Y UTILIDAD DEL PROTOTIPO

Por definición, un prototipo es un primer ejemplar que se fabrica previamente a la puesta en producción del producto final con el objetivo de detectar errores.

En el caso de este proyecto, uno de los motivos de su construcción alude a la definición anterior, pero otro es particular y típico de los proyectos de regulación, donde se requiere identificar un sistema.

A continuación, se detallan en profundidad los motivos que llevan a fabricar el prototipo de controlador:

- **Pruebas de funcionamiento**

Una vez planteado el problema y habiendo analizado las posibles soluciones, el ingeniero se decide por una, pero lo más probable es que no se acierte en al 100% a la primera. El ingeniero debe realizar experimentos con los componentes, poniendo a prueba su solución, posiblemente tenga que lidiar con imprevistos, de manera que poco a poco se perfile el producto final. Por ello se hace imprescindible la fabricación de un prototipo que permita reajustes de manera sencilla y rápida.

El objetivo final del proyecto es desarrollar un controlador automático que será soldado en una placa electrónica. Las placas electrónicas fabricadas por una empresa especialista tienen un coste relativamente alto y no permiten realizar grandes cambios una vez que se ha encargado o soldado sobre ella. Por ello, de nuevo se ve clara la necesidad de tener un prototipo funcional antes de proceder al diseño de la placa.

- **Modelado del sistema**

Dada la naturaleza de este proyecto, como se explica en posteriores apartados, es necesario crear un modelo del sistema del freno previamente al diseño del controlador. Para ello se debe realizar un sistema de adquisición de datos (*datalogger*) que permita adquirir y almacenar datos sobre el comportamiento del sistema para ser estudiados posteriormente.

En algunos casos, la adquisición de datos puede llegar a realizarse con el mismo *hardware* del producto final, cambiando el *software*, sin embargo, otras veces no es posible o resulta más ventajoso realizar una adquisición modificándolo. En este proyecto, si bien hubiese sido

posible modelar con el producto final, por precaución y ya que se dispone del prototipo, se hará con éste último.

Con el fin de clarificar y facilitar el entendimiento de los próximos apartados, a continuación, se presenta un esquema de la configuración del prototipo y su entorno.

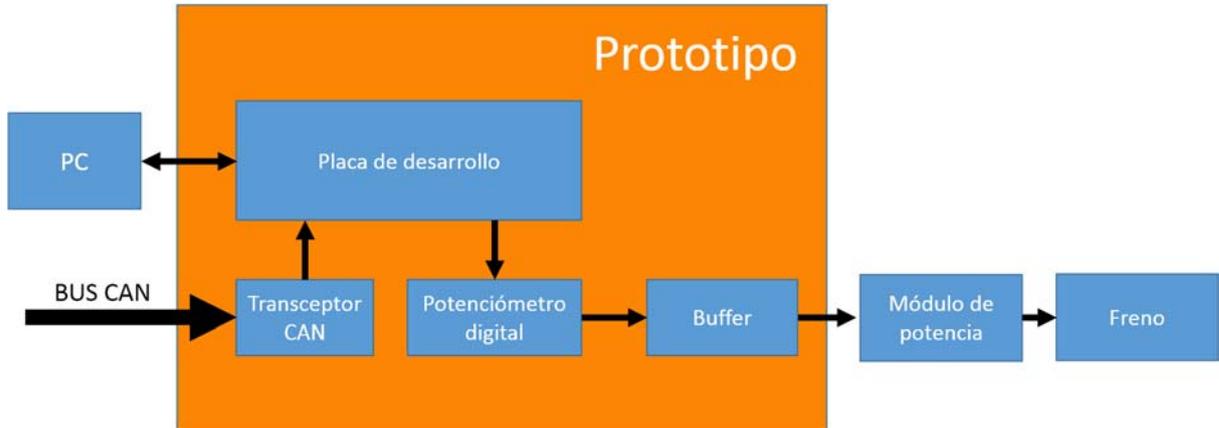


Figura 21 Esquema del prototipo y su entorno

El prototipo se realiza en placa perforada convencional, por su bajo coste, usando componentes con encapsulado DIP (*Dual Inline Package*), por su facilidad de soldar y desoldar.

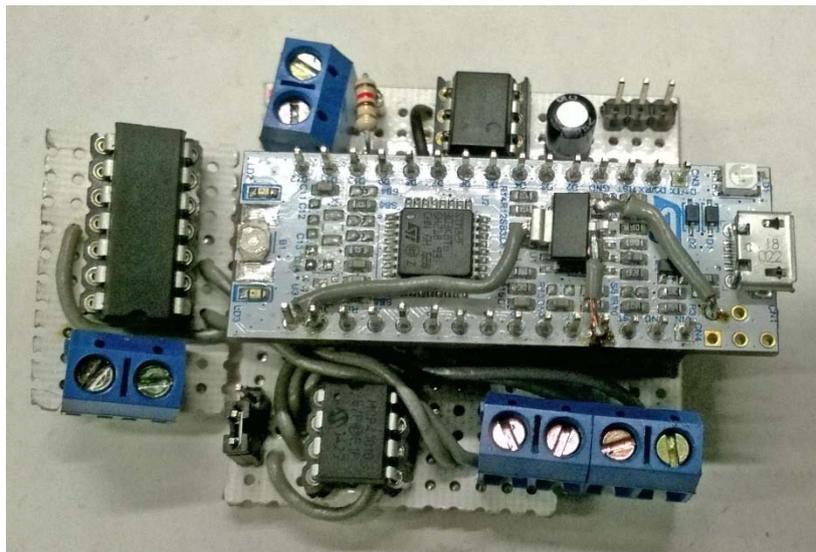


Figura 22 Prototipo de controlador

Los componentes más importantes que conforman el prototipo se detallan en los siguientes apartados. Sin embargo, cabe destacar el uso de otros componentes no tan importantes, como *jumpers* para cambiar la configuración del *hardware* de forma rápida, o bornas para conectar y desconectar el prototipo de los otros sistemas fácilmente.

4.2. MICROCONTROLADOR ARM CORTEX-M4

El “cerebro” del controlador que ejecuta el algoritmo de control y el que al fin y al cabo maneja el freno es un microcontrolador ARM Cortex-M4 de la empresa STMicroelectronics, modelo STM32F303K8T6.

CARACTERÍSTICAS

Las características que se muestran a continuación son sólo las más relevantes:

- CPU de 32 bits
- Velocidad de CPU máx. 72 MHz
- Oscilador interno
- Unidad de coma flotante
- 64 Kbytes de memoria Flash
- 12 Kbytes de memoria SRAM
- Alimentación entre 2.0 y 3.6 V
- Interfaces de comunicación (CAN, USART, I2C, etc.)



Figura 23 Series de microcontroladores STM32

Este microcontrolador se elige por dos razones, principalmente: primero, dispone de suficiente potencia y memoria para la aplicación sin resultar desmesurada como en el caso de las series STM32F4 o superiores, y segundo, se tiene experiencia con la marca y la serie, de trabajos anteriores.

4.2.1. Placa de desarrollo NUCLEO-F303K8

Para la fabricación del prototipo se utiliza una placa de desarrollo NUCLEO-F303K8 también de la compañía STMicroelectronics, que posee el microcontrolador citado en el apartado anterior y que está especialmente pensada, como su nombre indica, para el “desarrollo” de aplicaciones.

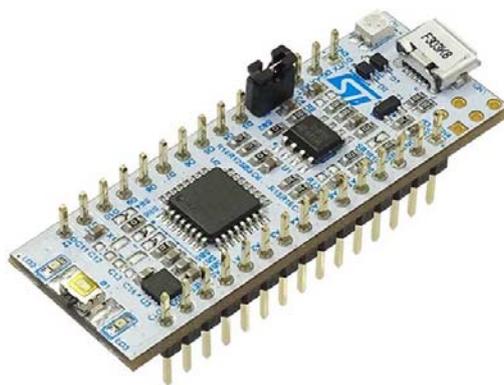


Figura 24 Placa de desarrollo NUCLEO-F303K8

El uso de una placa como esta tiene varias ventajas frente a la utilización de un microcontrolador por separado, ya que dispone de varias características incorporadas:

- Conectores para ser montada en placa perforada o placa de pruebas *proto-board*.
- Programador y *debugger* *ST-Link* integrado, de manera que puede programarse el microcontrolador utilizando un simple cable USB - micro USB.
- LED y pulsador para facilitar el desarrollo y depuración.
- Reguladores de voltaje que, además de alimentar los periféricos de la placa, proveen tensiones de 3.3 y 5 V para alimentar componentes externos.
- Todos los demás componentes necesarios para que el microcontrolador funcione apropiadamente.

Se puede encontrar el código que ejecuta el microcontrolador en detalle en documento Manual de Programación, apartados 2 y 3.

4.3. POTENCIÓMETRO DIGITAL MCP41010

El potenciómetro digital es el componente principal que regula la potencia de frenado. La lógica tras su funcionamiento es la misma que la del potenciómetro analógico que se encuentra en el controlador manual. La idea es formar un divisor de tensión y obtener una salida variable de 0 a 5 voltios.

Un potenciómetro digital, salvo por algunas peculiaridades que se verán próximamente, cumple la misma función que un potenciómetro analógico, con la diferencia de que su cursor se maneja digitalmente mediante un microcontrolador a través de una interfaz de comunicación, en este caso, SPI.

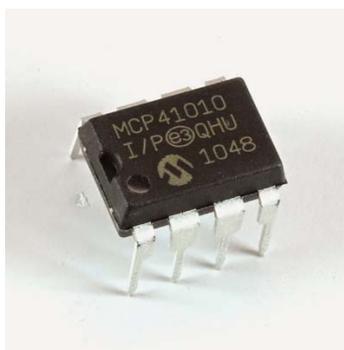


Figura 25 Potenciómetro digital MCP41010

CARACTERÍSTICAS

El producto elegido es el MCP41010 de la marca Microchip, cuyas características más importantes se detallan a continuación:

- 256 pasos
- 10 kΩ de resistencia total
- Interfaz SPI
- Alimentación de 2.7 a 5.5 V
- Corriente máxima: 1 mA

CONEXIÓN

Atendiendo al patillaje del dispositivo que se puede ver en la Figura 26, se debe conectar el mismo de la siguiente forma:

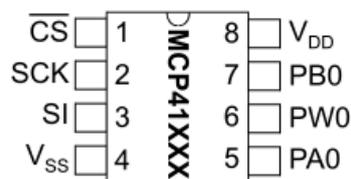


Figura 26 Pinout del MCP41010

- **CS, SCK, SI:** Corresponden a la interfaz SPI y se conectan al microcontrolador. CS es la entrada de *Chip Select*, SCK es la entrada de reloj y SI (*Slave Input*) es la entrada de datos al potenciómetro.
- **Vdd, Vss:** Corresponden a los terminales de alimentación, Vdd +5 V y Vss 0 V. El fabricante recomienda colocar un condensador de desacoplo entre Vdd y masa.
- **PB0, PW0, PA0:** Corresponden a la parte inferior, cursor y superior del potenciómetro, respectivamente. Estos pines han de conectarse al módulo de potencia de la siguiente manera: PB0 a 0V, PA0 a o5V y PW0 que es la tensión de control se conecta a un buffer como se verá en siguientes apartados.

UTILIZACIÓN

La utilización de este dispositivo a través de comunicación SPI es similar a otros componentes que usan el mismo protocolo.

Como indica el diagrama de la Figura 27 cada trama ha de ser de 16 bits que se transmiten en 16 flancos del reloj.

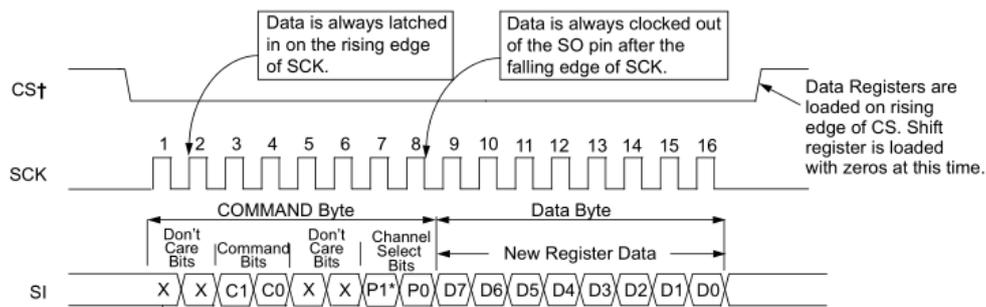


Figura 27 Diagrama de temporización del MCP41010

- En primer lugar, se ha de poner el pin de CS a nivel bajo para empezar la transmisión.
- Se envían 2 bits con cualquier valor.
- Se envían los bits C1 = 0 y C0 = 1 para seleccionar el modo escritura.
- Se envían 3 bits con cualquier valor (el bit P1 no se utiliza en el modelo que se está usando).
- Se envía el bit P0 = 1.
- Se envía una palabra de 8 bits (D7 a D0) con el valor del potenciómetro escalado a 256.
- Se pone el pin de CS a nivel alto para finalizar la transmisión.

Para clarificar se proveen los siguientes ejemplos de la palabra completa de 16 bits:

Ohmios	Escalado a 256	Binario	Hexadecimal
0	0	0001000100000000	0x1100
5 k	128	0001000101111111	0x117F
10 k	256	0001000111111111	0x11FF

Se puede encontrar la implementación en detalle del código del potenciómetro digital en el documento Manual de Programación, apartado 3.4.

PECULARIEDADES

Existen una serie de peculiaridades en este dispositivo que se hacen notar tras numerosas pruebas o que sólo se descubren leyendo hasta la última letra de la hoja de características, que pueden llegar a ser de gran importancia y que alejan a este potenciómetro de uno analógico. He aquí las más importantes:

- Cualquiera de los terminales del potenciómetro propiamente dicho (PB0, PA0 o PW0) no puede recibir una tensión superior a la tensión de alimentación del integrado, de lo contrario se producen problemas de saturación.
- No existe ningún tipo de aislamiento entre los terminales del potenciómetro y los de control o alimentación.
- Cuando se proporciona alimentación, el valor por defecto es la mitad del valor nominal.
- Cuando no se proporciona alimentación, el valor es indeterminado.
- En la práctica, al menos en la configuración utilizada en este proyecto, cuando se intenta obtener una corriente de salida cercana al miliamperio que se promete en las hojas de características, la tensión cae.

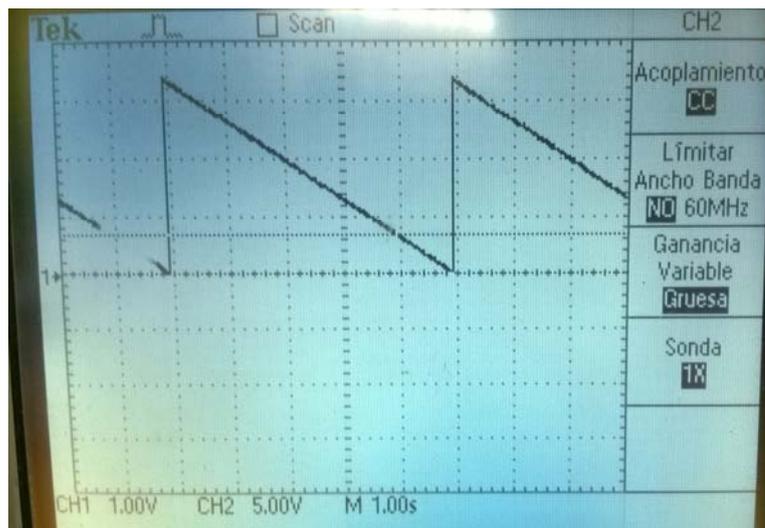


Figura 28 Osciloscopio mostrando barrido en rampa de todos los valores del potenciómetro conectado a 3.3 V

En la Figura 28 se puede ver una de las pruebas para verificar el buen funcionamiento del potenciómetro que consiste en realizar un barrido de todos los valores que puede tomar.

4.4. AMPLIFICADOR OPERACIONAL LM324

El amplificador operacional LM324 de Texas Instruments es un componente clásico de propósito general utilizado en multitud dispositivos. De hecho, la placa electrónica del módulo de potencia (Ver Figura 16) utiliza uno.



Figura 29 Amplificador operacional LM324 en encapsulado DIP

Este componente es un amplificador *quad*, lo que significa que contiene 4 amplificadores independientes (sólo comparten la alimentación).

Si bien sólo se necesitará un operacional de los cuatro, se utilizará este componente porque se tiene una amplia experiencia utilizándolo en otros proyectos, así como numerosas unidades en diferentes encapsulados a disposición de la disciplina de electrónica del FSUPV.

CARACTERÍSTICAS

- Tensión de alimentación de 3 a 32 V
- Alimentación simétrica o asimétrica
- Corriente máxima de salida: 40 mA

UTILIZACIÓN

Como se ha visto en el apartado sobre el potenciómetro digital, este sólo puede ofrecer una corriente de salida de 1 mA como máximo. Esto hace que cualquier cosa que se conecte a él ha

de tener una alta impedancia de entrada para que no se produzcan caídas de tensión o daños en el componente.

Si se conectase el potenciómetro directamente al módulo de potencia, que posee una impedancia de entrada de 6 kΩ, en el peor de los casos, en el que la señal de salida sea de 5 V:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5}{6000} = 0.83 \text{ mA}$$

La intensidad requerida es cercana al límite del potenciómetro y como se ha visto experimentalmente, no se comporta bien cuando esto ocurre.

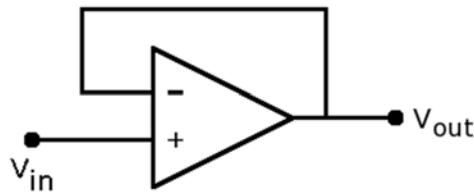


Figura 30 Configuración clásica de buffer

Para solucionar esto se opta por colocar un amplificador operacional en configuración de *buffer* o seguidor de tensión a la salida del potenciómetro, de manera que sea el amplificador el que envíe la señal al módulo de potencia.

CONEXIÓN

Atendiendo al patillaje del dispositivo que se puede ver en la Figura 31, se debe conectar el mismo de la siguiente forma:

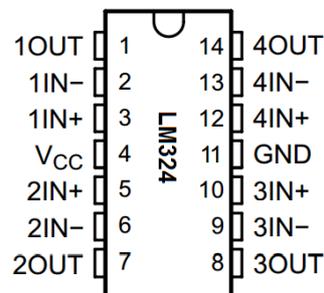


Figura 31 Pinout del LM324

- **1OUT:** Corresponde a la salida, que se conecta a la bornera del módulo de potencia, a 5V. También hay que conectarlo a 1IN- para proveer realimentación como se detalla en la configuración de *buffer*.
- **1IN-:** Se trata de la entrada inversora. Se conecta a la salida para obtener realimentación.
- **1IN+:** Corresponde a la entrada no inversora. Se conecta a la salida del potenciómetro.
- **Vcc y GND:** Se conectan a la alimentación. Vcc a 5 V y GND a 0 V.

4.5. TRANSCEPTOR DE BUS CAN SN65HVD251

Para poder recibir datos de la ECU y de otros dispositivos es necesario establecer una conexión de bus CAN. El microcontrolador ARM Cortex-M4 con el que se cuenta tiene capacidades de conexión a este bus porque en su interior posee un controlador de bus CAN. Sin embargo, esto no es suficiente para establecer una comunicación.

Entre el microcontrolador y el bus es necesario introducir un transceptor cuya función a grandes rasgos es adaptar niveles de tensión y enviar y recibir datos del bus de la manera apropiada según el estándar CAN ISO 11898.

El componente utilizado es el SN65HVD251 de Texas Instruments, con el que se tiene experiencia de proyectos anteriores.

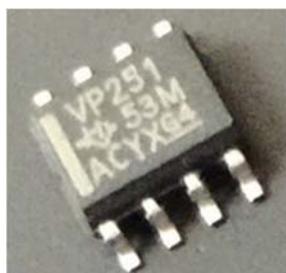


Figura 32 Transceptor CAN SN65HVD251 en encapsulado SOP

CARACTERÍSTICAS

- Velocidad de transmisión hasta 1 Mbps
- Permite hasta 120 nodos en el mismo bus CAN
- No perturba el bus si no recibe alimentación

CONEXIÓN

Atendiendo al patillaje del dispositivo que se puede ver en la Figura 33, se debe conectar el mismo de la siguiente forma:

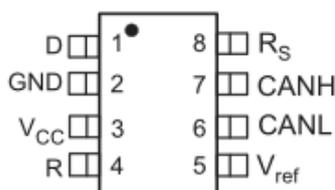


Figura 33 Pinout del SN65HVD251

- **D:** Corresponde a la entrada de datos al transceptor, lo que se envía. Se debe conectar al pin CANTX del microcontrolador.
- **R:** Corresponde a la salida de datos al transceptor, lo que se recibe. Se debe conectar al pin CANRX del microcontrolador.
- **Rs:** Sirve para configurar la velocidad de comunicación. De acuerdo a la velocidad del bus que es 1 Mbps, la máxima permitida por el componente, se debe colocar a masa.
- **V_{CC} y GND:** Se conectan a la alimentación. V_{CC} a 5 V y GND a 0 V.
- **CANH y CANL:** Se conectan al bus CAN, a las líneas del bus con el mismo nombre.
- **V_{ref}:** Voltaje de referencia de la salida. No es necesario que se conecte.

En el documento Manual de Programación, apartado 3.3, se puede encontrar el código relacionado con la comunicación CAN.

RESISTENCIA DE TERMINACIÓN DE BUS

El bus CAN tiene una impedancia nominal de 60 Ω . Esto se consigue gracias dos resistencias de 120 Ω que se colocan en paralelo, cada una en una terminación del bus. Una de estas resistencias

forma parte de la ECU, que corresponde al extremo “inicial” del bus, por lo que es necesario colocar otra en el extremo opuesto “final”, es decir en el dispositivo que se conecte en esta terminación.

El prototipo consta de una resistencia de 120 Ω para tal fin conectada entre CANH y CANL, que puede ser desconectada si se requiere. Esto es así debido a que es posible que el controlador sea el dispositivo que se conecte en la terminación del bus, o puede que sea otro dispositivo con su propia resistencia. En este último caso, para mantener la impedancia del bus en 60 Ω con la ECU, el prototipo y otro dispositivo más conectados, la resistencia de uno de ellos debe ser desconectada.

4.6. CONFIGURACIONES DEL PROTOTIPO

4.6.1. Controlador manual

Durante las primeras etapas del trabajo con el prototipo, con el objetivo de comprobar si el montaje funciona y si es posible un control básico del freno de manera digital, se programa el dispositivo como un controlador manual. Esto quiere decir que la funcionalidad será la misma que la del controlador manual de la Figura 11, pero de manera digital. Para ello, se utilizará un ordenador conectado al prototipo que le envíe la potencia de frenado deseada y este debe actuar sobre el módulo de potencia para conseguirla.

La conexión del PC con el prototipo se realiza a través de USB. El USB se conecta al programador/*debugger* integrado en la placa de desarrollo utilizada y el microcontrolador se pone en modo *debug*. De esta forma es posible modificar las variables del programa que se está ejecutando en tiempo real, lo que provee una manera fácil y rápida de controlar el freno digitalmente.

Con el fin de clarificar, concretamente lo que se hace para modificar el nivel del freno es cambiar una variable que corresponde al cursor del potenciómetro. Éste, modifica su salida, que tras pasar por el *buffer* llega al módulo de potencia. Para más claridad se puede observar la Figura 21.

LIMITACIÓN DIGITAL DEL MÓDULO DE POTENCIA

Como se ha visto en apartados anteriores, la señal de 0 a 5 V que puede ofrecer el controlador manual original equivale a una variación de 0 V a la tensión de red, lo que resulta en un voltaje excesivo para el freno porque supera su especificación nominal de 192 V.

Para solucionar este inconveniente y teniendo en cuenta que el valor de la tensión de red fluctúa, se realiza una limitación por *software* de la señal de control, de manera que sólo pueda tomar valores de 0 a 4 V. La justificación se basa en tomar como tensión de red el caso desfavorable de tener 240 V.

$$240 V * \frac{4 V}{5 V} = 192 V$$

La limitación por *software* puede encontrarse implementada en el documento Manual de Programación, apartado 3.4.2.

4.6.2. Módulo de adquisición de datos

Una vez que se consigue actuar sobre el freno de manera digital se configura el prototipo como módulo de adquisición de datos para realizar el modelado del sistema y posterior verificación de

las prestaciones del controlador. Para este cometido es necesario, básicamente, actuar sobre el freno digitalmente a la vez que se adquieren datos de la sesión para procesarlos más tarde.

En el apartado anterior ya se ha tratado cómo actuar sobre el freno con el prototipo a través de un PC y el *debugger*. Para realizar la adquisición de datos se configura el prototipo para enviar información sobre las RPM del motor y la señal del potenciómetro (acción de control) a un ordenador que se encontrará grabando estos datos.

COMUNICACIÓN SERIE MEDIANTE UART

Para transmitir los datos adquiridos a un ordenador se utiliza una comunicación serie clásica y simple mediante el periférico UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) que se encuentra integrado en el microcontrolador.

Esta comunicación es sólo temporal para el único cometido de adquirir los datos para el modelado y la verificación del controlador, no se usará en el producto final.

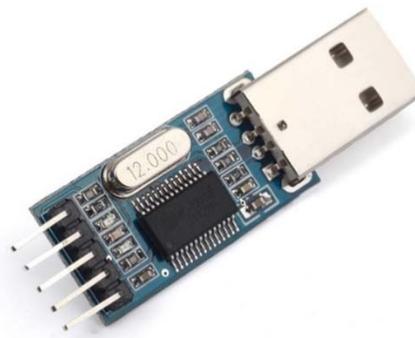


Figura 34 Adaptador USB-UART

La comunicación serie por UART no requiere de ningún componente extra en el prototipo, tan sólo es necesario un sencillo adaptador para poder conectar el puerto de comunicaciones al PC por USB.

TRAMAS

Dado que se trata de una comunicación sencilla y temporal, cuya programación no aparece en el Manual de Programación, se detalla la composición de las tramas de datos que se envían al PC.

Cada trama se compone de 6 bytes (del 5 al 0) que se estructuran de la siguiente forma:

- **Byte 5:** Byte de inicio. Es siempre 0xFF.
- **Bytes 4 y 3:** RPM_L y RPM_R. La combinación de ambos bytes corresponde a las RPM.
- **Bytes 2 y 1:** pot_L y pot_R. La combinación de ambos bytes corresponde a la señal del potenciómetro multiplicada por 100.
- **Byte 0:** Byte de *checksum*. Se calcula como el resto de dividir la suma de los bytes anteriores entre 255.

B5	B4	B3	B2	B1	B0
0xFF	RPM_L	RPM_R	pot_L	pot_R	<i>checksum</i>

Figura 35 Trama de adquisición de datos

Para clarificar, se provee un ejemplo. Con 6543 RPM y el potenciómetro a 2.1 V, se obtendría:

0xFF	0x19	0x8F	0x00	0xD2	0x7B
------	------	------	------	------	------

GRABACIÓN Y POSTPROCESADO

Las tramas se capturan en el PC con el programa Terminal.

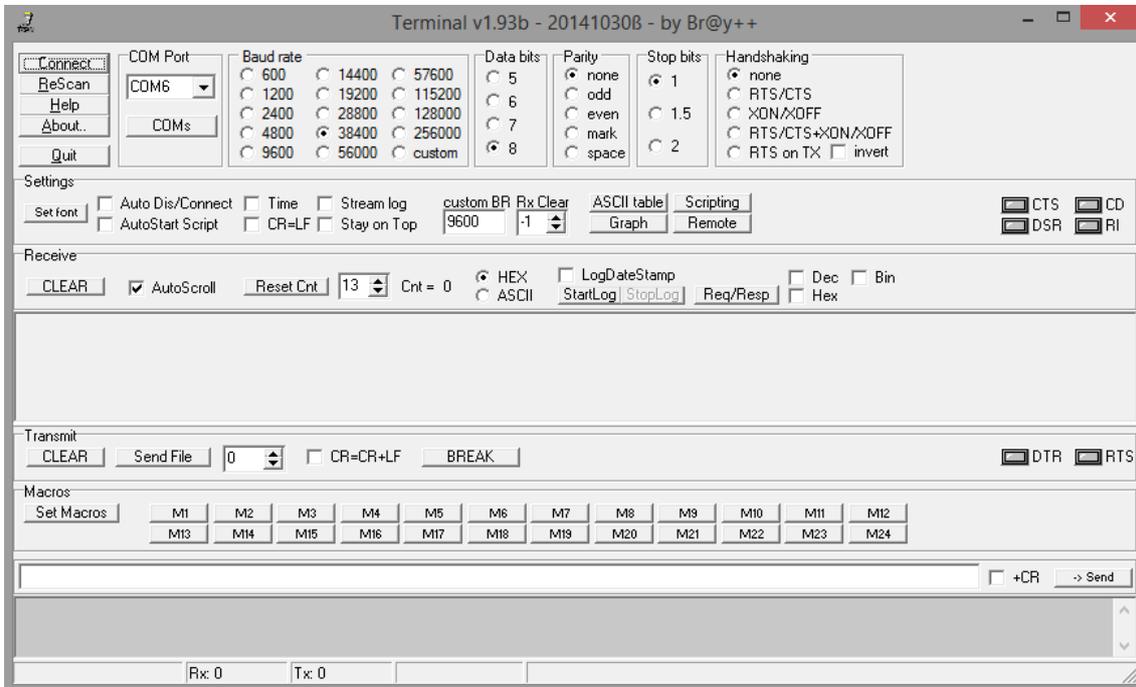


Figura 36 Interfaz del programa Terminal

El *software* Terminal es un programa para el envío y recepción de datos por el puerto de comunicaciones serie. A pesar de ser gratuito, constar tan sólo de un archivo .exe, y ocupar únicamente 336 KB de memoria (la versión utilizada en este proyecto), es capaz de realizar multitud de tareas. Entre ellas, permite capturar en un archivo de texto plano lo que se recibe por el puerto COM. De esta forma, las tramas que provienen del controlador se graban en el PC.

Posteriormente, se procesan los archivos de texto en el programa MATLAB para analizar los datos.

5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control es uno o varios dispositivos que se encargan de actuar sobre diferentes partes del sistema que se desea controlar para que este se comporte de la manera deseada.

En el caso de este proyecto se desea controlar el motor de combustión (su velocidad de giro) actuando sobre el freno que gira solidario, lo que a su vez implica actuar sobre el módulo de potencia que provee alimentación al freno, con un dispositivo controlador.

5.1. TIPOS DE CONTROL

Existen dos tipos de estructuras de control dependiendo de si existe o no realimentación o *feedback* sobre el estado del sistema a controlar.

5.1.1. Control en bucle abierto

Este tipo de estructura es la más sencilla porque no existe una realimentación. El controlador actúa sobre el sistema con el objetivo de controlarlo, pero desconoce si ha conseguido alcanzar la referencia (objetivo), o necesita seguir actuando sobre él.

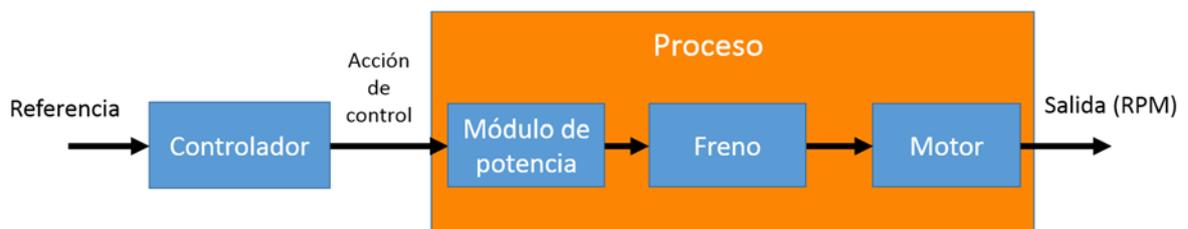


Figura 37 Estructura en bucle abierto

Se puede decir, expresándolo de otra forma, que el controlador confía en que la acción de control que aplica consiga llevar el sistema al punto al que se quiere, aunque no tiene información de si lo ha conseguido o no. En algunos casos un sistema controlado de esta forma funciona adecuadamente.

Si se trata de regular las RPM de motor con el controlador manual del que se disponía de origen con el freno, puede considerarse un controlador en bucle abierto. Como no tiene realimentación sería el operario quien comprobando visualmente el tacómetro tendría que verificar si se está alcanzando el objetivo.

En este proyecto, numerosas variables intervienen en que el motor alcance o no el objetivo, de forma que ni un controlador en bucle abierto, ni siquiera siendo manejado por un operario experimentado es capaz de lograr un comportamiento adecuado. De ahí la motivación de realizar un regulador automático (en bucle cerrado) para este trabajo.

5.1.2. Control en bucle cerrado

A diferencia del caso anterior, en un control en bucle cerrado el controlador tiene una realimentación de la evolución del sistema que le permite regular de una manera más precisa el proceso a controlar.

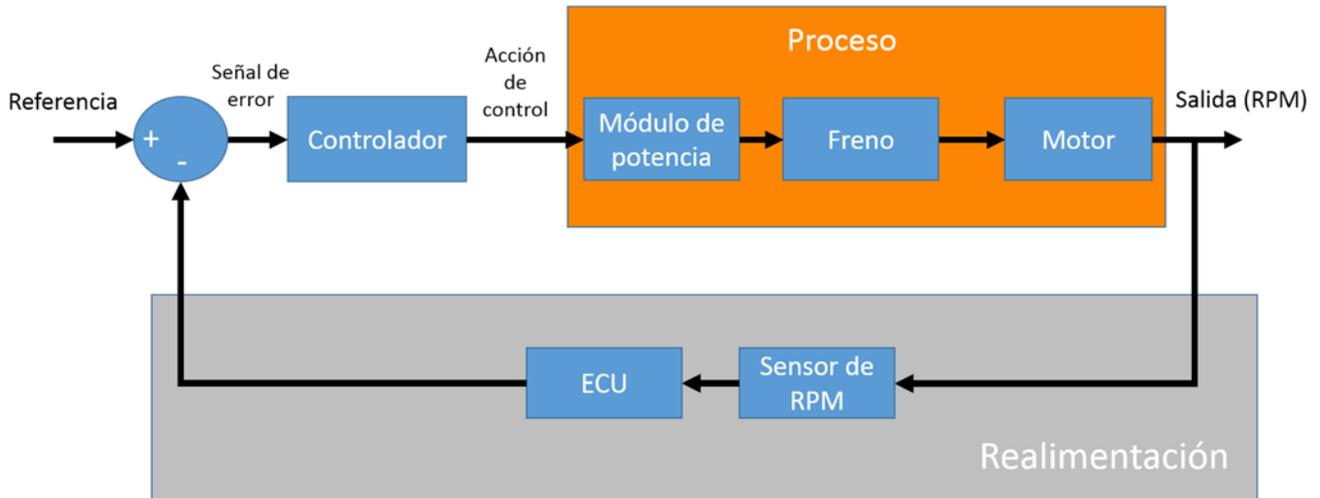


Figura 38 Estructura en bucle cerrado

El funcionamiento de un bucle cerrado consiste en:

- La realimentación provee el estado en el que se encuentra la salida.
- A la referencia deseada se le resta la realimentación y se obtiene la señal de error.
- El controlador genera una acción de control en base a la señal de error y al algoritmo de control.
- La acción de control actúa sobre el sistema y produce un cambio en la salida.
- Se repite lo anterior.

Particularizando la estructura al caso del proyecto:

- La realimentación consistente en el sensor de RPM y la ECU provee a través del bus CAN la velocidad de giro del motor en RPM.
- La referencia se proporciona en RPM y se obtiene la señal de error.
- El controlador genera una acción de control en voltios (de 0 a 4) que se transmitirá al módulo de potencia.
- El módulo de potencia elevará la tensión de la acción de control a un valor entre 0 y 192 V.
- El freno ejercerá un par de frenado mayor o menor de acuerdo a la alimentación que reciba del módulo de potencia.
- Finalmente, el motor reducirá o aumentará su velocidad como consecuencia de lo anterior.
- El bucle vuelve a comenzar.

Como se puede observar una regulación en bucle cerrado permite un control más preciso que en bucle abierto, de forma que se puede lograr el comportamiento requerido en complejos sistemas, difícil de conseguir de otra manera. Por ello el controlador automático que se desarrolla en este proyecto será de este tipo.

5.2. PROCESO DE IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

Con el objetivo de diseñar un controlador, previamente es necesario determinar un modelo matemático del sistema a controlar. Existen diferentes formas de realizar esto:

- Modelado teórico
Consiste en la obtención del modelo a través del planteamiento teórico de ecuaciones matemáticas que definan el comportamiento del sistema. Este método puede ser de utilidad para sistemas sencillos, sistemas en los que el siguiente método no sea viable, o sistemas en los que, por algún motivo, se requiera un modelado teórico.
- Modelado experimental
Consiste en la obtención del modelo a través de someter al sistema a una serie de pruebas que permitan identificarlo. Este método es aplicable a sistemas cuyo modelado teórico suponga una gran dificultad o cuando no sea necesario contar con un modelo teórico basado en ecuaciones.

5.2.1. Metodología

En este proyecto, el método de modelado elegido es el experimental, ya que la complejidad del sistema hace que esta opción sea la más viable, además de no ser de interés un desarrollo matemático del complejo comportamiento que presenta.

Las pruebas realizadas para la identificación del modelo consisten en lo siguiente:

- Se lleva el sistema a una velocidad determinada, esto se realiza actuando sobre el acelerador.
- Cuando se estabilice, se aplica un escalón de frenado determinado permaneciendo el acelerador siempre en el mismo punto.
- Se deja de aplicar la acción de frenado y se procede a repetir el experimento.

El prototipo de controlador programado como módulo de adquisición de datos transmite la información a un PC que se encuentra grabando los datos de la experiencia para ser analizados posteriormente.

5.2.2. Consideraciones sobre el sistema

El sistema que se pretende controlar cuenta con una serie de peculiaridades que es necesario apuntar y que adelantan que el modelo que se obtendrá tendrá un cierto grado de incertidumbre.

Como se ha visto en el primer punto de este proyecto, la gestión del motor es tarea enteramente de la ECU. Dicha unidad de control basa su comportamiento en una serie de configuraciones llamadas "mapas". Uno de los objetivos principales del controlador es ayudar a la optimización y mejora de estos mapas.

En el momento del desarrollo de este trabajo la configuración de la ECU tiene numerosas irregularidades que hacen que el comportamiento del motor diste mucho de parecerse al de, por ejemplo, un vehículo de calle convencional. Esto implica ciertas limitaciones a la hora de controlar

el sistema, que se verán en próximos apartados, y que igualmente tienen efecto a la hora de tratar de generar un modelo fiel.

Por citar un ejemplo de importancia para el modelado experimental, se hace muy complejo conseguir llevar el motor a un régimen de RPM determinado manejando el acelerador, requiere de varios intentos y personal experimentado.

5.2.3. Selección de datos

Una vez se han realizado numerosas pruebas, tras el estudio de los datos grabados, se selecciona la tirada que represente de forma más clara y lógica el comportamiento del sistema, para realizar el modelo.

Para la identificación del sistema se han seleccionado los siguientes datos:

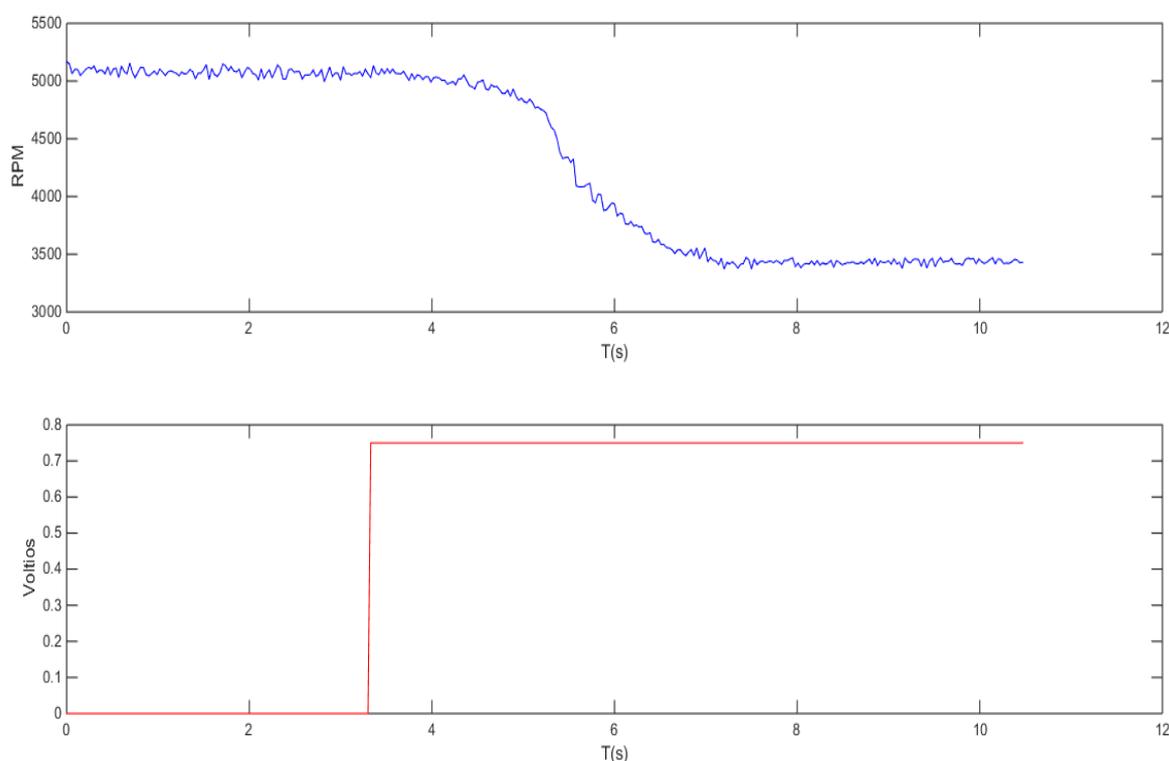


Figura 39 Datos de la identificación

Como se puede apreciar y siguiendo el procedimiento explicado en apartados anteriores se ha acelerado el sistema hasta 5000 RPM aproximadamente, con la mayor precisión que ha sido posible y se ha aplicado un escalón de frenado de 0.75 V.

El periodo de muestreo utilizado es 0.03 segundos.

5.2.4. Generación del modelo

Con los datos obtenidos se procede a generar el modelo. Para ello se utiliza la *toolbox* del *software* MATLAB: *System Identification Toolbox*. Esta herramienta permite estimar diferentes modelos matemáticos basados en los datos de entrada, que son los seleccionados en el apartado anterior.

Para obtener un mejor funcionamiento del programa, antes de cargar los datos de RPM, éstos se pasan por un filtro de media móvil de 10 pasos, para reducir el ruido en la señal. El resultado se observa en la Figura 40.

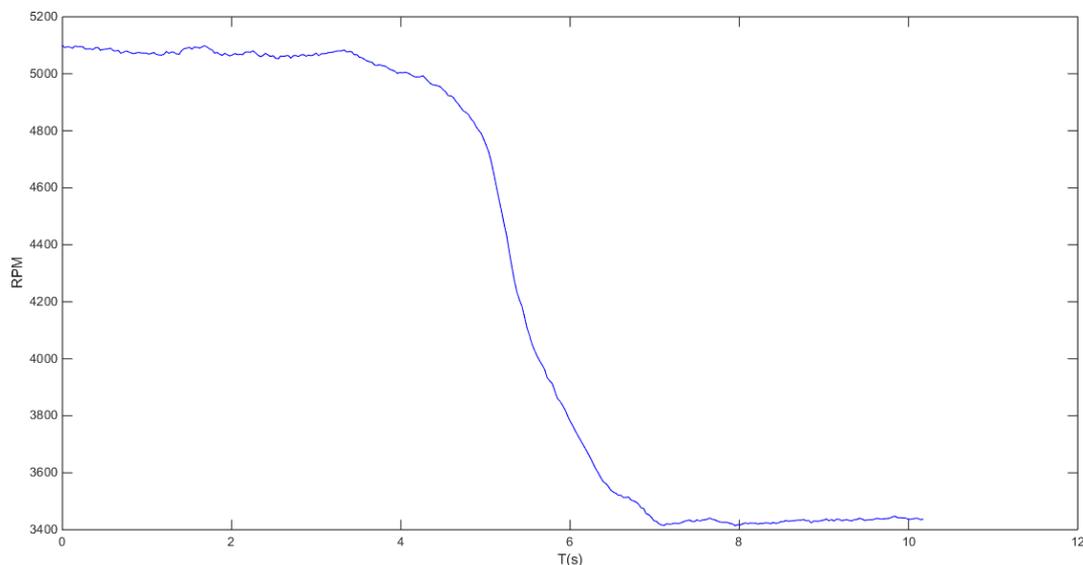


Figura 40 RPM filtradas

A continuación, se resta el punto de funcionamiento (para hacer que la señal parta de cero), se seleccionan los valores a partir del momento en el que se aplicó el escalón y se cargan en la herramienta los datos.

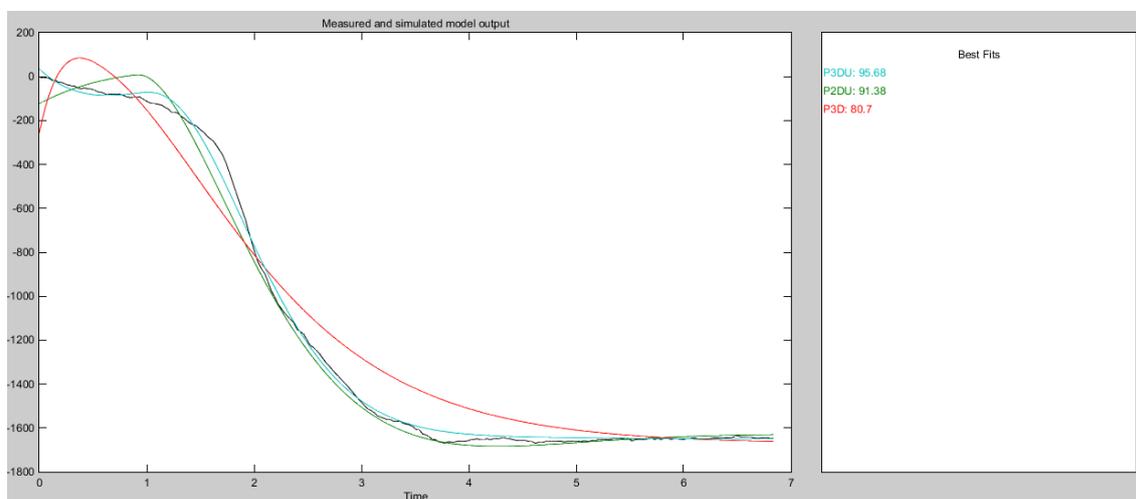


Figura 41 Estimación de diferentes modelos

El programa permite realizar una estimación de multitud de modelos y ofrece un porcentaje que indica el grado de similitud entre el modelo estimado y los datos de entrada.

En la Figura 41 se muestran los modelos más relevantes. P3DU corresponde a un modelo de tercer orden con polos imaginarios, P2DU similar, pero con segundo orden, P3D significa tercer orden con polos reales.

Como se puede apreciar el modelo que más se asemeja al comportamiento del sistema real es el P3DU con un 95.68% de similitud.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \left(\frac{Kp}{(1 + 2 * Zeta * Tw * s + (Tw * s)^2) * (1 + Tp3 * s)} \right)^{-Td*s}$$

Figura 42 Estructura de modelo de tercer orden con polos imaginarios y retardo

Los parámetros característicos son los siguientes:

$$Kp = -2200$$

$$Tw = 0.41816$$

$$Zeta = 0.72157$$

$$Tp3 = 0.66065$$

$$Td = 0.9$$

Se observa que además de ser un sistema de tercer orden, incorpora un retardo que se debe tener en cuenta para el diseño del controlador.

Si se opera, se puede llegar a la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \left(\frac{-2200}{0.1155 * s^3 + 0.5735 * s^2 + 1.264 * s + 1} \right)^{-0.9*s}$$

Si se iguala a cero el denominador se obtienen los polos:

$$s1 = -1.7256 + 1.6557i$$

$$s2 = -1.7256 - 1.6557i$$

$$s3 = -1.5137$$

Se observa que se tienen dos polos con parte imaginaria y uno simple. Todos son negativos, por lo que son estables.

5.2.5. Simulación del modelo

El modelo estimado será el que se utilizará para los posteriores pasos de diseño del controlador y simulación del controlador. Sin embargo, la función de transferencia estimada obtenida en el apartado anterior no corresponde exactamente a la que se verá cuando se simula para los siguientes pasos. Esto sucede porque *System Identification Toolbox*, con el objetivo de obtener un modelo más fiel, realiza una estimación de las condiciones iniciales y las aplica a la simulación.

Para comprobar cómo es la función de transferencia obtenida, se simula en la *toolbox* de MATLAB: *Simulink*.

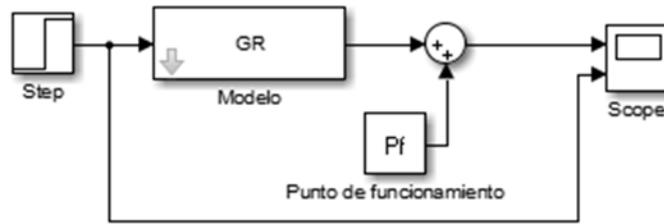


Figura 43 Esquema de simulación del modelo en Simulink

Se observa como a la salida del modelo se le suma el punto de funcionamiento que se le restó a la hora de estimar el modelo.

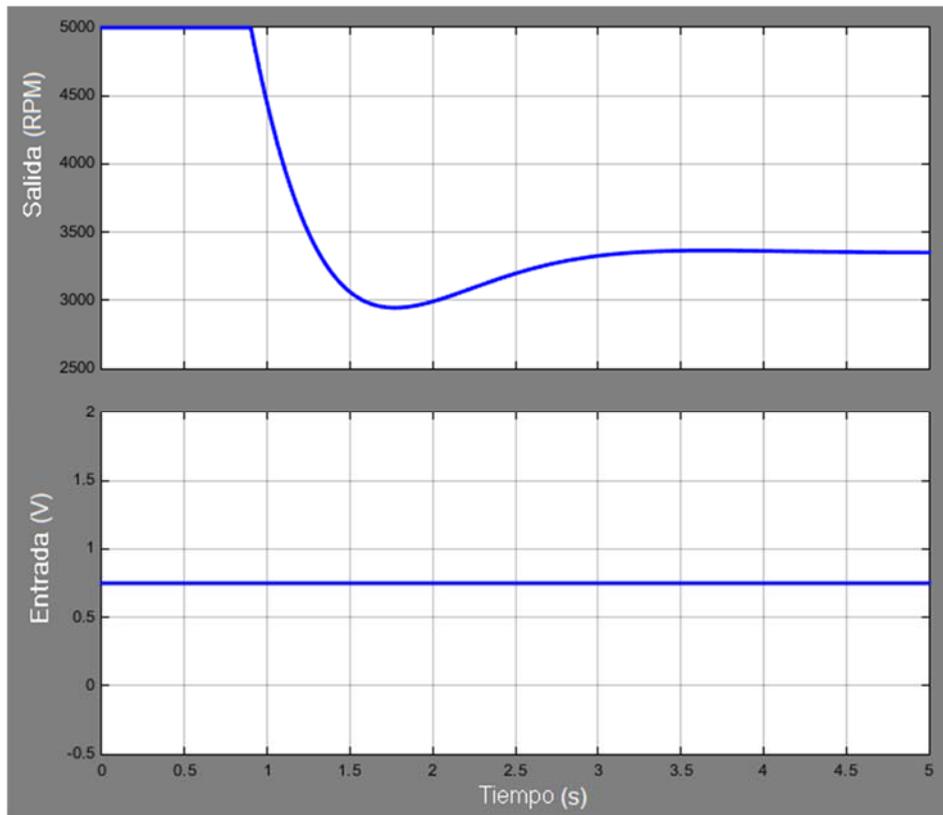


Figura 44 Simulación del modelo

En la simulación se aplica un escalón de 0.75 V y se observa que el transitorio inicial es ligeramente diferente, como se esperaba por la razón comentada anteriormente, sin embargo, en régimen permanente se llega al mismo punto.

COMPARACIÓN DEL MODELO

Para verificar que el modelo resultante se acomoda a la realidad, se realiza una comparación del mismo con los datos obtenidos experimentalmente.

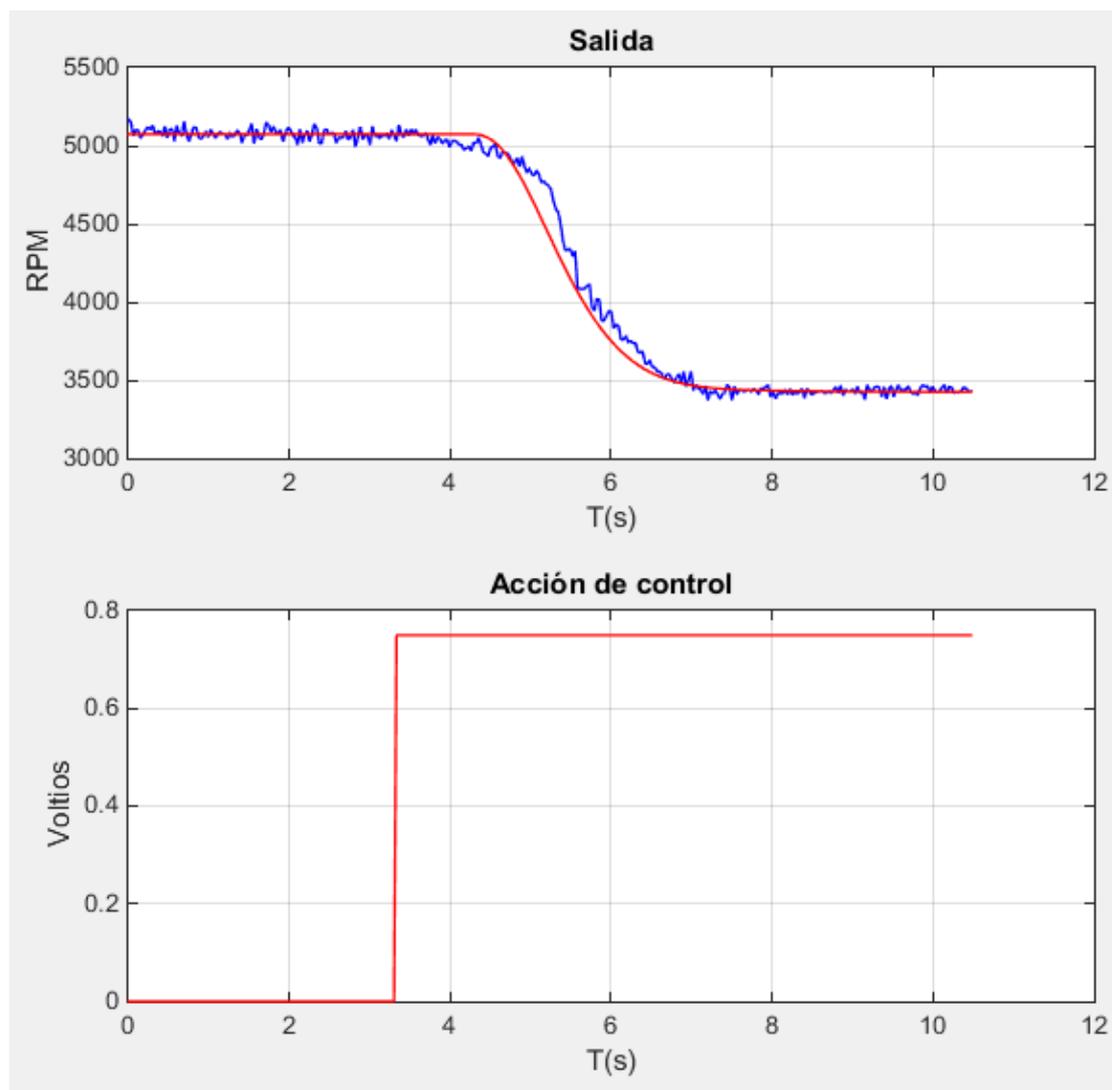


Figura 45 Comparación del modelo con datos experimentales

En la Figura 45 se han representado los datos obtenidos directamente del ensayo experimental sin filtrar, junto a una simulación del modelo.

La simulación se ha realizado con el mismo esquema de la Figura 43, pero modificando los parámetros para que se ajusten a la situación de los datos experimentales. Esto es: la referencia se coloca en 5075 RPM, la señal de control es de 0.75 V y el escalón se produce en 3.33 segundos, tal y como sucedió en el ensayo.

En la siguiente figura se ha omitido la señal de control para mostrar con mayor detalle las RPM.

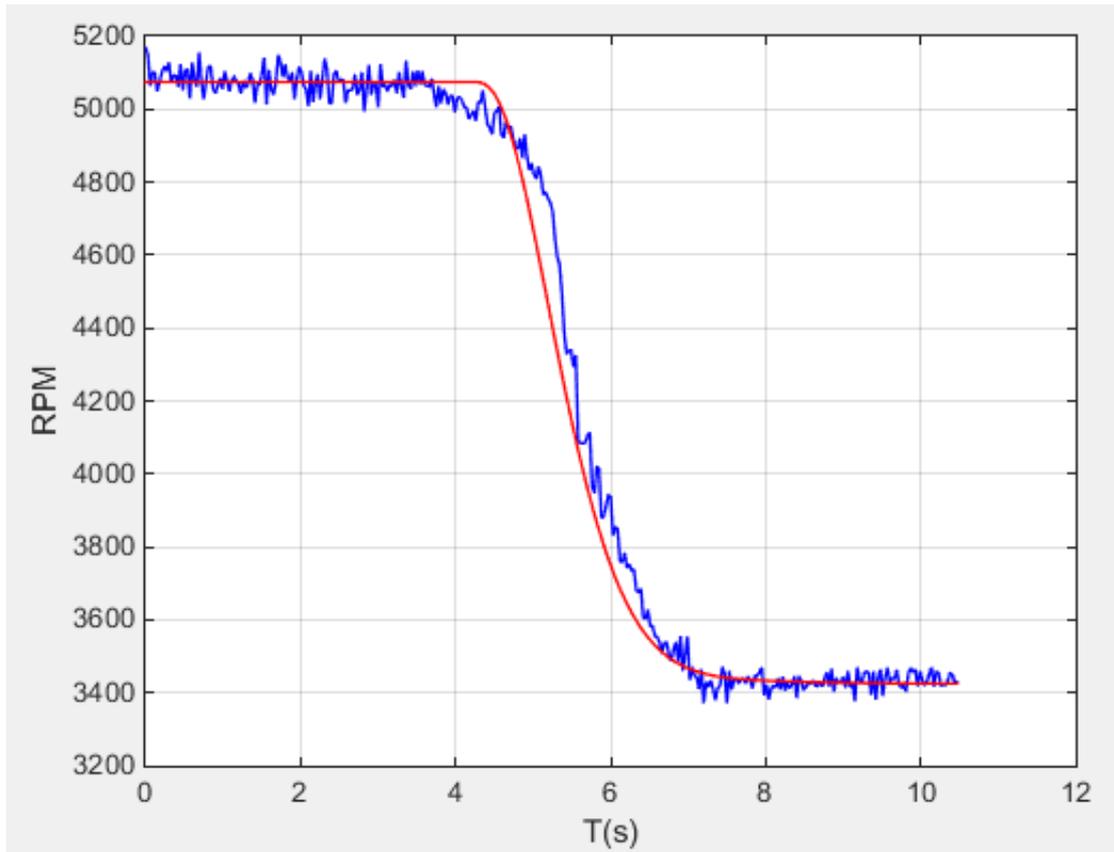


Figura 46 Comparación del modelo con datos experimentales 2

En la gráfica se observa como el modelo de tercer orden estimado representa de forma correcta la dinámica del sistema. El retardo que ocurre durante 0.9 s tras la aplicación del escalón puede parecer fuera de lugar, pero, lo más probable es que el algoritmo del *software* de identificación encuentre un modelo con una menor desviación introduciendo un retardo de estas características.

Durante el transitorio el modelo realiza un seguimiento del sistema con una desviación aceptable, y finalmente, en régimen permanente, la señal se estabiliza en un valor adecuado.

5.3. CONTROLADOR PID

Un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) es un sistema de control en bucle cerrado que se utiliza ampliamente tanto en el entorno industrial como en cualquier otro ámbito.

El funcionamiento se basa en la realimentación (*feedback*) de la variable a controlar. El PID realiza mediciones sucesivas de dicha variable, comparándola con la referencia que se le establece a seguir, para obtener la señal de error. De acuerdo a esa señal, es capaz de aplicar una acción de control sobre el sistema a controlar, cuya magnitud se calcula en base a un factor proporcional, otro integral y otro derivativo.

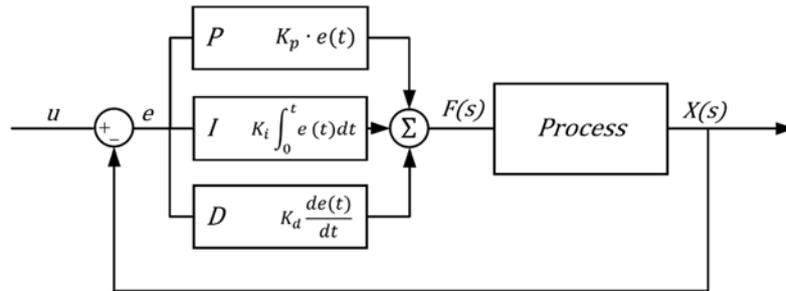


Figura 47 Esquema PID

ACCIÓN PROPORCIONAL

La parte proporcional, como su nombre indica, es proporcional al error. K_p es el factor de ponderación de la parte proporcional en la acción de control total.

$$P(t) = K_p * error(t)$$

Este término es capaz de realizar gran parte del control, sin embargo, no es adecuado para eliminar el error de posición que puede aparecer. El error de posición es la diferencia entre el valor de la salida y el de la referencia, en régimen permanente, el cuál en la mayoría de ocasiones se desea minimizar.

ACCIÓN INTEGRAL

La parte integral es aquella que depende de la integral del error, es decir, del área que encierra la curva del error. K_i es el factor de ponderación de la parte integral en la acción de control total.

$$I(t) = K_i * \int_0^t error(t) dt$$

Esta parte de la acción de control es la encargada de que el sistema alcance la referencia en régimen permanente, es decir, de anular el error de posición.

ACCIÓN DERIVATIVA

La acción derivativa es aquella proporcional a la derivada del error en cada instante. K_d es el factor de ponderación de la parte derivativa en la acción de control total.

$$D(t) = K_d * \frac{d error(t)}{dt}$$

Este término es especialmente sensible porque puede llevar el sistema a la inestabilidad rápidamente, puesto que la derivada del error puede tomar valores muy altos si se produce una variación rápida de error, por ejemplo, por una perturbación en el sistema. Por otro lado, tiene la ventaja de adelantarse a lo que ocurrirá en el futuro, pudiendo realizar las correcciones oportunas en el sistema.

Variantes más sencillas del controlador PID son el P, PI y PD, los cuales en muchas ocasiones son suficientes para controlar un proceso determinado.

5.3.1. Especificaciones

A la hora de diseñar un controlador, lo primero que se debe tener en cuenta son las especificaciones que se le piden, seguidamente se realiza el diseño en sí, y finalmente se comprueba mediante simulación que sea correcto. En este apartado se tratará el primer paso.

Existen dos tipos de especificaciones, las dinámicas y las estáticas. Las especificaciones dinámicas son las que se relacionan con el comportamiento del sistema durante el transitorio inicial, mientras que las estáticas tratan sobre el régimen permanente. Las que son de interés para este proyecto son las siguientes:

- Error de posición

Se trata de una especificación estática. Es la diferencia entre la señal que se desea controlar y la referencia en régimen permanente cuando se aplica un escalón a la entrada. Normalmente se quiere que sea cero o lo más pequeño posible.

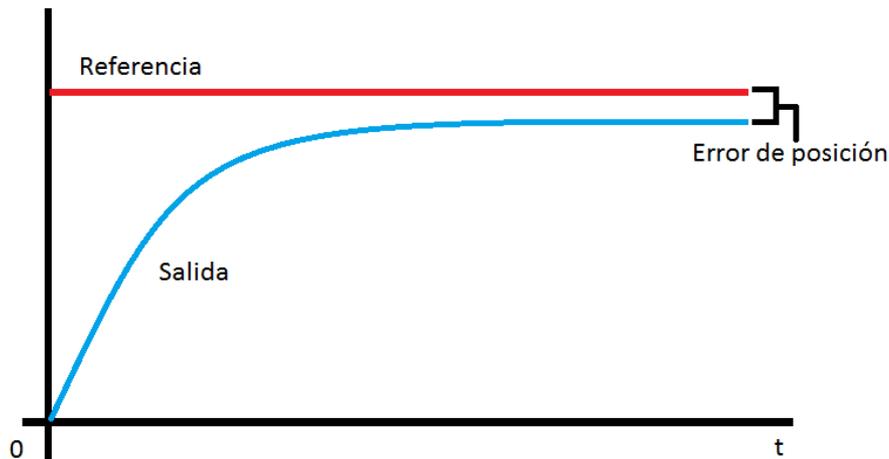


Figura 48 Error de posición

- Sobreoscilación

Se trata de una especificación dinámica. Sólo tiene sentido en sistemas subamortiguados, estos son en los que la señal sobrepasa la referencia durante el transitorio inicial. La sobreoscilación es la amplitud que toma la señal cuando sobrepasa por primera vez la referencia, es decir, en su primera oscilación. Se mide en porcentaje sobre el valor de la referencia. Normalmente se requiere que la sobreoscilación sea la menor posible.

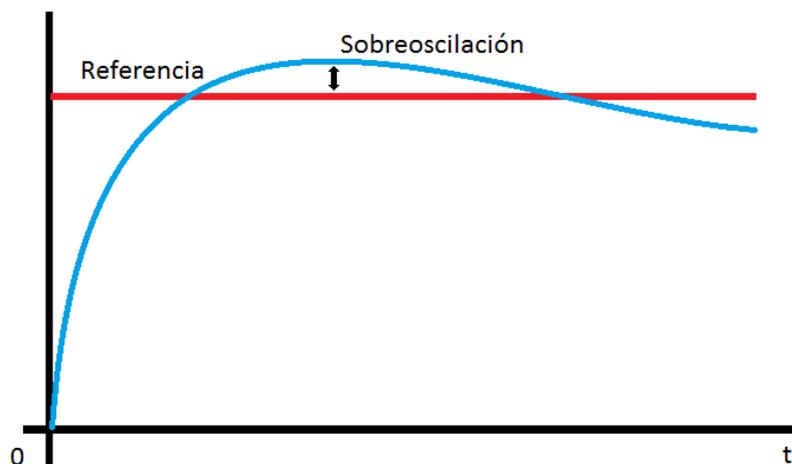


Figura 49 Sobreoscilación

- Tiempo de establecimiento

Se trata de una especificación dinámica. Es el tiempo que tarda la señal en alcanzar una franja imaginaria que se encuentra un 5% tanto por encima como por debajo del valor de la referencia. Se mide en unidades de tiempo. El tiempo de establecimiento es lo que determina si un controlador es rápido o lento.

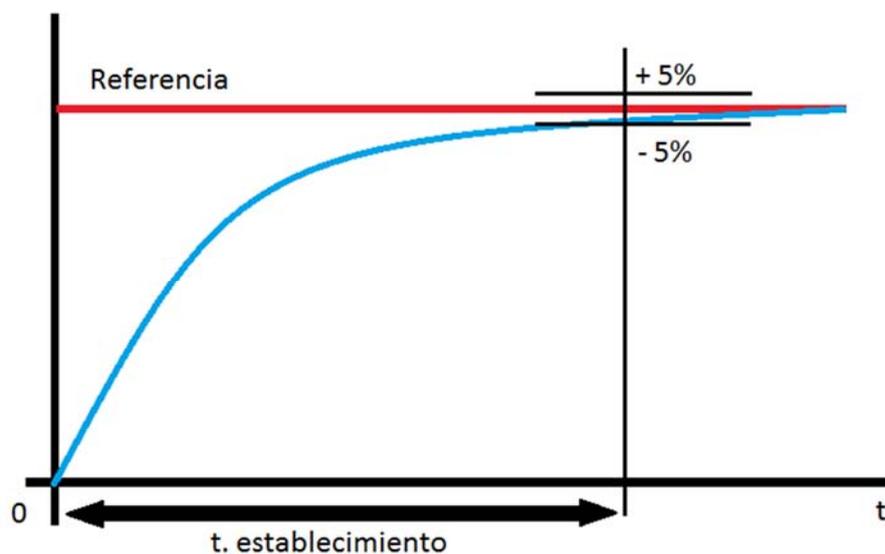


Figura 50 Tiempo de establecimiento

ESPECIFICACIONES DEL CONTROLADOR

- Error de posición

Que el error de posición sea lo menor posible es lo más importante para el proyecto, pues los experimentos con el banco de pruebas se realizarán en régimen permanente, cuando el controlador haya estabilizado el sistema.

Para conocer las limitaciones del sistema que conciernen al error de posición obsérvese la siguiente gráfica:

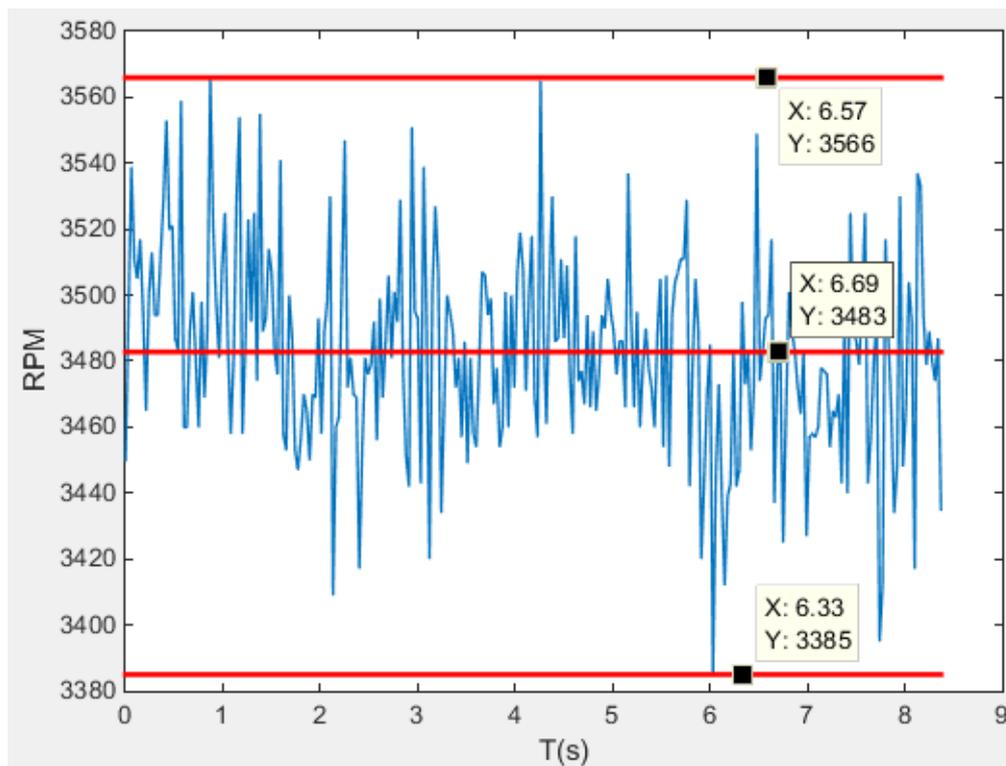


Figura 51 Ruido en la señal de RPM

En la gráfica se representan las RPM del motor en función del tiempo, con el acelerador en una posición constante. Las líneas horizontales marcan el máximo, mínimo y media de los valores.

En la figura se observa el ruido que tiene el sensor. En este ensayo concreto el valor que se desvían las RPM de la media está entorno a las 100 RPM. El valor exacto no es relevante porque es un experimento en el que influyen varios factores como el humano, además es en bucle abierto.

En teoría, incluyendo acción integral en el regulador se podría conseguir anular el error de posición, sin embargo, lo anterior presenta una limitación en la práctica. Como consecuencia, siempre existirá un ruido aleatorio que impedirá conseguir un posicionamiento perfecto en la referencia.

Visto lo anterior, se decide tomar como especificación que el error de posición no se desvíe más de 200 RPM de la referencia.

- Sobreoscilación

Esta especificación no es crítica para el proyecto pues se da durante el transitorio.

Si bien se podría exigir que el sistema no tuviese sobreoscilación (que fuese sobreamortiguado), esto podría ser un problema a la hora de ajustar el controlador, pues requeriría una acción de control muy poco energética que podría tardar una gran cantidad de tiempo en estabilizar el motor.

Por el contrario, permitir una sobreoscilación demasiado alta daría lugar a acciones de control demasiado energéticas, de manera que podrían llevar el sistema a la inestabilidad más fácilmente, provocar que el motor se cale o incluso favorecer el desgaste prematuro de los componentes y estructura mecánica del banco de pruebas.

Por lo tanto, se establecerá un requerimiento conservador de sobreoscilación del 25% o menos.

- Tiempo de establecimiento

Al igual que la sobreoscilación, no se trata de un requerimiento crítico.

Teniendo en cuenta que se prefiere una acción de control progresiva a una brusca, y considerando que se quiere evitar sobreoscilaciones agresivas, se permitirá un tiempo de establecimiento de 10 segundos para alcanzar la referencia.

5.3.2. Diseño de un controlador PI

LUGAR DE LAS RAÍCES (LDR)

Para el diseño del controlador se hará uso de la clásica técnica del Lugar de las Raíces. El LDR es una herramienta para el análisis dinámico de sistemas realimentados. Consiste en la representación gráfica de lugar geométrico de los polos y ceros en bucle cerrado de un sistema, cuando la ganancia varía desde cero hasta infinito.

Existen procedimientos para obtener el LDR de forma manual, pero se ha decidido no incluirlos en este trabajo por resultar de poca relevancia. En lugar de métodos manuales se usará el programa MATLAB para generar el gráfico.

En la Figura 52 se puede observar el lugar de las raíces con los tres polos que se obtuvieron en el modelo (las tres equis).

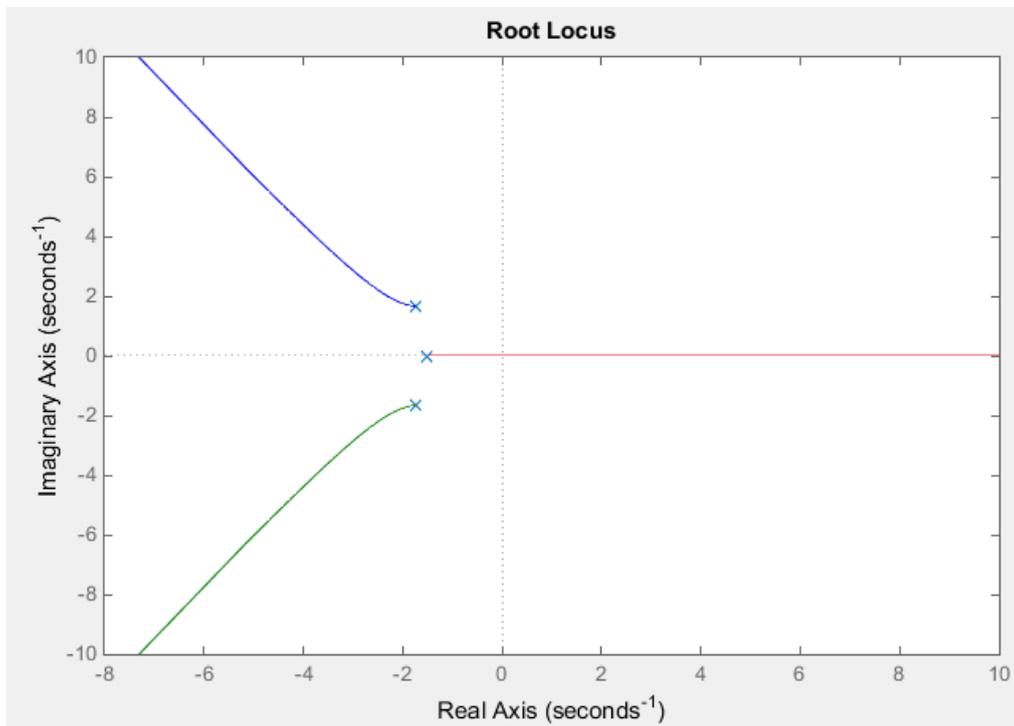


Figura 52 Lugar de las raíces sin retardo

Sin embargo, en este lugar de las raíces no se contempla el retardo que se obtuvo. Para poder generar el gráfico con el retardo se puede realizar una aproximación del mismo. De esta manera se pueden obtener unos polos y ceros determinados cuyo efecto sobre el sistema se asemeje al del retardo.

El método mencionado se conoce como Aproximación de Padé. Se utilizará una aproximación de primer orden, lo que añadirá un cero y un polo más.

$$e^{-Td*s} \approx \frac{-1 + Td * s/2}{1 + Td * s/2}$$

Figura 53 Aproximación de Padé de 1er orden

Esto da lugar al siguiente gráfico:

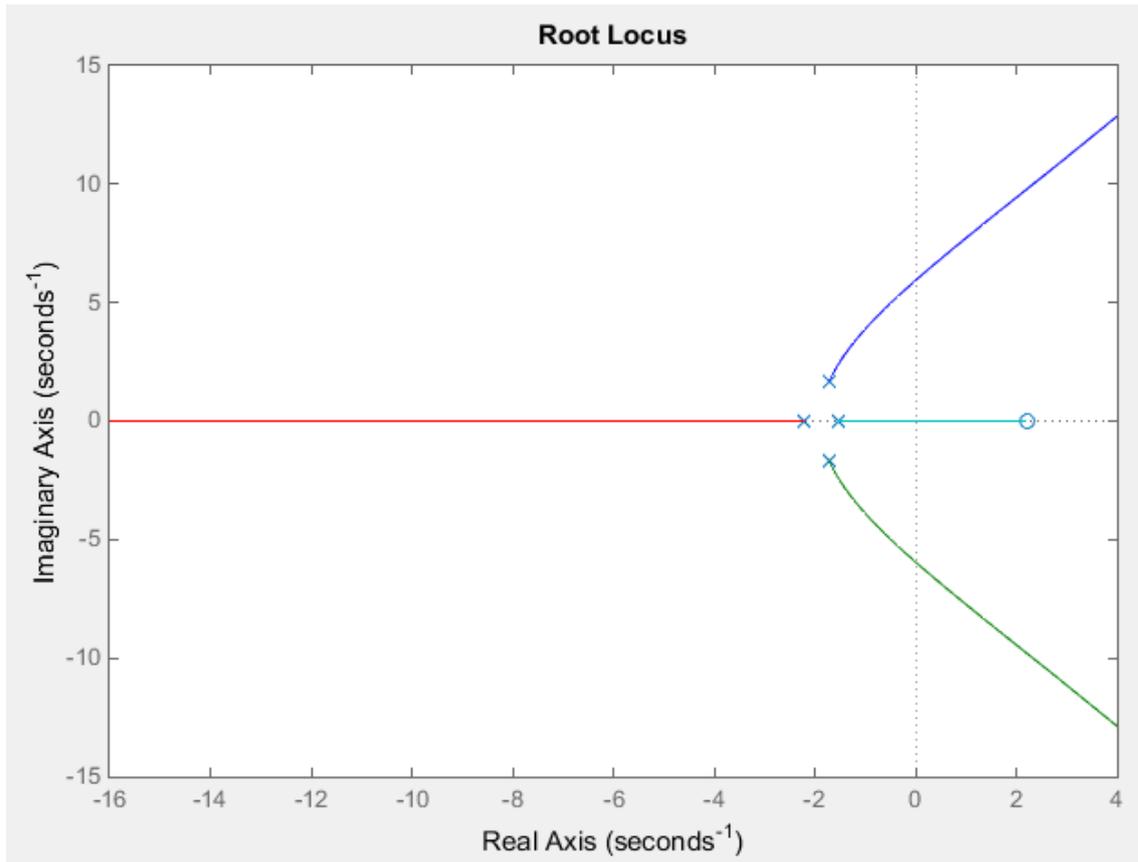


Figura 54 Lugar de las raíces con retardo

Como se puede observar aparece un polo en -2.22 y un cero en 2.22. El efecto de este nuevo par se aproximará al que produce en realidad el retardo.

AJUSTE DEL CONTROLADOR

Continuando con el diseño del controlador, se han de asignar los polos y ceros que se introducirán en el bucle de control para conseguir que el sistema se comporte de la manera requerida, además de la ganancia. Dicho de otra forma, se obtendrá la función de transferencia del controlador.

En principio se procederá a ajustar un regulador PI, cuya parte proporcional actuará durante el transitorio inicial y cuya acción integral acabará con el error de posición en régimen estacionario.

Para esta etapa del diseño se utilizará la *toolbox* de MATLAB: *Sisotool*, que permite realizar una asignación de polos y ceros de manera interactiva sobre el lugar de las raíces. Además, va calculando y mostrando la respuesta del sistema según se va ajustando el regulador.

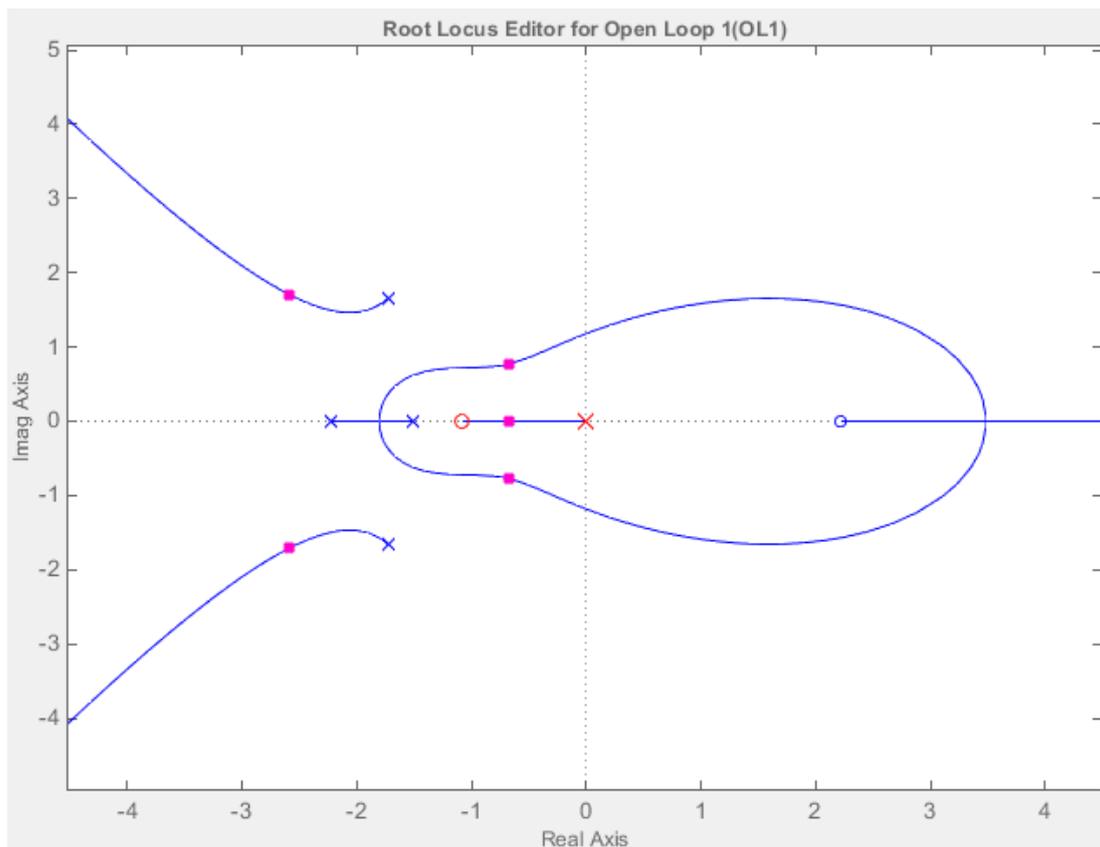


Figura 55 Lugar de las raíces con controlador PI

En la Figura 55 se puede ver la colocación del polo en el origen y del cero en -1.09 que corresponden un control PI. La localización del polo, por obligación ha de ser en cero (integrador), mientras que la del cero y la ganancia se han encontrado iterando mientras se comprueba la respuesta del sistema que se puede ver en la Figura 56.

Durante la iteración para obtener la posición del cero y la ganancia que mejor cumpla las especificaciones se ha intentado, en un primer momento, realizar un diseño por cancelación del polo en -1.5137. Esto significa, colocar el cero en el mismo lugar del polo para que su efecto se cancele y se obtenga un sistema más sencillo de controlar.

Tras iterar con el método de cancelación, se ha decidido no aplicarlo porque las prestaciones que se obtenían eran inferiores a las del diseño de la Figura 55.

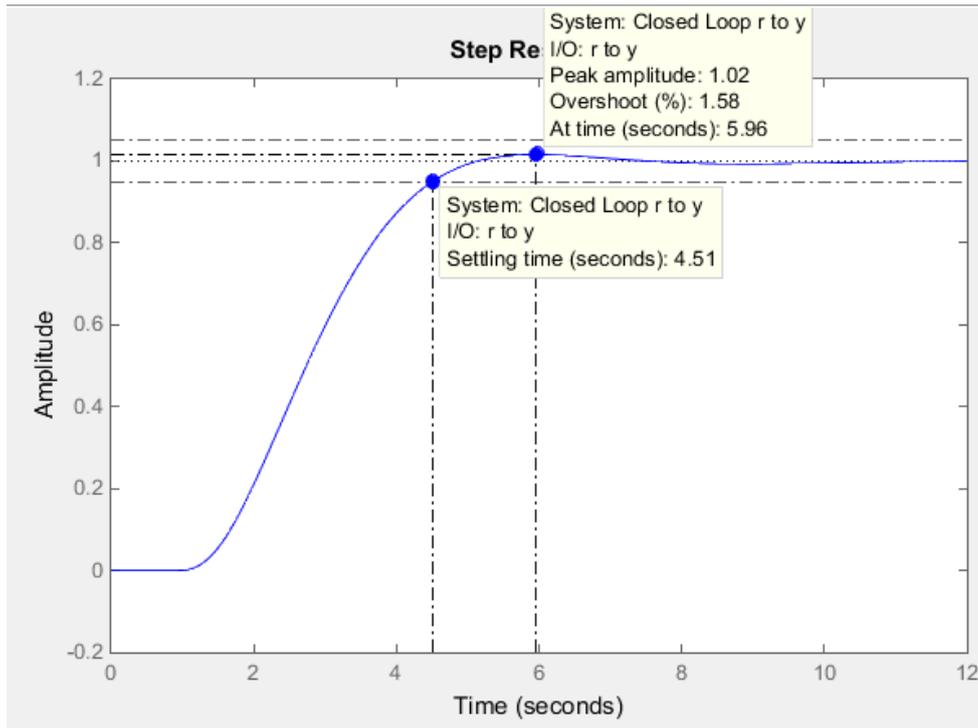


Figura 56 Respuesta ante escalón del sistema controlado

Como se aprecia, el diseño presenta una respuesta muy ligeramente subamortiguada, que cumple con las especificaciones que se requerían, pues se obtiene un tiempo de establecimiento al 95% de 4.51 segundos, una sobreoscilación de 1.58% y un seguimiento de la referencia en régimen estacionario sin error.

Con este diseño la función de transferencia del controlador que se obtiene es la siguiente:

$$C = -0.00014791 * \frac{(s + 1.09)}{s}$$

5.3.3. Simulación

Para verificar que el controlador hace su trabajo correctamente se simula una situación lo más parecida a la realidad posible. Para ello se utiliza el *software* se vio anteriormente, *Simulink*.

En la siguiente figura se muestra el esquema utilizado:

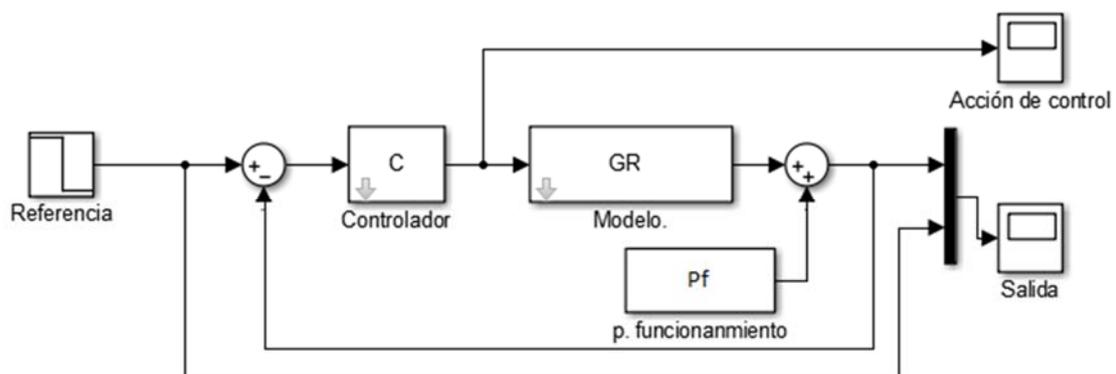


Figura 57 Esquema de simulación del sistema controlado

A continuación, se muestra el resultado:

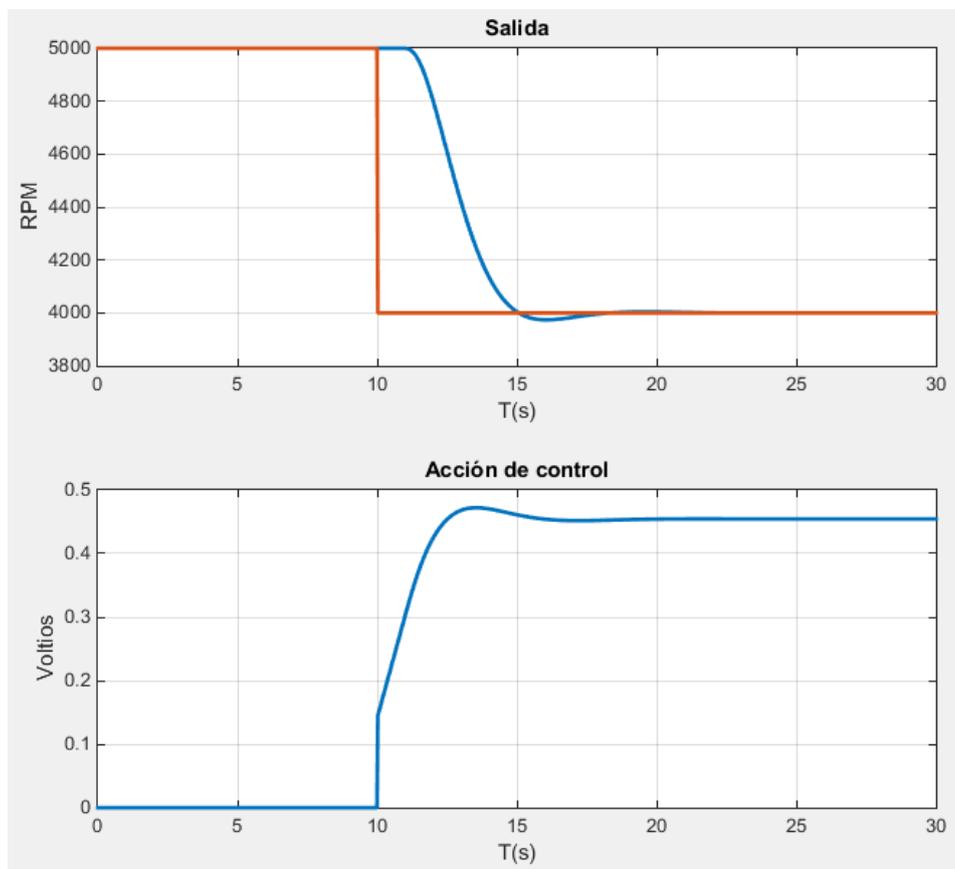


Figura 58 Simulación del sistema controlado

Se puede observar que el sistema se ha llevado a una velocidad de partida de 5000 RPM y seguidamente se ha cambiado la referencia a 4000 RPM.

El resultado de la simulación es el esperado, y además se puede comprobar que la acción de control ni satura ni toma valores cercanos al de la saturación del actuador, que se recuerda que es 4 V.

6. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

El controlador con del que se dispone en esta etapa del proyecto es una mera función de transferencia. Hasta que pueda ser utilizado en la realidad por el prototipo, aún han de completarse algunos pasos, como su discretización y su implementación en lenguaje de programación.

6.1. DISCRETIZACIÓN

Una señal continua es aquella que se desarrolla en el tiempo continuo, es decir, puede tomar valores en cualquier momento. A diferencia, existen las señales discretas, que sólo pueden tomar valores en determinados instantes de tiempo.

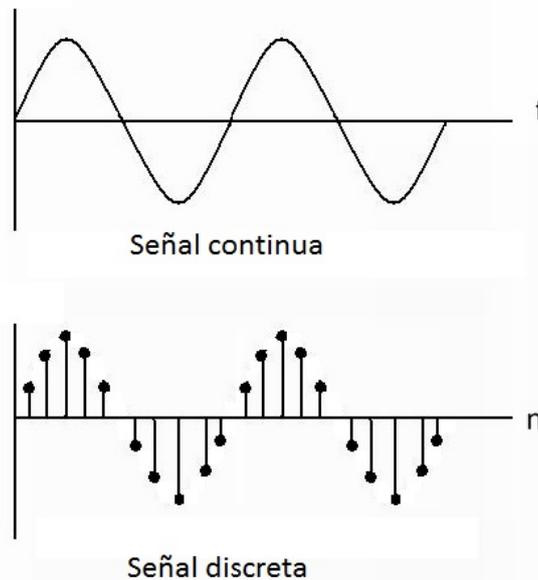


Figura 59 Diferencia entre señal continua y discreta

EL TIEMPO DISCRETO

Los computadores funcionan en el tiempo discreto, procesan datos en unos ciertos instantes determinados, no de forma continua. Por ejemplo, un procesador de 3 GHz realiza 3000000000 ciclos por segundo, y sólo puede procesar datos en cada uno de esos ciclos.

En un sistema de control, los instantes en los que suceden los ciclos se conocen como “instantes de muestreo”, mientras que el tiempo que transcurre entre cada ciclo se llama “tiempo o periodo de muestreo”. En el ejemplo anterior sería de 0.33 microsegundos (la inversa de la frecuencia). Para este proyecto se ha elegido un tiempo de muestreo de 30 ms, esto significa que el microcontrolador debe capturar una entrada, procesar la información y generar una salida cada 30 ms.

Por lo tanto, para que el controlador pueda ejecutar el control es necesario obtener un algoritmo discreto, a partir de la función de transferencia que se diseñó previamente.

EXPRESIONES DISCRETAS

Una expresión discreta es aquella cuyos parámetros vienen dados en función de "k", que indica el instante determinado del parámetro.

En un algoritmo de control, frecuentemente es necesario usar valores que ciertas variables tomaron en uno o varios instantes de muestreo anteriores. Por ejemplo, un parámetro "X" de hace dos periodos de muestreo se nota:

$$X_{k-2}$$

6.2. IMPLEMENTACIÓN

La implementación en el microcontrolador permitirá que el regulador diseñado pueda ser ejecutado y pueda utilizarse sobre el sistema a controlar. Para ello es necesario desarrollar un algoritmo de control basado en la función de transferencia del controlador e implementarlo en lenguaje de programación.

6.2.1. Algoritmo de control

El algoritmo de control es una expresión que permitirá el cálculo de la acción de control a aplicar al sistema, basándose en las entradas en el instante de control y en valores anteriores.

Existen numerosas formas de implementar un algoritmo de control PI. Para este proyecto se utilizará la que se muestra a continuación:

La acción de control "u" es la suma de la parte proporcional y la integral:

$$u_k = P_k + I_k$$

La parte proporcional, como se vio en apartados anteriores, es proporcional al error "e" en el momento de control (diferencia con la referencia):

$$P_k = Kp * e_k$$

La parte integral, en un sistema discreto, equivale a la acción de control integral que se calculó en el instante anterior más una parte proporcional al error en el instante anterior:

$$I_k = I_{k-1} + \frac{Kp * T}{Ti} * e_{k-1}$$

donde "T" es el periodo de muestreo de 0.03 s y "Ti" el tiempo integral.

Atendiendo a la expresión del controlador que se diseñó, se pueden obtener los parámetros "Kp" y "Ti" necesarios para esta implementación.

$$C = -0.00014791 * \frac{(s + 1.09)}{s}$$

"Kp" coincide con la ganancia y "Ti" es la inversa de la posición del cero.

$$Kp = -0.00014791$$

$$Ti = 1.09^{-1} = 0.92$$

6.2.2. Implementación en lenguaje C

El lenguaje de programación que se utiliza para programar el microcontrolador de este proyecto es el lenguaje C. En este apartado se desarrollará exclusivamente la implementación del algoritmo. Para más información acerca de la programación del dispositivo, se dispone del documento Manual de Programación, apartados 2 y 3, donde se desarrolla el código en profundidad.

En primer lugar, se declaran e inicializan las variables que se utilizarán:

```
volatile uint16_t ref = 20000; //Referencia
float kp = -0.00014791; //Ganancia
float Ti = 0.92; //Tiempo integral
volatile int16_t errorAnt = 0; //Error en el instante anterior
volatile int16_t errorAc = 0; //Error en el instante actual
volatile float ctrlS = 0; //Señal de control
volatile float intAnt = 0; //Parte integral en el instante anterior
volatile float intAc = 0; //Parte integral en el instante actual
float satMin = 0; //Saturación inferior del actuador
float satMax = 4; //Saturación superior del actuador
float ctrlS_0 = 0.0; //Señal de control en el punto de
//funcionamiento
```

Nótese que al principio la referencia (ref) se inicializa a un valor más alto del que podría tomar nunca para que el controlador no actúe hasta que se le transmita una referencia adecuada. Es decir, si se inicializara a 0 y se activase el controlador, el freno trataría de llevar la velocidad del motor a 0 RPM, con el consiguiente resultado indeseado. Sin embargo, si se inicializa por defecto a un valor muy alto, como 20000, y se activa el controlador, el freno no aplicará ningún frenado hasta que se cambie la referencia a una apropiada.

A continuación, se presenta el algoritmo que se ejecuta exactamente cada periodo de muestreo, gracias a un temporizador.

En primer lugar, se calcula el error actual restando las RPM del motor a la referencia:

```
errorAc = (signed)ref - (signed)RPM;
```

Después se calcula la acción integral:

```
intAc = intAnt + ( (kp*T) / Ti ) * errorAnt;
```

A continuación, se compone la señal de control que es la suma del término proporcional, el término integral que se ha calculado antes y el punto de funcionamiento, que en este caso es cero.

```
ctrlS = kp * errorAc + intAc + ctrlS_0;
```

Ahora se realiza una técnica conocida como “Clipping + Anti-Windup”, esto sirve para dos labores. Por un lado, recorta la señal de control si se encuentra fuera de los límites del actuador. Por otro lado, anula la parte integral cuando sucede lo anterior, para que no siga contribuyendo a la acción de control.

```
if (ctrlS < satMin)
{
```

```
        intAc = 0;
        ctrlS = satMin;
    }
    if (ctrlS > satMax)
    {
        intAc = 0;
        ctrlS = satMax;
    }
```

La señal de control se aplica al actuador:

```
digipotSet(ctrlS);
```

Finalmente, el error de este periodo de muestreo pasa a ser el "error anterior" para el periodo de muestreo siguiente. Lo mismo ocurre con la acción integral.

```
errorAnt = errorAc;
intAnt = intAc;
```

7. DISEÑO DE LA PCB

Durante las etapas anteriores del proyecto se ha estado trabajando con el prototipo de controlador en placa perforada. Una vez se ha comprobado que cumple las necesidades del proyecto y funciona correctamente, es momento de realizar un diseño definitivo con una PCB.

En este apartado se introducirá a las Placas de Circuito Impreso y su relevancia en el proyecto, así como se tratarán aspectos de su diseño.

7.1. PLACA DE CIRCUITO IMPRESO (PCB)

Una PCB (*Printed Circuit Board*) es un soporte físico donde se fijan los componentes electrónicos de un dispositivo y que los conecta eléctricamente mediante pistas (*traces*) de cobre.

Merece la pena mencionar la existencia de PCBs preperforadas, como la que se ha utilizado para desarrollar el prototipo, así como PCBs fabricadas mediante el método de insolación, como la que se puede ver en la Figura 60.

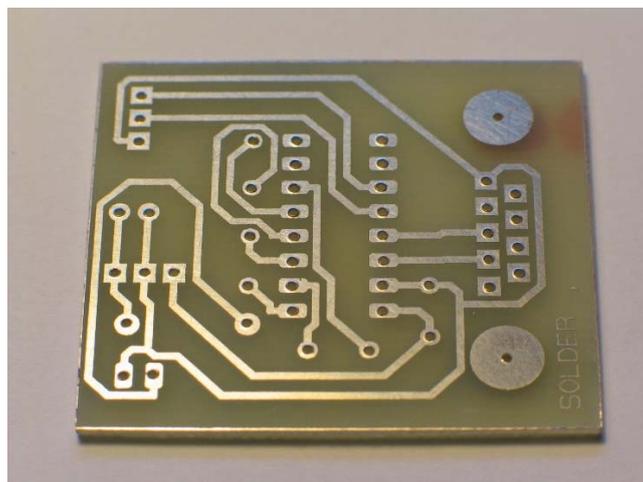


Figura 60 PCB insolada

Estos tipos de placas, si bien resultan adecuados para el desarrollo y experimentación, entre otros, por ser muy económicas, no son apropiadas para la construcción de un producto de calidad y fiabilidad industrial. Por lo tanto, no se usarán en el producto final de este trabajo.

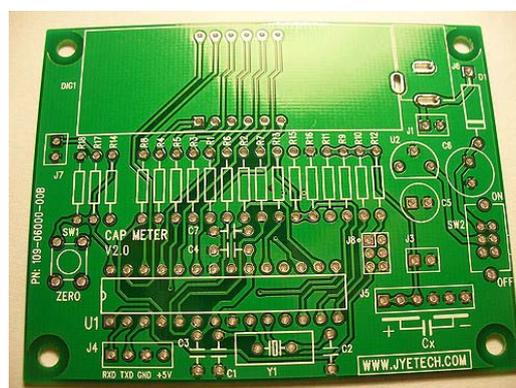


Figura 61 Placa de circuito impreso

A diferencia de los anteriores tipos, las PCBs de uso común en productos de consumo y entorno industrial son las fabricadas por empresas especializadas, con alta calidad y durabilidad, como la que se puede ver en la Figura 61.

CAPAS

Una PCB está conformada por varias capas, siendo el número mínimo tres o cuatro, aunque en la práctica, cuando se habla del número de capas de una PCB, se suelen contar sólo las de cobre.

Una PCB básica con una capa de cobre tiene la siguiente estructura:



Figura 62 Capas de una PCB

- Aislante (*Substrate*)

Es la capa más gruesa, no conduce la electricidad y es sobre la que se soportan las demás capas. Comúnmente el material utilizado es el FR-4, un material compuesto hecho con epoxi reforzado con vidrio.

- Cobre (*Copper*)

La capa de cobre es la que conecta eléctricamente los componentes. A partir de una lámina se obtienen las pistas y otras secciones con cobre, y se elimina el resto. El grosor puede ir desde ½ oz hasta 4 oz.

- Máscara de soldadura (*Soldermask*)

Esta capa se adhiere sobre el cobre dejando descubierto al exterior las zonas donde se aplicará estaño para soldar los componentes, y tapando el resto del cobre. Tradicionalmente suele ser de color verde, aunque puede adquirir cualquier otro. En este proyecto se ha usado el rojo por motivos estéticos. (Ver Figura 87).

- Serigrafía (*Silkscreen*)

En esta capa se imprimen los textos, designadores de componentes, logotipos etc.

En una PCB con dos capas de cobre, también llamadas “de doble cara”, la estructura de un lado a otro es simétrica y quedaría de la siguiente forma: serigrafía, máscara de soldadura, cobre, aislante, cobre, máscara de soldadura, serigrafía.

En PCBs multicapa, como la anterior, las conexiones eléctricas entre capas se realizan mediante “vías”, perforaciones que atraviesan las capas y que pueden ser remachadas o recubiertas de metal para hacerlas conductoras de la electricidad.

Las PCBs multicapa son muy utilizadas en la actualidad debido a que permiten un aprovechamiento óptimo del espacio y una mayor densidad de componentes.

Para este proyecto se ha decidido usar una PCB de doble cara. Además de los beneficios de este diseño frente al de una cara, son el estándar de multitud de empresas de fabricación de PCB, de manera que o no ofrecen la posibilidad de fabricar un producto con menos capas o bien el coste es el mismo.

Los planos de la PCB de este proyecto pueden encontrarse en el documento Planos, hojas de la 2 a la 12.

7.2. ESQUEMÁTICO

El primer paso para la realización de una PCB es diseñar el esquemático. Éste es un documento en el que se representa gráficamente el circuito eléctrico.

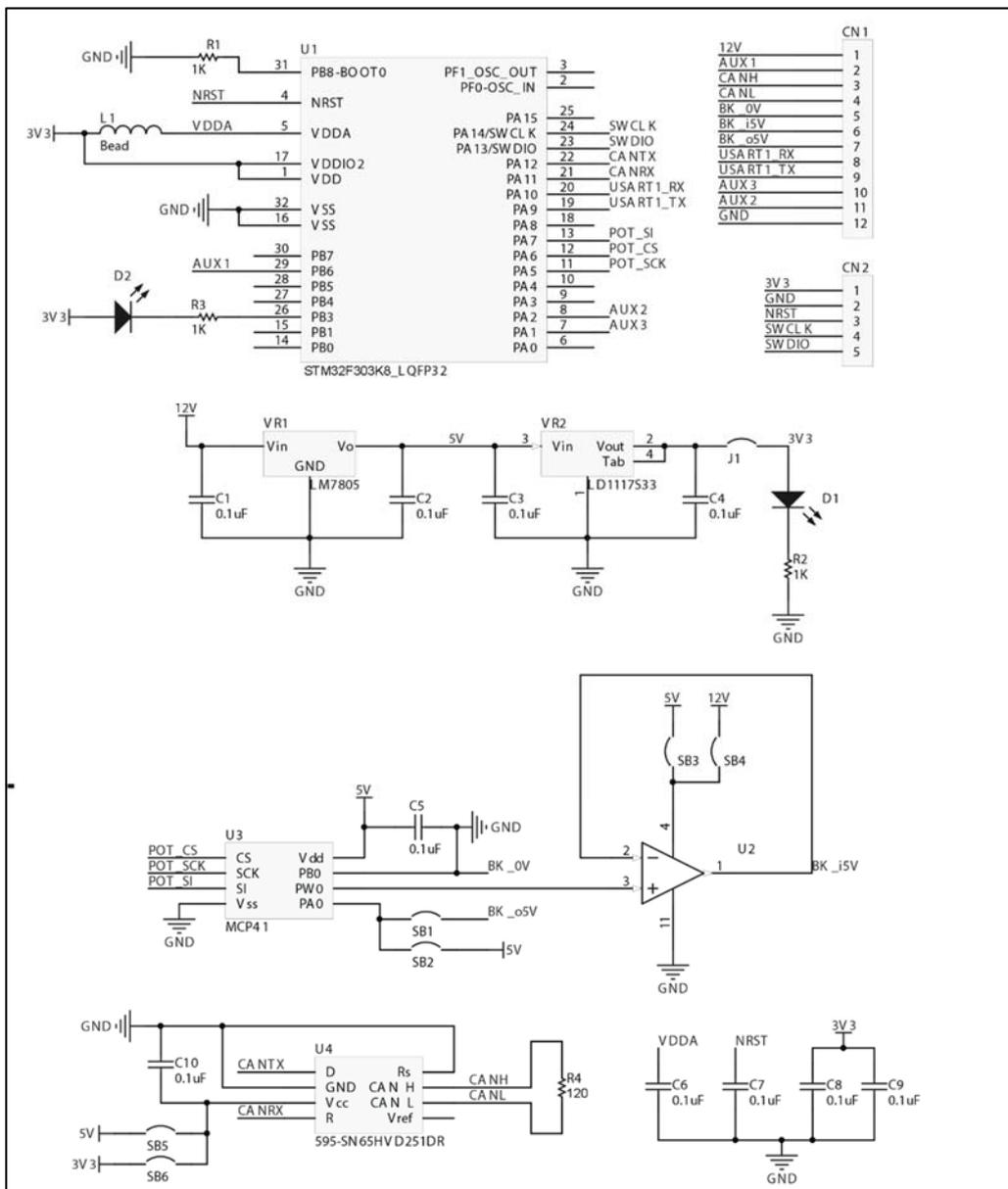


Figura 63 Esquemático del proyecto

La Figura 63 muestra el esquemático diseñado para este proyecto. Su cometido en esta memoria es meramente ilustrativo. Para consultar el esquemático en formato normalizado A4 diríjase a documento Planos, hoja 1.

En el esquemático aparecen todos los componentes del proyecto y sus interconexiones.

En proyectos con un diseño electrónico complejo, es común el uso de etiquetas en lugar de líneas para representar las interconexiones, ya que de lo contrario los esquemas carecerían de claridad. Por ejemplo, en la Figura 63, los puntos donde aparece la etiqueta "3V3" correspondiente al raíl de 3.3 voltios, están todos conectados entre sí.

Una vez que se dispone del esquemático se procede a traspasarlo a una PCB, mediante un programa informático, donde se continuará con el diseño.

7.3. SOFTWARE DE DISEÑO

Para el diseño de las complejas placas que se utilizan hoy en día se utilizan programas especializados con numerosas funcionalidades que ayudan a la labor. Por ejemplo, visualización 3D de la PCB o comprobación automática de cortocircuitos, solapamientos etc.

En la industria, por algún motivo, hasta los ingenieros más experimentados cometen frecuentemente errores durante el diseño de las placas de circuito impreso que precisan de una corrección improvisada una vez están fabricadas o de una nueva fabricación. Es por eso que para poder conseguir fabricar un diseño sin errores al primer intento es necesario realizar una revisión exhaustiva del mismo, actuar con cautela y contar con un *software* avanzado para la labor, pues el coste y tiempo de fabricación de una PCB por una empresa especializada es alto.

En este proyecto se ha empleado el programa Altium Designer. El coste de la licencia es elevado, pero se pueden obtener licencias de estudiante gratuitas.

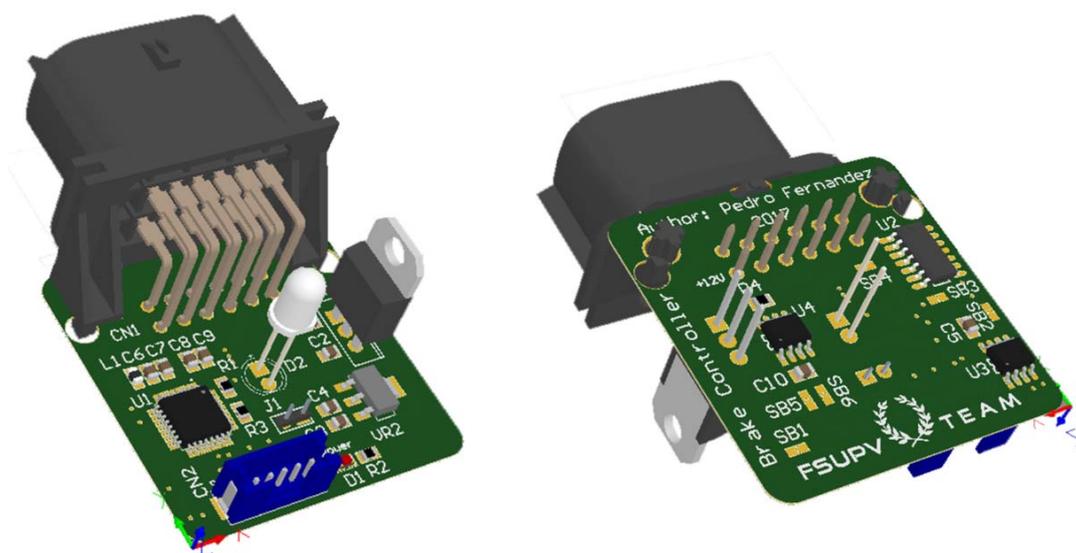


Figura 64 Visualización 3D del controlador

Altium Designer permite la visualización y exportación de un modelo 3D de la PCB, lo cual es de gran ayuda durante el proceso de diseño, montaje e integración del producto en otros sistemas. Véase el diseño de la carcasa en el apartado 8.1 de esta memoria.

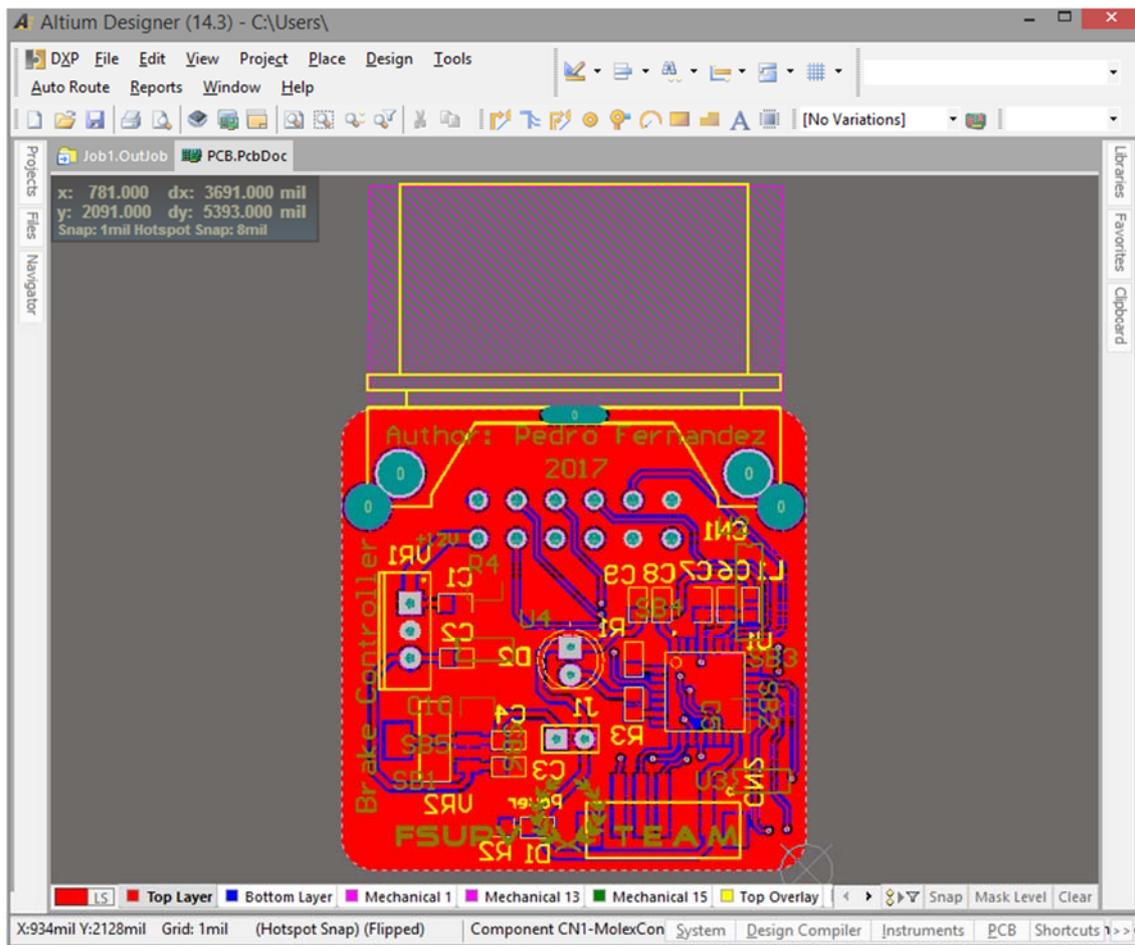


Figura 65 Diseño de la PCB en Altium Designer

La interfaz del programa es de apariencia sencilla. Además de la vista 3D, permite también una visualización en dos dimensiones, de una o varias capas, con orientación normal o en espejo.

7.4. COMPONENTES

Puesto que, generalmente este diseño consiste en trasladar los componentes del prototipo a una PCB, se utilizarán los mismos componentes, pero en sus versiones en encapsulado de montaje superficial.

Los componentes de montaje superficial (SMD, *Surface-Mount Device*), tienen un tamaño reducido y están diseñados para ser soldados directamente sobre la superficie de la PCB. A diferencia, los *thru-hole* atraviesan la placa con sus patillas. Los componentes SMD no son apropiados para realizar prototipos, por su tamaño, pero son ideales para productos finales, ya que permiten producir dispositivos compactos e igual de funcionales.



Figura 66 Potenciómetro digital MCP41010 en encapsulado SMD

Algunos componentes, por limitaciones físicas u otros motivos no disponen de versión en SMD, por lo que se utilizarán sus modelos *thru-hole*.

Los componentes principales utilizados pueden encontrarse detallados en el apartado 4 de esta memoria. También se puede consultar la lista completa de materiales en el documento Planos, hoja 13.

En el producto final no se utilizará la tarjeta de desarrollo empleada hasta ahora. Por el contrario, se usará el microcontrolador que incorpora, individualmente, y además habrá que colocar en la PCB todos los componentes necesarios para su funcionamiento, que antes estaban incluidos en la placa de desarrollo.

El esquemático del dispositivo puede encontrarse en el documento Planos, hoja 1.

De esta forma, además de los componentes mencionados en apartados anteriores se incorporan los siguientes:

7.4.1. Regulador de voltaje 7805T

El regulador lineal 7805T de la empresa ON Semiconductor es un componente clásico en la industria, económico y sencillo, que realiza una conversión de tensión de los 12 V CC de los que se alimenta el módulo a 5 V CC, apropiados para alimentar otros circuitos.

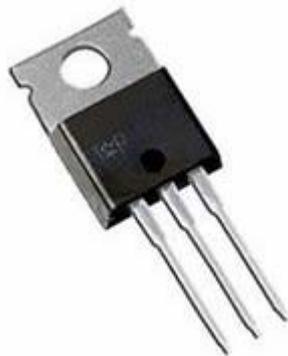


Figura 67 Regulador 7805T en encapsulado TO-220

CARACTERÍSTICAS

- Tensión de entrada de 7 a 25 V
- Salida de corriente hasta 1 A
- Protección integrada por sobrecalentamiento
- Protección integrada contra cortocircuitos

CONEXIÓN

- **INPUT:** Entrada de tensión de 7 a 25 V
- **GROUND:** Terminal común. Masa.
- **OUTPUT:** Salida regulada a 5 V.

Es conveniente apuntar que la pestaña de metal está conectada a GROUND.

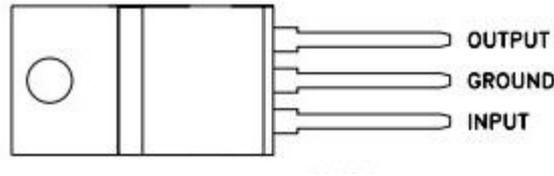


Figura 68 Pinout del 7805T

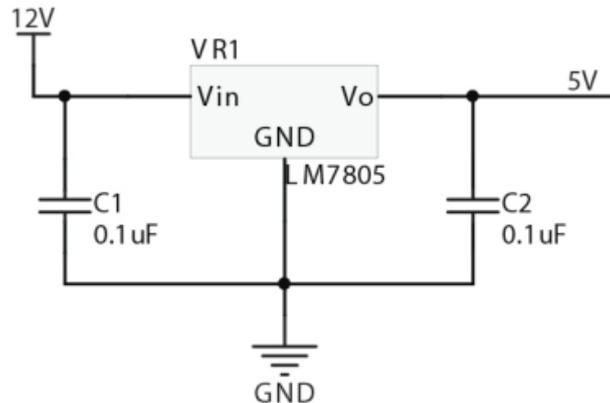


Figura 69 Esquema de conexión del 7805T

UTILIZACIÓN

Aunque la utilización del regulador es muy sencilla, cabe destacar que el fabricante recomienda incluir dos condensadores, uno entre la entrada y masa, y otro entre la salida y masa, de valores próximos al microfaradio.

7.4.2. Regulador de voltaje LD1117S33

El LD1117S33 es un regulador LDO (*Low Dropout Voltage*, baja caída de tensión), de la empresa STMicroelectronics que convierte los 5 V que se obtienen del regulador anterior a 3.3 V apropiados para alimentar algunos dispositivos. Al igual que el otro regulador, éste es también un estándar en la industria, económico y sencillo.

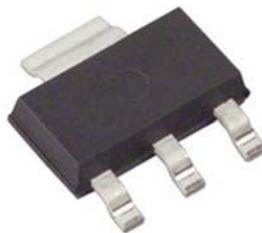


Figura 70 Regulador LD1117S33 en encapsulado SOT-223

CARACTERÍSTICAS

- Tensión de entrada máxima 12 V
- Salida de corriente hasta 1 A
- Protección integrada por sobrecalentamiento
- Protección integrada contra cortocircuitos
- Baja caída de tensión (aprox. 1.15 V a 1 A)

CONEXIÓN

- **GND:** Terminal común. Masa.
- **Vout:** Entrada de tensión hasta 12 V.
- **Vin:** Salida de tensión regulada a 3.3 V

Es conveniente apuntar que la pestaña de metal está conectada a Vout.

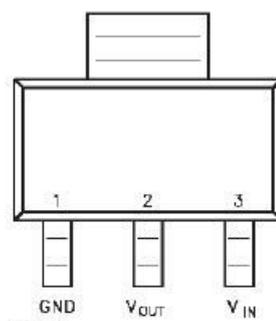


Figura 71 Pinout del LD1117S33

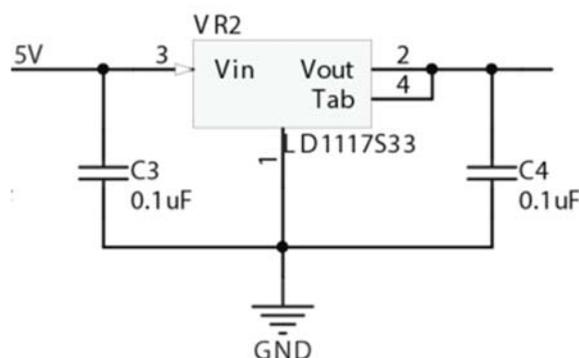


Figura 72 Esquema de conexión del LD1117S33

UTILIZACIÓN

Aunque la utilización del regulador es muy sencilla, al igual que en el anterior cabe destacar que el fabricante recomienda incluir dos condensadores, uno entre la entrada y masa, y otro entre la salida y masa, de valores próximos al microfaradio.

7.4.3. Diodos LED

El dispositivo cuenta con dos diodos LED que permiten comprobar visualmente diferentes datos.

LED DE ALIMENTACIÓN

Se trata de un LED rojo común, en encapsulado SMD, de la empresa OSRAM. Está colocado de manera que se alimenta del raíl de 3.3 V. Este LED señala que el microcontrolador recibe alimentación.



Figura 73 LED de alimentación

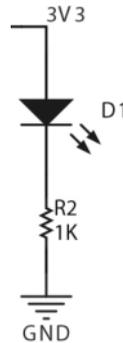


Figura 74 Esquema de conexión del LED de alimentación

En serie con el LED se encuentra su resistencia de limitación de corriente.

LED SUPERIOR

Se trata de un LED rojo de 5 mm clásico, en formato *thru-hole*, de la empresa Kingbright. Se sitúa en el centro de la PCB y está pensado para que sobresalga por la parte superior de la carcasa y pueda ser visto desde el exterior. Su función es informar al operario de diferentes acontecimientos.

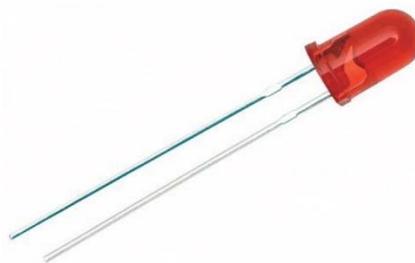


Figura 75 LED superior

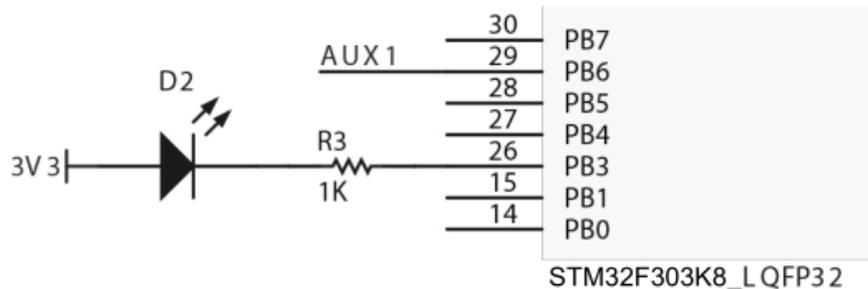


Figura 76 Esquema de conexión del LED superior

El componente se encuentra conectado a la salida digital PB3 del microcontrolador, en serie con la resistencia de limitación de corriente.

La información que provee este LED puede consultarse en el documento Manual de Usuario, apartado 3.3.

7.4.4. Conectores

El dispositivo cuenta con dos conectores, un conector principal que sirve para conectar el controlador al cableado del banco de ensayos y otro para programar el microcontrolador.

CONECTOR PRINCIPAL

El conector MX120G de la empresa Molex es un componente de montaje *thru-hole*, robusto y sellado a prueba de polvo, suciedad y humedad. Este conector se ha utilizado con anterioridad en otros proyectos y los resultados son muy satisfactorios.



Figura 77 Conector principal Molex MX120G

El componente cuenta con 12 pines, cuya numeración se puede encontrar en la parte interior del conector.



Figura 78 Esquema de conexión del conector principal

Dado que son necesarios menos de 12 pines para el trabajo, los restantes, en lugar de dejarlos desconectados, se utilizan para acceder a algunas entradas/salidas del microcontrolador que pueden ser de alguna utilidad en el futuro.

La disposición de pines se detalla a continuación:

Pin	Conexión	Función
1	12 V	Alimentación
2	AUX1	Pin auxiliar 1, no usado
3	CANH	Conexión a bus CAN
4	CANL	Conexión a bus CAN
5	BK_0V	Módulo de potencia 0 V
6	BK_i5V	Módulo de potencia, entrada de 5 V
7	BK_o5V	Módulo de potencia, salida de 5 V
8	USART1_RX	Puerto de comunicaciones serie
9	USART1_TX	Puerto de comunicaciones serie
10	AUX3	Pin auxiliar 3, no usado
11	AUX2	Pin auxiliar 2, no usado
12	GND	Masa

CONECTOR DE PROGRAMACIÓN

El conector PH x5 de la empresa JST es un componente de tamaño reducido y de montaje superficial, con 5 terminales. Es ideal para acceder temporalmente a los pines necesarios para programar y hacer *debug* del microcontrolador. Además, se tienen buenas experiencias de proyectos anteriores.

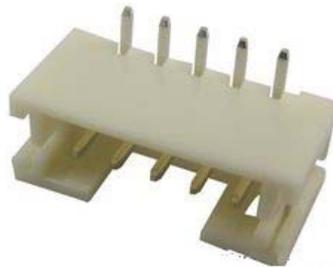


Figura 79 Conector de programación JST PH x5

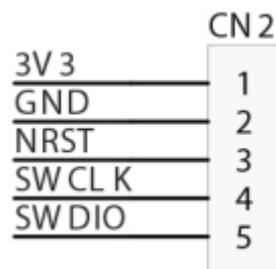


Figura 80 Esquema de conexión del conector de programación

Para programar el dispositivo, se conecta un programador externo que necesita tres pines de señal y dos de alimentación. A continuación, se muestra la disposición de pines:

Pin	Conexión	Función
1	3.3 V	Alimentación
2	GND	Masa
3	NRST	Programación. Reset.

4	SWCLK	Programación. Reloj.
5	SWDIO	Programación. Datos.

En el documento Manual de Programación, apartado 1.4, se puede encontrar cómo realizar la conexión para programar el microcontrolador con el programador ST-Link V2.

7.4.5. Jumper

El diseño incorpora dos terminales pensados para situar un jumper que cierre el circuito de alimentación al microcontrolador.



Figura 81 Jumper

La función del jumper es interrumpir la alimentación que proviene del conector principal para de esta forma poder conectar el programador externo al circuito y depurar el código.

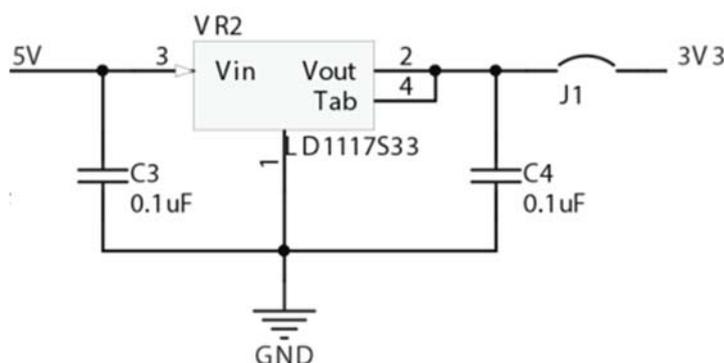


Figura 82 Esquema de conexión de jumper

Se puede observar que el componente (J1) se encuentra situado entre la salida del regulador de 3.3 V y el raíl "3V3" de la misma tensión, que es el que alimenta al microcontrolador.

7.4.6. Condensadores y resistencias

Los condensadores y resistencias del circuito, de la misma forma que la mayoría de componentes del circuito, se han empleado en formato de montaje superficial.

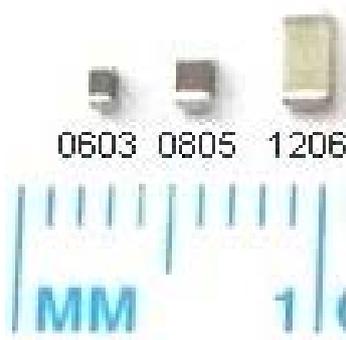


Figura 83 Comparación de tamaños de componentes SMD

Existen diferentes tamaños en el mercado para elegir componentes pasivos SMD, en este proyecto se ha decidido emplearlos de la medida 0805 (2.0 mm x 1.25 mm), con los que, además de tener experiencias anteriores, presentan un buen compromiso entre tamaño reducido y facilidad de manejo manual.

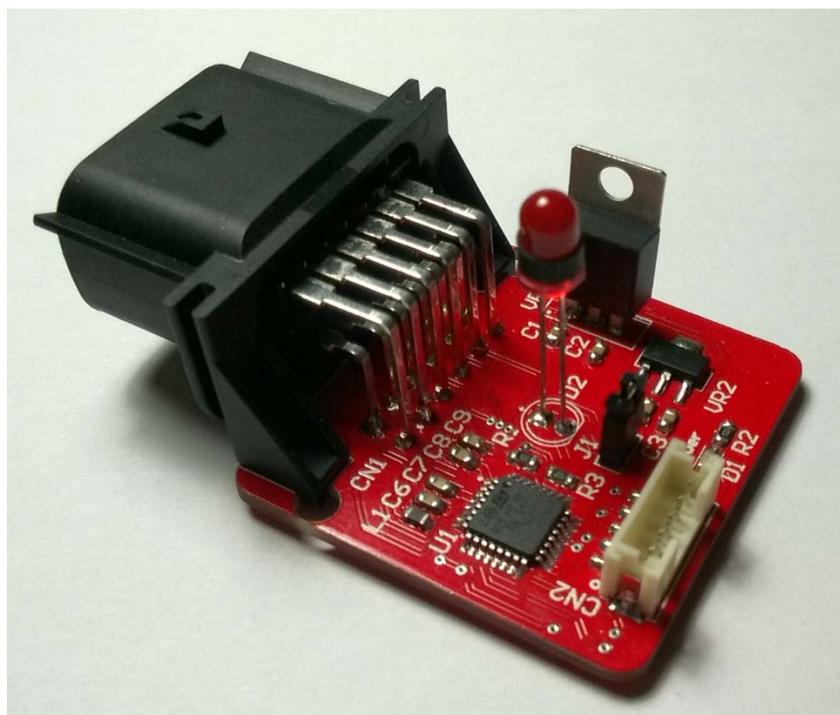


Figura 84 Controlador con todos los componentes soldados

En la Figura 84 se puede observar el aspecto del controlador con todos los componentes soldados. Se aprecia que el uso de componentes SMD permite obtener un producto compacto y un mejor aprovechamiento del espacio.

7.5. CONSIDERACIONES DEL DISEÑO

Para diseñar la PCB se han tomado en cuenta una serie de consideraciones sobre tamaños de pista, vías y planos que se detallan a continuación.

Para más información sobre el diseño de la PCB, se pueden consultar los planos en el documento Planos, hojas de la 2 a la 12.

7.5.1. Tamaño de pistas

A la hora de elegir el tamaño de las pistas se puede encontrar información en el estándar IPC-2152 (*Standard for Determining Current-Carrying Capacity In Printed Board Design*), donde aparece la siguiente tabla:

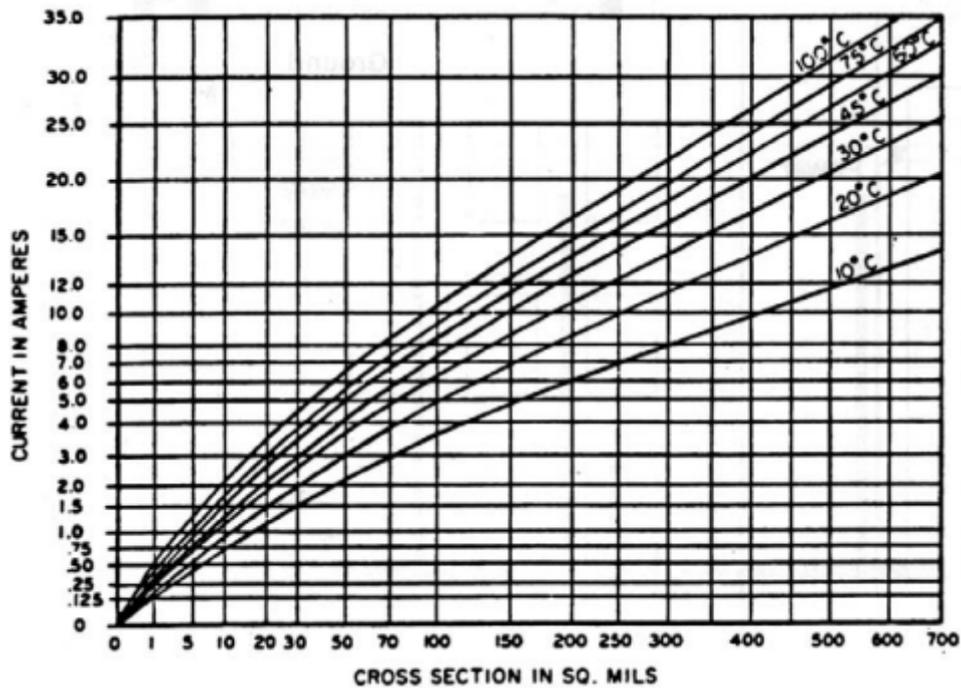


Figura 85 Tabla de anchura de pistas IPC-2152

De la tabla se puede obtener, por ejemplo, que al atravesar 0.5 A una pista de 5 mil (5 milésimas de pulgada), la temperatura de la misma ascendería alrededor de 10 °C.

Muchas de las pistas en este proyecto conducen corrientes prácticamente despreciables, con lo que, atendiendo a la tabla anterior, se obtendrían pistas de tamaños ínfimos, que resultarían difíciles de fabricar. Por ello se recurre a dimensiones de mayor tamaño, que sí pueden ser fabricadas sin problemas y que, además, aportan un grado de seguridad muy alto.

Para el proyecto se han utilizado las siguientes dimensiones de pistas:

- Alimentación general al regulador: 40 mil (1.016 mm)
- Resto de alimentaciones: 20 mil (0.506 mm)
- Señales: 10 mil (0.254 mm)

7.5.2. Tamaño de vías

El tamaño de las vías que atraviesan la PCB, al igual que el de las pistas, debe ir en consonancia con la intensidad que conducen.

Según el estándar IPC-2152, el diámetro (efectivo) de las vías debe ser mayor que la anchura de las pistas que llegan hasta ellas. Aunque, como se indica en el apartado anterior, el tamaño de las pistas se toma con un alto margen de seguridad, esta recomendación se sigue. De esta forma los tamaños quedan así:

Pista	Diámetro interior	Diámetro exterior	Diámetro efectivo
40 mil (1.016 mm)	No se usan vías para estas pistas		
20 mil (0.506 mm)	No se usan vías para estas pistas		
10 mil (0.254 mm)	0.3 mm	0.6 mm	0.3 mm

7.5.3. Planos de masa

En una PCB, un plano es una superficie de la capa de cobre que normalmente se utiliza para conectar eléctricamente diversos puntos a la misma tensión. Se diferencia de una pista en que los planos no tienen la forma alargada que tienen éstas, además de que las pistas suelen conectar sólo dos puntos.

Los planos pueden ser de gran ayuda en el diseño ya que permiten por ejemplo llevar las tensiones de masa o alimentación, que son comunes a muchos componentes, más fácilmente, sin necesidad de trazar pistas independientes para cada uno.

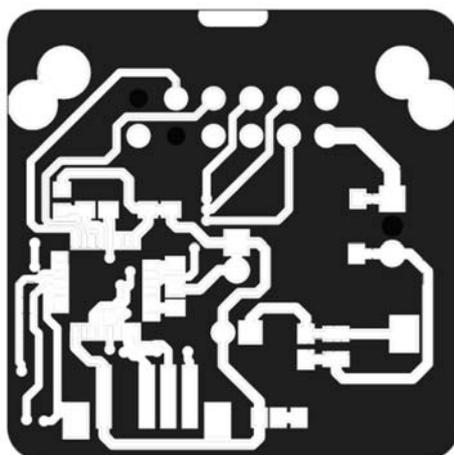


Figura 86 Plano de masa de la capa superior

En este proyecto se utilizan dos planos de masa, uno en cada cara. Su uso facilita la distribución de la masa a todos los componentes que la necesitan, aprovechando el espacio que queda vacío entre pistas.

En la Figura 86 se puede ver el plano de masa de la parte superior de la PCB. El cobre que forma el plano corresponde a lo coloreado en negro. Las pistas y *pads*, que se han eliminado de la figura para más claridad, discurren por los huecos (en blanco) que no están conectados al plano.

Los planos de la capa superior e inferior se pueden consultar en formato normalizado en el documento Planos, hojas 2 y 3.

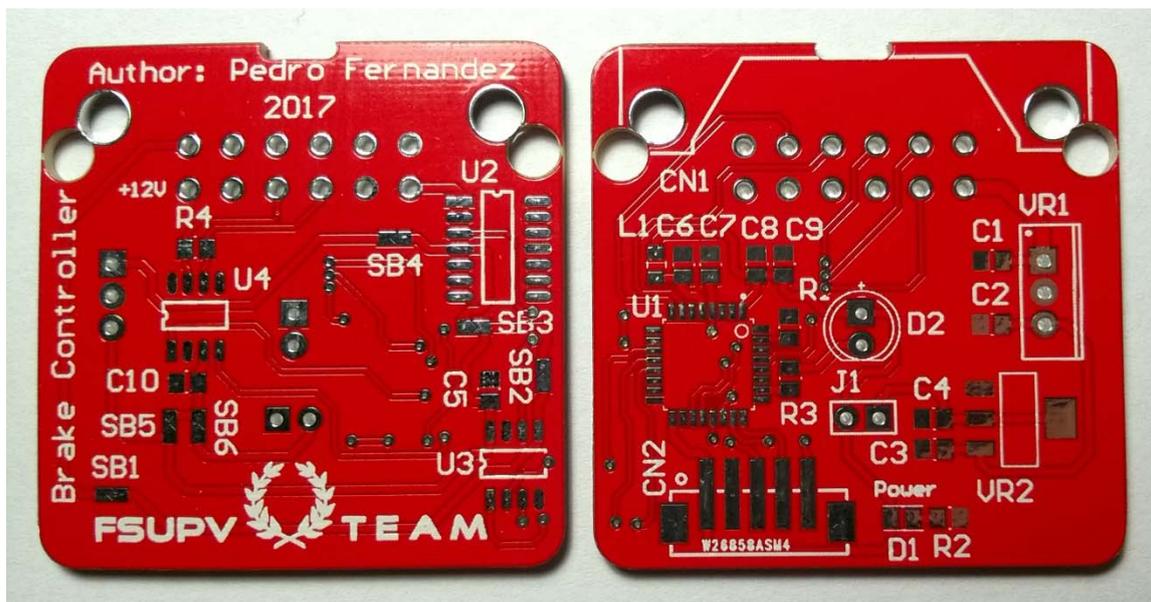


Figura 87 PCB del controlador

En la Figura 87 se observa la placa del controlador previamente al montaje. Los planos de masa ocupan todos los espacios libres entre pistas, *pads* y agujeros. Se aprecia también una distribución uniforme de los componentes y las pistas que aprovechan la totalidad de la superficie disponible.

8. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA CARCASA

El dispositivo desarrollado está pensado para trabajar en un banco de pruebas de un motor donde tendrá que lidiar con suciedad, manipulación del personal y otros fenómenos adversos. Por ello se hace imprescindible la protección del mismo con una carcasa robusta.

Si bien existen carcasas en el mercado que se pueden adquirir y adaptar al producto, dado que el FSUPV cuenta con una impresora 3D, se ha optado por diseñar y fabricar una carcasa a medida.

Con esto, además, se ponen de manifiesto capacidades del ingeniero en otras áreas que distan de la electrónica y el control.

8.1. DISEÑO

En primer lugar, se procede al diseño basado en una serie de especificaciones que tiene que cumplir la carcasa final:

- Robusta:

El producto ha de poder resistir las exigencias del uso en ambiente industrial, como golpes o trato descuidado.

- Sencilla:

Por un lado, se debe pretender que el número de piezas sea el mínimo, de esta forma se reduce el coste. Por otro lado, el montaje debe ser lo menos complejo posible.

- Evitar aberturas que queden descubiertas:

Es importante que no se realicen aberturas de forma que cuando el dispositivo se encuentre montado queden descubiertas al exterior. El aparato no necesita ningún tipo de ventilación, por lo que cualquier abertura de este tipo sólo facilita la entrada de suciedad y de objetos perjudiciales, ambos presentes con regularidad en el ambiente industrial.

- Evitar, si es posible, el uso de tornillos:

Se tratará de fijar la carcasa a la PCB sin usar tornillos que incrementen el coste y el tamaño del dispositivo final.

Tras el análisis de las especificaciones se procede al modelado con la herramienta informática de CAD Solidworks.

El *software* de diseño de la PCB, Altium Designer, permite exportar un modelo 3D (ver Figura 88) que se puede usar para medir, diseñar alrededor del mismo y verificar el buen acoplamiento.

Con estas herramientas, es posible realizar un modelo informático iterando hasta que se ajuste al producto que se busca.

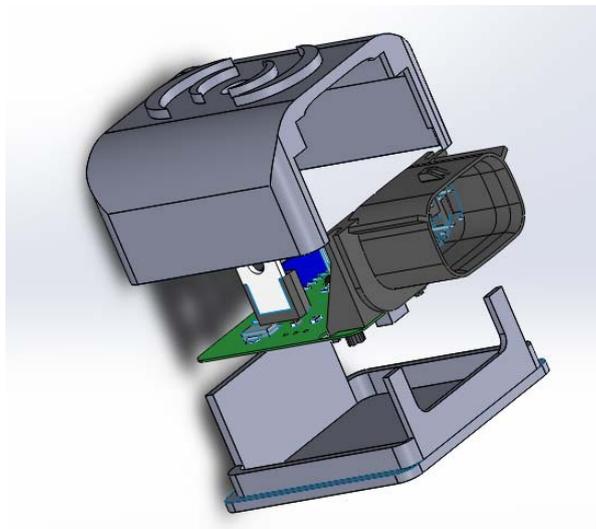


Figura 88 Vista explotada de la carcasa

La carcasa diseñada consiste en una caja dividida en dos partes, una superior y otra inferior, que se separan para introducir el dispositivo en el interior. De esta forma se consigue un sencillo montaje con un número mínimo de piezas.

La caja una vez cerrada, adquiere una alta robustez debido al espesor de las paredes, que generalmente es de 2 mm, y al diseño de la estructura, en esencia, una caja cúbica.

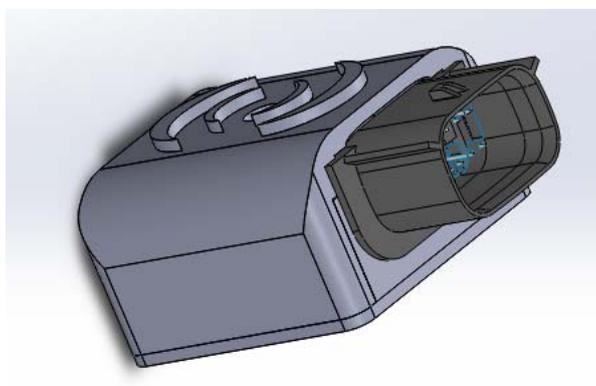


Figura 89 Vista de la carcasa cerrada

La parte frontal cuenta con unas protuberancias para acomodar el conector principal y la parte superior consta de un orificio para la salida del LED. No existen más aperturas, como se detalla en las especificaciones.

La caja se mantiene cerrada mediante la fricción que generan los bordes que parten de la base con la parte superior. De esta forma se evita el uso de tornillos o adhesivos.

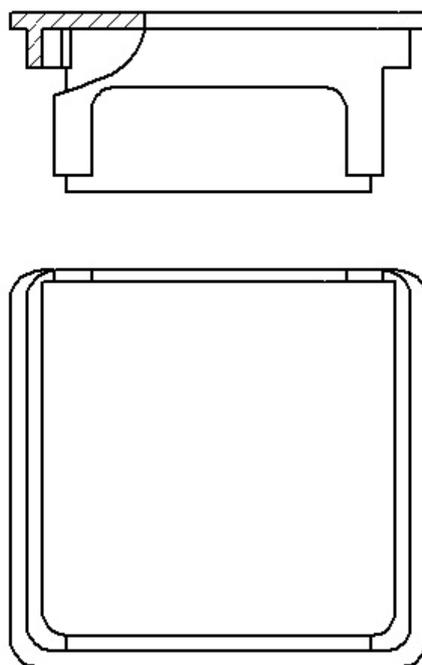


Figura 90 Vistas de la parte inferior de la carcasa

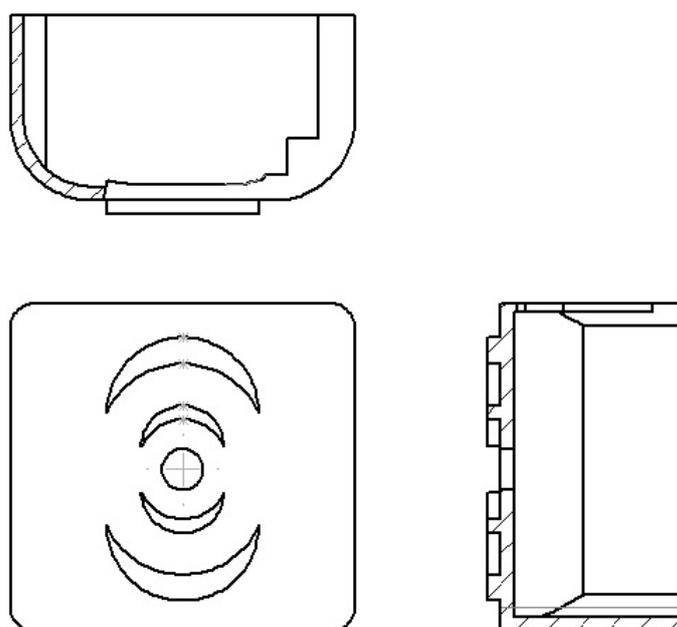


Figura 91 Vistas de la parte superior de la carcasa

En la Figura 90 y la Figura 91 se pueden observar las vistas de las dos partes en alzado, planta y perfil. El propósito de estas figuras es meramente ilustrativo. Para encontrar los planos en formato normalizado y con todas las cotas, diríjase al documento Planos, hojas 14 y 15.

En el CD adjunto al TFG se pueden encontrar los modelos 3D de la carcasa en formato STEP.

8.2. FABRICACIÓN

La técnica de fabricación empleada ha sido la impresión 3D, con material ABS negro. La máquina utilizada para la labor se trata de una Zortrax M200, con filamento Z-ultraT.

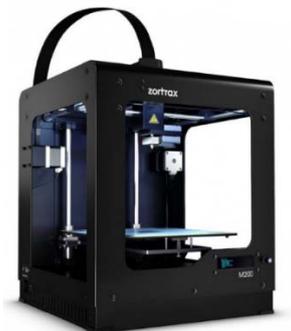


Figura 92 Impresora 3D Zortrax M200

A continuación, se muestra el resultado final.



Figura 93 Carcasa impresa en 3D

No ha sido necesaria ninguna modificación en el diseño original para adaptarse al proceso de impresión.

El resultado obtenido es satisfactorio. Se ha conseguido un acabado liso y bien definido sin necesidad de ningún tratamiento posterior en la mayoría de la superficie. Excepcionalmente, en algunos puntos del interior se ha tenido que retocar la parte inferior muy ligeramente para que la PCB encajase más suavemente. Esto se podría mejorar si se hubieran tomado unas tolerancias en las piezas mayores de los 0.2 a 0.5 mm (dependiendo de lugar) que se tomaron.

9. RESULTADOS

Tras el proceso de desarrollar el diseño e implementar el controlador durante las anteriores páginas, se hace necesario como uno de los últimos pasos del proyecto, comprobar que todo funciona como se espera. Para ello se desarrollan algunas pruebas que se relatan a continuación.



Figura 94 Controlador final

La Figura 94 muestra el aspecto del controlador una vez montado y terminado.

9.1. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA

En lo que respecta al desarrollo electrónico del proyecto se han obtenido resultados satisfactorios.

En primer lugar, no se ha encontrado ningún problema en el diseño o fabricación de la PCB. Tras la etapa de soldadura y limpieza de la placa, se ha procedido a interactuar con el microcontrolador a través del puerto de programación y se ha programado si problema.

Después, tras la conexión al banco y la activación de la alimentación, se ha obtenido el comportamiento esperado (el LED superior realiza lo que debe) y no se aprecia ningún calentamiento anómalo en ninguna región de la PCB.

A continuación, se ha comprobado la correcta conexión al bus CAN, de manera que pueda obtenerse información de otros periféricos conectados al mismo y ha transcurrido sin problema.

Finalmente, se ha verificado que el algoritmo se ejecuta correctamente y es capaz de provocar que el freno actúe.

9.2. RESULTADOS DEL CONTROL

Tras las primeras pruebas para verificar el control en bucle cerrado se realizan unos ligeros ajustes en los parámetros del control para mejorar el comportamiento. Para ello se procede a

modificar progresivamente los parámetros de ganancia y tiempo integral del controlador, en línea.

Los valores quedan de la siguiente forma.

	Kp	Ti
Valor teórico	-0.00014791	0.92
Valor ajustado	-0.0000771	0.35

En la siguiente figura se puede observar el comportamiento del controlador. En el experimento se coloca la referencia en 6000 RPM y se acelera el motor hasta sobrepasar dicho valor. En ese momento el dispositivo comienza a funcionar y consigue alcanzar el objetivo en menos de 10 segundos, que se estableció como especificación.

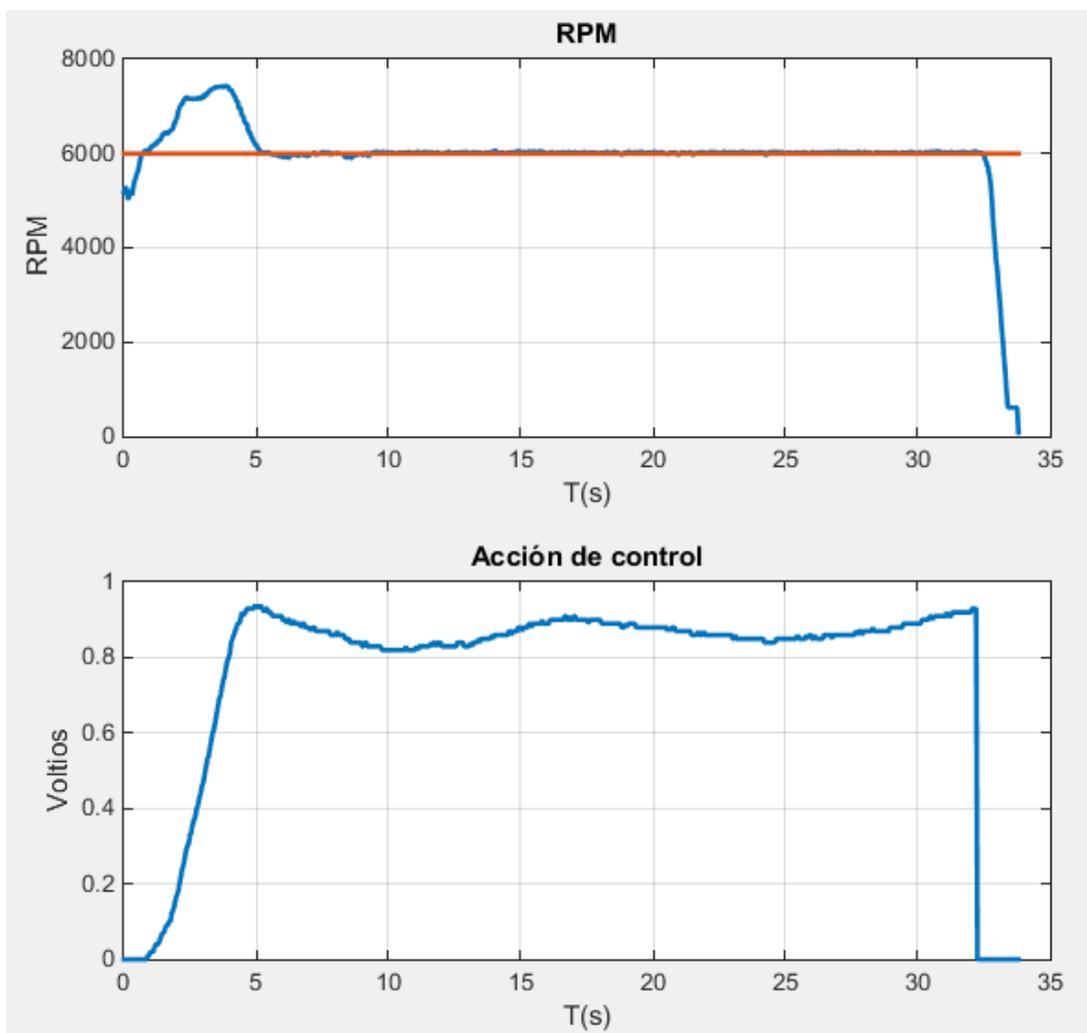
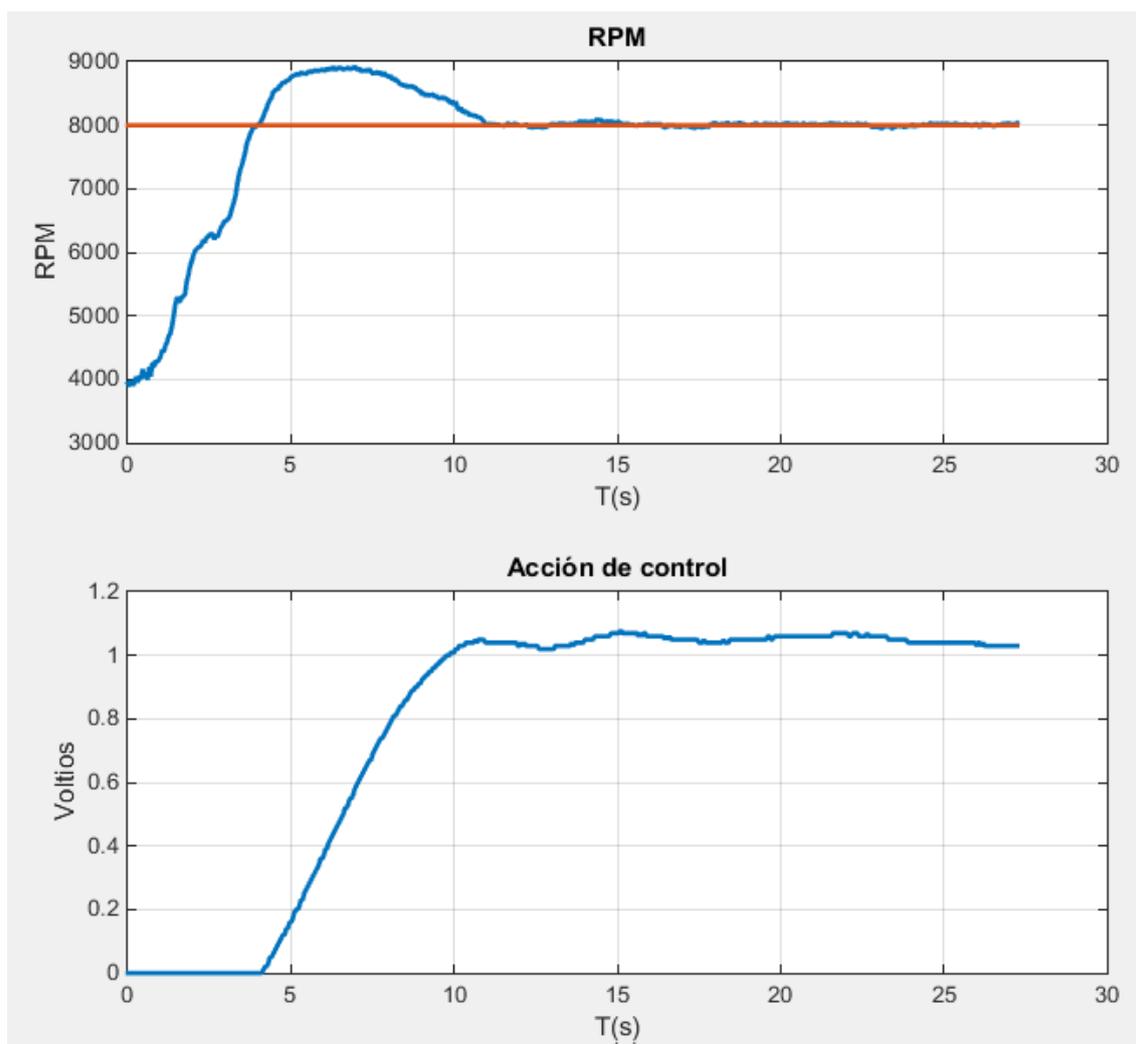


Figura 95 Resultado del controlador

Se observa una sobreoscilación del 23% al inicio debida a que el motor se encuentra acelerando, además en una de las zonas en las que un motor de combustión interna desarrolla más potencia. Aun así, el resultado se mantiene dentro de la conservadora especificación que se tomó.

En régimen permanente, que es la zona más importante en este proyecto se observan unos valores máximos y mínimos de 6143 RPM y 5880 RPM respectivamente, los cuales se mantienen dentro de las especificaciones. Además, se ve como la acción de control va variando en función de las necesidades del sistema mientras que la velocidad permanece en la referencia.

Pese a que el diseño del controlador se ha desarrollado sobre un modelo a 5000 RPM (ver apartado 5.2.3) el dispositivo se comporta de forma satisfactoria en un amplio rango de referencias. Ya se ha visto la prueba anterior a 6000 RPM, para destacar la robustez del regulador, se presenta el siguiente ensayo a 8000 RPM de referencia.



En esta prueba se observa una sobreoscilación de 10.6 % y un tiempo de establecimiento de 5.55 s, los cuales cumplen las especificaciones. En régimen permanente, el valor máximo se sitúa en 8137 RPM y el mínimo en 7884 RPM, lo cual también denota el funcionamiento adecuado.

En el siguiente apartado de Conclusiones se comentarán otros aspectos sobre el control y sobre los resultados obtenidos.

10. CONCLUSIONES

El controlador desarrollado en este proyecto, en el momento de la redacción, está siendo utilizado por el equipo para la ejecución de pruebas que van directamente asociadas a mejoras en el vehículo de competición, y, por lo tanto, a una mejora en los resultados en las competiciones a las que se enfrenta.

El proyecto ha dado lugar a un dispositivo fiable, robusto y útil, que cumple las necesidades del equipo, con lo que se puede considerar un desarrollo satisfactorio.

Durante todas las etapas del diseño e implementación del controlador se han adquirido nuevos conocimientos y reforzado otros en numerosos campos: electrónica, control automático, mecánica, etc., ya que un proyecto de estas características obliga al ingeniero a desarrollar un grado importante de polivalencia.

Para finalizar se presentan unas conclusiones más concretas sobre algunos aspectos del trabajo.

MODELO DEL SISTEMA

El modelo obtenido ha servido para desarrollar una primera versión del regulador que posteriormente en la práctica se ha terminado de ajustar. Desde el primer momento, como se ha comentado en apartados anteriores, se sabía que iba a contar con un grado importante de incertidumbre. Esto puede deberse a los siguientes factores:

- El motor de combustión interna, por su naturaleza, hace que el sistema no sea lineal.
- En el momento del desarrollo de este trabajo la configuración de la ECU tiene numerosas irregularidades que hacen que el comportamiento del motor sea errático y muy difícil de controlar.
- El factor humano en el manejo del acelerador durante el modelado introduce también otra variable que puede afectar al modelo.

AJUSTE DEL CONTROLADOR

Una posibilidad que se plantea es si se puede obtener un mejor ajuste del controlador, que cumpla unas especificaciones más exigentes y que sea más rápido.

Numerosas pruebas se han llevado a cabo para este fin concreto y se ha concluido lo siguiente:

- Un aumento de la parte proporcional, en teoría podría conseguir una respuesta más rápida durante el transitorio inicial. Las pruebas han determinado que, si bien esto es cierto, y puede alcanzarse la referencia más rápido, en muchas ocasiones esto propicia una acción de frenado demasiado brusca y el motor se cala.
- Se ha comprobado que puede ajustarse el regulador de forma que funcione más rápido para un punto concreto de RPM del motor. Esto es sólo beneficioso para trabajar alrededor de ese punto pues el sistema se aleja mucho de ser lineal. La consecuencia es un peor funcionamiento en el resto del rango de RPM.
- Dada la naturaleza del proyecto, en un banco de ensayos hay numerosos componentes que se reemplazan para realizar pruebas con ellos (admisión, escapes, inyectores etc.), así como la configuración de la ECU que repercute directamente en el comportamiento del motor. Esto obliga a que un buen regulador para esta aplicación debe ser versátil y

debe ser capaz de controlar el sistema a pesar de algunos cambios. Esto se ha puesto de manifiesto durante el desarrollo del trabajo, dado que varios componentes han ido cambiando. Por ello, es necesario no particularizar más de lo necesario el regulador, y así se ha llevado a cabo. El regulador obtenido necesita unos segundos para llegar al objetivo, pero es capaz de tolerar grandes variaciones en el sistema.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Wikipedia (2017). Corriente de Foucault [online]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_de_Foucault [11 de mayo de 2017]
- Venkat Ramaswamy (1998). HALF-CONTROLLED SINGLE-PHASE BRIDGE RECTIFIER [online]. Disponible en: http://www.technik-emen.de/~elmalab/projekte/ws9899/pe_html/ch06s1/ch06s1p1.htm [11 de mayo de 2017]
- STMicroelectronics (2017). STM32 32-bit ARM Cortex MCUs [online]. Disponible en: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html?querycriteria=productId=SC1169> [11 de mayo de 2017]
- ON Semiconductor (2013). Everything You Wanted to Know About Digital Potentiometer (POT) [online]. Disponible en: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND8414-D.PDF> [11 de mayo de 2017]
- Robert Bosch GmbH (1991). CAN Specification Version 2.0 [online]. Disponible en: http://www.bosch-semiconductors.de/media/ubk_semiconductors/pdf_1/canliteratur/can2spec.pdf [11 de mayo de 2017]
- Varios autores (2006). Controlador CAN [online]. Disponible en: <http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/PAEEES/2005-06/A05-A06%20-%20Controlador%20CAN%20-%20Trabajo.pdf> [11 de mayo de 2017]
- MathWorks (2017). MATLAB Answers [online]. Disponible en: https://es.mathworks.com/matlabcentral/answers/index/?s_tid=gn_mlc_an [11 de mayo de 2017]
- Wikipedia (2017). Controlador PID [online]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID [11 de mayo de 2017]
- Varios Autores (2013). Automática (2013) [online]. Disponible en: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/automatica> [11 de mayo de 2017]
- Mahmoud Wahby (2013). PCB design basics [online]. Disponible en: <http://www.edn.com/design/pc-board/4424239/PCB-design-basics> [11 de mayo de 2017]
- IPC – Association Connecting Electronics Industries (2013). IPC-2152: Standard for Determining Current-Carrying Capacity In Printed Board Design
- Microchip (2013). MCP41XXX datasheet [online]. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/11195c.pdf> [11 de mayo de 2017]
- Texas Instruments (2015). SN65HVD25 [online]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd251.pdf> [11 de mayo de 2017]
- Texas Instruments (2015). LM324 [online]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2902-n.pdf> [11 de mayo de 2017]
- STMicroelectronics (2016). STM32F303K8 datasheet [online]. Disponible en: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/f2/1f/e1/41/ef/59/4d/50/DM00058181.pdf/files/DM00058181.pdf/jcr:content/translations/en.DM00058181.pdf> [11 de mayo de 2017]

- ON Semiconductor (2014). 7805T datasheet [online]. Disponible en:
<http://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC7800-D.PDF> [11 de mayo de 2017]
- STMicroelectronics (2013). LD1117S33 datasheet [online]. Disponible en:
<http://www.mouser.com/ds/2/389/ld1117-974075.pdf> [11 de mayo de 2017]