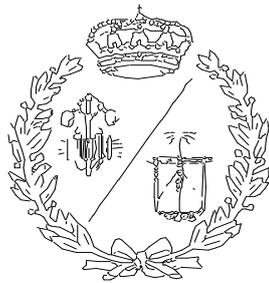


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**SISTEMA DE CONTROL LONGITUDINAL PARA
VEHÍCULO ELÉCTRICO URBANO**

**(Longitudinal control system for urban electric
vehicle)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Daniel López Montes

Septiembre – 2014

TÍTULO	Sistema de control longitudinal para vehículo eléctrico urbano		
AUTOR	Daniel López Montes		
DIRECTOR / PONENTE	Luciano Alonso Rentería		
TITULACIÓN	<i>Grado en ingeniería de tecnologías industriales</i>	FECHA	17/09/2014

PALABRAS CLAVE

Sistema de control, vehículo eléctrico, motor eléctrico, frenos, modelado de sistemas, identificación de sistemas, sistemas discretos, diseño, PID, realimentación de estados, Matlab, Simulink.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se desea investigar la automatización de un vehículo eléctrico de forma que tanto el motor como los frenos puedan ser controlados mediante un ordenador, pudiendo elegir la velocidad a la que se desplaza el vehículo. En este caso se dispone de un pequeño vehículo eléctrico experimental.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Se estudia el vehículo y se crea un modelo en Simulink para poder simular su funcionamiento, usando este modelo se prueban en simulaciones diferentes formas de control previamente estudiadas. Estas formas de control consisten en el uso de PIDs o de diferentes realimentaciones de estados, se comparan los resultados obtenidos para decidir que opción es la mejor.

Este sistema de control creará una señal que dependiendo de su valor actuará acelerando el vehículo o frenándolo, esta señal será enviada a la controladora del motor o a una electrobomba que accionara los frenos.

También se estudian los componentes de los que dispone el vehículo y los que deben ser instalados para su automatización.



CONCLUSIONES

Nos decidimos por implementar un control mediante realimentación de estados, debido a los mejores resultados que obtiene en las simulaciones.

El sistema de aceleración únicamente necesita de una tarjeta de adquisición de datos que genere la señal que llegará a la controladora del motor eléctrico, mientras que el sistema de frenado necesita una electrobomba y una válvula para modificar el sistema hidráulico.

BIBLIOGRAFÍA

- Michael Short, Michael J.Pont and Qiang Huang. "Safety and Reliability of Distributed Embedded Systems: Simulation of Vehicle Longitudinal Dynamics". Embedded Systems Laboratory Technical Report, 2004.
- H Pacejka. "Tyre and vehicle dynamics". Butterworth-Heinemann, 2012.
- Benjamin C. Kuo. "Sistemas de Control Automático". Prentice Hall, 1996.
- Katsuhiko Ogata. "Ingeniería de control moderna". Pearson Educación, 1998.
- Katsuhiko Ogata. "Sistemas de Control en tiempo discreto". Prentice Hall, 1996.
- Luis Moreno, Santiago Garrido, Carlos Balaguer. "Ingeniería de Control (Modelado y control de sistemas dinámicos)". Ariel, 2003.
- Sergio Domínguez, Pascual Campoy, José María Sebastián, Agustín Jiménez. "Control en el Espacio de Estado". Prentice Hall, 2001.
- Ramos P.Ñeco, Oscar Reinoso, Nicolás García, Rafael Aracil. "Apuntes de Sistemas de Control". ECU (Editorial Club Universitario), 2003



- Theodore Wildi. "Maquinas eléctricas y sistemas de Potencia". Pearson Educacion, 2007.
- http://es.wikipedia.org/wiki/Vehículo_autónomo - 2/07/2014
- http://es.wikipedia.org/wiki/Vehículo_eléctrico - 4/07/2014
- <http://www.car.upm-csic.es/autopia/> - 4/07/2014
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Brake> - 29/08/2014



ÍNDICE GENERAL



1 INTRODUCCIÓN	7
1.1 FINALIDAD DEL PROYECTO	7
1.2 ESTADO DEL ARTE	8
1.3 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	13
1.3.1 Vehículos híbridos	17
1.4 VEHÍCULO EXPERIMENTAL	18
2 MODELADO DE LA DINÁMICA LONGITUDINAL DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO	21
2.1 CUERPO DEL VEHÍCULO	24
2.2 NEUMÁTICOS	25
2.3 RUEDAS	28
2.4 MOTOR ELÉCTRICO	29
2.5 FRENOS	30
2.6 PARÁMETROS DEL VEHÍCULO	32
3 TÉCNICAS DE CONTROL	34
3.1 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	34
3.2 CONTROL PID	39
3.2.1 Diseño de controladores PID	45
3.2.2 Discretización de controladores PID	49
3.3 CONTROL POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS	52
3.3.1 Espacio de estados	52
3.3.2 Controlabilidad y Observabilidad	54
3.3.3 Realimentación de estados sin observador	56
3.3.4 Realimentación de estados con observador	59
3.3.5 Realimentación de estados con un PI	62
3.3.6 Cálculo de las ganancias	63
4 ANALISIS DE CONTROLADORES MEDIANTE SIMULACIÓN	65
4.1 VERIFICACIÓN DEL MODELO	65
4.2 IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DINÁMICO LINEAL	68
4.3 CONTROL PID	70



4.3.1 PID rápido	72
4.3.2 PID sin sobreimpulso	76
4.3.3 PID con ligero sobreimpulso.....	78
4.4 CONTROL POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS	81
4.4.1 Realimentación de estados típica	81
4.4.2 Realimentación de estados con un PI	87
4.5 CONCLUSIONES	91
5 MECANISMO DE FRENADO	93
5.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE FRENADO	93
5.2 TIPOS DE FRENOS	95
5.2.1 Frenos de Disco	95
5.2.2 Frenos de Tambor.....	98
5.3 SISTEMA HIDRÁULICO	100
6 HARDWARE.....	104
6.1 CONTROLADOR CURTIS PMC 1268	104
6.2 MOTOR ELÉCTRICO.....	109
6.3 POTENCIOMETRO DEL PEDAL DEL ACELERADOR	113
6.4 SENSOR DE EFECTO HALL	114
6.5 TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS.....	116
6.6 SISTEMA DE SELECCIÓN MANUAL-AUTOMÁTICO	117
6.7 SISTEMA DE FRENOS	119
6.7.1 Bomba electrónica	121
6.7.2 Válvula direccional	125
7 CÁLCULOS.....	128
7.1 IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DEL VEHÍCULO	128
7.2 VELOCIDAD MEDIDA POR EL SENSOR DE EFECTO HALL.....	129
A1 - CODIGO MATLAB PARA LAS SIMULACIONES	131
A2 - HOJAS DE CARACTERISTICAS	135
BIBLIOGRAFÍA	188



1 INTRODUCCIÓN

1.1 FINALIDAD DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es conseguir una automatización de bajo nivel de un vehículo urbano, en este caso el vehículo con el que se trabajara será un coche eléctrico biplaza del que se hablara más adelante.

La finalidad es que el conductor del vehículo no tenga que usar ni el freno ni el acelerador para la conducción, ya que mediante un computador se establecerá la velocidad deseada. El conductor solo tendría que manejar el volante (el sistema de la dirección debiera ser otro proyecto posterior) y en caso de emergencia podría utilizar el acelerador o el freno (por seguridad).

El control se llevara a cabo mediante un algoritmo introducido en un ordenador que se tendrá a bordo conectado a una tarjeta de adquisición de datos que se encargara de enviar y recibir las señales necesarias para el funcionamiento del sistema de control. El algoritmo se implementará en un idioma de programación que estará configurado para funcionar con la tarjeta de adquisición y usará el sistema de control que se estudiara y probará en este proyecto.

Por tanto el control por ordenador es un complemento a la conducción manual, y no una sustitución ya que por motivos de seguridad no se debe eliminar la posibilidad de que el conductor pueda frenar o acelerar si fuera necesario.

Este tipo de proyectos son pasos previos a la automatización total de los vehículos, que posiblemente se conseguirá en un futuro no muy lejano, esta automatización total significaría la "extinción" de los conductores, que no serán necesario en el transporte por carretera, el principal inconveniente de esto es la seguridad, dado que muchas personas no están dispuestas a dejar su vida en manos de la tecnología.



Este proyecto es un paso previo a otros posibles proyectos que aumenten el nivel de control del vehículo, implementando por ejemplo el control de la dirección, o el uso de cámaras para visión artificial reconociendo el entorno y posibilitando la automatización total de un vehículo en la universidad de Cantabria, siguiendo la línea de investigación que se está llevando en esta universidad.

1.2 ESTADO DEL ARTE

En el pasado se llevaron a cabo varios proyectos en todo el mundo intentando conseguir vehículos que se desplacen sin conductor, a continuación se habla de algunos de estos proyectos.

La presentación más antigua de un vehículo autónomo que se conoce fue hecha por Norman Bel Geddes en la feria de muestras "Futurama" en la Exposición Universal de 1939, que consistía en un vehículo eléctrico que era controlado por un circuito eléctrico embebido en el pavimento de la carretera.

En 1980 una furgoneta guiada por visión de Mercedes-Benz, diseñada por la Universidad de Múnich alcanzó los 100 km/h en calles sin tráfico. La Comisión Europea se mostró interesada en el proyecto y realizó una inversión de 800 millones de € para un proyecto que buscaba desarrollar un vehículo autónomo.

En 1980 DARPA construyó el primer vehículo que funcionaba mediante un radar láser y visión computarizada. En 1987, los laboratorios HRL demostraron que se podía construir un vehículo que diseñaba su propia ruta una vez que se salía del mapa. El vehículo consiguió moverse más de 600 metros a través de terreno complejo con pendientes, vegetación y grandes rocas.

En 1994, dos vehículos robots gemelos *VaMP* y *Vita-2* condujeron solos más de mil kilómetros en una autopista de París con 3 carriles en días habituales con tráfico intenso a velocidades de hasta 130 km/h. Los vehículos funcionaron de forma autónoma con pequeñas intervenciones



humanas. Demostraron que la conducción en carriles libres, en convoy y los cambios de carril a derecha e izquierda podían realizarse de forma autónoma.

En 1995, el equipo de Dickmanns modificó un Mercedes Clase S para que hiciera un viaje entre Múnich y Copenhague y vuelta, usando una visión computarizada y un ordenador para reaccionar en tiempo real. El vehículo consiguió alcanzar velocidades superiores a 175 km/h en las "Autobahn" alemanas, con un tiempo medio entre intervenciones humanas de 9 km, lo que supuso un 95% de conducción autónoma. De nuevo el vehículo condujo en tráfico, consiguiendo ejecutar con éxito maniobras para adelantar a otros vehículos [10].

En la universidad de Cantabria aún no se ha realizado ningún proyecto que lleve a cabo la implementación de un sistema así en un coche, si se han realizado estudios previos a este paso.

En España, unos ingenieros de la universidad de Alicante, han desarrollado un paquete que se puede instalar en cualquier vehículo de conducción manual para convertirlo en un vehículo que pueda funcionar sin conductor, está diseñado en principio para el transporte de cargas en el sector industrial, funcionando en recintos cerrados. Este proyecto tiene la ventaja de tener un bajo coste comparado con otros vehículos con el sistema ya integrado.

Además, el programa "Autopía" del CSIC y con ayuda de la universidad politécnica de Madrid, ha desarrollado un coche autónomo utilizando un Citroën C3, el cual ha conseguido conducir sin intervención humana a lo largo de unos 100 km, siendo escoltado por un coche guía, el recorrido llevado a cabo transcurría tanto por vía urbana como por autovía, el coche alcanzó los 109 km/h en un tramo de la autovía [12].



Fig 1.1– Platero, el vehículo autónomo español.

En la figura 1.1 se puede ver una fotografía del primer vehículo autónomo creado en España, que se le bautizó como “Platero”.

El proyecto más avanzado es el llevado a cabo por “Google”, llamado “Google driverless car”, que usando un Toyota Prius han conseguido la automatización total, respetando todas las normas de tráfico y de seguridad, se pueden ver videos en los que se prueba el funcionamiento de este vehículos por las calles, llevando a personas que no pueden conducir, y que este vehículo les permite desplazarse sin depender de nadie más.

En la figura 1.2 se muestra una imagen del modelo de vehículo sin conductor de Google.



Fig 1.2- Vehículo sin conductor de Google.

Los vehículos autónomos perciben el entorno mediante técnicas complejas como láser, radar, lidar, GPS y visión computerizada. Los sistemas avanzados de control interpretan la información para identificar la ruta apropiada, así como los obstáculos y la señalización relevante. Los vehículos autónomos generalmente son capaces de crear sus propios mapas si se ven en entornos en los que no existe cartografía disponible y crear sus propias rutas.

En la figura 1.3 se puede ver como es el entorno que crea el vehículo de Google, se aprecian el resto de vehículos presentes en la vía, el recorrido que planea hacer para llegar a su destino, y otros elementos como pasos de cebra o peatones.

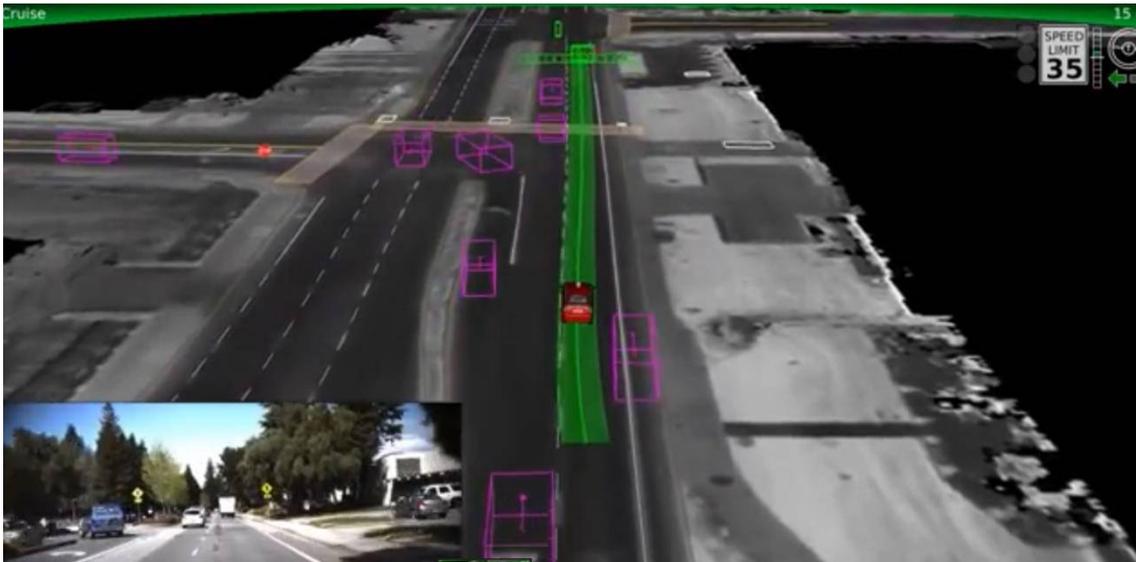


Fig 1.3– Reconocimiento de entorno de Google.

En el Estados Unidos, en los estados de Florida y Nevada, la ley ya permite la circulación de estos vehículos sin conductor, y en el caso de Nevada, en 2012 ya se entregó la primera licencia para el vehículo de Google.

Según algunas estimaciones, como la de la empresa Nissan, en el año 2020 estos automóviles ya estarán disponibles en el mercado doméstico. Y para 2040, según el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), el 75% de los coches serán autónomos, en especial todos los dedicados a transportes de mercancías por carretera, ya que esto sería especialmente rentable para las empresas que se dedican a esto.

En el mundo del cine, hay películas ambientadas en un futuro no muy lejano, donde la tecnología es ampliamente superior a la disponible actualmente, se ha podido ver vehículos de este tipo. Un buen ejemplo es la película "Yo, robot", realizada en 2004 y ambientada en 2035, en un mundo donde el tráfico está compuesto por coches autónomos, y la conducción manual esta vista como peligrosa y una locura, debido a las altas velocidades a las que se desplazan estos coches.

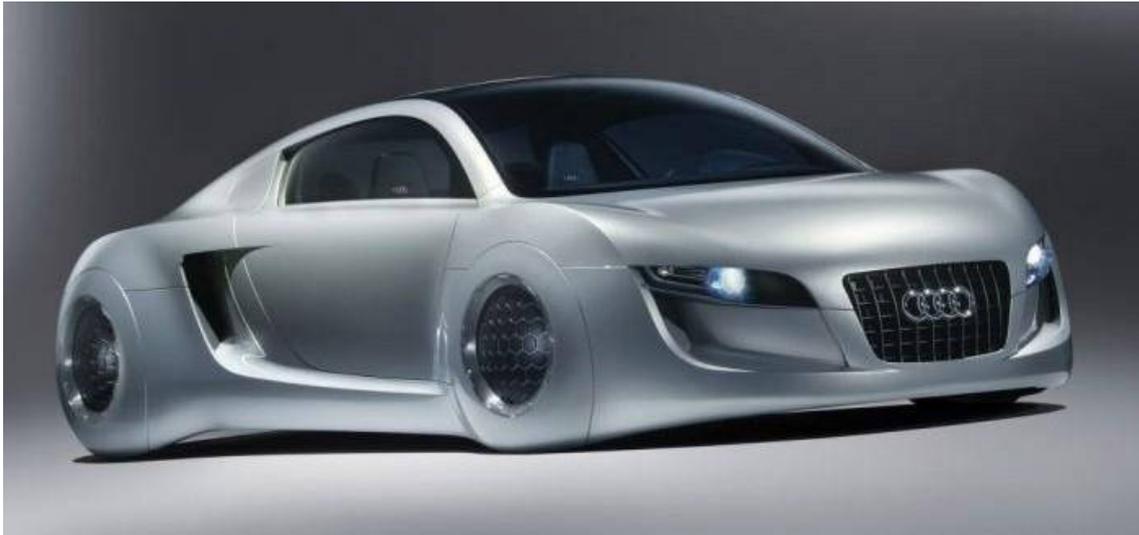


Fig 1.4- Vehículo de la película "Yo, robot".

La figura 1.4 muestra el vehículo utilizado en la película "Yo, robot".

1.3 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Los vehículos eléctricos son aquellos que su fuente de energía es la electricidad, y son impulsados mediante uno o varios motores eléctricos que lleva la potencia en forma de movimiento a las ruedas o hélices.

En la actualidad los vehículos eléctricos están dando el salto a la calle, ya se puede ver zonas de recarga para automóviles de este tipo y concesionarios donde se venden, pero la gente se sigue preguntando si son de verdad rentables o hay que esperar unos años más a que la tecnología avance un poco más.

En casos especiales como prototipos o pruebas experimentales, se han construido vehículos que en lugar de utilizar la recarga de las baterías mediante una conexión a la red eléctrica como única fuente de energía, como es lo habitual, obtienen energía a partir de paneles solares instalados en la carrocería. Los resultados de estos experimentos no fueron lo suficientemente buenos como para desarrollar estos vehículos para llevarlos a las calles.

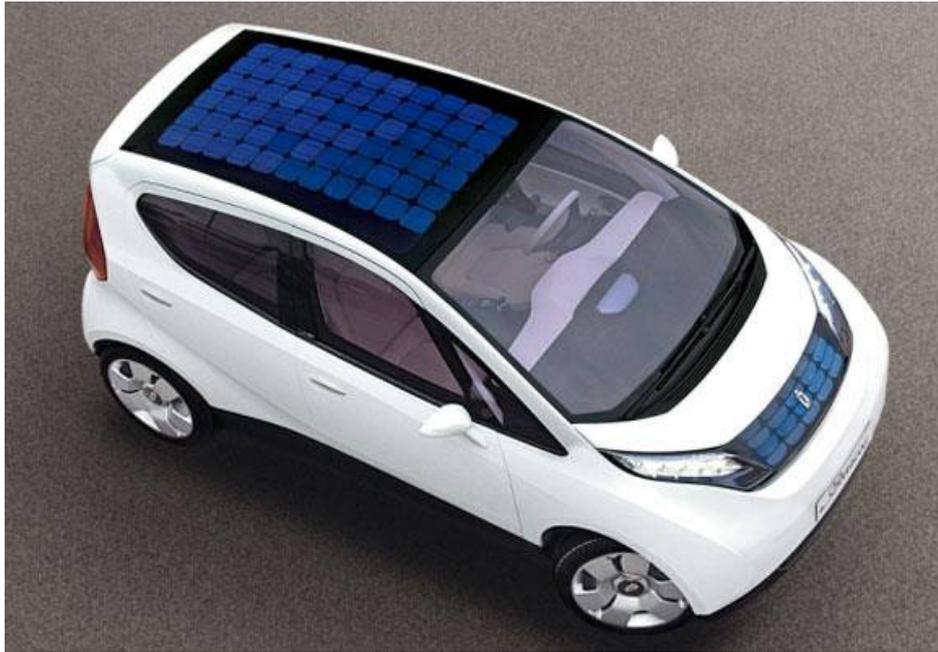


Fig 1.5- Vehículo que utiliza paneles solares.

En la figura 1.5 se ve un modelo de vehículo eléctrico que utiliza paneles solares para recargar las baterías.

El principal inconveniente de los coches eléctricos son las baterías, ya que la autonomía de estas no nos permiten hacer largos viajes sin largas paradas, una buena batería tiene una autonomía para recorrer más de 400 Km, pero esto implica un alto precio y un tiempo de carga completa de más de 9 horas. Por esto los coches eléctricos están diseñados más para un uso urbano, siendo la mayoría biplazas de pequeño tamaño.

En la actualidad se está investigando nuevas formas de almacenar energía para usarlas como fuentes de energía en vehículos eléctricos, algunas de las más esperanzadoras son los supercondensadores de grafeno, o las baterías líquidas. En el caso de los supercondensadores de grafeno se tiene gran esperanza debido a que con ellos se tiene una mayor densidad energética, tiempos muchísimo menores de carga, y mayor durabilidad, esto aumentaría la autonomía de los vehículos en un factor de aproximadamente 2,5.

En la tabla 1.1 se muestra la autonomía y el gasto de energía de los principales vehículos eléctricos.



Modelo	kWh	Autonomía (km)	kWh / 100 km
Mega e-City	9	100	9
Reva L-ion	11	120	9,17
Think City	25	200	12,5
Mitsubishi i- Miev	16	130	12,31
Citröen C- Zero	16	130	12,31
Renault Fluence ZE	24	175	13,71
Nissan Leaf	24	160	15
Tesla Roadster 42	42	257	16,34
Tesla Roadster 70	70	483	14,49

Tabla 1.1–Características de los principales vehículos eléctricos.

Otros problemas importantes actualmente son el alto precio inicial de estos vehículos, a veces cerca del triple del valor de un coche convencional de similar gama, que hace que lo que se ahorra con el combustible se pierda en un gran desembolso inicial.

Otro inconveniente es la dificultad para encontrar un sitio en el que cargarlo, que aunque cada día hay más, es posible que no encuentres uno disponible cuando lo necesites por la escasez de ellos.



Fig 1.6– Renault Twizy.

En la figura 1.6 se muestra la fotografía de un Renault Twizy, un pequeño vehículo eléctrico de uso urbano.

Sin embargo, los vehículos eléctricos tienen importantes ventajas, el usuario notará un ahorro importante debido a que el precio del combustible utilizado para un vehículo convencional es mucho mayor que el precio para recargar la batería de los vehículos eléctricos. Además la vida de estos vehículos es mayor que la de los coches de gasolina, pudiendo recorrer muchos más kilómetros.

Otra ventaja de los vehículos eléctricos es que permiten la recuperación de energía, por ejemplo cuando el coche está bajando una cuesta (energía potencial) o cuando el coche frena (energía cinética), esto hace que el vehículo eléctrico utilice mejor la energía y aumente la autonomía.

El más beneficiado del uso de los vehículos eléctricos es el medio ambiente, y por tanto todo el planeta, ya que la contaminación creada es muchísimo menor (aunque también existe, ya que los elementos que componen las baterías son tóxicos), se reduce el uso de petróleo en el mundo, lo cual es importante porque el petróleo es una fuente limitada de energía. Y además se reduce la contaminación acústica producida por los ruidosos motores de combustión, ya que los motores eléctricos son emiten menos ruido [11].



1.3.1 Vehículos híbridos

Otro tipo de vehículos que utilizan la energía eléctrica como fuente importante de su movimiento son los híbridos, que siguen utilizando motores de combustión, y son un paso intermedio muy interesante entre los vehículos convencionales y los eléctricos.

Sus ventajas en ahorro de combustible son mayores cuando su uso se restringe al ámbito urbano, funcionando a bajas velocidades. Esto se debe a que el motor eléctrico entra en funcionamiento cuando el vehículo va más lento, como por ejemplo cuando se para en un semáforo y se tiene que acelerar desde parado.

En la figura 1.6 tenemos un dibujo de las partes importantes en un coche híbrido, como son las baterías o los motores tanto de combustión como el eléctrico.

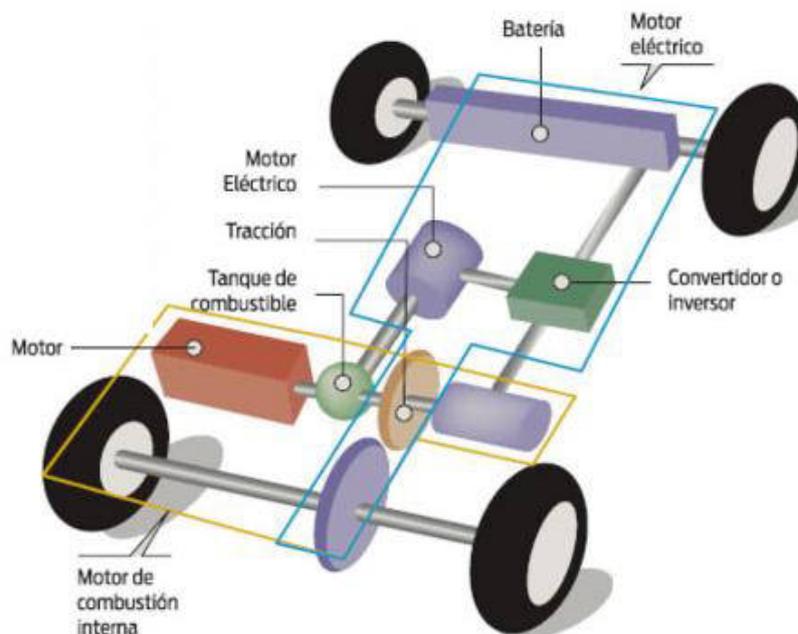


Fig 1.7- Diagrama de componentes de un vehículo híbrido.

El principal modelo de vehículo híbrido es el Toyota Prius, que ha logrado grandes datos de ventas en todo el mundo, siendo el vehículo híbrido más vendido. Además de momento nadie ha superado la eficiencia del sistema



de Toyota. Es un coche con el tamaño justo para ser el único de una familia. Tiene una imagen ecológica reconocida y funciona muy bien ahorrando en ciudad, ofreciendo una conducción relajada y sencilla, y en carretera a una velocidad mantenida tampoco consume mucho.



Fig 1.8– Toyota Prius.

En la figura 1.8 podemos ver una fotografía del Toyota Prius.

1.4 VEHÍCULO EXPERIMENTAL

El vehículo del que se dispone es un pequeño coche eléctrico biplaza, del tamaño de un carrito de golf, y que se denomina cuadríciclo. No se trata de un vehículo comercial, sino de un vehículo experimental que se utiliza para investigaciones o proyectos.

El fabricante del vehículo es la compañía catalana "Teycars", el modelo es el ALSO2 fabricado en 2008.

Este coche no llega a alcanzar los 50 Km/h por lo tanto es para uso exclusivo en vías de baja velocidad como en las ciudades, la autonomía de la que dispone es de unos 90 km, siendo inviable realizar viajes largos.



En la figura 1.9 se puede ver el vehículo circulando por el exterior de la escuela.



Fig 1.9 – Fotografía del vehículo utilizado.

En la tabla 1.2 se pueden leer algunos datos adicionales que han sido obtenidos de una placa de características de la que dispone el coche, o que han sido medidos directamente en el vehículo.



Peso Vacío	600 Kg
Peso Máximo	950 Kg
Largo x Alto x Ancho	2740 x 1490 x 1950 mm
Altura al suelo	180 mm
Ancho de ejes (Delantero/Trasero)	1280 / 1260 mm
Distancia entre ejes	1900 mm
Motor	4.3 KW, 48 V
Batería	210 AH, 6V
Frenos Delanteros	Disco
Frenos Traseros	Tambor
Distancia de frenado	≤ 4 m
Tiempo de carga de la batería	8-10 Horas
Autonomía	80-90 Km
Velocidad Máxima	45-50 Km/h
Neumáticos	Kebler 165/70R13

Tabla 1.2 – Características del vehículo.



2 MODELADO DE LA DINÁMICA LONGITUDINAL DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

El modelo del vehículo servirá para la simulación por ordenador del comportamiento del vehículo ante las diferentes entradas y perturbaciones del sistema, en este caso el modelo será un modelo longitudinal, despreciando así las fuerzas y movimientos laterales del vehículo debido a que apenas afectan para el cálculo de la velocidad y movimiento longitudinal, a las velocidades a las que nuestro vehículo se va a desplazar, que serán velocidades menores que 50 km/h.

Además se simplificará utilizando un modelo de dos ruedas, gracias a que en el movimiento longitudinal no habrá diferencia entre ambas ruedas de un mismo eje, por lo que eliminaremos la distinción entre rueda derecha e izquierda.

Este apartado está basado en su mayoría en [1], a excepción del apartado que trata el tren de potencia del vehículo, dado que este trabajo, a diferencia de la referencia, trata un vehículo con motor eléctrico y no un motor de combustión.

En la figura 2.1 se muestra el modelo del vehículo con los principales parámetros que vamos a utilizar.

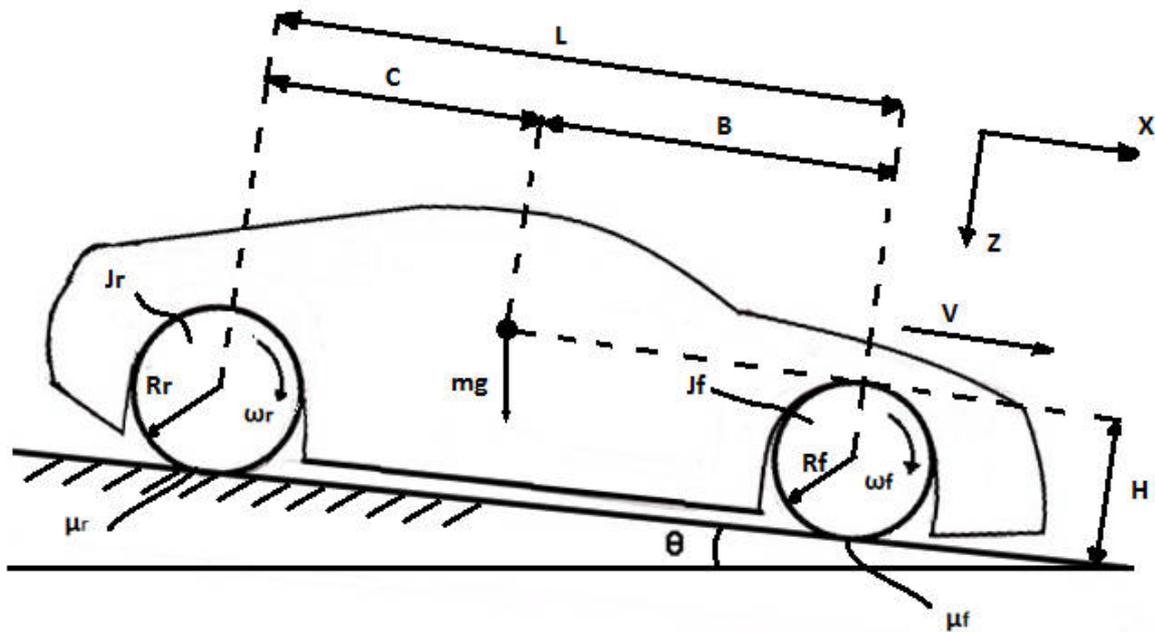


Fig 2.1- Esquema de fuerzas del vehículo.

El vehículo de la figura está circulando en una carretera recta, con pendiente θ , en la dirección del eje X, a una velocidad V.

Los parámetros mostrados en la figura son los siguientes:

- m: Masa de todo el vehículo.
- g: Aceleración de la gravedad.
- V: Velocidad a la que se desplaza el vehículo en la dirección X.
- L: Distancia entre ejes.
- B: Distancia entre el eje delantero y el centro de gravedad del vehículo.
- C: Distancia entre el eje delantero y el centro de gravedad del vehículo.
- H: Altura del centro de gravedad.
- θ : Pendiente de la carretera.
- ω_f y ω_r : Velocidad angular de las ruedas delanteras y traseras respectivamente.
- R_f y R_r : Radio de las ruedas delanteras y traseras respectivamente.
- J_f y J_r : Momentos de inercia del eje delantero y trasero respectivamente.



- μ_f y μ_r : Coeficientes de rozamiento de los neumáticos delantero y trasero respectivamente.

Para realizar el modelo se ha utilizado el programa MATLAB-SIMULINK, con el cual se ha creado un diagrama de bloques, en el cual las entradas son los porcentajes de accionamiento de los pedales de aceleración y freno, y las salidas son la velocidad y la posición en cada momento. Las perturbaciones como la velocidad del viento o la pendiente de la carretera también está incluidas, aunque se anularan para la simulación.

Se puede apreciar en la figura que el sistema tiene múltiples realimentaciones y lo complican, además de que algunos bloques no son lineales.

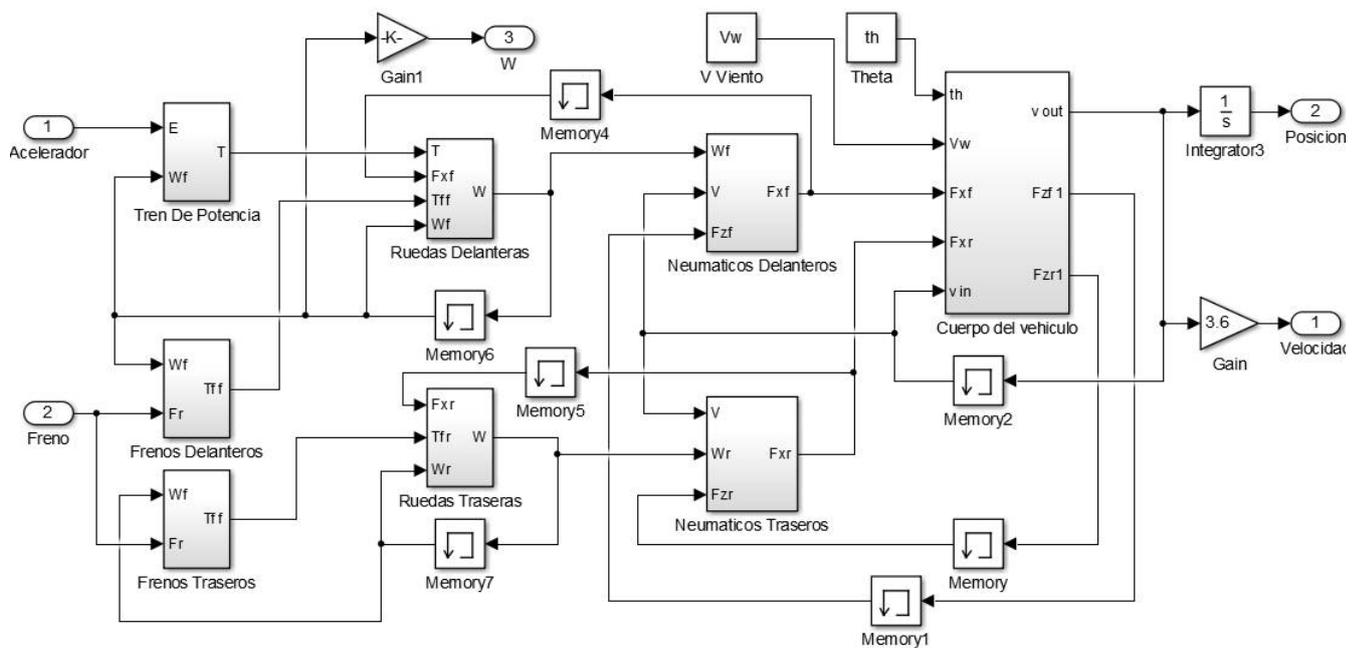


Fig 2.2– Esquema de bloques del modelo.

En la figura 2.2 se muestra el modelo completo utilizado en Simulink para las pruebas que se realizarán.

A continuación se definen los diferentes “bloques” o partes que se han separado para crear el modelo.



2.1 CUERPO DEL VEHÍCULO

Este bloque contiene el equilibrio de fuerzas longitudinales que provocan el movimiento del vehículo, la ecuación que lo define está basada en la segunda ley de Newton, obteniendo así la aceleración del vehículo. Además también se calculan las fuerzas verticales que soportan cada eje (F_{zf} y F_{zr}).

La velocidad del viento y la pendiente de la carretera son parámetros de entrada de este bloque, al igual que las fuerzas de rozamiento de los neumáticos con la carretera que básicamente son las principales responsables del movimiento del vehículo. También será necesaria la velocidad del vehículo, ya que para calcular la velocidad relativa entre el aire y el vehículo se necesitan ambas velocidades.

La ecuación para el cálculo de la aceleración es la siguiente, y se basa en la segunda ley de Newton:

$$A = \frac{-F_x + m \cdot g \cdot \sin(\theta) - F_v - F_r}{m} \quad (2.1)$$

Siendo F_x la suma de las fuerzas de contacto de los neumáticos multiplicada por 2 para contar ambas ruedas por eje, además será negativa debido a que el deslizamiento también lo será, como veremos posteriormente. F_v es la fuerza resistente del viento y F_r la fuerza resistente de rodadura, definidas a continuación:

$$F_x = 2 \cdot (F_{xf} + F_{xr}) \quad (2.2)$$

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_v \cdot C_d \cdot (V + V_v)^2 \quad (2.3)$$

$$F_r = m \cdot g \cdot C_r \cdot V \quad (2.4)$$

Siendo A_v el área frontal del vehículo, ρ la densidad del aire, C_d el coeficiente de fricción con el viento, y C_r el coeficiente de rodadura.



Una vez obtenida la aceleración se integra para obtener la velocidad V del vehículo, y si se desea obtener la distancia recorrida se utiliza otro integrador.

Para calcular las fuerzas verticales en cada eje usamos las siguientes formulas:

$$F_{zf} = m \cdot g \cdot \left(\frac{C}{L} \cdot \cos(\theta) + \frac{H}{L} \cdot \sin(\theta) \right) - \frac{H}{L} \cdot m \cdot A \quad (2.5)$$

$$F_{zr} = m \cdot g \cdot \left(\frac{B}{L} \cdot \cos(\theta) - \frac{H}{L} \cdot \sin(\theta) \right) + \frac{H}{L} \cdot m \cdot A \quad (2.6)$$

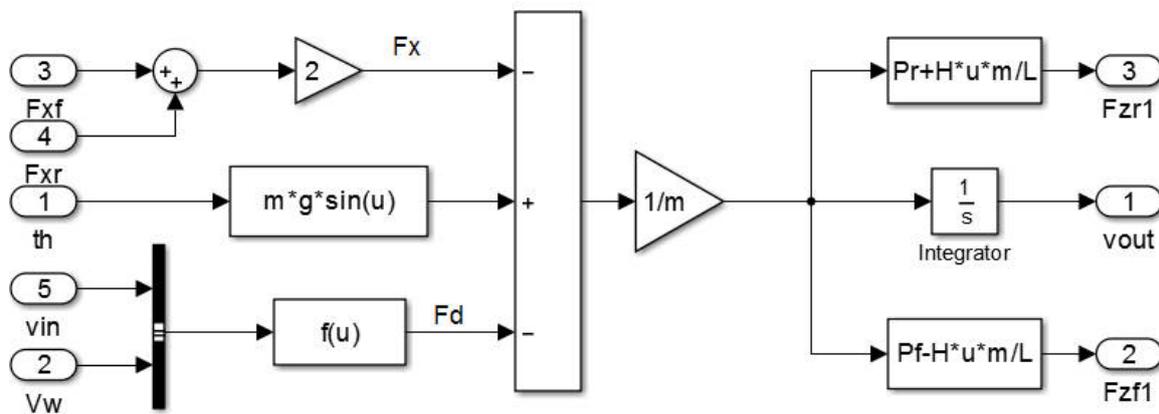


Fig 2.3 – Bloque "Cuerpo del vehículo".

La figura 2.3 muestra el sistema de bloques utilizado para modelar la parte del cuerpo del vehículo.

2.2 NEUMÁTICOS

El rozamiento de los neumáticos con el suelo es el causante de las fuerzas que hacen moverse longitudinalmente al vehículo, estas fuerzas dependen de la fuerza vertical que soportan las ruedas, y del coeficiente de rozamiento del neumático con la carretera.

Este coeficiente de rozamiento no es constante, varía en función del deslizamiento de los neumáticos con el asfalto, y de las condiciones del asfalto (Seco, húmedo, nevado o con hielo).



El deslizamiento viene definido por la ecuación 2.7:

$$S_i = \frac{V - \omega_i \cdot R_i}{\text{Max}\{V, \omega_i \cdot R_i\}} \quad i = f, r \quad (2.7)$$

Donde V es la velocidad del cuerpo del vehículo, ω_i es la velocidad angular de la rueda de la que se calcula el deslizamiento y R_i su radio.

Para calcular el coeficiente de rozamiento se utilizara la ecuación de Pacejka, obtenida experimentalmente para diferentes condiciones del asfalto, para ello utiliza unos coeficientes distintos según las condiciones, debido a que la fricción depende mucho de las condiciones del asfalto.

$$\mu_i = D \cdot \sin\left(C \cdot \text{atan}\left(B \cdot S_i - E \cdot \left(B \cdot S_i - \text{atan}(B \cdot S_i)\right)\right)\right) \quad i = f, r \quad (2.8)$$

Donde los coeficientes B, C, D y E son:

Superficie	B	C	D	E
Asfalto Seco	10	1.9	1	0.97
Asfalto Húmedo	12	2.3	0.82	1
Nieve	5	2	0.3	1
Hielo	4	2	0.1	1

Tabla 2.1 – Coeficientes de Pacejka.

En la tabla 2.1 se encuentran los coeficientes utilizados en la ecuación de Pacejka dependiendo de cuales sean las condiciones del asfalto.

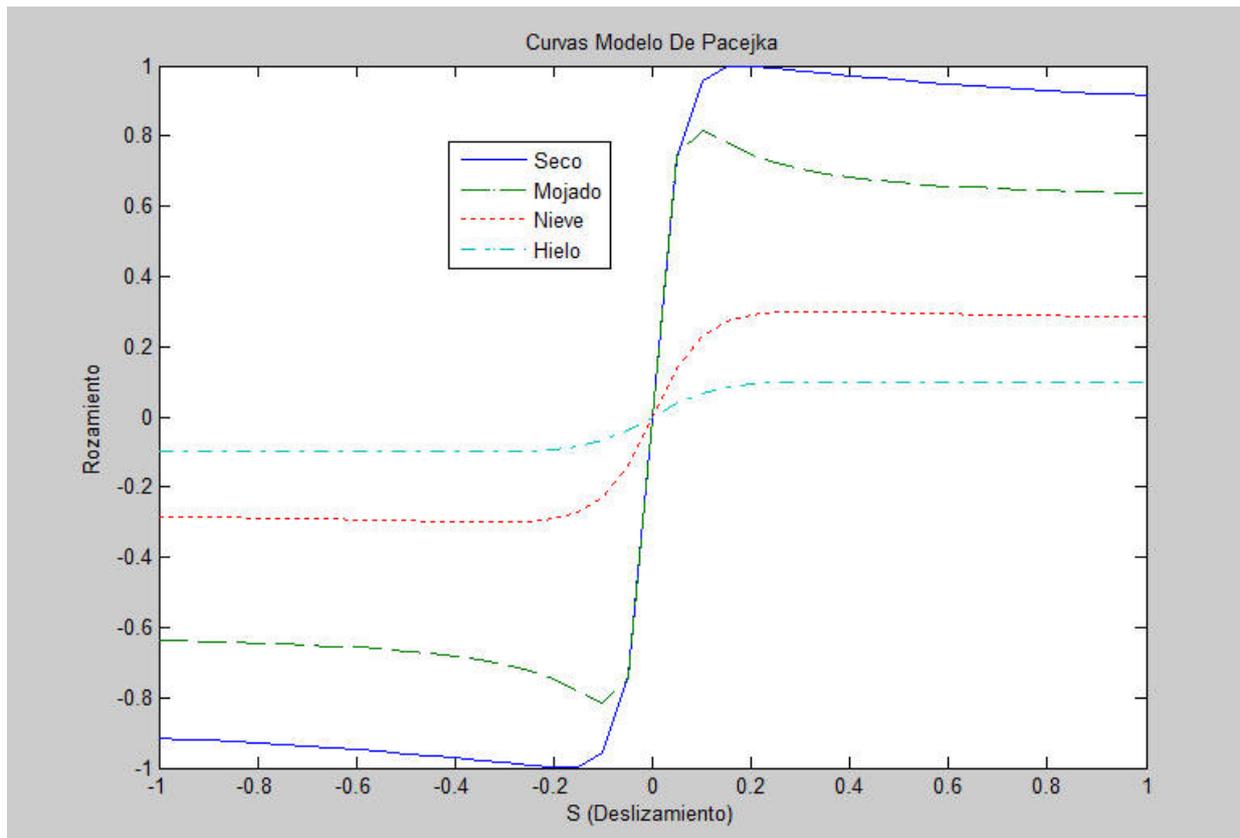


Fig 2.4– Curvas del modelo de Pacejka.

En la figura 2.4 se puede ver una gráfica de la cual se puede obtener el coeficiente de rozamiento con el asfalto, conociendo cual es el deslizamiento, y las condiciones climatológicas.

Para este modelo se supondrá que el asfalto está seco, y por lo tanto se utilizara la primera fila de coeficientes.

Una vez obtenido el coeficiente de rozamiento se calcula las fuerzas F_x :

$$F_{xi} = \mu_i \cdot F_{zi} \quad i = f, r \quad (2.9)$$

Estas ecuaciones son válidas de igual forma para los neumáticos delanteros como para los traseros.

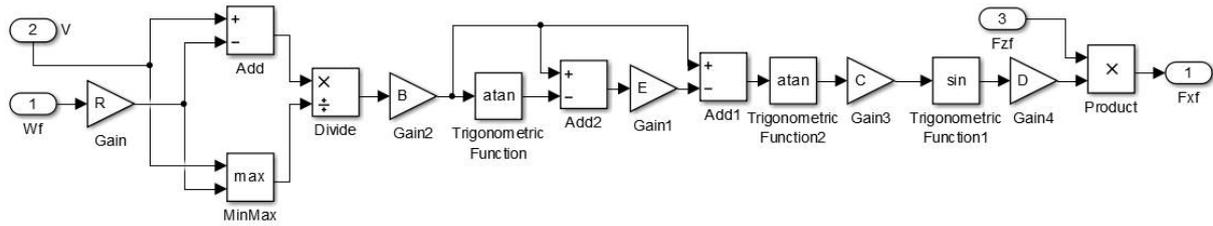


Fig 2.5 – Bloque "Neumáticos".

En la figura 2.5 se puede ver el sistema de bloques de Simulink que describe el modelo de los neumáticos, donde se encuentra incluida la ecuación de Pacejka.

2.3 RUEDAS

Este subsistema consta de 4 entradas y 1 salida, las entradas son los momentos torsores que afectan al movimiento de las ruedas, estos son:

τ_e , par que proviene del motor, el que provoca el movimiento del vehículo; τ_b , par de frenado; τ_r , par de reacción debido a las fuerzas F_x de cada rueda, y su valor se obtiene de:

$$\tau_{ri} = F_{xi} \cdot R_i \quad i = f, r \quad (2.10)$$

Y τ_v , que es el par de fricción viscosa, que es debido a pérdidas en los elementos mecánicos del vehículo, y cuya expresión es:

$$\tau_{vi} = C f_i \cdot \omega_i \quad i = f, r \quad (2.11)$$

Donde C_f es el coeficiente de fricción viscosa.

La salida del subsistema es la velocidad angular de cada eje, para ello se utiliza la segunda ley de Newton para movimiento angular, obteniendo así la aceleración angular, e integrándola se conseguirá la velocidad angular.

$$\alpha_i = \frac{\tau_{ei} + \tau_{ri} - \tau_{bi} - \tau_{vi}}{J_i} \quad i = f, r \quad (2.12)$$

Al ser un vehículo de tracción delantera, el par debido al motor solo tendrá efecto en el eje delantero, siendo nulo la entrada τ_e para el eje trasero.

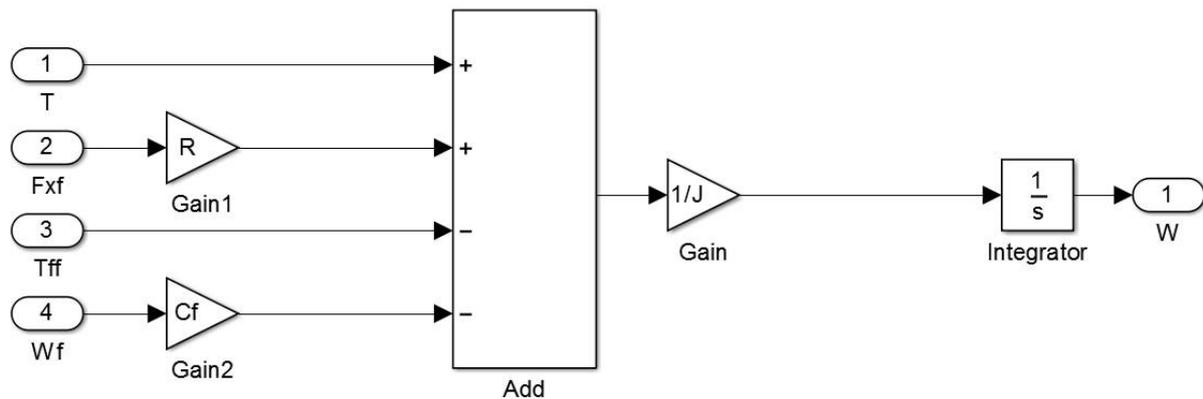


Fig 2.6– Bloque "Ruedas".

En la figura 2.6 se pueden ver los bloques que conforman el modelo de las ruedas.

2.4 MOTOR ELÉCTRICO

El modelo que se ha hecho del motor con el que funciona el coche es un modelo de un motor eléctrico con excitación independiente, el cual es el típico modelo matemático de un motor eléctrico en el que se supone la excitación de campo constante.

Las entradas de este bloque son la tensión suministrada al motor y la velocidad actual de las ruedas delanteras. La única salida del bloque es el par mecánico suministrado al eje delantero.

En este bloque también se tiene en cuenta la existencia de un diferencial que hace que la velocidad y el par en el eje del motor y en el eje de las ruedas sean distintos, sin embargo se presupone que la potencia a ambas partes del diferencial es la misma y no hay ninguna pérdida en él.

Las ecuaciones que definen el funcionamiento del motor son las siguientes:

$$E - R_e \cdot I - \omega_f \cdot K_b \cdot N - L_e \frac{di}{dx} = 0 \quad (2.13)$$

$$\tau_e = K_t \cdot N \cdot I \quad (2.14)$$



Donde " τ_e " es el par mecánico en el eje de las ruedas; " K_t " es la constante de par electromagnético; " N " es la relación en el diferencial; " E " es la tensión aplicada en bornes del motor; " ω_f " es la velocidad angular de las ruedas delanteras, " K_b " es la constante de fuerza contra electromotriz; " R_e " es la resistencia eléctrica en el circuito del motor y " L_e " la inductancia.

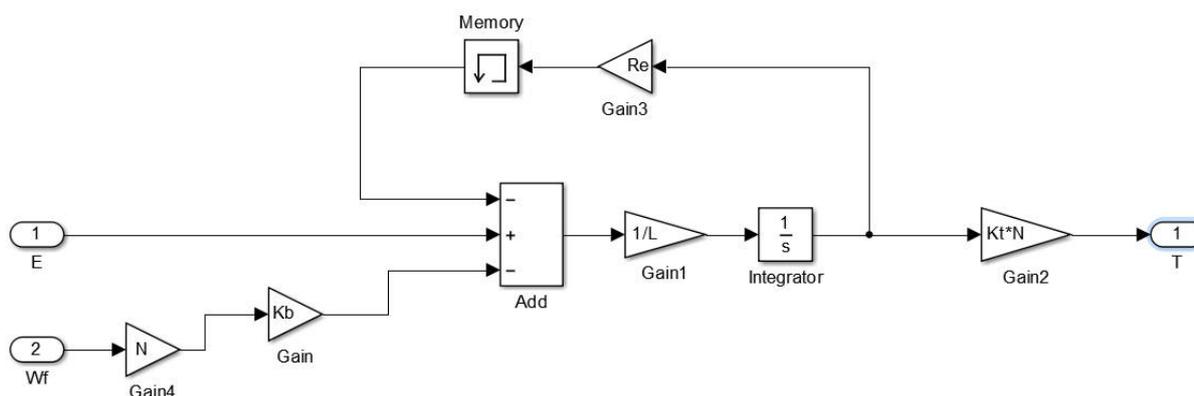


Fig 2.7 – Bloque "Tren de Potencia".

En la figura 2.7 se muestran los bloques utilizados para modelar todo el tren de potencia.

2.5 FRENOS

El sistema de frenos solo tiene dos señales de entrada, una evidentemente es la señal de frenado que se genera cuando el conductor pisa el pedal del freno, esta señal será entre 0 y 1, y la otra es la velocidad angular de las ruedas. La única señal de salida será el par de frenado generado.

Debido a que el sistemas de freno es un sistema hidráulico y por lo tanto no es instantáneo, se modelará con un retraso temporal τ_{bs} , y las pinzas de freno tendrán un valor K_c , con estos parámetros se puede obtener la presión creada en los frenos, p_b .

$$p_{bi} = 1,5 \cdot K_c \cdot u_{bi} - \tau_{bs} \cdot \dot{p}_{bi} \quad i = f, r \quad (2.15)$$

Donde u_b es la señal de entrada que se mencionó anteriormente, y 1,5 es una constante que se debe a que la presión máxima es de 150 bares.



Esta ecuación diferencial puede ser expresada como función de transferencia de la siguiente forma:

$$\frac{P_{bi}(s)}{U_{bi}(s)} = \frac{1,5 \cdot Kc \cdot \frac{1}{\tau_{bs}}}{s + 1/\tau_{bs}} \quad i = f, r \quad (2.16)$$

Esta presión en los frenos se transforma en un par de frenado que hace que el vehículo reduzca su aceleración, este paso de presión – par depende de varios parámetros, como pueden ser la velocidad o la temperatura, pero en este caso solo se tendrá en cuenta la velocidad.

$$\tau_{bi} = p_{bi} \cdot K_{bi} \cdot \min\left(1, \frac{\omega_i}{\alpha_i}\right) \quad i = f, r \quad (2.17)$$

K_b es una constante que hace la conversión entre presión y par, ω es la velocidad angular de la rueda. Se puede observar que el par es proporcional a la presión y a la velocidad angular (siempre que esta no supere el valor de α).

Debido a que el reparto de frenada no es igual para los frenos delanteros que para los traseros, normalmente el coeficiente K_b será mayor en los frenos delanteros.

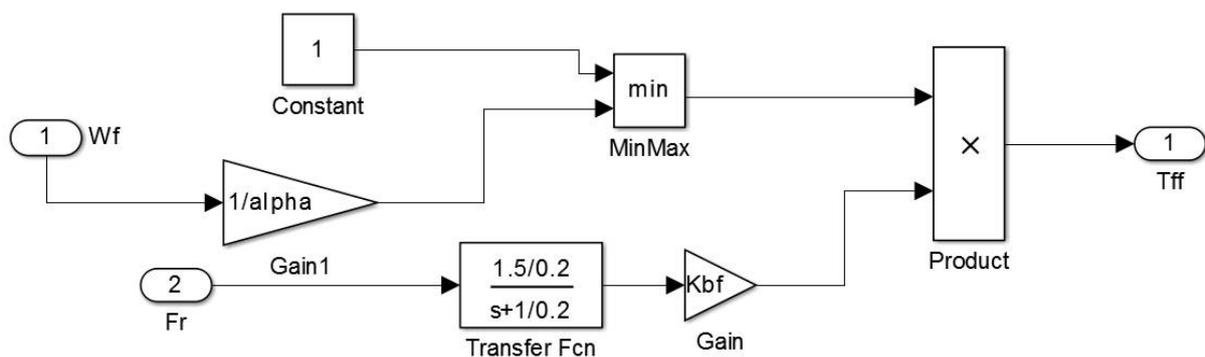


Fig 2.8 – Bloque "Frenos".

En la figura 2.8 se ven los bloques utilizados para el modelado de los frenos.



2.6 PARÁMETROS DEL VEHÍCULO

Para realizar posteriormente las simulaciones habrá que establecer los valores de las constantes o parámetros de las ecuaciones establecidas en los apartados anteriores, que serán necesarios para después realizar la simulación con Matlab.

Algunos de esos parámetros es imposible determinarlos con exactitud, por lo tanto se harán estimaciones para tener unos datos lo más próximos a la realidad que sea posible, para ello se ha buscado parámetros de otros vehículos de similar tamaño o funcionamiento.

Seguramente a la hora de realizar pruebas con el vehículo los resultados no sean igual a los simulados debido a las diferencias que puede haber en los parámetros reales y los que nosotros estimamos aquí.

En la tabla 2.2 se encuentran los parámetros que se utilizarán en el apartado "4 - ANÁLISIS DE CONTROLADORES MEDIANTE SIMULACIÓN".



<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
m	600 kg
L	1,9 m
B	0,95 m
C	0,95 m
H	0,5 m
θ	0 rad
R_f, R_r	0,2 m
J_f, J_r	0,5 Kg / m ²
ρ	1,23 kg / m ³
A_v	1,5 m ²
Cd	0,29
V_v	0 km/h
Cr	0,01
C_{ff}, C_{fr}	0,1 Nm/rad ⁻¹
Re	10 Ω
Le	1 H
Kb	0.3 Vs
Kt	40 Nm/A
N	1
Kc	1
K_{bf}	10 Nm/bar
K_{br}	5 Nm/bar
τ	0,2 s
a	0,01

Tabla 2.2 – Parámetros del vehículo.

Además, los coeficientes de la ecuación de Pacejka, serán los correspondientes a una conducción sobre asfalto seco que aparecen en la tabla 2.1.



3 TÉCNICAS DE CONTROL

3.1 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

La identificación de sistemas es la teoría y el arte de construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos basándonos en las entradas y salidas observadas.

El objetivo es conseguir una función de transferencia o unas ecuaciones de estados que modelen, con cierta precisión, el sistema identificado. El modelo obtenido puede ser del orden que se desee, siendo así más o menos preciso, dependiendo de para que se necesite la identificación.

La obtención de un modelo matemático puede enfocarse de dos formas, utilizando métodos teóricos, o usando métodos experimentales.

La primera de estas opciones se basa en conocer los principios físicos, químicos o de cualquier otra ciencia, para así predecir el comportamiento del sistema, por ejemplo en motores eléctricos, circuitos, elementos mecánicos, reacciones químicas, etc. Esta forma se suele denominar modelado de sistemas, y este método a menudo resulta imposible de realizar, por el desconocimiento del sistema o por su complejidad.

Cuando no sea posible realizar un modelado, se recurre a la segunda opción, la experimental, denominada identificación de sistemas, que es la que utilizaremos para crear un modelo matemático del vehículo.

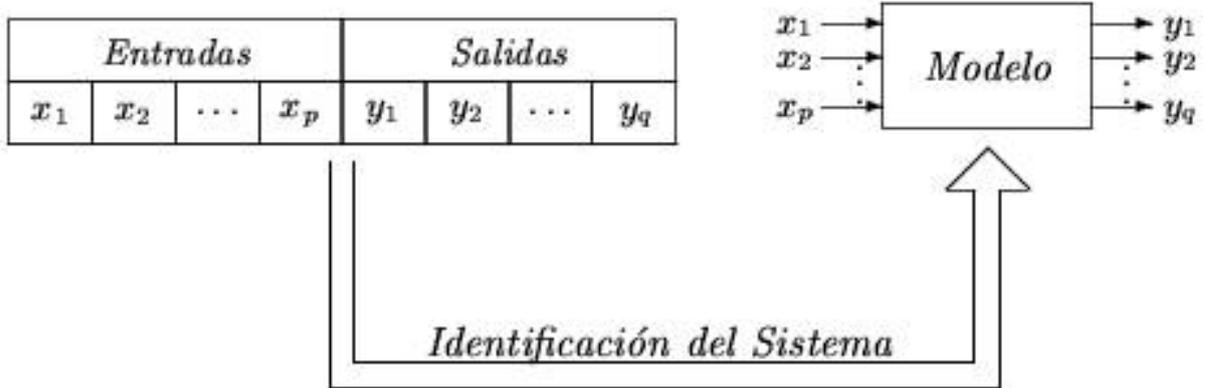


Fig 3.1 – Esquema de identificación de sistemas.

La figura 3.1 muestra un esquema de la función de una identificación de un sistema, con los datos de las entradas y las salidas, se obtiene un modelo.

Construir modelos para sistemas desconocidos es un objetivo importante de la ingeniería de control. Estos modelos necesitan simular el comportamiento real en los casos en que el conocimiento previo del sistema es limitado.

El proceso de identificación sigue los siguientes pasos:

- Obtención de datos de entrada y salida, para ello se somete al sistema a una excitación cualquiera y se recogen los datos necesarios.
- Tratamiento de los datos obtenidos, debido a que puede haber perturbaciones como por ejemplo ruido en ellos, y para mayor precisión habrá que corregirlos en lo posible, utilizando métodos de filtrado.
- Elección del tipo de modelo deseado, esto incluye si el modelo será continuo o discreto, periodo de muestreo si fuera necesario, o el orden del modelo.
- Obtención de los parámetros del sistema, consiguiendo así el modelo identificado.



- Comprobación del modelo, para ello se puede someterle a la una excitación común con el sistema real, posteriormente se obtienen y comparar ambos resultados, comprobando si son lo suficientemente similares.

En caso de que el modelo no sea satisfactorio, habrá que volver a realizar la identificación, pero variando el tipo de modelo a construir, o ampliando el rango de valores de entrada usados en la excitación de toma de datos.

El problema de la identificación se complica bastante cuando se trata con un sistema no lineal, y la mayoría de los procesos reales son no lineales, aunque se pueden linealizar en torno a un punto de operación, en esa zona el modelo de la identificación funcionará correctamente, pero si el sistema pasa a funcionar en un punto de operación alejado, el modelo se comportara erróneamente.

Existen dos grandes categorías de modelos utilizadas en la identificación, modelos paramétricos y modelos no-paramétricos. Los primeros son aquellos en los que el modelo matemático utilizado para describir el funcionamiento del sistema está completamente caracterizado por un conjunto finito de coeficientes (parámetros), en este grupo se encuentran las funciones de transferencia y los modelos de estado.

Los no-paramétricos en cambio son aquellos métodos de caracterización de un sistema en los que para describir el funcionamiento del mismo se usa una o varias curvas de respuesta.

Entre estos métodos están por ejemplo Bode, Nyquist y Nichols, que son métodos de respuesta frecuenciales.

En el caso de este proyecto se realizara una identificación mediante un método de mínimos cuadrados, utilizando un modelo de segundo orden discreto.

En esta identificación no se tomaran en cuenta las perturbaciones (ya que en la simulación no las habrá), varios métodos de identificación por



mínimos cuadrados sí que las tienen en cuenta, como por ejemplo los modelos ARX o ARMAX [6].

El modelo deseado de segundo orden discreto tiene la siguiente ecuación en diferencias, donde "y" es el valor de salida, y "u" el de entrada.

$$y_k = a_1 \cdot y_{k-1} + a_2 \cdot y_{k-2} + b_1 \cdot u_{k-1} \quad (3.1)$$

Después de obtener todos los datos necesarios, se procederá a ordenarlos de forma que se repartan en 2 matrices que se definirán a continuación, en este caso se ha omitido el paso de filtrado de señales debido a que al haberse obtenido los datos de una simulación sin ruido, no hará falta ese filtrado.

La primera de ellas será un vector columna con "m" filas, siendo los valores la velocidad del coche obtenidos en cada periodo de muestreo. La segunda será una matriz de 3 columnas y "m" filas, siendo las dos primeras columnas los valores de la señal de salida pero con uno y dos retrasos respectivamente, y la última columna será los valores de la señal de entrada.

$$Y = (y(2:n)) = \begin{pmatrix} y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$Z = (y(1:n-1) \quad y(0:n-2) \quad u(1:n-1)) = \begin{pmatrix} y_1 & y_0 & u_1 \\ y_2 & y_1 & u_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ y_{n-1} & y_{n-2} & u_{n-1} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Una vez ordenados se obtendrán los coeficientes que después formaran parte de la función de transferencia y de las ecuaciones del espacio de estados, para ello se resolverá el siguiente sistema:

$$Y = Z \cdot X \quad (3.4)$$

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 & y_0 & u_1 \\ y_2 & y_1 & u_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ y_{n-1} & y_{n-2} & u_{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{pmatrix} \quad (3.5)$$



Siendo X un vector columna de 3 filas, que contiene los tres coeficientes necesarios para un sistema de segundo orden, y que se obtendrá resolviendo el sistema de ecuaciones de la ecuación 3.4.

Como nosotros vamos a trabajar en tiempo discreto, necesitaremos una función de transferencias discreta, la función de transferencia de sistema discreto será:

$$Gz(z) = \frac{X(3) \cdot z}{z^2 - X(1) \cdot z - X(2)} \quad (3.6)$$

Y el modelo expresado como espacio de estados en variables de fase sería:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ X(2) & X(1) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$C = [0 \quad X(3)] \quad (3.9)$$

$$D = [0] \quad (3.10)$$

En Matlab se pueden utilizar algunos comandos para realizar una identificación, gracias a una "toolbox" de identificación disponible en algunas versiones.

El resultado es muy similar y no se ofrece la opción de obtener el espacio de estados en variables de fase, cosa que es muy útil para nuestro objetivo, por lo tanto se usara el método anterior para modelos de segundo orden.

Las funciones o comandos que se utilizarían en Matlab serían "iddata" para ordenar los datos, y "ssest" para crear el modelo con los parámetros deseados, el problema de este método es que matlab solo te permite obtener el espacio de estados en unas variables que el programa ha establecido.



3.2 CONTROL PID

Un PID es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso.

PID son las siglas de "Proporcional, Integral y Derivativo", ya que son las 3 acciones que realiza. Básicamente, un PID es un controlador de hasta segundo orden.

La acción proporcional da una señal proporcional al error actual, y es la parte más importante. La acción integral genera una corrección proporcional a la integral del error y aumenta el tipo del sistema, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. Y la acción derivativa determina la reacción del tiempo en el que el error se produce, y es proporcional a la derivada del error, esto supone que el PID se anticipa a la señal futura, tratando de contrarrestarla antes de que se produzca. El resultado total es la suma de estas tres acciones.

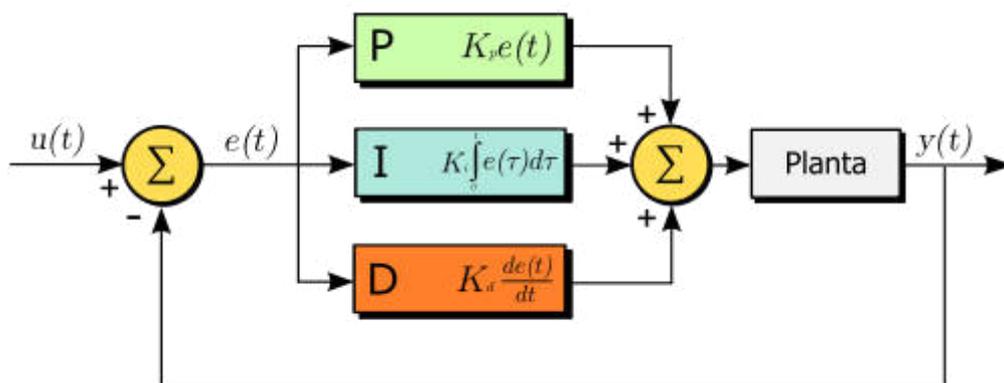


Fig 3.2– Diagrama de bloques de un PID.

En la figura 3.2 se muestra un PID separado por las 3 acciones que tiene, y como el resultado de las 3 acciones es sumado después.

Además un PID puede funcionar eliminando algunas de las acciones, como por ejemplo es habitual no utilizar la acción derivativa debido a que puede dar problemas en determinadas ocasiones, por lo tanto el



controlador pasa a denominarse un PI, también pueden encontrarse algún PD, P o I.

Combinando estas diferentes acciones el controlador adquiere las ventajas y desventajas de cada una, y dependiendo del sistema a controlar será necesario un tipo de controlador u otro.

El regulador más simple de todos es el de acción proporcional o regulador P, cuya señal de control o salida es proporcional a la entrada o señal de error, y tiene una constante ajustable denominada ganancia del regulador.

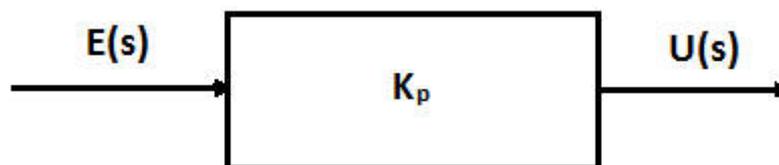


Fig 3.3 – Regulador de tipo P.

En la figura 3.3 se muestra como es un bloque de un regulador tipo P.

En el regulador de acción integral o regulador I, la señal de control es proporcional a la integral de la señal de error o entrada, y también tiene una ganancia ajustable.

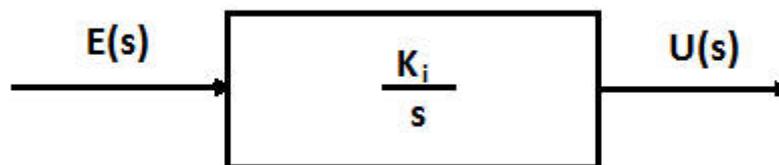


Fig 3.4 – Regulador de tipo I.

En la figura 3.4 se puede ver el bloque de un regulador de tipo I.

En un regulador proporcional-diferencial o regulador PD, la señal de control es proporcional a la entrada y a la derivada de la entrada, tiene



dos parámetros, una ganancia de acción proporcional, y una constante de tiempo de la acción diferencial.

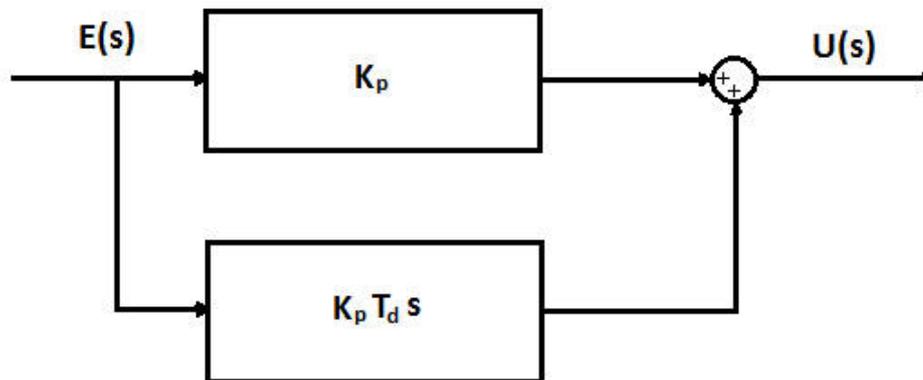


Fig 3.5 – Regulador de tipo PD.

En la figura 3.5 tenemos un regulador de tipo PD, y se puede ver como la acción total es la suma de ambas acciones.

Otro de los reguladores más importantes el proporcional integral o regulador PI, combina los efectos del regulador P y del regulador I, con la acción proporcional se consigue un efecto rápido pero no lo suficientemente preciso, y con la acción integral es al contrario, se tiene precisión pero es una acción de control lenta, las ventajas de ambos reguladores son combinadas en el PI. Este regulador tiene una ganancia de acción proporcional, y una constante de tiempo de la acción integral.

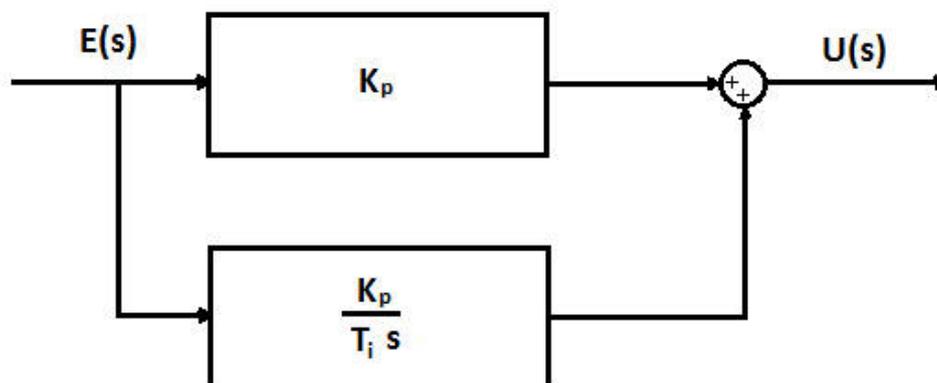


Fig 3.6 – Regulador de tipo PI.

En la figura 3.6 se muestran los bloques de un regulador PI [8].



En las siguientes figuras se puede ver cuáles son las reacciones de las diferentes acciones a una señal de error determinada.

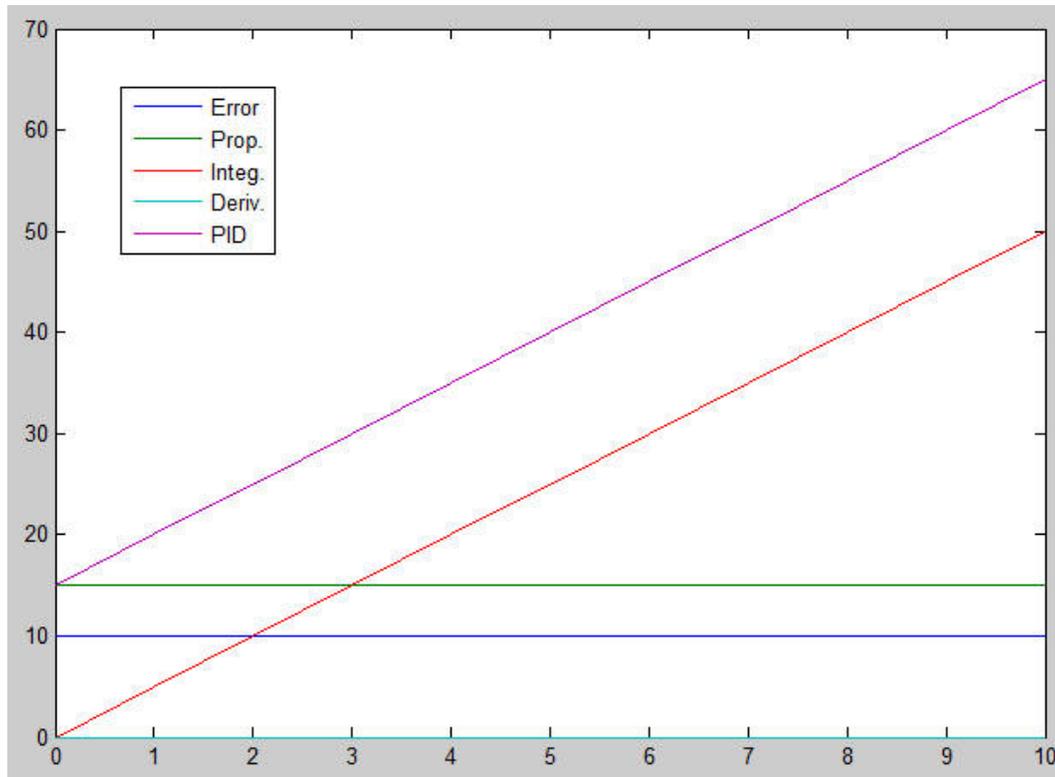


Fig 3.7 – Acciones del PID ante un error constante.

En la figura 3.7 se tiene la respuesta de un PID cuando se aplica a la entrada una señal de valor constante, en ese caso la respuesta proporcional será también constante y su valor dependerá de K_p , la respuesta integral será una rampa de una determinada pendiente en función de T_i y K_p , y la respuesta derivativa será nula, ya que la pendiente del error es 0. La respuesta total será la suma de todas las acciones, es decir, una rampa.

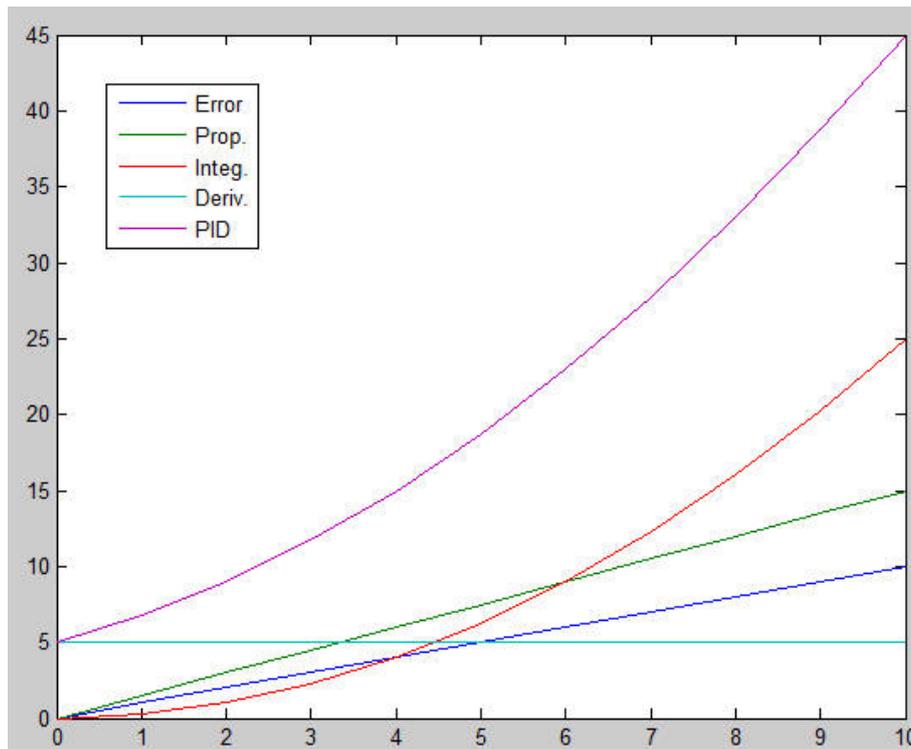


Fig 3.8 – Acciones del PID ante un error rampa.

En la figura 3.8 se muestra la respuesta de un PID ante una señal de error que aumenta con pendiente constante, en este caso la forma de las diferentes acciones cambian con respecto a la respuesta a un error constante. La respuesta proporcional será otra rampa con distinta pendiente a la del error, y dependerá de K_p , la respuesta integral ahora será una parábola, y la respuesta derivativa será constante. La respuesta de todo el PID será pues la suma de las tres respuestas, que tendrá una forma similar a una parábola.

De esta forma se puede entender como son las respuestas de las diferentes acciones ante un error, que normalmente se verá afectado por la señal del PID de modo que no será tan lineal como los de los ejemplos anteriores.

Normalmente un PID tiene suficiente flexibilidad como para alcanzar resultados satisfactorios en la mayoría de los sistemas en los que se implementan.



Es por todas estas características que los controladores del tipo PID son con mucha diferencia los que se utilizan con más frecuencia en la industria de control de procesos, donde más del 95% de los lazos de control están realizados con controladores PID o sus simplificaciones.

Físicamente un PID continuo está compuesto por diferentes componentes electrónicos como resistencias, condensadores o amplificadores operacionales, dispuestos de tal manera que realizan las diferentes acciones del controlador (proporcional, integral y derivativa).

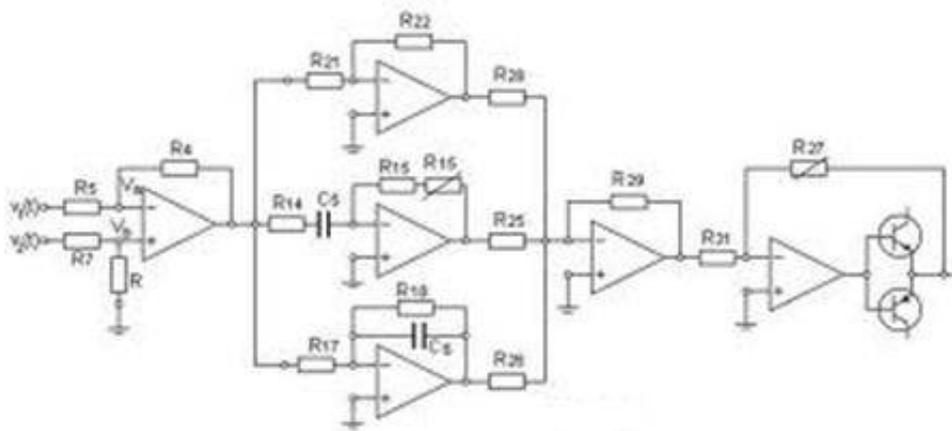


Fig 3.9 – Componentes de un controlador PID continuo.

En la figura 3.9 se muestra el circuito electrónico utilizado para crear un controlador PID continuo, se aprecia que utilizan varios componentes electrónicos básicos.

La función de transferencia de un PID tiene la siguiente forma:

$$C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (3.11)$$

Que define la siguiente ley de control:

$$u(t) = K_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.12)$$

Los parámetros K_p , T_i y T_d son los que determinan como es la acción del PID, y será necesario ajustarles para conseguir un funcionamiento correcto del controlador.



La función de transferencia de la ecuación 3.11 no es físicamente realizable, por lo tanto a ese PID se lo denomina regulador PID teórico. Para que el PID sea físicamente realizable habrá que añadir a la acción derivativa un polo, con una influencia limitada, este nuevo regulador tendrá la forma:

$$C(s) = K_p \cdot \frac{1 + s \cdot T_i + s^2 \cdot T_i \cdot T_d}{(1 + s \cdot T_i) \cdot (1 + s \cdot T_d)} \quad (3.13)$$

La función de transferencia puede tener varias formas de ser representada, con diferentes valores para los parámetros K_p , T_i y T_d , representando el mismo regulador o planta, por tanto la función de transferencia utilizada posteriormente en el PID seguramente no tenga ninguna de las formas descritas anteriormente, aunque su funcionamiento sea el mismo [8].

En la actualidad es posible crear reguladores mucho más complejos que hace unos años, gracias a la posibilidad de realizar un algoritmo de control mediante un computador, estos algoritmos permiten crear reguladores más complejos que los controladores físicos como los PID.

3.2.1 Diseño de controladores PID

Existen varias formas para diseñar un PID, como por ejemplo el método de respuesta en frecuencia o el método de respuesta al escalón. Uno de los más utilizados y sencillos consiste en a partir de los polos deseados del sistema, y mediante el lugar de las raíces, se calculan donde debieran estar los polos del PID.

Para determinar cuáles son los polos que se desean, o la respuesta que se quiere obtener, se pueden especificar ciertos parámetros de la respuesta, normalmente en el dominio del tiempo.

Es habitual utilizar parámetros de la respuesta al escalón, como el tiempo de pico, tiempo de establecimiento, o el máximo sobreimpulso, estos parámetros se pueden relacionar con la posición de los polos mediante ecuaciones.

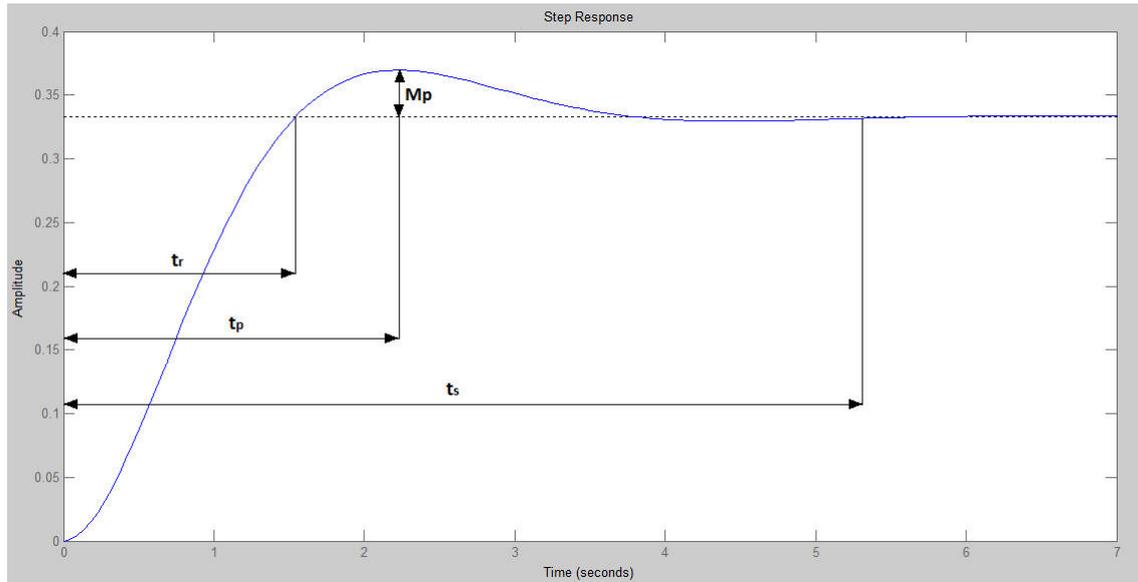


Fig 3.10 – Parámetros para el diseño de un PID.

En la figura 3.10 se muestra la respuesta de un sistema de segundo orden con sobreimpulso, y en ella se marcan algunos de los parámetros utilizados en el diseño de reguladores PID.

Las especificaciones respecto a la respuesta en el dominio temporal de un sistema se suelen definir con respecto a la respuesta temporal ante una entrada escalón en un sistema de segundo orden, para ello se toma como sistema de referencia un sistema con función de transferencia teórica:

$$G(s) = \frac{K \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (3.14)$$

Cuyos polos están situados:

$$p_{1,2} = -\xi \cdot \omega_n \pm j \cdot \omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \quad (3.15)$$

Donde ξ es la tasa de amortiguamiento, y ω_n es la frecuencia natural no amortiguada del sistema. Un sistema subamortiguado ($0 < \xi \leq 1$) tiene una respuesta al escalón como la mostrada en la figura 3.3.

También es necesario definir la frecuencia amortiguada como:

$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \quad (3.16)$$



Conociendo 2 de las características de la respuesta podemos calcular la tasa de amortiguamiento y la frecuencia natural, para ello se utilizan las siguientes ecuaciones [6]:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (3.17)$$

$$M_p = e^{-\pi \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (3.18)$$

$$t_s \approx \frac{\pi}{\xi \cdot \omega_n} \quad (3.19)$$

En el método de asignación de polos se parte de la función de transferencia de la planta o el proceso y de la función de transferencia del regulador elegido (aun sin los parámetros establecidos). Con estos datos se calcula la función de transferencia de lazo cerrado del sistema que será de la forma:

$$G(s) = \frac{G_p(s) \cdot C(s)}{1 + G_p(s) \cdot C(s)} \quad (3.20)$$

Donde $G_p(s)$ es la función de transferencia de la planta, y $C(s)$ la del controlador PID.

Por lo tanto se sabe que la ecuación característica del sistema será:

$$1 + G_p(s) \cdot C(s) = 0 \quad (3.21)$$

Conociendo los polos deseados del sistema en lazo cerrado que se calcularon anteriormente, se pueden calcular los parámetros del PID.

Otra opción válida para el diseño de PID's en sistemas estables en lazo abierto es el método de Ziegler-Nichols, que es el más importante de los métodos empíricos.

El método de Ziegler-Nichols consiste en utilizar un control proporcional con una ganancia K_p , esta ganancia empezara siendo pequeña pero irá aumentando hasta que la señal de salida del controlador empiece a oscilar, en ese punto la ganancia K_p será K_c , la ganancia crítica, además



se medirá el periodo de oscilación T_c , con estos dos valores se determinarán los parámetros del regulador mediante la tabla 3.1:

	K_p	T_i	T_d
P	$0,50 \cdot K_c$		
PI	$0,45 \cdot K_c$	$T_c/1,2$	
PID	$0,60 \cdot K_c$	$T_c/2$	$T_c/8$

Tabla 3.1 – Valores de los parámetros por Ziegler-Nichols.

Este método tiene varias formas de realizarse pero muy similares a esta que se ha explicado.

También es posible el diseño de reguladores mediante respuesta en frecuencia, utilizando parámetros de diseño como pueden ser el margen de fase, el error de posición o velocidad, o el ancho de banda. Estos métodos de respuesta en frecuencia utilizan los diagramas de Bode y suelen realizarse de forma gráfica, aunque también pueden realizarse mediante programas informáticos.

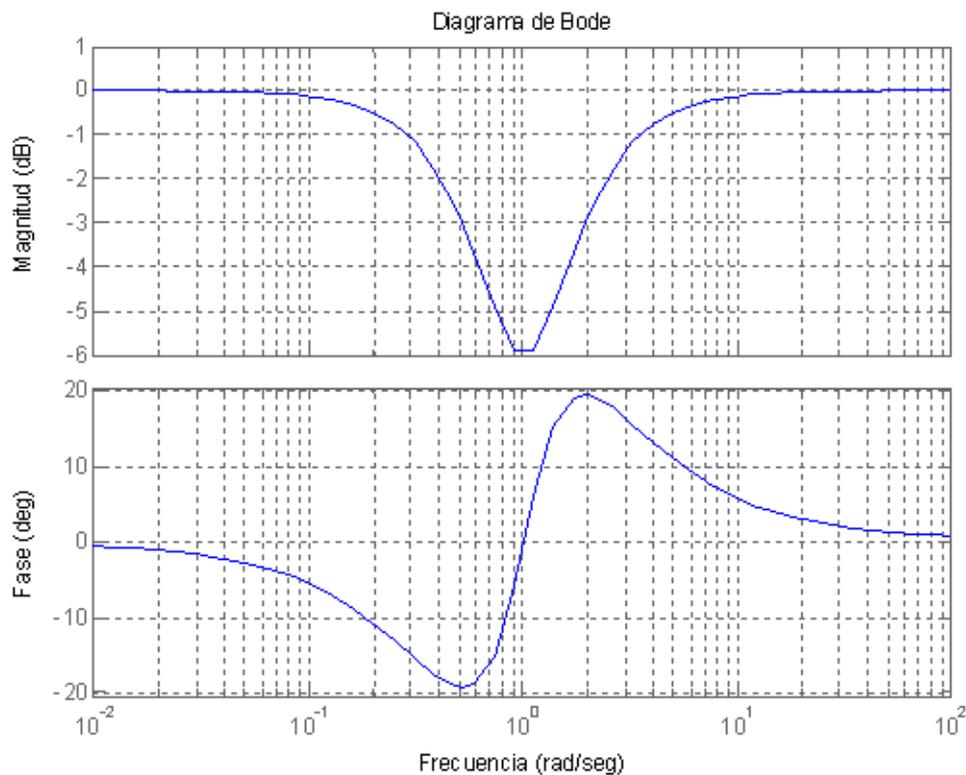


Fig 3.11 – Ejemplo Diagrama de Bode.

La figura 3.1 muestra como es un diagrama de bode.

Debido a la inexactitud que tienen los estos métodos gráficos es preferible utilizar otros métodos analíticos como el de la asignación de polos.

Con Matlab también se puede diseñar PID de forma sencilla, gracias a una toolbox que permite el diseño gráfico con la respuesta, esto permite observar la respuesta en función de los parámetros introducidos, eligiendo cual es la más satisfactoria para el sistema con el que se trabaja.

3.2.2 Discretización de controladores PID

Los métodos anteriormente descritos están pensados para controladores continuos, dado que la mayoría de los procesos industriales son de naturaleza continua. Sin embargo, en la actualidad la mayoría de los controladores son de tipo discreto, por lo que si se diseñan con los



métodos anteriores, será necesario discretizarlos para poder implantarlos en los sistemas reales.

La ecuación 3.12 describe la respuesta de un controlador continuo, en cambio, en un controlador discreto la respuesta no tendrá la misma forma, habrá que sustituir el término derivativo por una diferencia de primer orden, y el término integral por una aproximación rectangular hacia adelante.

$$u(k) = K_p \cdot \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1)) \right] \quad (3.22)$$

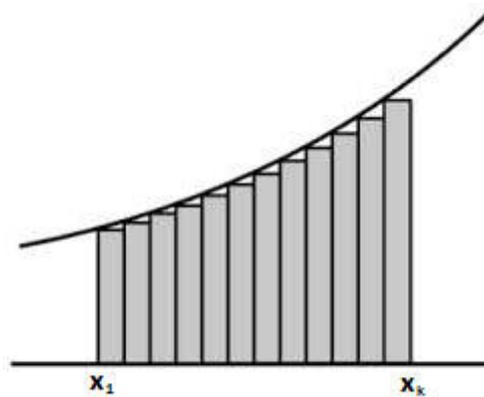


Fig 3.12 – Aproximación rectangular hacia adelante.

Lo que muestra la figura 3.12 es como se realiza una aproximación rectangular hacia adelante, se puede apreciar que se comete un ligero error.

Después de realizar unas operaciones para eliminar el sumatorio y transformar la ecuación 3.22 podemos obtener la función de transferencia del regulador discreto, que tiene la siguiente forma:

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 \cdot z^{-1} + q_2 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (3.23)$$

Donde los parámetros q_0 , q_1 y q_2 son los siguientes:

$$q_0 = K_p \cdot \left(1 + \frac{T_d}{T} \right) \quad (3.24)$$



$$q_1 = -K_p \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{T_d}{T} - \frac{T}{T_i}\right) \quad (3.25)$$

$$q_2 = K_p \cdot \frac{T_d}{T} \quad (3.26)$$

También se puede sustituir la integral mediante una aproximación trapezoidal, de forma más exacta, obteniendo un resultado muy similar, cuanto mayor sea el orden de la aproximación mayor será la precisión y la dificultad.

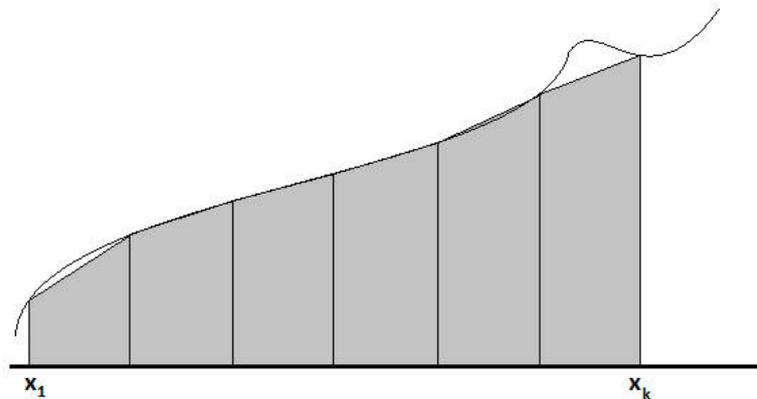


Fig 3.13 – Aproximación Trapezoidal.

En la figura 3.13 se muestra una aproximación trapezoidal, que comparada con la rectangular, se puede ver que es más exacta.

De tal forma la expresión de $u(k)$ sería:

$$u(k) = K_p \cdot \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \cdot \left(\frac{e(0) + e(k)}{2} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} e(i) \right) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1)) \right] \quad (3.27)$$

Y con la misma función de transferencia de la ecuación 3.23, tendríamos unos parámetros q_0 y q_1 ligeramente distintos, sin embargo q_2 seguirá siendo el mismo que en la ecuación 3.26 [5].

$$q_0 = K_p \cdot \left(1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{2 \cdot T_i}\right) \quad (3.28)$$

$$q_1 = -K_p \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{T_d}{T} - \frac{T}{2 \cdot T_i}\right) \quad (3.29)$$



3.3 CONTROL POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS

3.3.1 Espacio de estados

Le teoría moderna está basada en el conocimiento del comportamiento interno de los sistemas, esto se puede reflejar en variables que influyen en su dinámica. Estas variables constituyen el concepto de "estados del sistema". El conocimiento de la evolución de las variables del sistema permite realizar un control más potente y su utilización en el control de sistemas más complejos.

Se define estado de un sistema como la mínima cantidad de información necesaria en un instante para que, conociendo la entrada a partir de ese instante se pueda determinar la salida en cualquier instante posterior.

Para controlar un sistema por este método será necesario que el sistema esté en forma de espacio de estados, para poder obtener una señal de estados que realimentar. Para ello habrá que conocer las cuatro matrices de las que consta todo espacio de estados.

En la figura 3.14 se muestra la representación de un sistema en espacio de estados, donde los parámetros A, B, C y D son matrices.

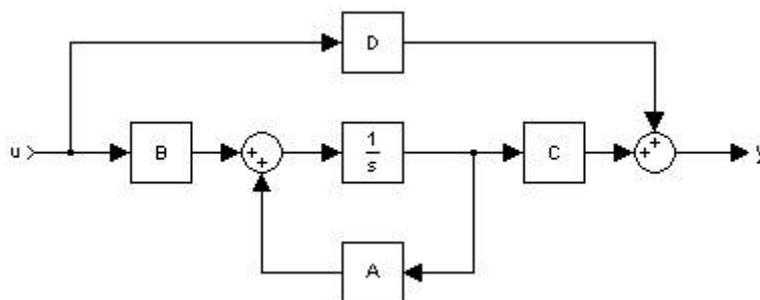


Fig 3.14 – Representación en espacio de estados.

Las matrices A, B, C y D dependen del tiempo en la forma más general, aunque en la mayoría de los casos se pueden simplificar a matrices constantes si el sistema no varía con el tiempo. En un vehículo convencional por ejemplo, la masa del vehículo puede ir cambiando (Consumo de gasolina, aumento de pasajeros, desgaste de neumáticos),



y por lo tanto las ecuaciones que definen su funcionamiento debiera cambiar, por lo tanto las ecuaciones de estado tienen la siguiente forma:

$$\dot{x}(t) = A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t) \quad (3.30)$$

$$y(t) = C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot u(t) \quad (3.31)$$

Además la señal de salida se puede definir solo con los estados, por tanto la matriz "D" suele ser nula y eliminarse de las ecuaciones.

Simplificando las ecuaciones de estado para sistemas invariantes:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (3.32)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) \quad (3.33)$$

Las matrices que constituyen el espacio de estados son las siguientes:

- A (n x n): Matriz de evolución.
- B (n x m): Matriz de aplicación.
- C (q x n): Matriz de observación.
- D (q x m): Matriz de transmisión directa.

Siendo "n" el orden del sistema, "m" el número de entradas y "q" el número de salidas, además "x" es el vector de estados, "u" la señal de entrada, y "y" la señal de salida.

Estas ecuaciones son muy similares tanto si el sistema es continuo como si es discreto, existen las mismas matrices y de la misma forma, aunque evidentemente con distintos valores, quedando las ecuaciones de la siguiente manera para un sistema invariante:

$$x(k + 1) = A \cdot x(k) + B \cdot u(k) \quad (3.34)$$

$$y(k) = C \cdot x(k) \quad (3.35)$$

Los estados dependen de la forma de las matrices, un sistema puede estar representado de infinitas formas, con diferentes estados cada una. Algunas formas son más habituales debido a la simpleza o a la utilidad, las más utilizadas son las llamadas de variables de fase, variables físicas o de variables canónicas o de Jordán.



Se puede pasar de unas variables a otras utilizando las matrices de transformación, que serán distintas dependiendo de qué variables se utilicen. Esta matriz de transformación se denomina "T", y es de tamaño $n \times n$. Al realizar la transformación las matrices A, B, C y D cambian de la siguiente manera, siendo $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C},$ y \tilde{D} las matrices nuevas.

$$\tilde{A} = T^{-1} \cdot A \cdot T \quad (3.36)$$

$$\tilde{B} = T^{-1} \cdot B \quad (3.37)$$

$$\tilde{C} = C \cdot T \quad (3.38)$$

$$\tilde{D} = D \quad (3.39)$$

3.3.2 Controlabilidad y Observabilidad

No todos los sistemas son controlables de esta forma, por lo que antes de diseñar el control, habrá que comprobar si este sistema es controlable, mediante la matriz de controlabilidad.

Básicamente un sistema es controlable si se puede alcanzar un determinado estado aplicando una entrada determinada en un tiempo finito.

Existen varias formas de definir la controlabilidad, una de ellas es la siguiente:

"Se dice que el estado $x(t)$ es controlable en $t = t_0$ si existe una entrada continua por intervalos $u(t)$ que moverá el estado a cualquier estado final $x(t_f)$ en un tiempo finito $[t_f - t_0 \geq 0]$ ".

En un sistema lineal que tiene como ecuación de estado la ecuación 3.30, es controlable en $[t_0, t_1]$ si y solo si la matriz $W(t_1, t_0)$ es no singular.

$$W(t_1, t_0) = \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t_1, \tau) \cdot B(\tau) \cdot B^T(\tau) \cdot \Phi^T(t_1, \tau) d\tau \quad (3.40)$$

Sin embargo hay una forma más simple de ver si un sistema es controlable siempre y cuando el sistema se invariante tal y como el de la ecuación 3.32. Para ello se utiliza la llamada matriz de controlabilidad.



La matriz de controlabilidad se forma de la siguiente forma:

$$M = (B|A \cdot B|A^2 \cdot B| \dots |A^{n-1} \cdot B) \quad (3.41)$$

Para que este sistema completamente controlable, es condición necesaria y suficiente que la matriz de controlabilidad M de $n \times nr$ tenga rango n y por lo tanto su determinante sea distinto de 0.

Si un sistema no es controlable significa que existen determinados estados que no se van a poder alcanzar, sin embargo seguirán existiendo estados que si se podrán alcanzar. Así que se puede hablar de un subespacio controlable donde se encuentran los estados alcanzables en un sistema no controlable.

Se puede hablar también de la controlabilidad de la salida, que se define como:

“Se dice que un punto del espacio de salida de un sistema, y_1 , es controlable en $[t_0, t_1]$ si existe una entrada “ u ” definida en el intervalo $[t_0, t_1]$, tal que para todo punto de origen en t_0 consiga que la salida valga y_1 en t_1 ”.

En este caso también se puede definir una matriz de controlabilidad para la salida:

$$Q_C = (C \cdot B|C \cdot A \cdot B|C \cdot A^2 \cdot B| \dots |C \cdot A^{n-1} \cdot B) \quad (3.42)$$

La salida $y(t)$ es controlable si y solo si la matriz Q_C es de rango q (La matriz C es re tamaño $q \times n$).

Dualmente a la controlabilidad se define la observabilidad, se necesita que un sistema sea observable si se quiere hacer un observador para el control por realimentación de estado.

La observabilidad es la posibilidad de conocer el valor de un estado de un sistema a partir del conocimiento de la evolución de la entrada y de la salida que genera, una vez conocido el estado en un instante inicial, se puede conocer el estado en cualquier otro instante posterior utilizando la solución de la ecuación de estado.



Se define la observabilidad como:

“Se dice que un punto x_0 del espacio de estado es observable en $[t_0, t_1]$, si siendo este el estado inicial en el instante t_0 , $x_0 = x(t_0)$, el conocimiento de la entrada $u(t)$ en el intervalo $[t_0, t_1]$ y de la salida $y(t)$ en el mismo intervalo permite determinar que el estado inicial del sistema en el instante t_0 es x_0 ”.

Para un sistema general se puede decir que un sistema es observable siempre y cuando la matriz $V(t_1, t_0)$ es no singular.

$$V(t_1, t_0) = \int_{t_0}^{t_1} \Phi^T(\tau, t_0) \cdot C^T(\tau) \cdot C(\tau) \cdot \Phi(\tau, t_0) d\tau \quad (3.43)$$

Además, como con la controlabilidad, existe también una matriz de observabilidad en sistemas invariantes, que se necesita que sea de rango n , para que el sistema sea observable.

$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

En un sistema invariante como el definido por las ecuaciones 3.32 y 3.33, el conjunto de puntos del espacio de estado tales que tomados como estado inicial ante entrada nula, la salida del sistema es permanentemente nula y denominados no-observables, forman un subespacio vectorial que se denomina subespacio no-observable.

Se puede separar el subsistema no-observable del sistema total, para ello se utilizara una matriz de cambio de base “T”, que multiplicada por las matrices que definen el sistema, se obtendrán otras nuevas matrices que definirán el subsistema [7].

3.3.3 Realimentación de estados sin observador

El control por realimentación de estados consiste en utilizar el vector de estados $x(t)$ en cada momento para multiplicar cada estados por una



constante y realizar una realimentación negativa a la entrada de referencia.

Para ello será necesario poder acceder al valor de todos los estados, en caso contrario habría que utilizar un observador de orden parcial o de orden completo, como se explicará posteriormente.

En la figura 3.15 se puede ver como se dispone el sistema total cuando se utiliza el control por realimentación de estados, con la realimentación negativa tal y como se dijo anteriormente.

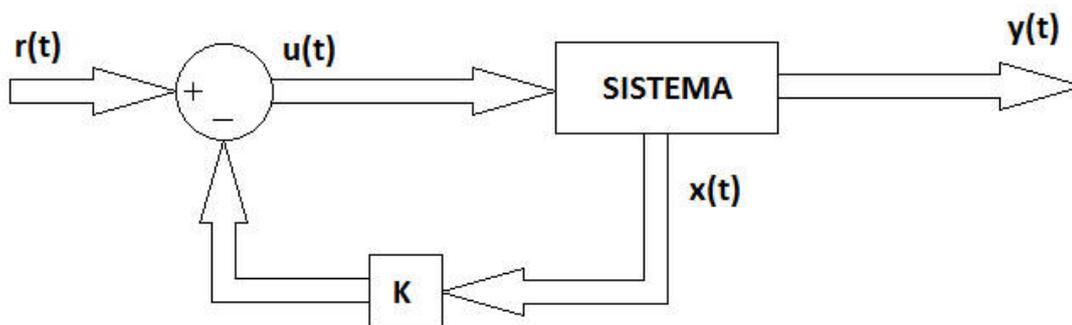


Fig 3.15 –Diagrama realimentación de estados.

La ganancia "K" es la ganancia de realimentación de estados, y es un vector fila con "n" columnas, siendo "n" el número de estados del sistema.

Esta ganancia "K" se calcula de forma que el sistema realimentado tenga los polos deseados de lazo cerrado, para ello se utiliza la fórmula de Ackermann que se explicara posteriormente.

El sistema de ecuaciones del sistema cambia al implementar esta realimentación, la señal de entrada aplicada a la planta ya no es la misma:

$$u(t) = r(t) - K \cdot x(t) \quad (3.45)$$



Donde $r(t)$ es la señal de referencia que se utiliza ahora, esta señal de referencia será el valor deseado por el usuario para el valor final de la salida.

La ecuación de la derivada de los estados quedaría por lo tanto de la siguiente manera:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot r(t) - B \cdot K \cdot x(t) = (A - B \cdot K) \cdot x(t) + B \cdot r(t) \quad (3.46)$$

Como se puede observar la realimentación de estados es como si hubiera cambiado la matriz A , por una matriz nueva que llamaremos A_r , esta matriz no tiene por qué estar implementada en el espacio de estados.

$$A_r = A - B \cdot K \quad (3.47)$$

Un problema que surge al utilizar este método de control es que la ganancia del sistema en lazo cerrado no es la deseada normalmente, ya que al introducir la realimentación toma un valor arbitrario. A este problema se le pueden aplicar dos soluciones.

La primera de ellas consiste en sacrificar el posicionamiento de uno de los polos, que queda libre, para poder fijar el término independiente del polinomio característico. Este proceso será de prueba y error, ya que al fijar la ganancia y el resto de polos, el polo libre se puede posicionar en un punto no deseado.

La segunda solución y más utilizada, usa una ganancia " K_0 " colocada en la entrada para multiplicar a la señal de referencia, la función de transferencia del sistema cambiara y se podrá calcular el valor de esta ganancia para conseguir el valor final deseado.

Posteriormente se explicará cómo calcular el valor correcto de esta ganancia.



3.3.4 Realimentación de estados con observador

No en todos los sistemas puede usarse la realimentación de estados tal y como se ha explicado, dado que como se ha podido observar es necesario obtener las señales de todos los estados, esto a veces no es posible o es muy complicado, dado que pueden ser variables físicas que se necesita instrumental especial para medirlas. Para controlar estos sistemas es necesario utilizar un observador con el cual sí que se pueda conseguir una señal aproximada de todos los estados.

El observador puede ser de orden completo, el cual tiene como salidas un vector con todos los estados del sistema, o un observador de orden reducido, el cual solo tiene como salida los estados que no pueden ser medidos en el sistema físico.

Este observador es un sistema en el espacio de estados con las mismas matrices que el sistema a controlar, pero en este caso será un sistema electrónico, del cual obtenemos la salida y los estados, aplicando la misma señal de entrada que a la planta.

Dado un sistema lineal, invariante y observable como el de las ecuaciones 3.32 y 3.33, se dice que el siguiente sistema (ecuaciones 3.48 y 3.49) es un observador siempre y cuando se cumplan las dos condiciones expuestas a continuación.

$$\hat{\dot{x}}(t) = F \cdot \hat{x}(t) + G \cdot u(t) + L \cdot y(t) \quad (3.48)$$

$$\hat{y} = C \cdot \hat{x}(t) \quad (3.49)$$

- Si los estados de ambos sistemas (real y observador) coinciden en un instante t_0 , $\hat{x}(t_0) = x(t_0)$, entonces los estados coinciden para todo instante posterior $\hat{x}(t) = x(t)$ para cualquier entrada $u(t)$ aplicada sobre el sistema.
- $\hat{x}(t)$ debe tender asintóticamente al estado $x(t)$ para cualquier entrada $u(t)$ y para cualesquiera estados iniciales $\hat{x}(t_0)$ y $x(t_0)$.



En la figura 3.16 se puede ver como es el sistema total cuando la realimentación de estados se realiza con ayuda de un observador de estados.

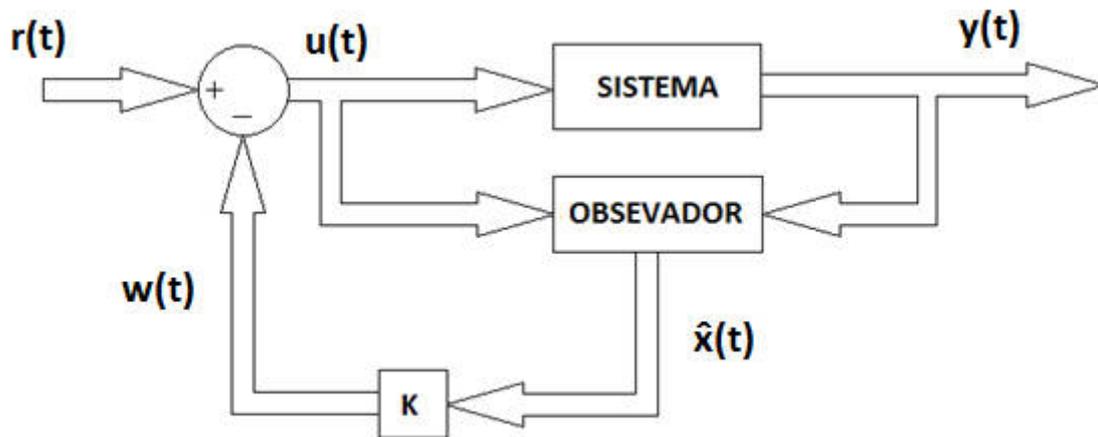


Fig 3.16- Diagrama de bloques de la realimentación de estados con un observador.

Las ecuaciones del sistema realimentado son las siguientes:

$$w(t) = K \cdot \hat{x}(t) \quad (3.50)$$

$$u(t) = r(t) + w(t) \quad (3.51)$$

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot K \cdot \hat{x}(t) + B \cdot r(t) \quad (3.52)$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - L \cdot C) \cdot \hat{x}(t) + B \cdot u(t) + L \cdot y(t) \quad (3.53)$$

En un sistema de control por realimentación de estados con observador, hay que utilizar una matriz más, representada como "L" y situada dentro del observador, multiplica a la diferencia entre la salida real y la salida del observador y se suma a la derivada de los estados, tal y como se puede ver en la ecuación 3.53.

Escritas las ecuaciones en forma matricial, se tiene que:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\hat{x}}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \cdot K \\ L \cdot C & A - L \cdot C + B \cdot K \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ B \end{pmatrix} \cdot r(t) \quad (3.54)$$



El caso de un observador de orden reducido es más complejo, pero dará mejores resultados dado que habrá estados que no hará falta estimar, siendo su valor el valor real. No sería lógico que pudiendo utilizar estos estados conocidos no se utilizaran.

Para realizar un observador de este tipo se separan los estados medibles de los no medibles, a los primeros los llamaremos x_a y a los segundos x_b . Las ecuaciones de estados en forma matricial resultarían entonces de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_a \\ \dots \\ \dot{x}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{aa} & \dots & A_{ab} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{ba} & \dots & A_{bb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_a \\ \dots \\ x_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_a \\ \dots \\ B_b \end{pmatrix} \cdot u \quad (3.55)$$

$$y = (I \quad \dots \quad 0) \cdot \begin{pmatrix} x_a \\ \dots \\ x_b \end{pmatrix} \quad (3.56)$$

En el caso típico de que solo hubiera un estado medible, y este fuera además igual a la salida, podríamos hacer lo siguiente:

Dinámica de los estados no medidos:

$$\dot{x}_b = A_{bb} \cdot x_b + A_{ba} \cdot x_a + B_b \cdot u \quad (3.57)$$

Donde los dos últimos sumandos se corresponden con entradas conocidas por nosotros.

Dinámica de los estados medidos:

$$\dot{x}_a = \dot{y} = A_{aa} \cdot x_a + A_{ab} \cdot x_b + B_a \cdot u \quad (3.58)$$

Se puede hacer una comparación con un sistema invariante lineal como el de las ecuaciones 3.32 y 3.33.

El estimador de orden reducido entonces nos daría el valor de los estados no medibles, mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{\dot{x}}_b = (A_{bb} - L \cdot A_{ab}) \cdot \hat{x}_b + (A_{ba} - L \cdot A_{aa}) \cdot y + L \cdot \dot{y} + (B_b - L \cdot B_a) \cdot u \quad (3.59)$$

La ganancia "L" necesaria se obtendrá de la misma forma que para un observador de orden completo, tal y como se explicará posteriormente.



3.3.5 Realimentación de estados con un PI

El objetivo de añadir un PI al sistema es aumentar la robustez de este, esto se hace aumentando la planta agregando un nuevo estado x_i que integra el error de seguimiento.

Para ello se necesita realimentar la salida además de los estados, y comparar la salida con la señal de referencia, la señal que resulta de esta comparación será la señal que se integrará. Una vez la señal pasa por el PI se obtiene el nuevo estado x_i , que será la señal que se compare con la realimentación de los demás estados. Por lo tanto este nuevo estado sería equiparable a la señal de referencia de un sistema de realimentación de estado que no utilizara este método.

La figura 3.17 muestra como es el sistema cuando se utiliza un PI complementando la realimentación de estados.

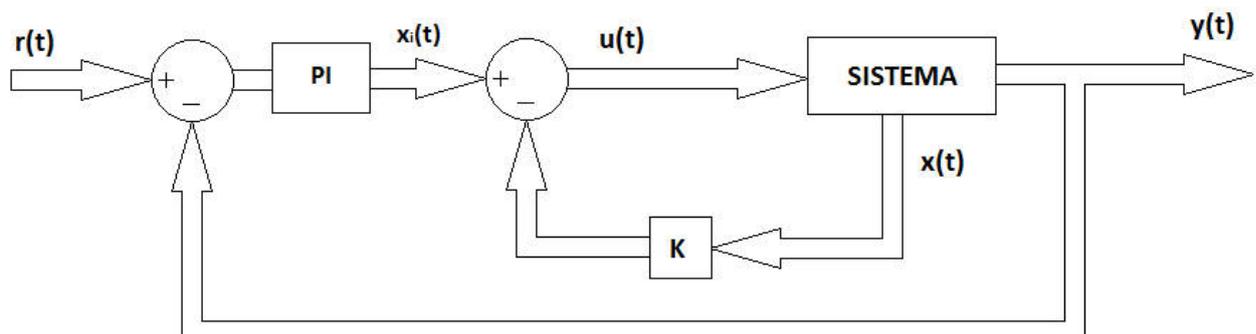


Fig 3.17 – Diagrama de realimentación de estados con PI.

Si el sistema sin el PI era controlable y $G(s)$ no tiene ceros en $s=0$, entonces los autovalores de la matriz de evolución aumentada (ecuación 3.60) pueden asignarse arbitrariamente seleccionando la matriz de realimentación (K y parámetros del PI).

$$A = \begin{pmatrix} A - B \cdot K & -B \cdot k_{pi} \\ C & 0 \end{pmatrix} \quad (3.60)$$

En términos de polos y ceros, si la planta tuviera un cero en $s=0$, su conexión en cascada con el integrador de x_i produciría una cancelación polo-cero inestable y haría que la planta aumentada no sea controlable.



El sistema rechazará perturbaciones constantes y seguirá referencias constantes, ambas de valor no necesariamente conocido, a un frente a incertidumbres de modelado de la planta, siempre que el lazo cerrado permanezca estable.

3.3.6 Cálculo de las ganancias

Como se dijo anteriormente la ganancia de realimentación de estados debe calcularse mediante la fórmula de Ackermann, válida para sistemas de una única entrada. La fórmula de Ackermann únicamente utiliza las matrices A y B, y los polos de lazo cerrado deseados.

$$K = (0 \ 0 \ \dots \ 1) \cdot (B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B)^{-1} \cdot \phi(A) \quad (3.61)$$

Donde $\phi(A)$ es el polinomio característico del sistema realimentado, evaluado en la matriz A.

Además la fórmula de Ackermann también se puede utilizar para obtener la matriz "L" del observador, para ello habrá que sustituir la matriz B por la matriz C, y además trasponer la matriz A y la B, y el resultado final, de modo que la matriz "L" será un vector de "n" filas, la ecuación resultante será:

$$L = (0 \ 0 \ \dots \ 1) \cdot (C' \ A'C' \ \dots \ A'^{n-1}C')^{-1} \cdot \phi_{obs}(A') \quad (3.62)$$

Donde $\phi_{obs}(A')$ es el polinomio característico del observador, evaluado esta vez en A traspuesta.

Por último, para el sistema realimentado habrá que utilizar una ganancia de compensación "K₀" para ajustar la ganancia estática, y que el valor final en régimen permanente sea el mismo que el sistema sin realimentación, para ello se calcula G (z) mediante la fórmula:

$$G(z) = C \cdot (zI - \hat{A}) \cdot (B * K_0) \quad (3.63)$$

Con ella y utilizando el teorema de valor final se iguala el valor final a 1, y se despeja para obtener la ganancia "K₀".



$$K_o = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{\text{Polos } G(z)}{\text{Zeros } G(z)} \quad (3.64)$$

Esta ganancia estará situada de tal forma que la señal de referencia quede multiplicada por ella, es decir, se colocara en la entrada del sistema.



4 ANALISIS DE CONTROLADORES MEDIANTE SIMULACIÓN

Una vez realizado el modelo del vehículo tal y como se detalló en el apartado "2 MODELADO DE LA DINAMICA LONGITUDINAL DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO", se usará para realizar pruebas con él, mediante la herramienta de Matlab "Simulink", para ello se crearán una serie de diagramas de bloques para las diferentes pruebas, para comprobar el correcto funcionamiento del modelo, y para diseñar las diferentes formas de control que se podrían implementar posteriormente en el vehículo.

4.1 VERIFICACIÓN DEL MODELO

Para esta comprobación, se someterá el modelo a varios valores para la señal de entrada (Aceleración/Freno) para comprobar que la señal de salida (Velocidad) es más o menos la que se espera, para ello la señal de entrada tiene que ser variada, teniendo momentos en las que el vehículo aumentara de velocidad y momentos en los que el vehículo frenará.

Los datos que se obtienen al realizar la simulación serán los siguientes:

- Velocidad del cuerpo del vehículo, es la velocidad real a la que se mueve el coche.
- Velocidad de las ruedas, obtenida al multiplicar la velocidad angular del movimiento de las ruedas por el radio de estas.
- Distancia Recorrida, resultado de integrar la velocidad del cuerpo.

La diferencia entre las dos velocidades medidas, se debe al deslizamiento descrito anteriormente, las ruedas pueden derrapar al tener un par grande, y entonces se moverán con más velocidad que el vehículo.

El diagrama de bloques realizado para esta simulación se muestra en la siguiente figura, siendo el bloque "Vehículo" el realizado en el apartado de modelado.

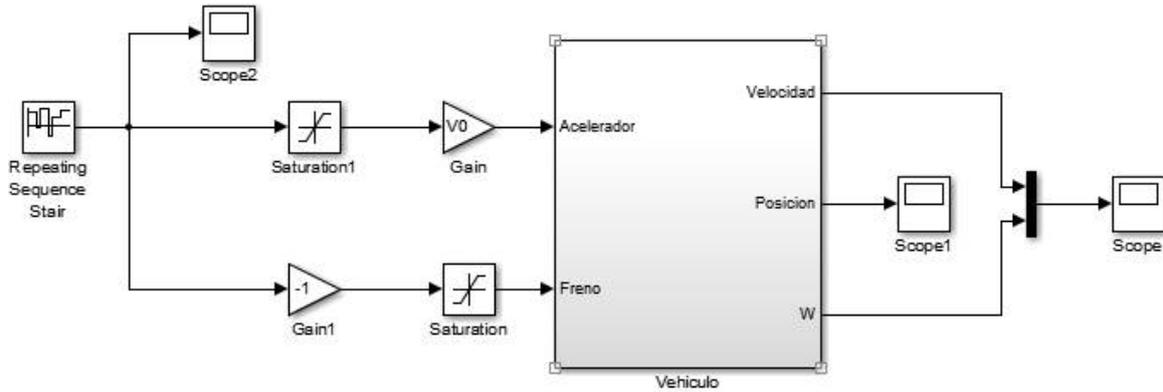


Fig 4.1– Bloques de Simulink para la comprobación del sistema.

En la figura 4.1 se muestra la disposición de los bloques, incluido el modelo del vehículo realizado anteriormente, que se va a utilizar para comprobar el funcionamiento correcto de este.

La señal de entrada que se aplicara será la siguiente, como se puede apreciar alterna periodos de frenado con periodos de aceleración, para que se compruebe completamente el correcto funcionamiento del modelo. Se puede ver que es una secuencia periódica, de periodo 30 segundos, que en ese caso se repetirá en 2 ocasiones, ya que las simulaciones tendrán un tiempo de 60 segundos. Los frenados no son muy fuertes para que el vehículo no funcione a velocidades muy bajas, debido a que el modelo tiene problemas al simular con velocidades cercanas a 0.

En la figura 4.2 se enseña la gráfica de la señal de entrada que se aplicara.

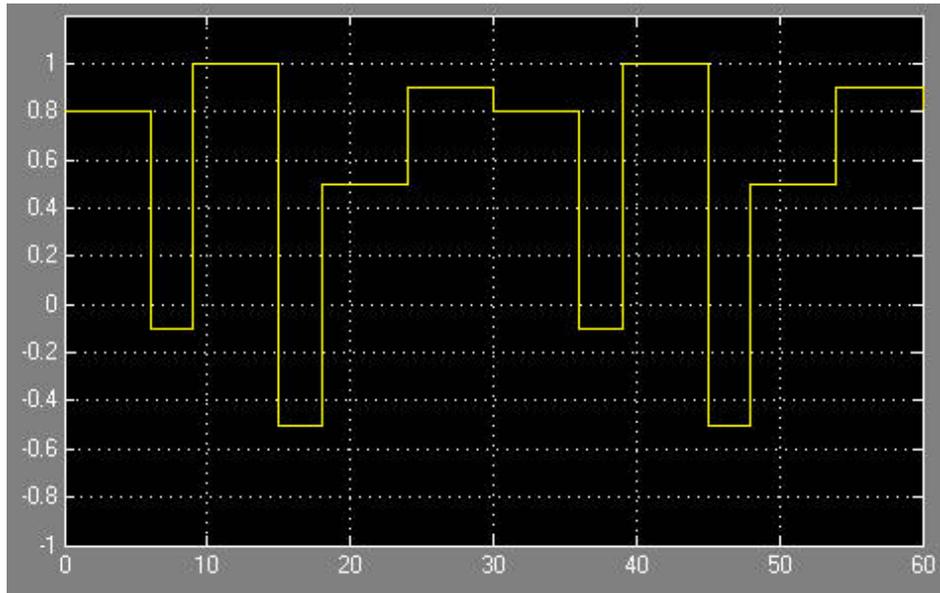


Fig 4.2- Señal de entrada aplicada.

En la figura 4.3 se muestra las gráficas de las señales de salida, en la gráfica superior están superpuestas la velocidad del vehículo y la velocidad de las ruedas, y en la segunda se representa la distancia recorrida por el vehículo en función del tiempo.

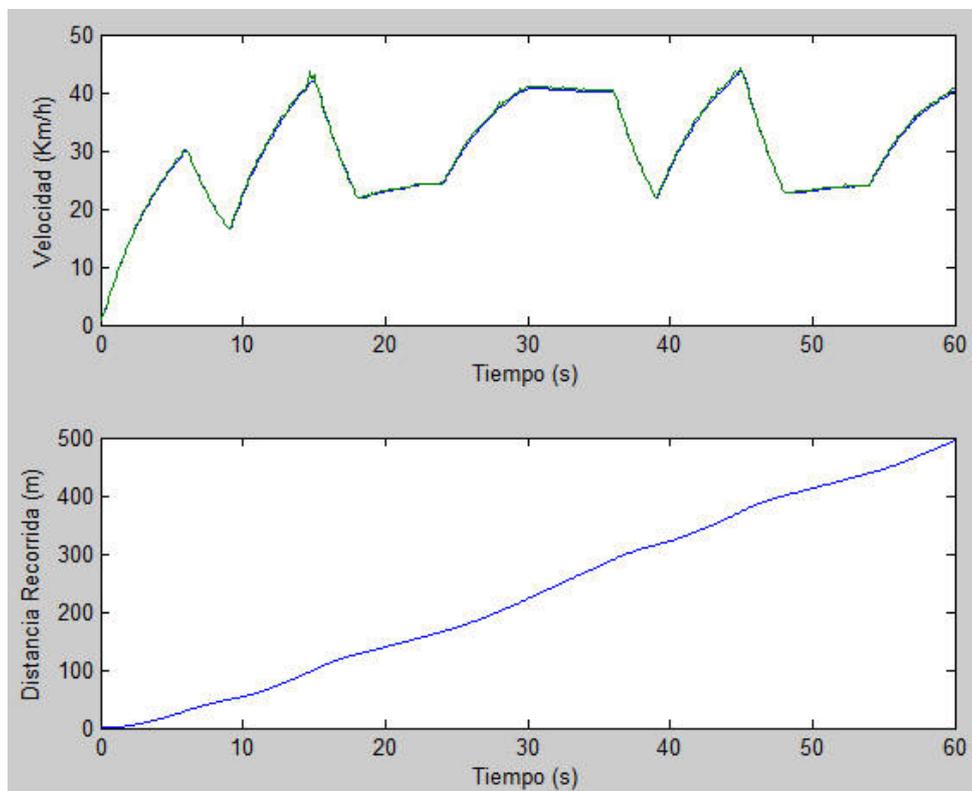


Fig 4.3 - Resultados obtenidos en la comprobación.



Se puede apreciar que existe una ligera diferencia entre la velocidad de las ruedas y la velocidad del vehículo, hay picos cuando se produce el deslizamiento entre neumáticos y asfalto, estos picos se acentúan cuando el vehículo está acelerando bruscamente, y en vehículos más potentes se notarían mucho más. En un coche real esto sería un derrape donde la rueda gira a más velocidad debido al deslizamiento.

Los resultados obtenidos son satisfactorios y se corresponden con lo esperado, el vehículo responde de forma rápida a la señal de entrada, como era de esperar debido a que los motores eléctricos tienen mayor velocidad de actuación que los motores de combustión típicos en la automoción.

4.2 IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DINÁMICO LINEAL

Con los resultados obtenidos es posible conseguir una identificación del modelo del vehículo, para obtener una función de transferencia que modele el funcionamiento del vehículo, pudiendo pasarlo a espacio de estados y utilizarla para el diseño de un PID o un control por realimentación de estados.

La identificación que se va a realizar va a obtener un sistema de segundo orden lineal, tal y como se explicó en el apartado anterior, que no se corresponde con el modelo más real del vehículo, que no es lineal, por tanto se conseguirá un modelo aproximado, que funcionará con la suficiente precisión para el objetivo de estas simulaciones.

La función de transferencia de un modelo de segundo orden será del tipo:

$$Gm(z) = \frac{b1 * z}{z^2 - a1 * z - a2} \quad (EC 4.1)$$

Mediante la identificación en matlab los coeficientes obtenidos son:

$$\mathbf{b1 = 0.3616; a1 = 1.551; a2 = -0.5577;}$$

Resultando la función de transferencia del modelo:

$$Gm(z) = \frac{0.3616 * z}{z^2 - 1.551 * z + 0.5577} \quad (EC 4.2)$$



Para el control por realimentación de estados que probaremos posteriormente se va a necesitar que el sistema esté representado en el espacio de estados, para ello a partir de la función de transferencia creamos el espacio de estado en variables de fase.

Utilizando los mismos coeficientes que se obtuvieron para la función de transferencia, una vez sustituidos los valores, las matrices de estados serán:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.5577 & 1.551 \end{bmatrix} \quad (EC 4.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (EC 4.4)$$

$$C = [0 \quad 0.3616] \quad (EC 4.5)$$

$$D = [0] \quad (EC 4.6)$$

Ambas formas representan el mismo sistema, y tienen un comportamiento idéntico, por lo tanto tienen los mismos polos de lazo abierto, que son los siguientes:

$$z_1 = 0.9857; z_2 = 0.5657;$$

Y el lugar de las raíces del sistema se puede ver en la figura 4.4, realizado con la función de matlab "rlocus".

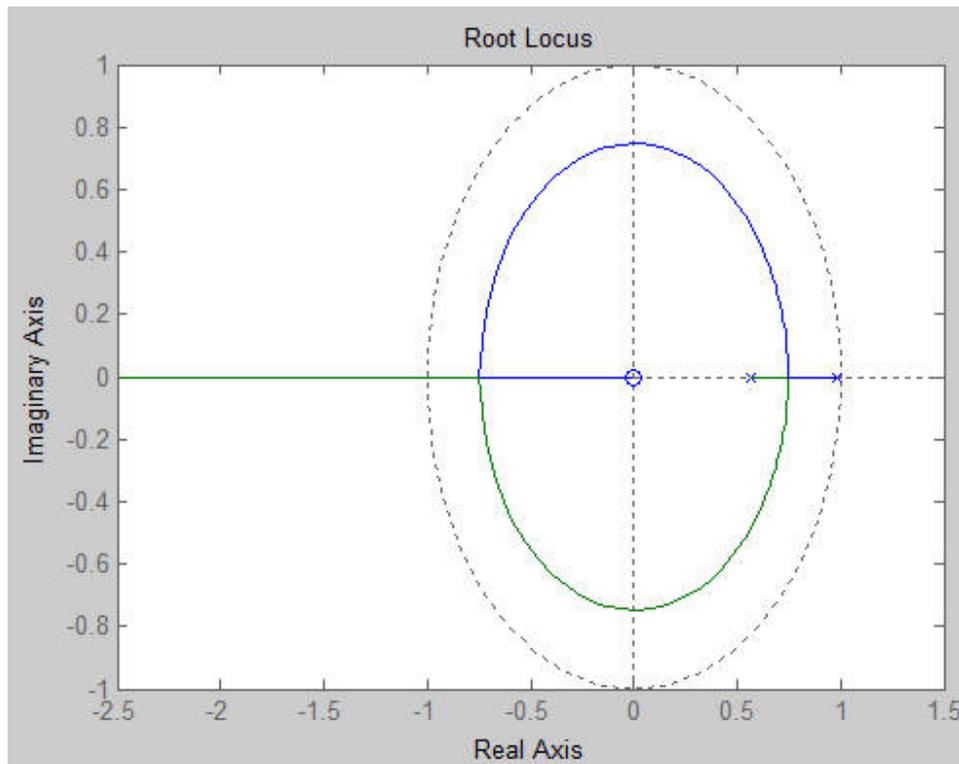


Fig 4.4– Lugar de las raíces del sistema.

La ganancia en lazo cerrado a partir de la cual el sistema es inestable es $K=8.61$, en este caso no se alcanzará tal ganancia así que el sistema será estable, que es, lógicamente, indispensable.

4.3 CONTROL PID

Esta solución para el control de la señal de entrada (acelerador/freno) es la más básica que se proba, consiste en colocar un PID antes de la entrada del sistema, este PID recibe una señal de error obtenida de la resta de una señal de referencia y la velocidad de salida del sistema.

La señal de referencia que aplicaremos será la velocidad deseada, es decir, la velocidad a la que se desea que se ponga el vehículo.

Para la simulación, la señal de referencia aplicada consistirá en varios escalones de distinta amplitud, siempre en el rango de valores de velocidades que el vehículo puede circular. Estos escalones se suavizarán gracias a un bloque función de transferencia que se colocará a



continuación del bloque que da la señal de entrada, esta función de transferencia suavizará la señal sin modificar el valor final.

La señal de error es por tanto una resta entre dos velocidades, por lo cual está en variables de velocidad (km/h), cuanto más cercana sea la velocidad del vehículo a la deseada, menor será la señal de error.

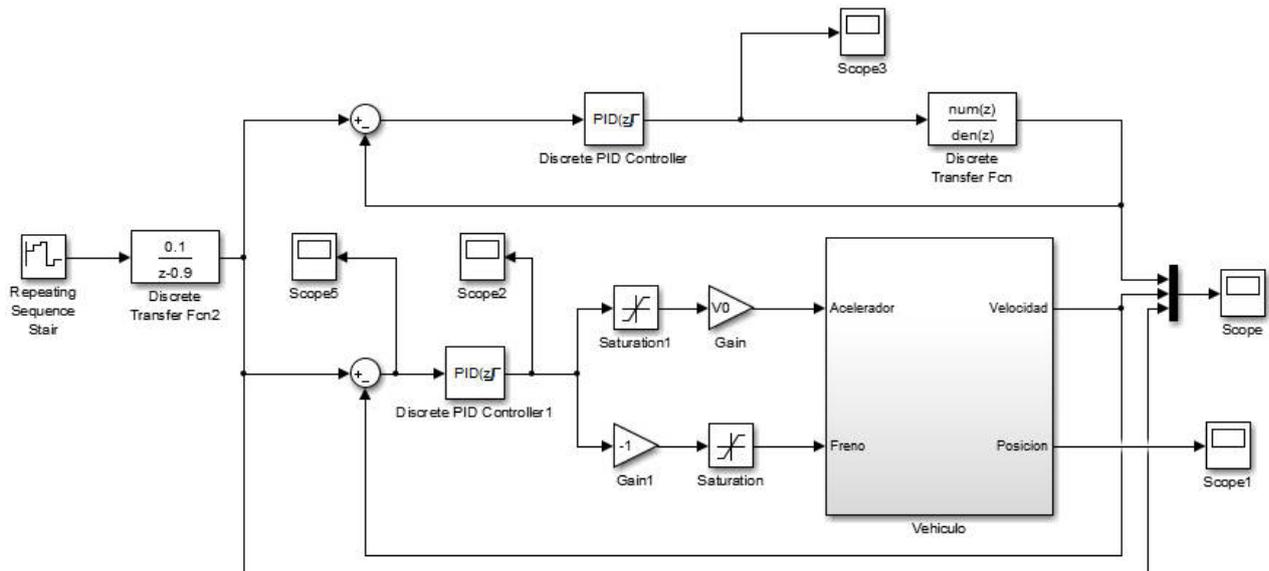


Fig 4.5– Bloques de Simulink para el diseño del PID.

La figura 4.5 muestra el sistema de bloques utilizados en Simulink para simular el sistema cuando se utiliza PIDs, se puede apreciar el bloque función de transferencia a continuación de la señal de entrada.

Se han colocado dos PID para las pruebas, aunque son exactamente el mismo y por lo tanto tienen el mismo funcionamiento, primero se diseñó el PID en el lazo con el modelo identificado, para después copiarlo y añadirle en el lazo del modelo "real". El bloque de la función de transferencia contiene la función obtenida en la identificación anterior.

El diseño del PID se ha realizado con una herramienta de matlab que ofrece un diseño gráfico con la respuesta a una entrada escalón, para ello linealiza la planta.

Con dicha herramienta se debe buscar un PID que no tenga ningún sobreimpulso y que tenga un buen tiempo de subida para la función que



cumple, este tiempo se ha estimado de unos 5 segundos. Estos requisitos son lo que cualquier usuario del vehículo querría para un vehículo urbano, es decir, que la velocidad no oscile, y que no tenga grandes acelerones.

En este caso se ha diseñado utilizando el dominio temporal, aunque también se podría haber usado el dominio de la frecuencia, donde habría que haber especificado el ancho de banda y el margen de fase.

Para el sistema que tenemos es imposible conseguir las especificaciones deseadas con este método, habrá que elegir entre un PID rápido o un PID sin sobreimpulso, o uno con unas características entre ambos, pero ninguno será del todo satisfactorio.

4.3.1 PID rápido

Primero haremos las pruebas con un PID que cumpla la condición del tiempo de subida:

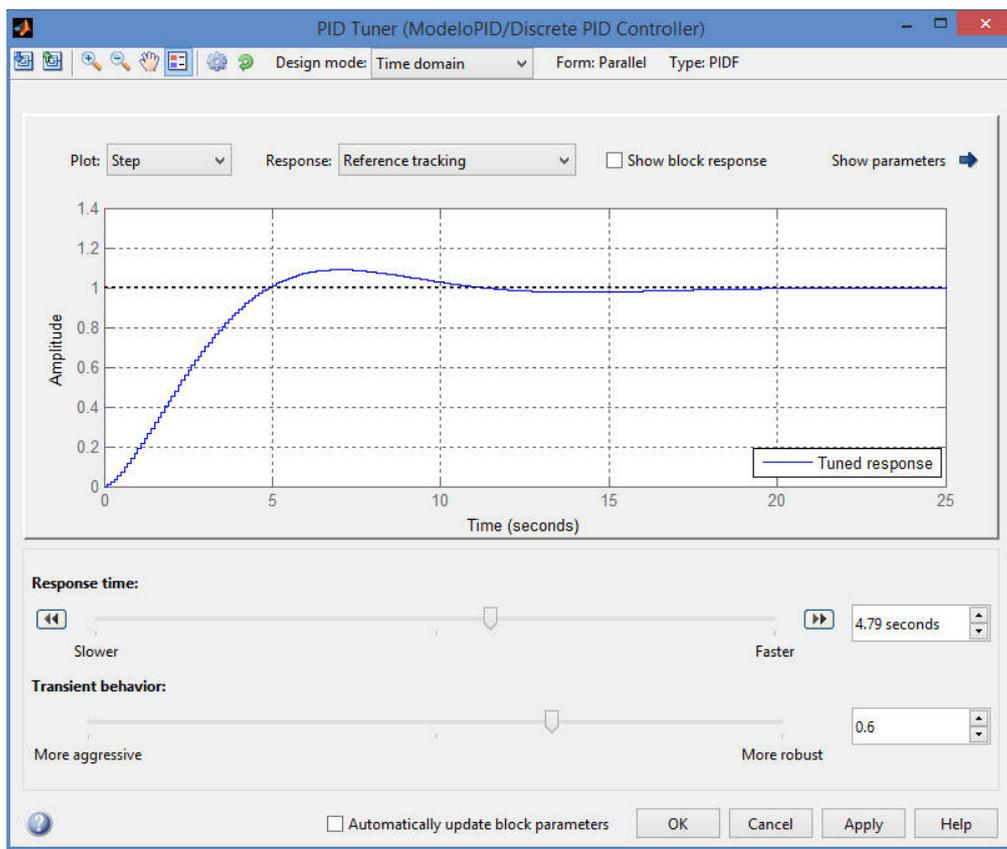


Fig 4.6 – Diseño gráfico de un PID rápido.



En la figura 4.6 se muestra la interfaz de matlab para el diseño de reguladores gráficamente, se puede apreciar el sobreimpulso que se generará.

El PID obtenido tiene la siguiente forma y parámetros:

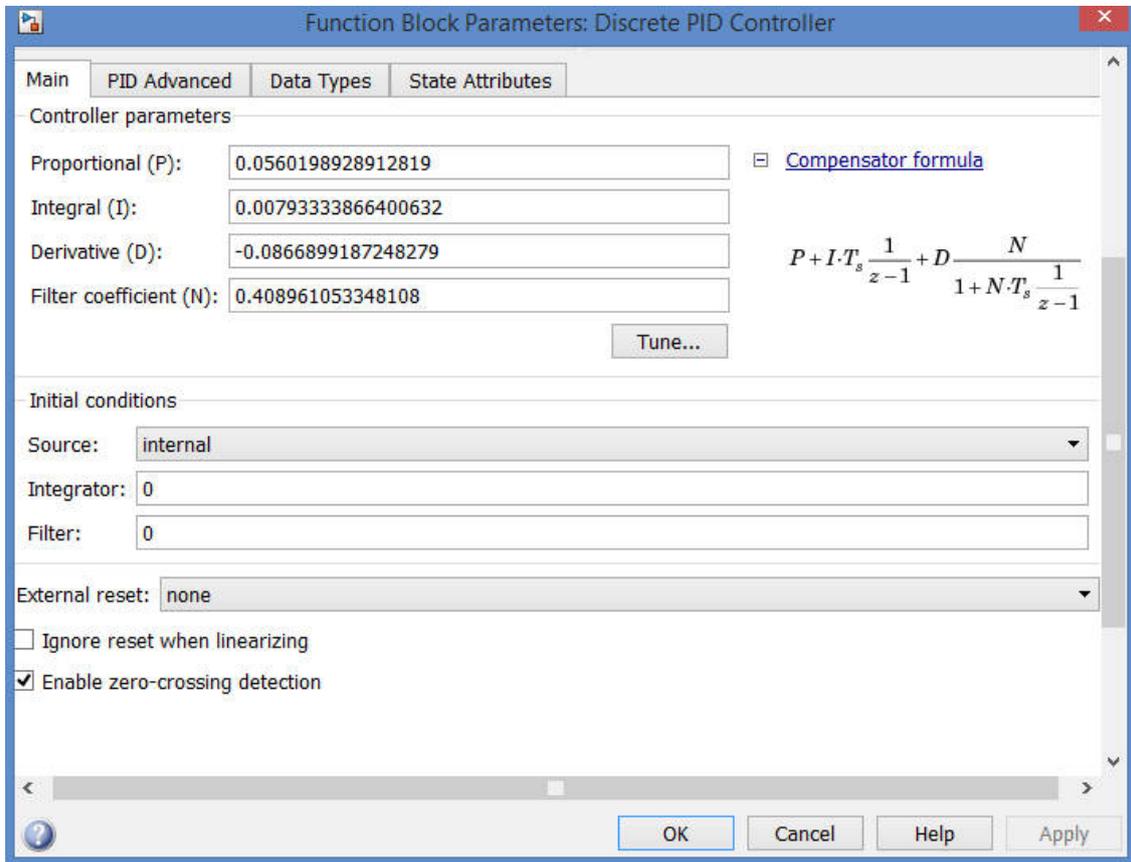


Fig 4.7– Parámetros del PID rápido.

La figura 4.7 contiene los parámetros del PID diseñado, así como la fórmula del PID.

En la figura 4.8 muestra la gráfica con los valores de:

- Velocidad según la función de transferencia.
- Velocidad según el modelo matemático del coche.
- Velocidad de referencia.

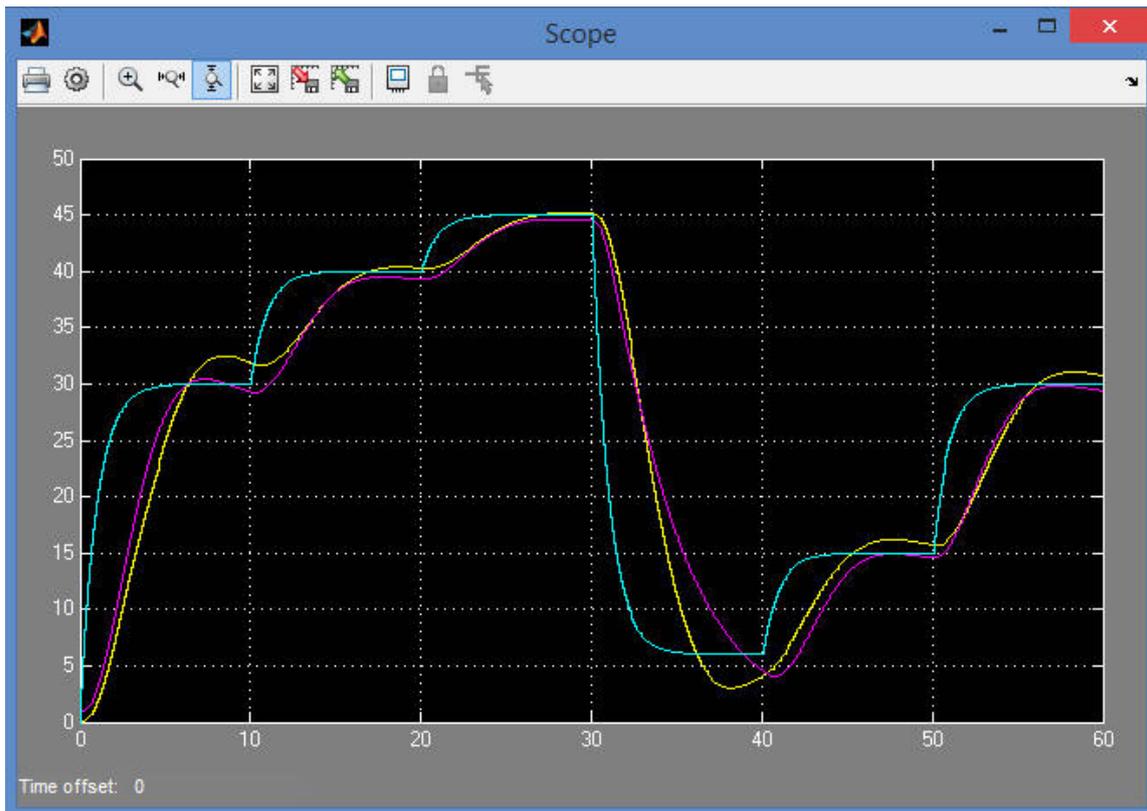


Fig 4.8– Resultados obtenidos con el PID rápido.

La señal azul es la señal de entrada, la amarilla la velocidad del modelo matemático, y la morada la velocidad del modelo de la función de transferencia.

Los resultados obtenidos no son satisfactorios, la velocidad del vehículo sobrepasa en momentos a la de referencia, debido a que tiene sobreimpulso. El tiempo que tarda en alcanzarla es aceptable (es más lento que los 5 segundos deseados, pero aun así es válido).

Además se ve una diferencia apreciable en el funcionamiento del PID para el modelo real y para el modelo identificado.

También es recomendable comprobar cómo será la señal de entrada (aceleración/freno) que se enviará a la controladora, y esta pasará después al motor.

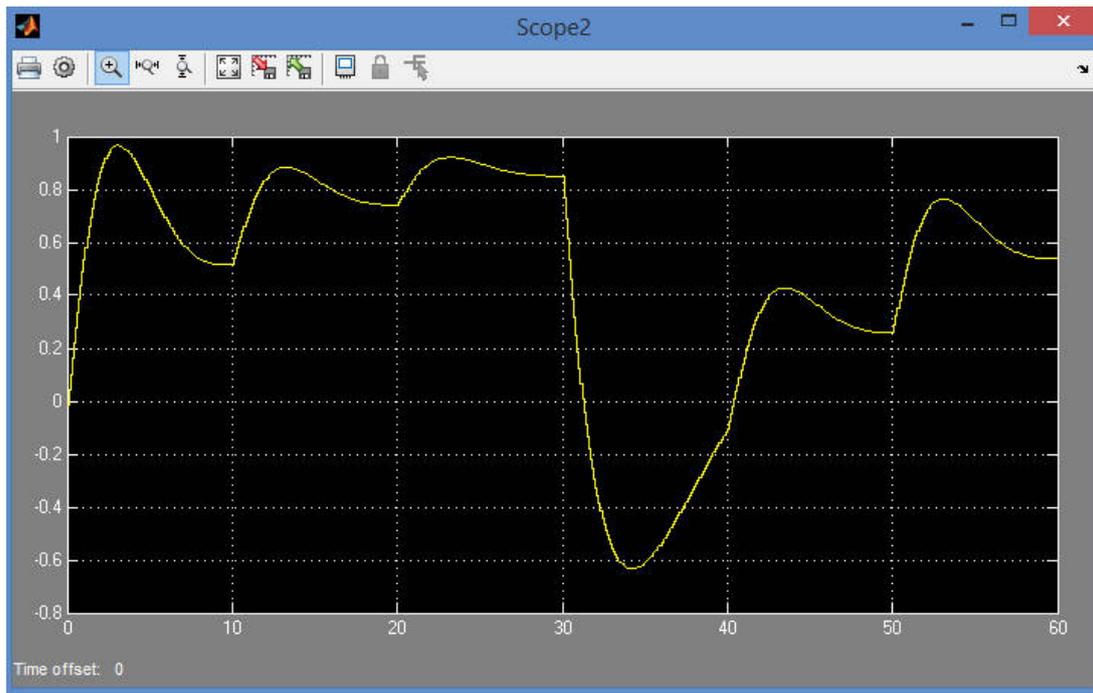


Fig 4.9– Señal de entrada con el PID rápido.

En la figura 4.9 se puede ver como sería la señal de entrada que se crearía.

Se puede apreciar que la señal no tiene cambios demasiado bruscos y la forma que tiene podría ser válida para el modelo final.

Una forma de obtener un valor para ver como de buenos son los resultados es calcular el error cuadrático medio, para ello se eleva al cuadrado una señal de error, que será el resultado de la resta del valor de la velocidad de referencia y el valor de velocidad real, después se integra y se divide entre el tiempo de simulación, obteniendo así un valor que determinará el error que se produce con el sistema de control. Evidentemente, cuanto menor sea el error, mejor será nuestro sistema.

Los bloques utilizados para el cálculo del error cuadrático medio se pueden ver en la figura 4.10.

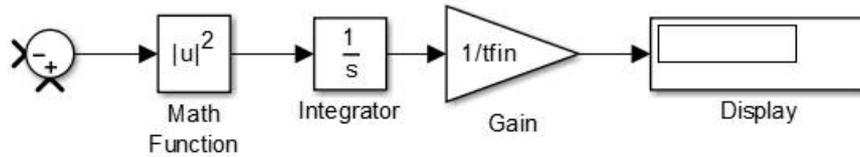


Fig 4.10 – Bloques para el cálculo del error cuadrático.

El error cuadrático que se obtiene con la simulación de PID rápido es de 52.02, que se comparara con los obtenidos en las siguientes simulaciones.

4.3.2 PID sin sobreimpulso

En este caso diseñaremos un PID que no tenga sobreimpulso, sacrificando así la velocidad.

En la figura 4.11 se puede ver la respuesta a un escalón en la interfaz de diseño de Matlab, donde se aprecia que la respuesta no tiene sobreimpulso, tal y como se desea.

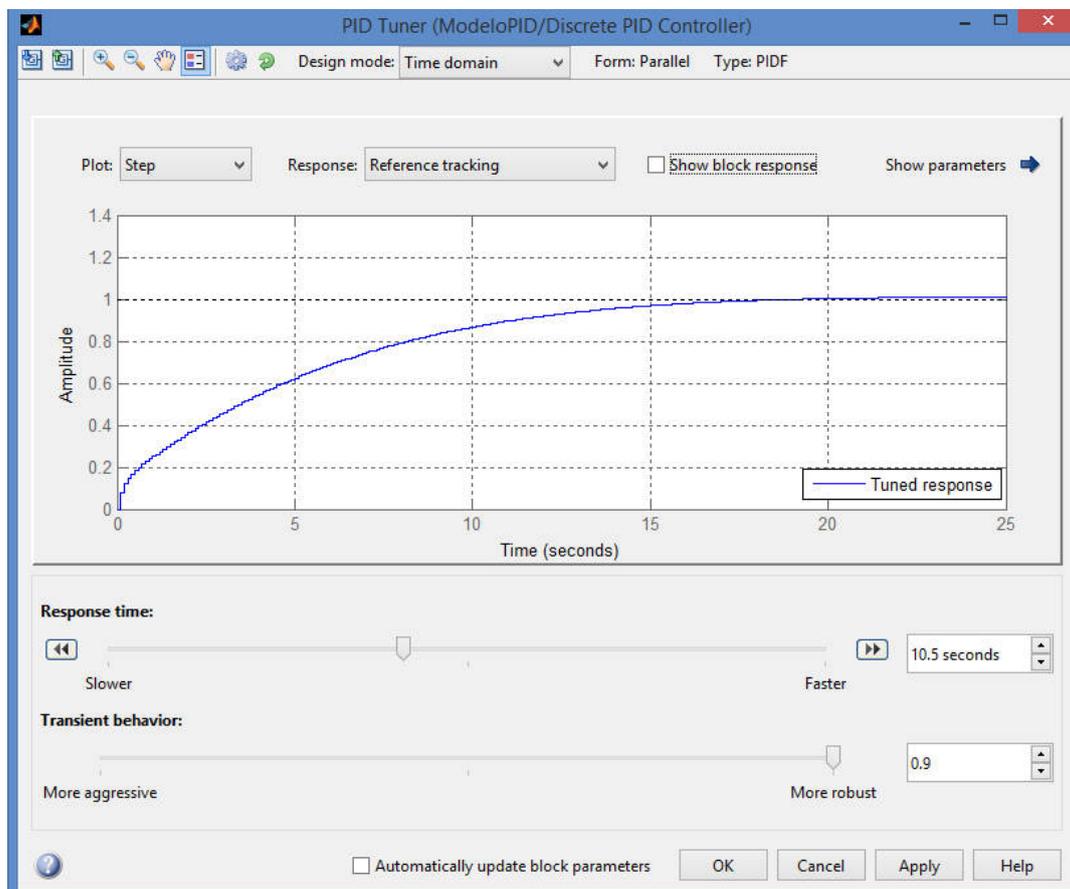


Fig 4.11 – Diseño gráfico de un PID sin sobreimpulso.



Se puede ver que en principio es demasiado lento para el objetivo que se busca.

Los parámetros de este PID son:

Controller parameters

Proportional (P):	<input type="text" value="0.0235110476647527"/>	<input type="checkbox"/> Compensator formula $P + I \cdot T_s \frac{1}{z-1} + D \frac{N}{1 + N \cdot T_s \frac{1}{z-1}}$
Integral (I):	<input type="text" value="0.00378247355918357"/>	
Derivative (D):	<input type="text" value="0.018224708141221"/>	
Filter coefficient (N):	<input type="text" value="10.4349639056962"/>	

Fig 4.12 – Parámetros del PID sin sobreimpulso.

La figura 4.12 muestra los parámetros que tiene este nuevo PID, y la fórmula que lo define.

En la figura 4.13 se puede ver cuál sería las respuestas en el caso de utilizar este PID, igual que en la figura 4.8, la señal azul corresponde a la señal de referencia, la amarilla a la velocidad del modelo matemático, y la morada corresponde a la velocidad del modelo de la función de transferencia.

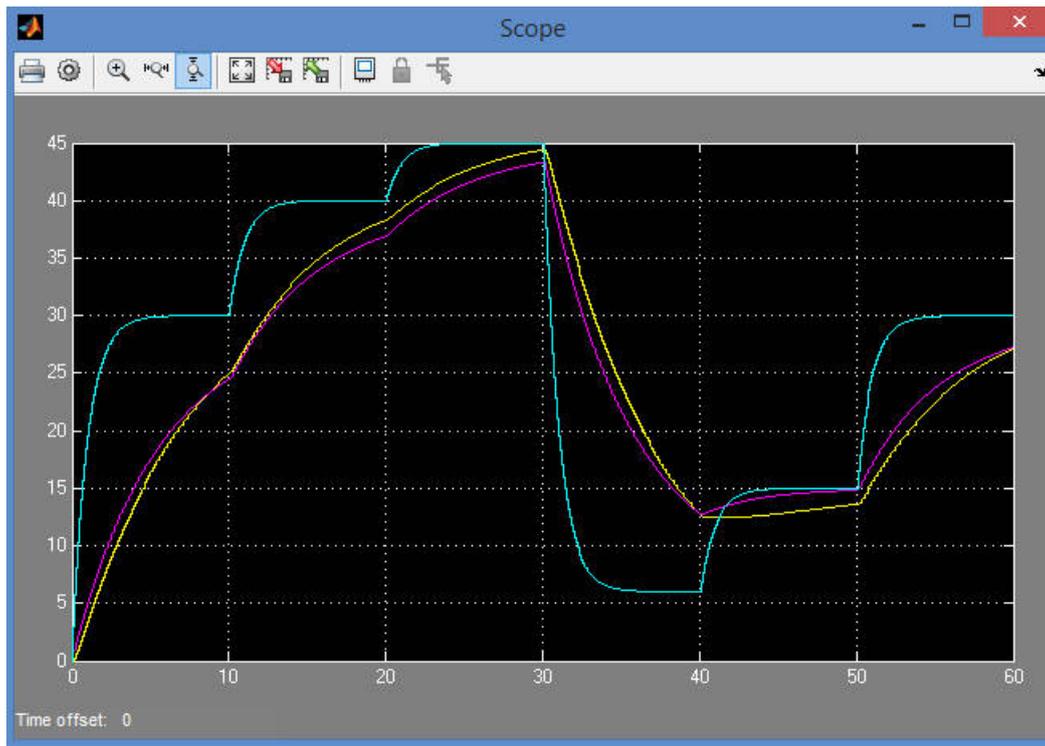


Fig 4.13 – Respuesta del sistema usando un PID sin sobreimpulso.

Evidentemente este PID no cumple con lo deseado, es demasiado lento para implementarlo en un vehículo, ya que tardaría unos 15 segundos en alcanzar la velocidad deseada.

El error cuadrático obtenido con este PID es de 72,05, que es ampliamente superior al del PID rápido.

Así que esta opción queda descartada, ya que un PID rápido como el probado anteriormente, aun con sobreimpulso, funciona mucho mejor que este.

4.3.3 PID con ligero sobreimpulso.

Este PID se diseñara buscando un caso medio entre los dos anteriores, se sacrificará un poco de velocidad a cambio de reducir un poco de sobreimpulso, y se comparará con los anteriores.

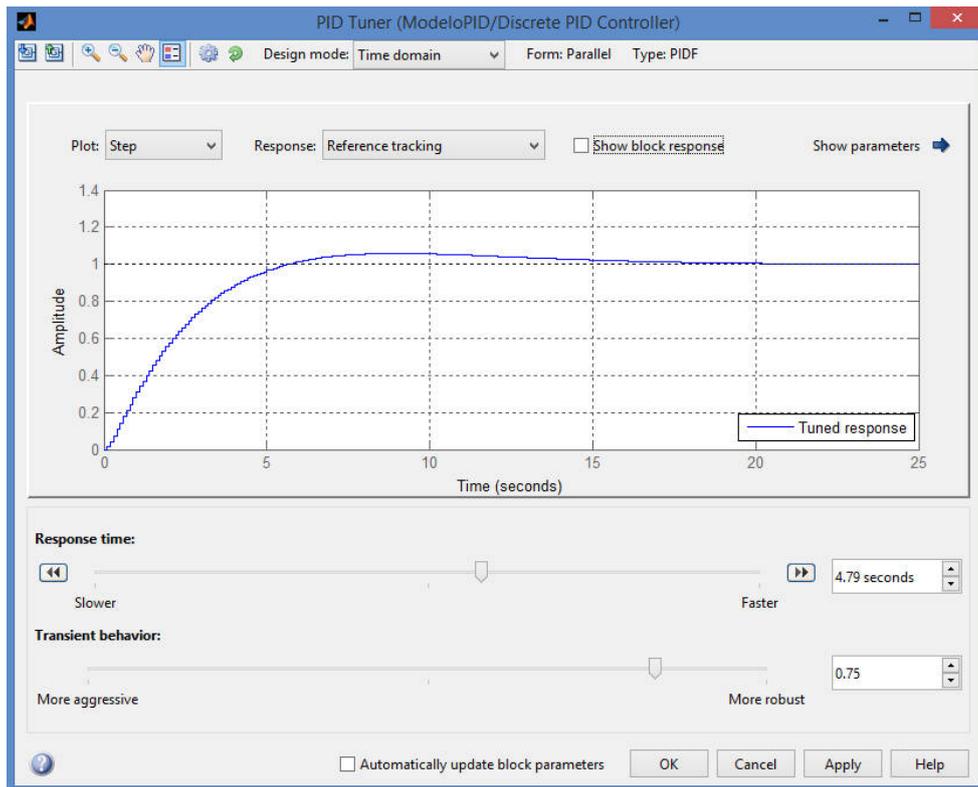


Fig 4.14 – Diseño gráfico del PID.

La figura 4.14 muestra la interfaz de diseño del nuevo PID, donde se puede apreciar las condiciones que se querían, tales como una mayor velocidad que el anterior, y un menor sobreimpulso.



Fig 4.15 – Parámetros del PID.

La figura 4.15 muestra los parámetros del PID, aunque se puede apreciar que pese a que el diseño que en principio era de un PID, se ha convertido en un PI, ya que la parte derivativa es nula.

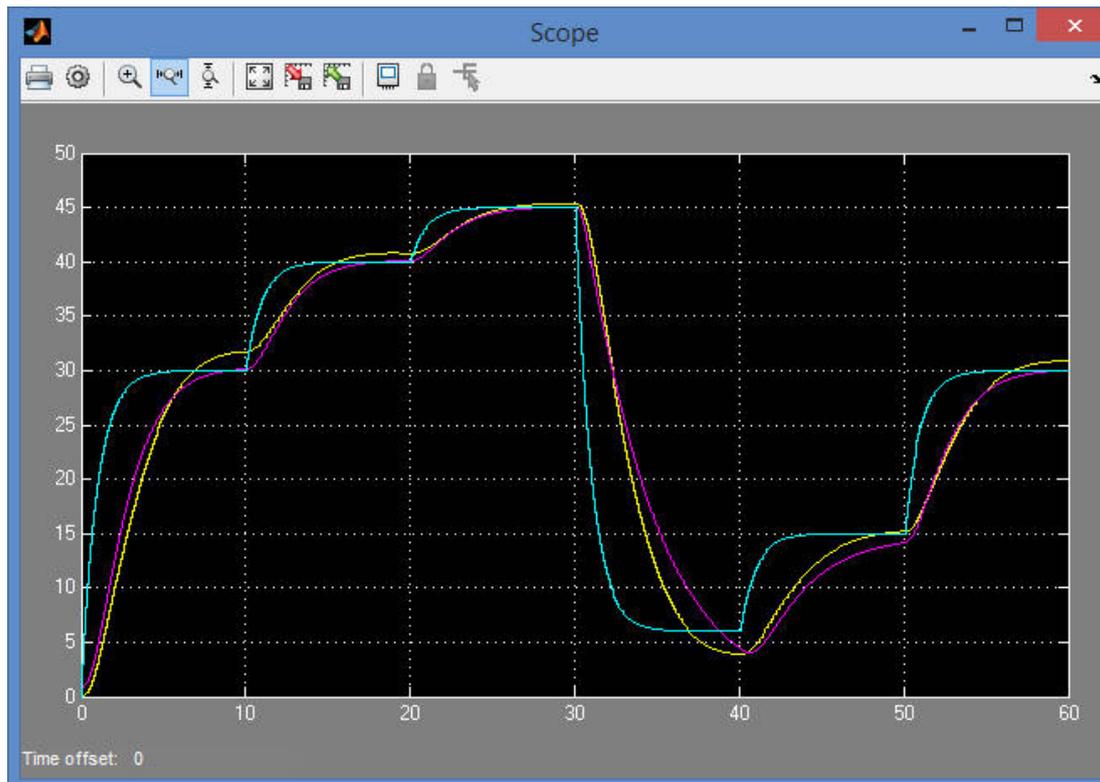


Fig 4.16 – Resultados de la simulación con un PI.

Los resultados obtenidos por el PI se muestran en la figura 4.16, se utiliza el mismo código de colores que en los anteriores casos.

Tal y como se hizo con el primer PID se comprobará la forma de la señal de acelerador/freno que se aplicaría al motor, esta señal se puede ver en la figura 4.17.

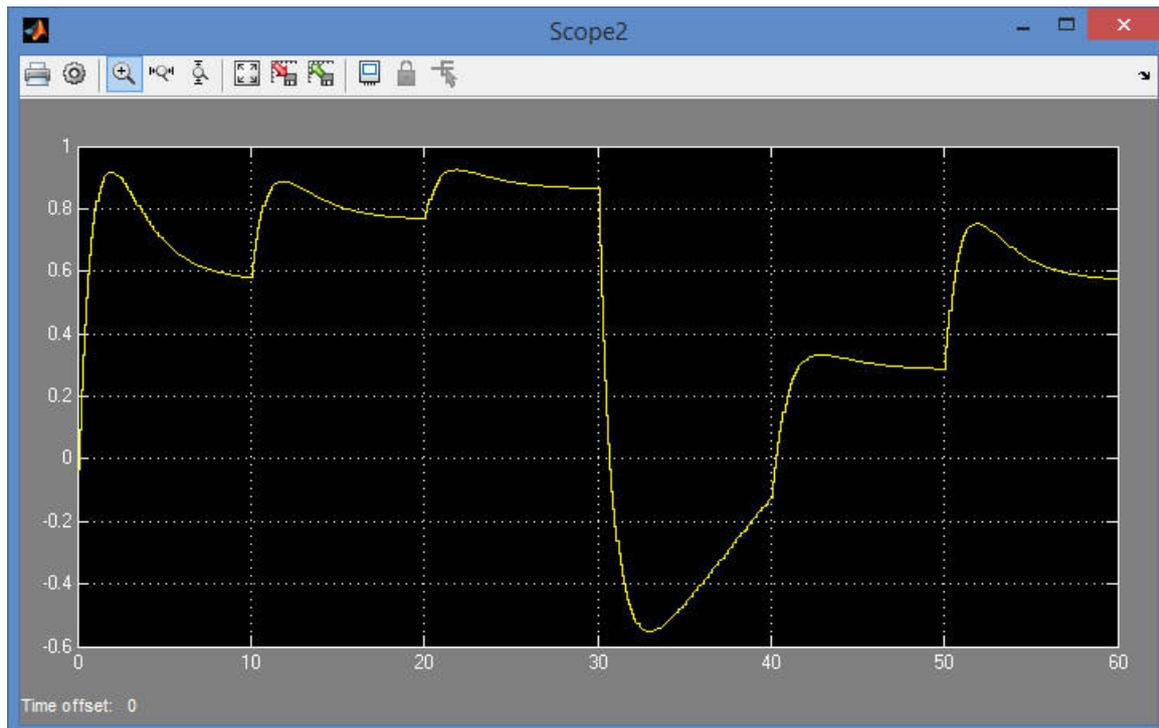


Fig 4.17 – Señal de entrada al motor.

Esta señal es muy similar a la obtenida con el PID rápido, y como se dijo es satisfactoria debido a su suavidad y ausencia de cambios bruscos.

Por último se calcula el error cuadrático producido en la simulación, que en este caso es de 41,83, que es inferior al que resulto con el PID rápido, por lo tanto este último PI tiene unos resultados mejores que los obtenidos con otros PID.

4.4 CONTROL POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS

4.4.1 Realimentación de estados típica

El primer paso será comprobar la controlabilidad de nuestro modelo, realizando las comprobaciones necesarias se verifica que la matriz de controlabilidad es de rango 2, por lo tanto es completamente controlable y se podrá aplicar la realimentación de estados.

También habrá que calcular las ganancias "K" y "L", haciendo uso de la fórmula de Ackermann, para ello se necesita colocar los polos deseados. Para la ganancia de realimentación de estado se ha elegido un polo doble



en $z = 0.9$, y para la ganancia "L" del observador el polo será también doble pero en este caso en $z = 0.5$, lógicamente todos los polos están centro del círculo unidad para asegurar la estabilidad. Además, para el correcto funcionamiento del sistema se usan unos polos más rápidos para "K".

Por último se calcula la ganancia "K₀" que hace que la señal de referencia esté dimensionada para que la realimentación de estados sea correcta, para el cálculo de estas ganancias se han aplicado las técnicas descritas en el apartado anterior "3 TÉCNICAS DE CONTROL".

Las ganancias obtenidas mediante matlab son:

$$K = [0.2523 \quad -0.2485]$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.5258 \\ 0.5251 \end{bmatrix}$$

$$K_0 = 0.0277$$

El modelo resultante en Simulink se puede ver en la figura 4.18.

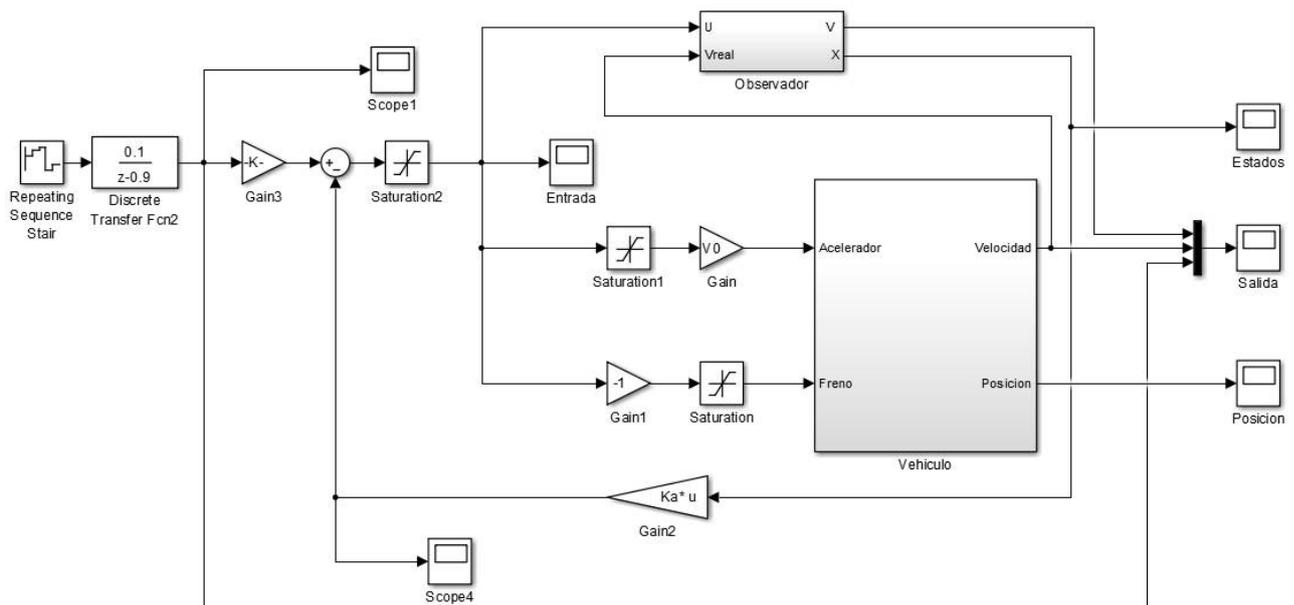


Fig 4.18-Bloques de Simulink para la realimentación de estados.



La ganancia de compensación es la situada en la entrada llamada "Gain3", la ganancia de realimentación de estados es "Gain2", y la matriz "L" está dentro del bloque "Observador".

En la figura 4.19 se muestra el sistema de bloques para el observador, donde se puede ver la matriz "L" como la ganancia "Gain2", el resto de las ganancias son las matrices que definen el sistema (A, B y C).

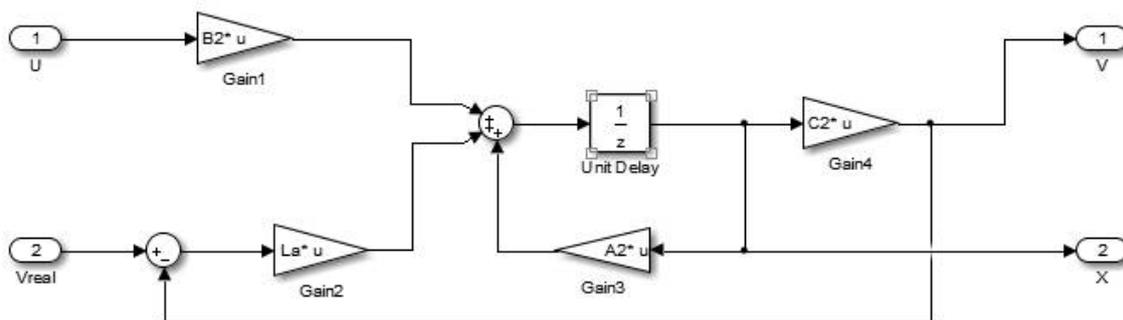


Fig 4.19- Observador de estados.

Como entrada del sistema llega una señal de referencia en unidades de velocidad, que será la velocidad deseada, en el caso de la simulación se ha puesto una señal con valores de velocidad a los que nuestro coche puede funcionar, además se ha puesto a propósito un descenso muy pronunciado de la velocidad para comprobar la capacidad de frenado.

En la figura 4.20 se aprecia la señal de salida (velocidad) de tanto el observador como del modelo matemático del sistema, y la velocidad de referencia aplicada.

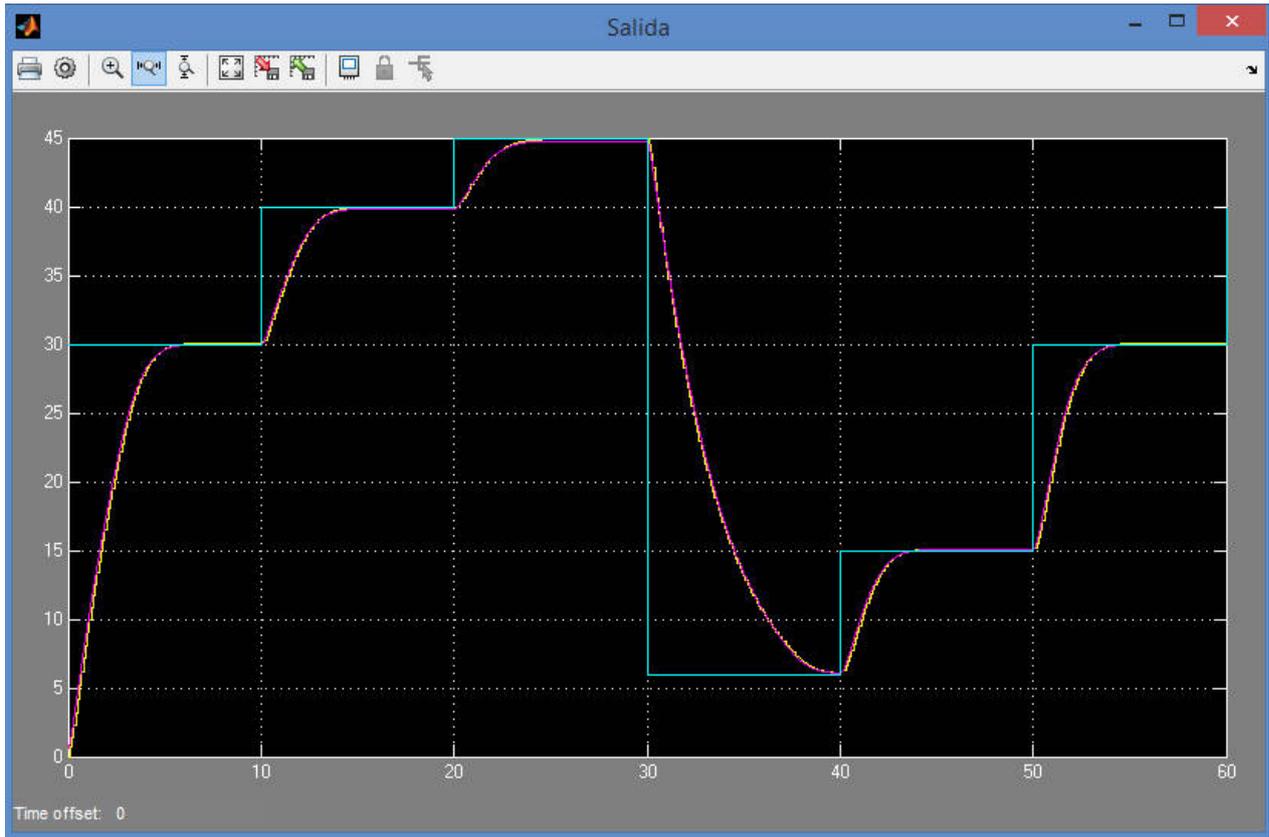


Fig 4.20– Resultados obtenidos con realimentación de estados.

Se puede apreciar que el control es realmente bueno, con un tiempo de establecimiento menor de 5 segundos, y sin ningún sobre impulso, además el valor final es el deseado.

La señal de entrada al motor se muestra en la figura 4.21.

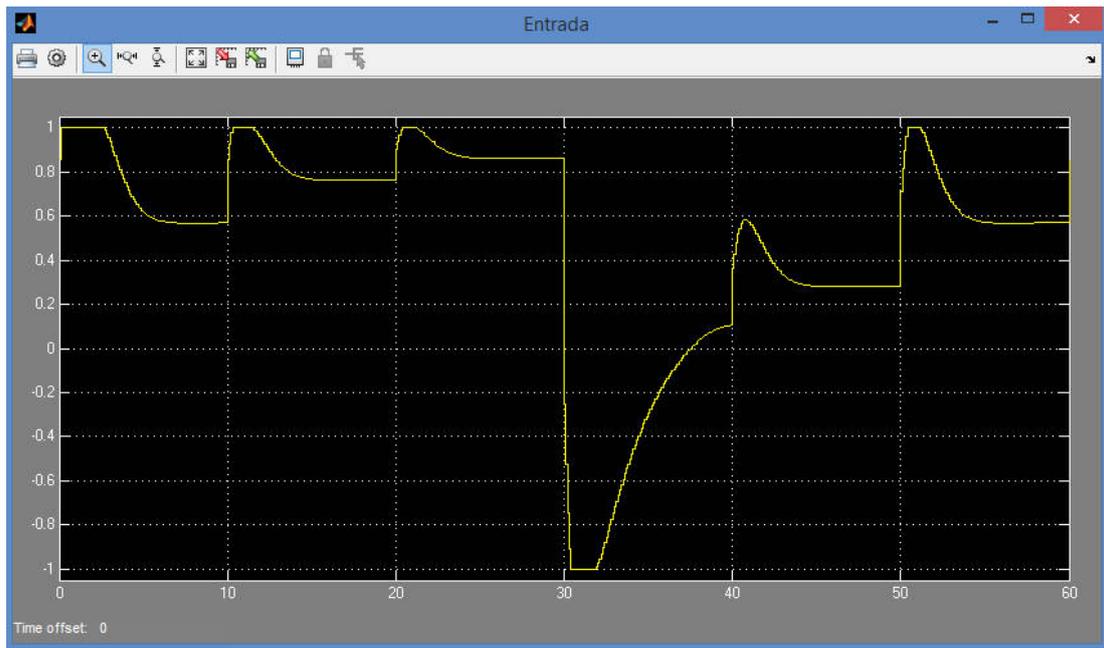


Fig 4.21– Señal de entrada con realimentación de estados.

En este caso la señal de entrada al motor generada también suave como con el PID. Además, se puede apreciar que la señal está saturada en ciertos puntos, aunque esto no supone un problema.

A continuación, tal y como se hizo en el apartado del PID, se introducirá un bloque función de transferencia para suavizar la señal de referencia usada.

Los resultados con esta configuración se muestran en la figura 4.22, en los cuales se utilizan los mismos colores que en anteriores ocasiones.

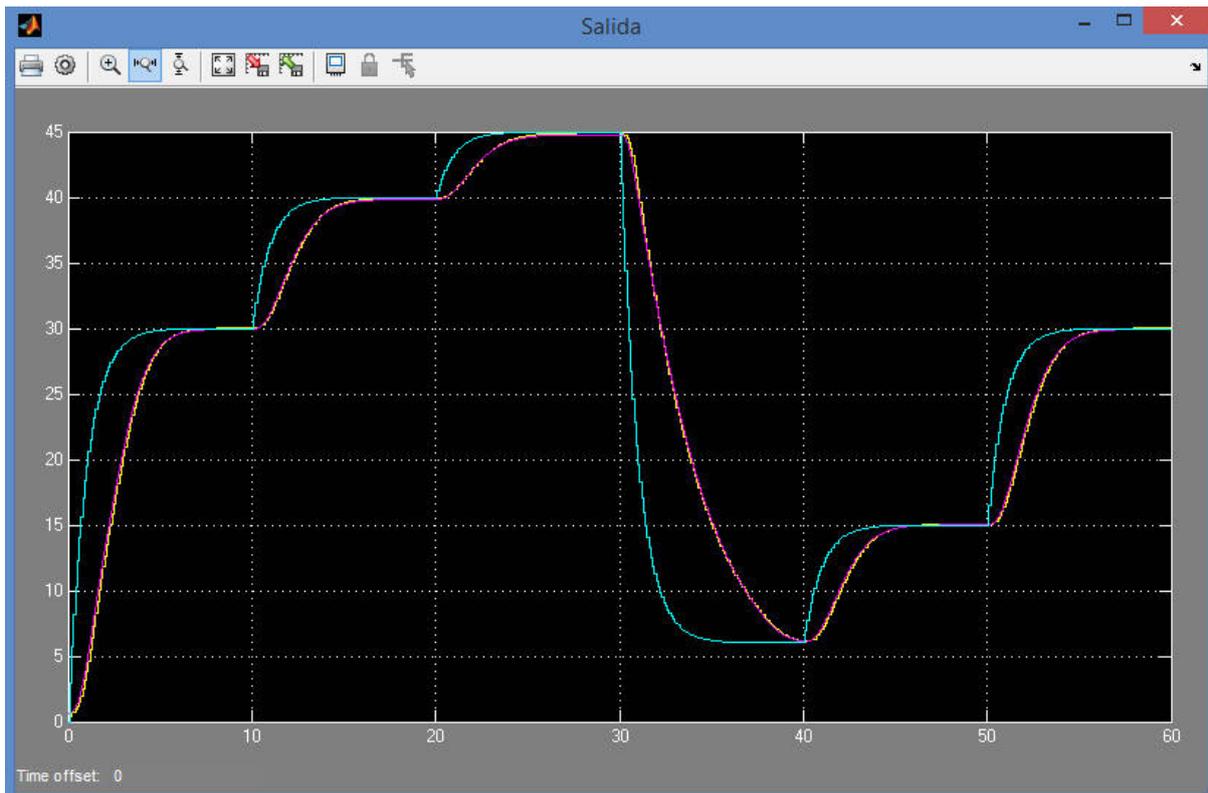


Fig 4.22– Resultados obtenidos con la referencia suavizada.

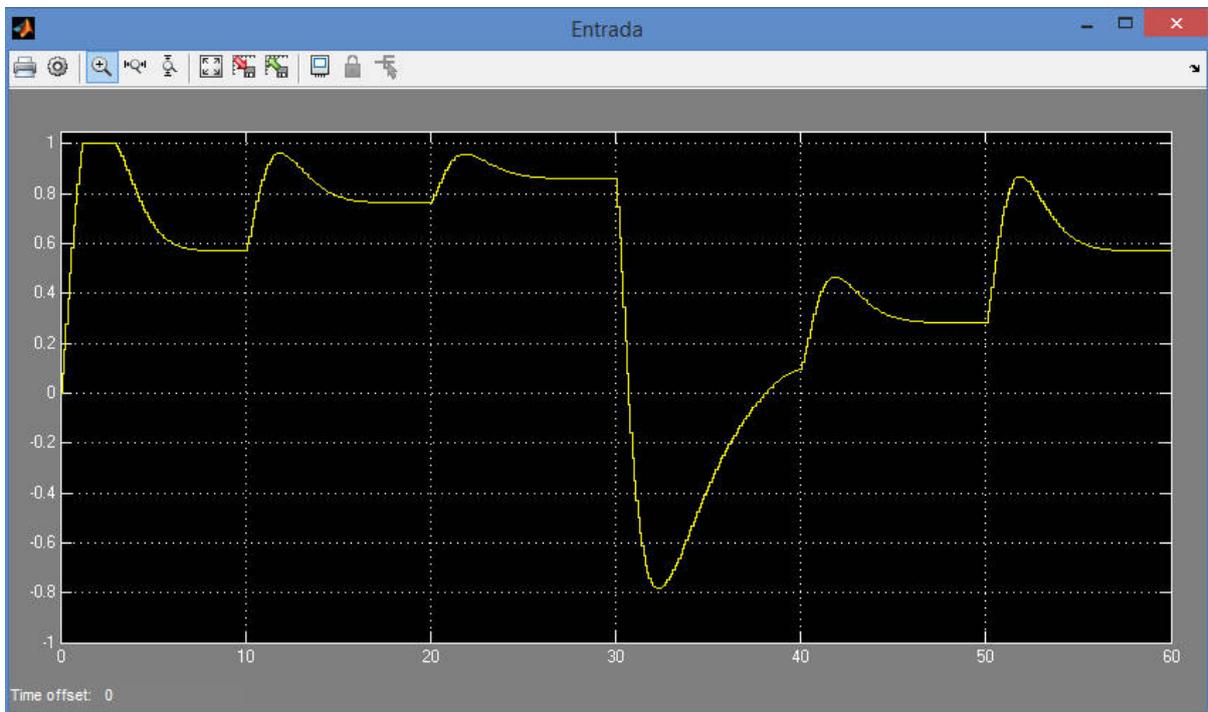


Fig 4.23– Señal de entrada con la referencia suavizada.

La figura 4.23 muestra la señal de entrada generada por el sistema de control.



Como se puede apreciar los resultados son los deseados, se ha añadido suavidad a la señal de entrada al motor, además en este caso solo se ha producido saturación en un punto, por lo que el funcionamiento es más adecuado.

El valor obtenido del error cuadrático, tal y como se hizo en el apartado del PID, para la realimentación de estados típica, con la entrada suavizada es de 36,04.

4.4.2 Realimentación de estados con un PI

Otra forma más compleja para el control consiste en añadir un Integrador o un PI (en este caso se ha elegido un PI), para ello se crea una señal de error que será la diferencia entre la señal de entrada de la velocidad de referencia, y la señal de salida de la velocidad real, esta señal de error se lleva al PI que nos dará una señal que sería nuestra entrada en el sistema de realimentación de estados normal, en este caso la constante K_0 utilizada en el caso anterior se puede eliminar e introducir en el PI.

El sistema de bloques utilizado en Simulink se puede ver en la figura 4.24.

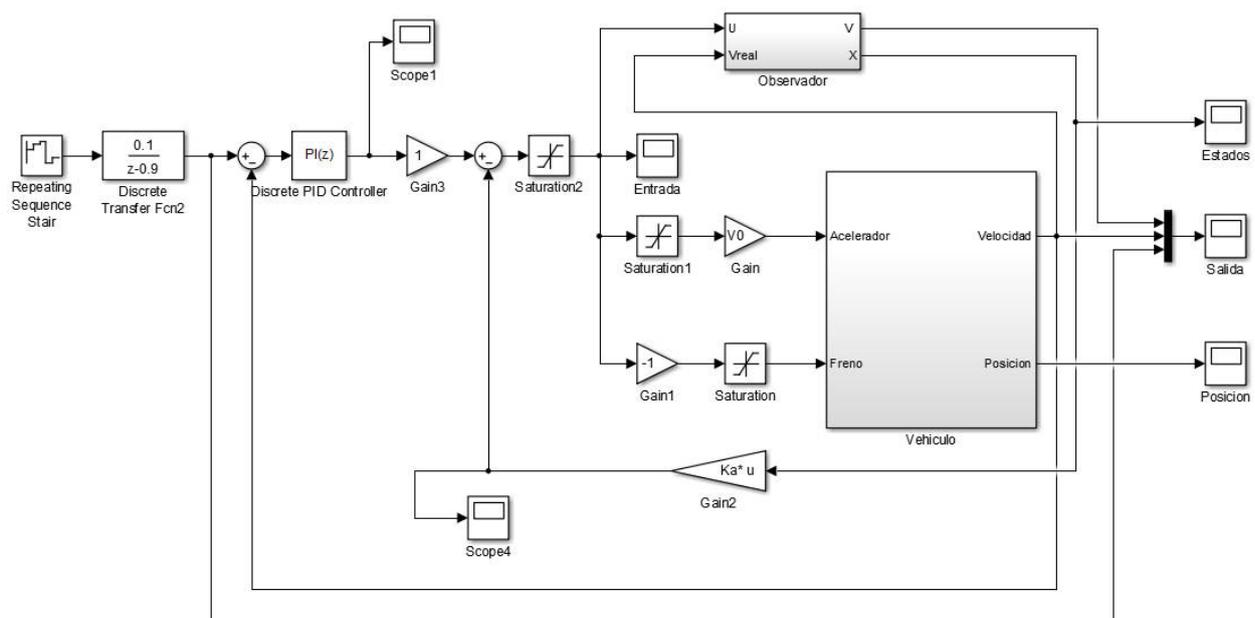


Fig 4.24 – Bloques de Simulink con realimentación con PI.



La señal de entrada es la misma que en el caso anterior, con escalones con amplitudes positivas y menores de 45 (Km/h), y también incluye una deceleración para tener un tiempo de frenada.

El PI en este caso se ha regulado viendo los resultados de las simulaciones y cambiando los parámetros para ir convergiendo a resultados más satisfactorios.

Tanto los parámetros del PI como la fórmula que lo define se pueden ver en la figura 4.25.

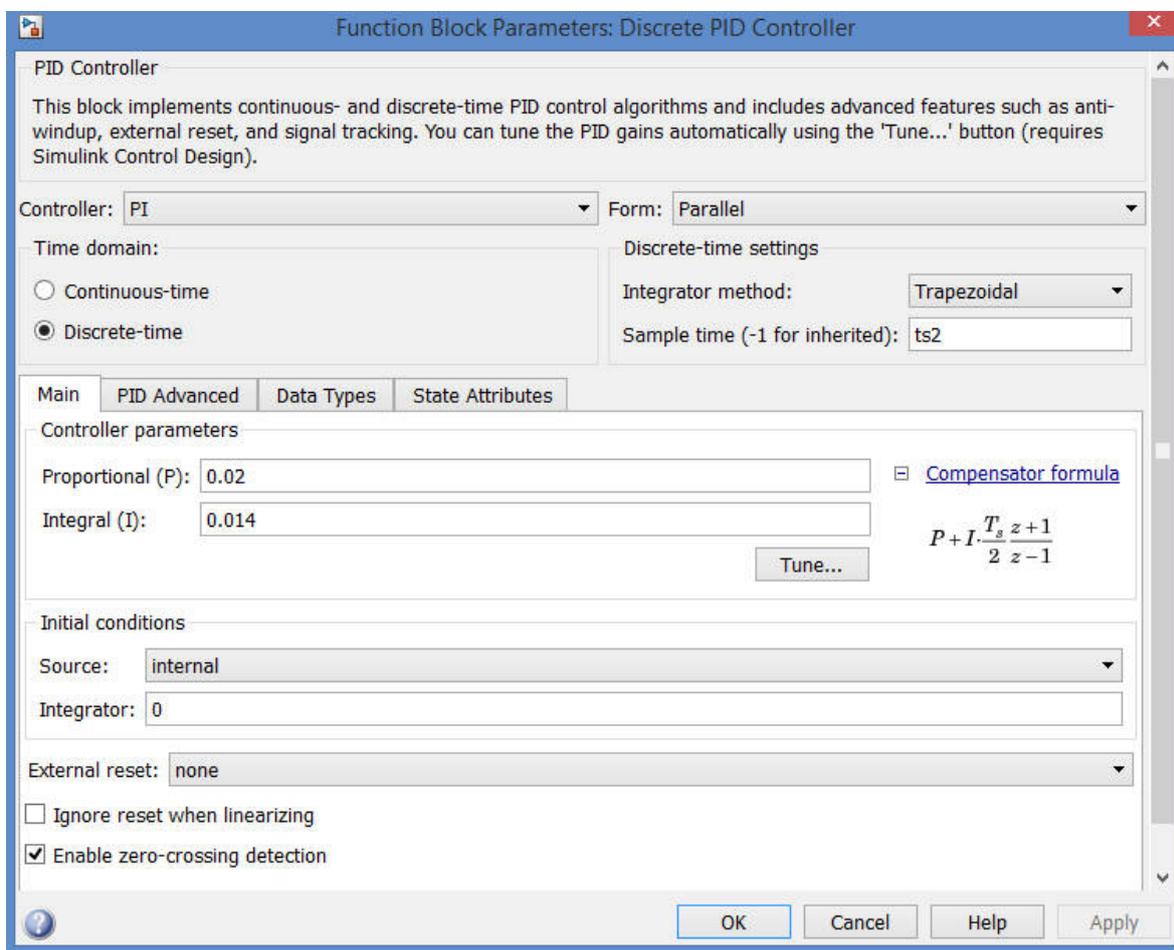


Fig 4.25– Diseño del PI.

Con este control los resultados obtenidos son mostrados en la figura 4.26, al igual que en apartados anteriores se muestra las velocidad del observador y del modelo del vehículo, y la velocidad de referencia de entrada.

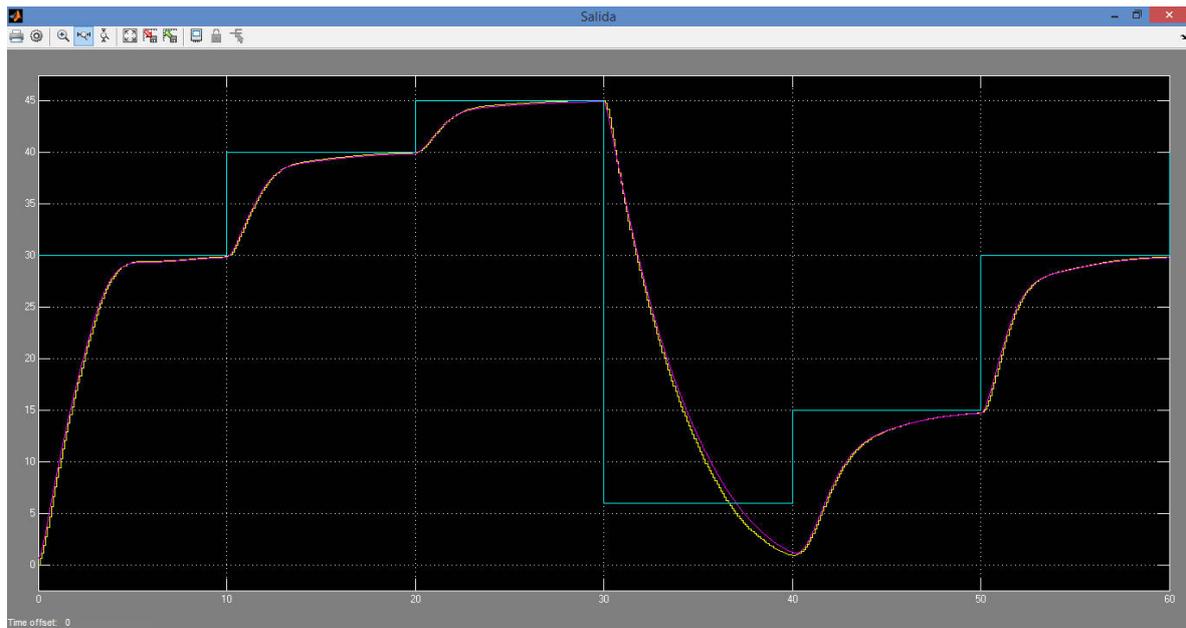


Fig 4.26 – Resultados con realimentación con PI.

Se puede apreciar que en la frenada la velocidad no parece estabilizarse en el valor deseado, lo cual es insatisfactorio, en las aceleraciones sin embargo el control es bueno.

Los resultados son peores que con el control por realimentación de estados típico, el error cuadrático cometido es de 74,26, que es considerablemente superior a los conseguidos anteriormente.

Como en anteriores apartados se comprobará la señal de entrada entregada al motor, esta señal se muestra en la figura 4.27.

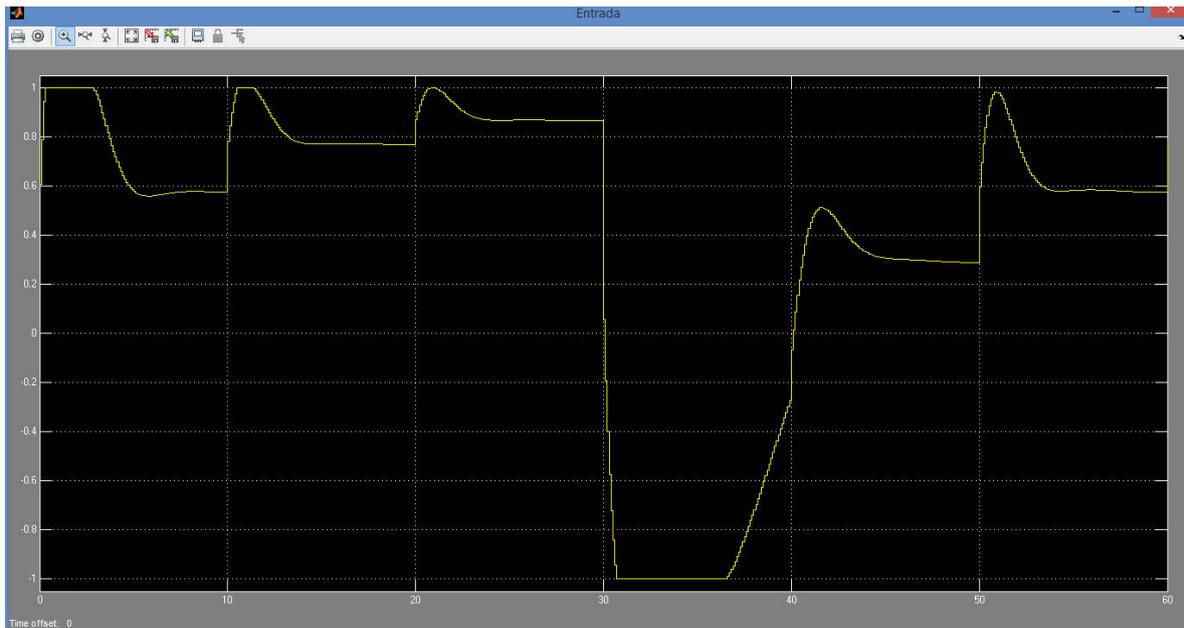


Fig 4.27– Señal de entrada con realimentación con PI.

Esta señal no es lo suficientemente suave para el objetivo que tienen, y además está demasiado saturada, por lo tanto el control no es óptimo.

Como en el caso anterior se puede introducir un bloque función de transferencia para evitar los escalones muy pronunciados y mejorar las señales, los resultados obtenidos son los mostrados en la figura 4.28.

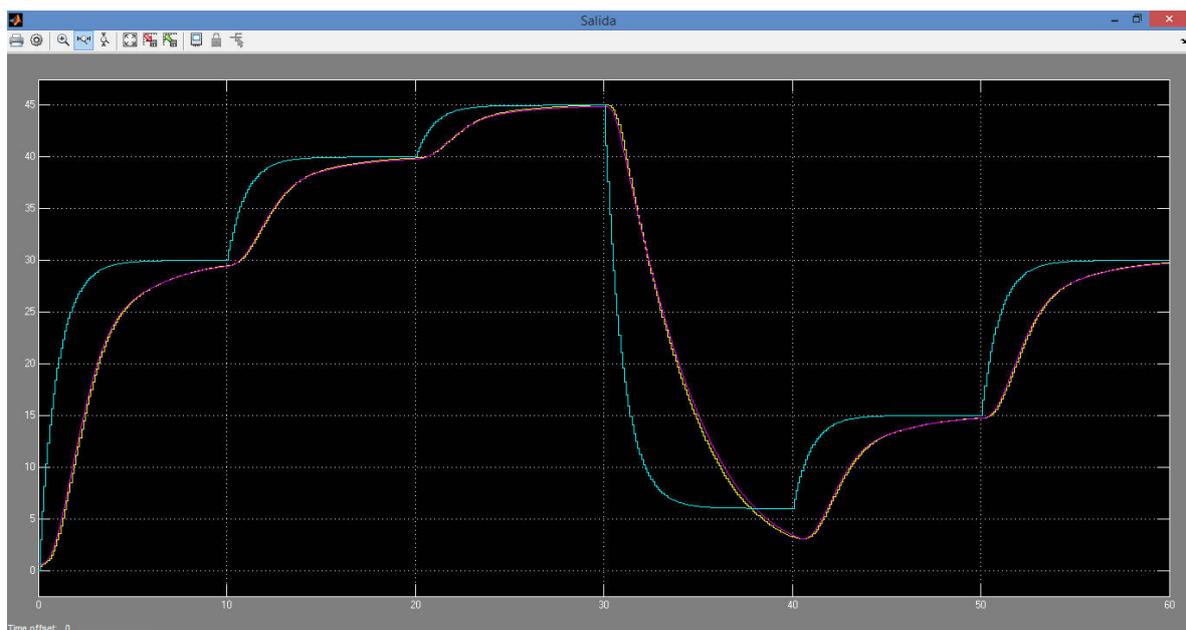


Fig 4.28– Resultados con la referencia suavizada

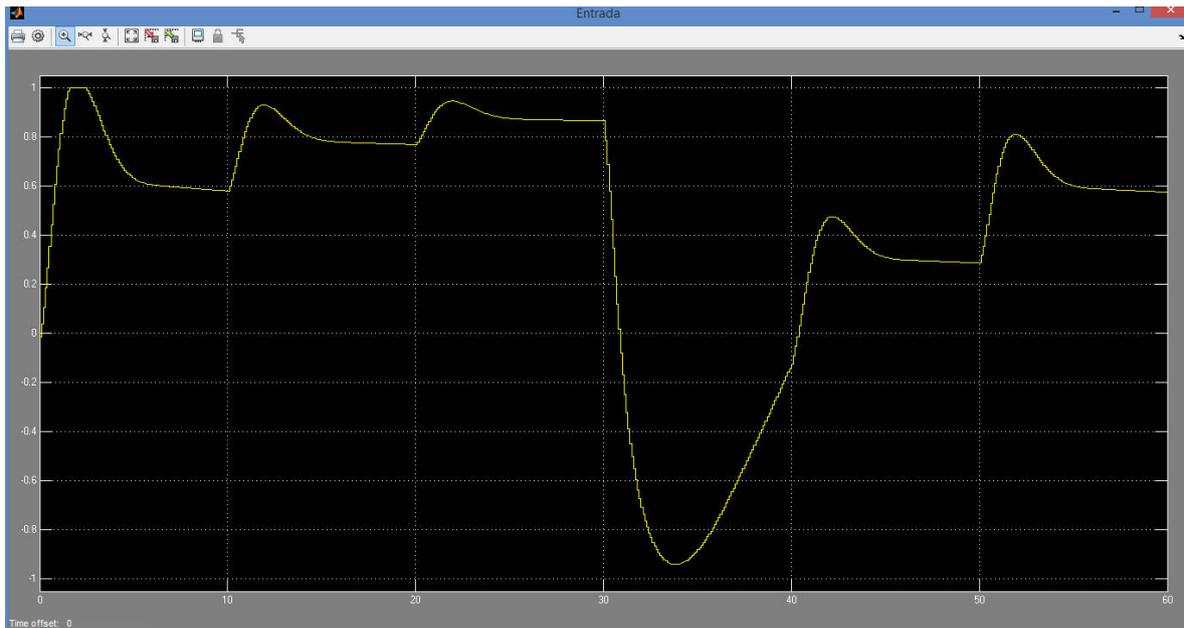


Fig 4.29 – Señal de entrada con referencia suavizada.

En la figura 4.29 se puede ver la señal de entrada generada cuando la señal de referencia ha sido suavizada.

Se puede apreciar que los resultados se corresponden con lo esperado, incluso se elimina parcialmente el error que se producía en el frenado.

La saturación de la entrada desaparece casi por completo y además la forma de la señal es más suave.

Al igual que en el apartado anterior se calculara el error cuadrático, para obtener un valor objetivo de como de bueno es esta forma de control. En este caso el valor del error cuadrático medio es de 43,23.

4.5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con estas simulaciones son buenos, ya que se consigue que la velocidad llegue a un valor que es el deseado en un tiempo aceptable, que no es ni demasiado corto (lo que supondría grandes acelerones o frenadas) ni demasiado largo.

De las opciones que se han comprobado mediante simulaciones las más satisfactorias son las de realimentación de estados, sobretudo la



realimentación de estados sin el PI que será la opción elegida para implementarse, una realimentación de estados con una ganancia para igualar el valor final con el deseado.

Además el error cuadrático medio es ligeramente menor en la realimentación de estados típica, por lo tanto el control es mejor de esta forma.

Esta opción elegida tiene muy buenos resultados en la simulación, no presenta sobreimpulsos, el tiempo de establecimiento es bueno, y la forma de la señal de entrada generada es suave.



5 MECANISMO DE FRENADO

5.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE FRENADO

El sistema de frenos de un vehículo tiene el objetivo de conseguir una rápida deceleración en el movimiento de este, para conseguirlo se realiza una fuerza que actúa en contra del movimiento, normalmente esta fuerza se efectúa generando un fuerte fricción en las ruedas y transformando la energía cinética que disponía el vehículo, en calor disipado en el ambiente.

La mayor parte de los frenos por fricción se basan en el rozamiento entre dos superficies, una que forma parte del sistema de frenado, y otra que superficie que forma parte del eje o de las ruedas. También existen otros sistemas de frenado especiales, basados en la fricción aerodinámica, como pueden ser la utilización de un paracaídas, en aviones o coches que alcanzan grandes velocidades.



Fig 5.1 – Avión con sistema de frenado con paracaídas.



En la figura 5.1 se puede ver un avión con un sistema de frenado por fricción un tanto especial, dado que utiliza la fricción de un paracaídas con el aire.

En la conducción también es típico utilizar el llamado freno motor, variando la marcha es posible que el motor sea un mecanismo de frenado, aunque no tan eficaz como los de fricción.

En vehículos eléctricos también es posible realizar un frenado con los llamados frenos electromagnéticos, que varían la excitación del motor haciendo que este disminuya la velocidad.

Otros tipos de frenos utilizados sobretodo en vehículos eléctricos son los regenerativos, que consiguen transformar la energía cinética en energía eléctrica, evitando así las pérdidas en formas de calor que tienen habitualmente los mecanismos de frenos. Esta energía eléctrica además se puede utilizar para otros sistemas del vehículo, lo cual resulta muy útil [13].

En la figura 5.2 se puede ver como sería el diseño de unos frenos regenerativos que aprovechan la energía de la frenada para crear energía eléctrica.



Fig 5.2 – Dibujo de unos frenos regenerativos.



Un coche normal dispone de dos sistemas de frenos, el freno de servicio que se activa con el pedal central, y el freno de mano o freno de estacionamiento que habitualmente está colocado entre los dos asientos delanteros del coche. El freno de servicio utiliza un sistema de accionamiento hidráulico y tiene efecto sobre todos los frenos del coche, aunque con el reparto de frenada habitual los frenos delanteros tienen mayor potencia de frenado que los traseros. El freno de mano sin embargo utiliza un sistema de accionamiento mecánico por medio de unos cables, y solo tiene efecto en las ruedas traseras.

Los sistemas de frenado son una parte muy importante de la seguridad de un vehículo, por ello la gran mayoría de los vehículos disponen de uno, y los que no tienen son vehículos especiales para pruebas o experimentación.

5.2 TIPOS DE FRENO

Los dos mecanismos de frenos más utilizados en vehículos son los frenos de disco y los frenos de tambor, de los cuales se hablará a continuación, aunque también existen otros tales como los frenos de cinta, menos utilizados.

5.2.1 Frenos de Disco

Para utilizar este mecanismo de frenado, las ruedas tienen que disponer de un disco que gira solidariamente con ellas, cuando el freno es accionado, unas pastillas que están fijas (no giran) se cierran sobre el disco provocando una fricción. La superficie de las pastillas tiene un alto coeficiente de rozamiento para que su efecto sea mayor.

Este rozamiento provoca la transformación de la energía cinética en calor repartido en el disco y en las pastillas, que será disipado poco a poco en el ambiente debido al efecto de la convección con el aire.



Los frenos de disco tienen 4 elementos principales, el disco, las pastillas y las mordazas (o pinzas), y los pistones o cilindros.

En la figura 5.3 se pueden ver separados los diferentes elementos que conforman unos frenos de disco, los pistones estarían situados en el interior de las pinzas.

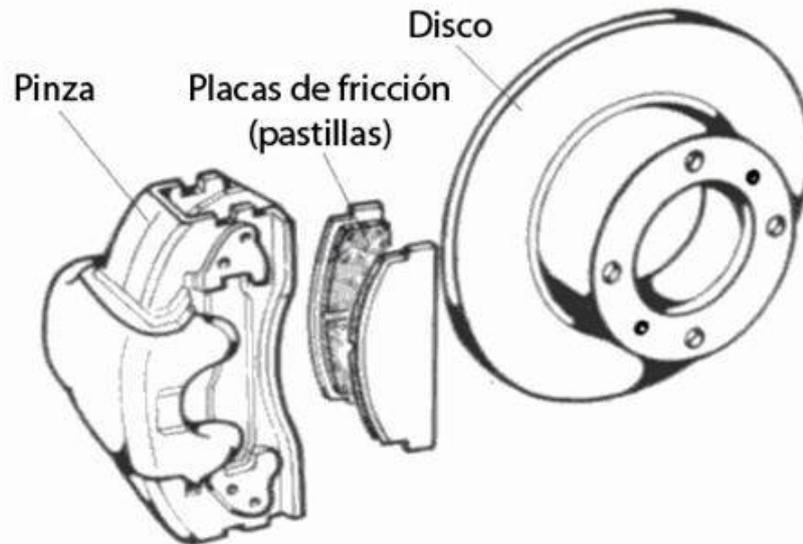


Fig 5.3 – Elementos principales de un freno de disco.

El disco es el elemento con forma circular que gira solidariamente a la rueda, normalmente están realizados de acero, y pueden tener agujeros para aumentar la superficie en contacto con el aire y por tanto mejorar la disipación de calor.

La función principal de las mordazas o pinzas es soportar las pastillas de freno, la correcta posición de las mordazas es muy importante, debido a que si están mal colocadas podrían ejercer rozamiento sobre el disco cuando no se desea, provocando un frenado constante y una considerable pérdida de energía continuamente.

Las mordazas pueden ser de dos tipos, fijas o flotantes, en el caso de las fijas solo se mueven las pastillas para contactar con el disco, y en las



flotantes tanto la mordaza como las pastillas se mueven para conseguir ese contacto.

Los pistones o cilindros se encuentran colocados en las mordazas y son los encargados de que las mordazas presionen las pastillas de frenos contra el disco, para ello son impulsados por el líquido de frenos del sistema hidráulico. Es importante que los pistones estén bien sellados para que no se pierda líquido de frenos.

Las pastillas de freno tienen un alto coeficiente de fricción para que el frenado sea bueno, debido al uso estas pastillas se desgastan y es necesario cambiarlas cada cierto tiempo. Según sea el material por el cual estén compuestas tienen diferentes características, como la duración, disipación de calor, o la potencia de frenado.

Existen 3 tipos de pastillas de freno según el material con el cual estén fabricadas, cerámicas (que destacan por su buen funcionamiento a altas temperaturas), orgánicas (tienen una alta calidad y un alto coeficiente de rozamiento), y metálicas (la duración de estas pastillas es mayor pero desprenden más calor que las otras).

Los frenos de disco son los más utilizados en vehículos de calle, debido a su rápido funcionamiento y buena disipación del calor.

En la figura 5.4 se puede ver una fotografía de una rueda de un vehículo deportivo con frenos de disco.



Fig 5.4 – Fotografía de unos frenos de disco.

5.2.2 Frenos de Tambor

Estos frenos consisten en un tambor que está conectado a la rueda y gira solidariamente con ella, y un mecanismo interior al tambor, con unas zapatas que al accionarse el freno se mueven y contactan con el tambor, provocando así la fricción que frena al vehículo.

En la figura 5.5 se puede ver un esquema donde se indican como están dispuestos el tambor y las zapatas.

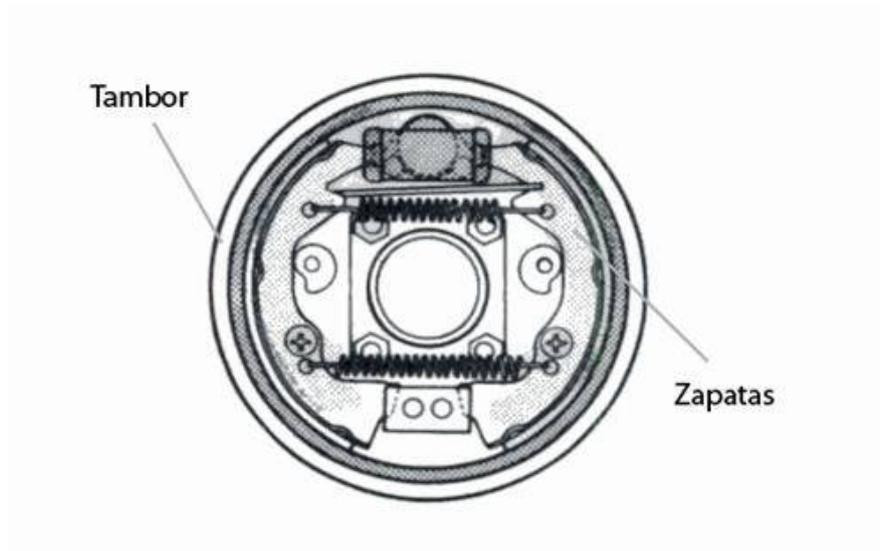


Fig 5.5 – Esquema de unos frenos de tambor.



El mayor problema de los frenos de tambor es que se generan altas temperaturas y tienen problemas de disipación de calor, por lo tanto al ser metálicos pueden deformarse y provocar un mal funcionamiento de los frenos.

Los frenos de tambor tienen la ventaja de estar más protegidos contra el agua, barro u otros elementos, por lo tanto para algunas condiciones de funcionamiento pueden ser mejores.

Habitualmente los frenos de tambor son utilizados en las ruedas traseras para ahorrar costes (son más baratos que los frenos de disco). Mientras que en las ruedas delanteras se utilizan frenos de disco por su mejor funcionamiento.



Fig 5.6 – Fotografía del interior de un freno de tambor.

En la figura 5.6 se puede ver una fotografía del interior de un freno de tambor, donde se pueden apreciar las zapatas (en dorado) y los muelles de los que dispone el mecanismo.



5.3 SISTEMA HIDRÁULICO

El freno de servicio dispone de un sistema hidráulico de accionamiento para hacer conseguir que el vehículo frene cuando el conductor pulsa el pedal de freno. Este sistema consiste en un circuito de mangueras o tubos entre el pedal de freno y los frenos, a este circuito se le considera el circuito principal de frenos.

El sistema es básicamente un amplificador de la fuerza que el conductor aplica sobre el pedal, transmitiéndola a los frenos para que ejerzan una fuerza en contra del movimiento de las ruedas. Su funcionamiento se basa principalmente en la transmisión de la presión en el interior de los conductos.

En la figura 5.7 se puede ver un dibujo de cómo funciona básicamente el sistema hidráulico, y como actúa en unos frenos de disco y en unos frenos de tambor.

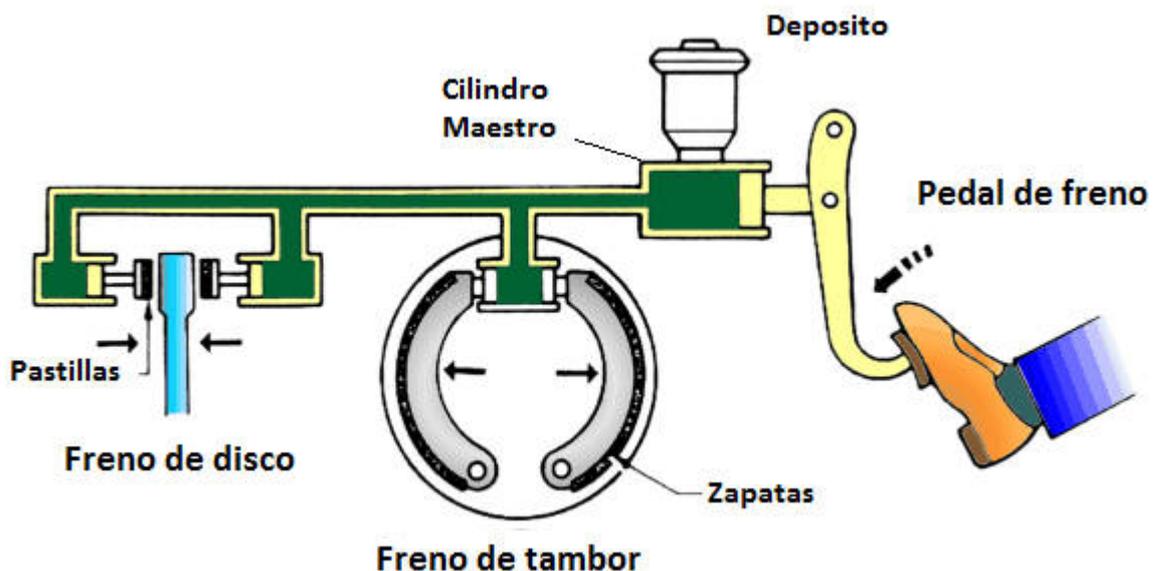


Fig 5.7 – Esquema sencillo de un sistema hidráulico de frenos.

Un sistema hidráulico dispone de varios elementos importantes, el primero de ellos es el pedal de freno, que es el elemento que está expuesto al conductor para que este le pulse cuando quiera frenar.



El cilindro maestro, cilindro principal o bomba, es un cilindro colocado al comienzo del sistema hidráulico y que está conectado al pedal de freno, de forma que cuando el conductor pisa el pedal, un pistón se mueve en el interior del cilindro maestro impulsando el líquido de frenos que se mueve en dirección a los frenos. Dependiendo de la sección interior del cilindro la fuerza transmitida será mayor o menor.

Además cerca del cilindro maestro se debe colocar un pequeño depósito que contiene líquido de frenos, para que en caso de pequeñas pérdidas de líquido en el sistema, la potencia de frenada no se vea afectada y el sistema funcione adecuadamente.

Otro elemento principal son las mangueras o tubos que transmiten el líquido de frenos hasta los frenos situados en las ruedas, son una parte indispensable y dependiendo de su sección transmitirán diferentes fuerzas.

Los últimos elementos son los propios frenos de los que ya se ha hablado anteriormente.

Todos los vehículos están obligados además a disponer de unas luces en la parte posterior que se iluminen cuando se accionen los frenos, por lo tanto el sistema de frenos tiene que estar conectado a esta lámpara testigo.

Los vehículos actuales llevan además dispositivos electrónicos que controlan el funcionamiento de todo para una mayor seguridad, como el sistema ABS, que evita el bloqueo de las ruedas.

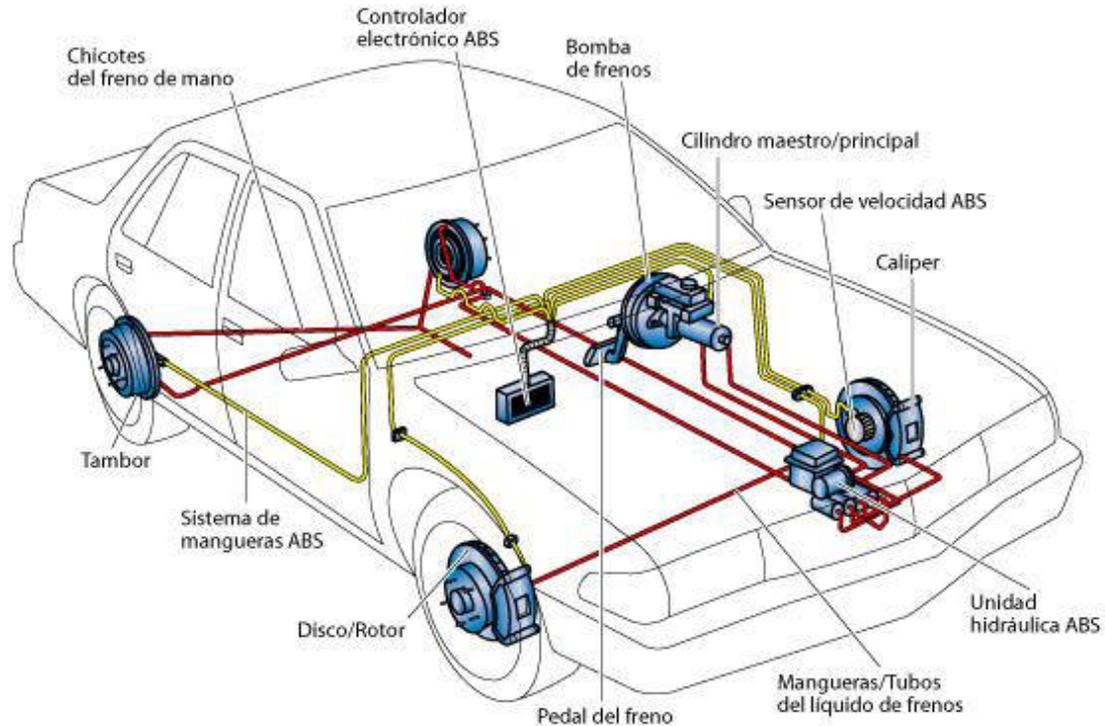


Fig 5.8 – Sistema de frenos completo de un coche.

En la figura 5.8 se puede ver un sistema de frenos más complejo y como está distribuido en un coche.

5.4 FRENO DE ESTACIONAMIENTO

El freno de estacionamiento o freno de mano forma parte del llamado circuito auxiliar de frenos, y que a diferencia del circuito principal no utiliza un sistema hidráulico, sino que habitualmente se acciona mecánicamente por medio de un cable.

En la mayoría de los coches, al accionar la palanca del freno de mano el cable activa únicamente los frenos traseros, que inmovilizan el vehículo para que durante el estacionamiento el coche no se desplace.

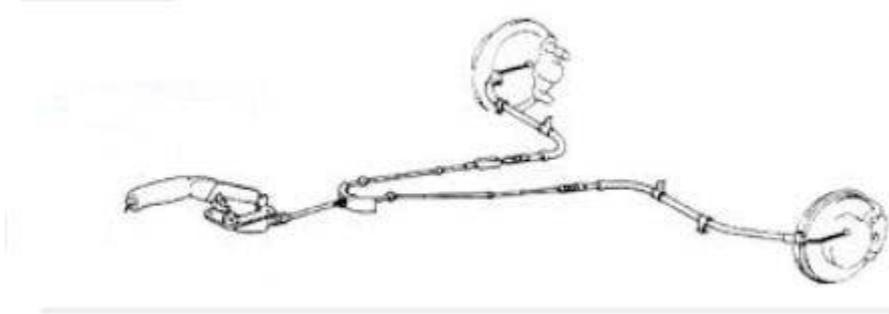


Fig 5.9 – Sistema de un freno de estacionamiento.

En la figura 5.9 se muestra como es el circuito auxiliar de frenos, con los cables que van desde la palanca central, hasta los frenos de las ruedas traseras, ya sean de tambor o de disco.



6 HARDWARE

6.1 CONTROLADOR CURTIS PMC 1268

Este componente instalado previamente en el coche es el encargado de que la señal de entrada de acelerador que llega al motor eléctrico sea adecuada, para que no tenga grandes cambios bruscos u otros problemas. Además esta controladora crea unas señales para tanto la armadura del motor eléctrico, como para la inductancia de magnetización que excita al motor.



Fig 6.1 – Controladora Curtis PMC.

La figura 6.1 muestra una fotografía de la controladora de la que dispone el vehículo experimental.

Tal y como se puede apreciar en la figura 6.1, la controladora tiene 3 entradas de baja corriente, una de 24-pin que se utiliza para la entrada de las señales de control, una de 6-pin, la cual está conectada con un sensor "Hall" de velocidad, para conocer la velocidad a la que gira el motor, y otra de 4-pin que se usa para cambiar los parámetros con los que hace el control. Estas conexiones en el centro de la parte superior de la controladora.



En la figura 6.2 podemos ver cómo están hechas las conexiones en nuestro vehículo.



Fig 6.2 – Fotografía de la controladora en el vehículo.

También dispone de 5 conexiones de alta corriente, las cuales son las de la batería, las de la armadura del motor (batería y armadura comparten la conexión de nivel alto de tensión), y las de la excitación del motor.

Existen varias formas para hacer llegar a la controladora la señal de aceleración, de las cuales se tendrá que escoger una, básicamente se podrá elegir entre crear niveles de tensión entre 0 y 5 Voltios, o crear una impedancia de entrada entre 0 y 5 k Ω . En nuestro caso se ha elegido la primera opción, ya que con la tarjeta de adquisición de datos (de la cual se hablará posteriormente) tenemos la opción de obtener una señal analógica que tenga ese rango de tensiones.



La señal de salida de la controladora hacia la armadura del motor tendrá un rango de tensión entre 0 y 48 Voltios, dado que el motor del que se dispone tendrá un valor máximo de tensión de 48 Voltios.

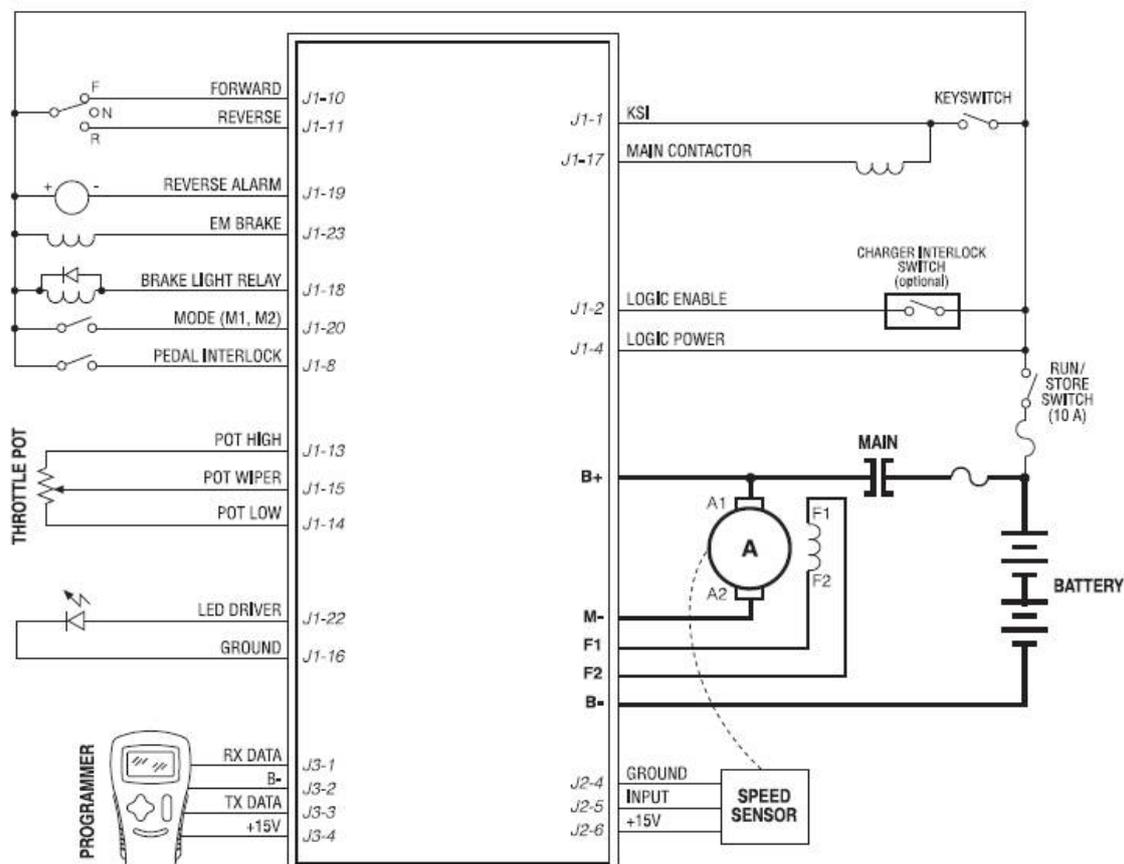


Fig 6.3- Típica configuración del cableado.

La figura 6.3 muestra un esquema con las conexiones que se deben realizar para el correcto funcionamiento de la controladora.

Se pueden modificar hasta 46 parámetros distintos para los posibles funcionamientos deseados, los parámetros pueden estar relacionados con la aceleración, el frenado, las corrientes que atraviesan el motor, la velocidad, etc...

Uno de los más importantes es el tiempo de aceleración del 0% al 100%, que será entre 0.1 y 5 segundos. Este es la forma de bloquear los grandes cambios en la señal de entrada, creando una señal en forma de rampa ascendente desde el valor inferior hasta el valor máximo.



Otro parámetro similar es el de la deceleración, que establece el tiempo mínimo en el que la tensión en el motor puede bajar del 100% al 0%, algo que no se debe confundir con el tiempo de frenado.

La velocidad máxima (en funcionamiento normal o marcha atrás) también es establecida como un parámetro, y además, para que la controladora tenga una referencia válida de la velocidad, habrá que introducirle un parámetro para que convierta las RPM que obtiene del sensor, a las unidades de velocidad deseadas, en este caso km/h.

Además se dispone de 2 modos de funcionamiento, los cuales tendrán distintos valores para los parámetros más importantes, lo cual hace que podamos funcionar con diferentes parámetros sin necesidad de estar cambiándolos constantemente, en caso de que cambien las condiciones de funcionamiento.

Existe también un tercer modo para algunos parámetros que sería un modo reservado para la marcha atrás.

Para modificar los parámetros hará falta una consola o programador, en este caso el 1311 que es el asociado a este modelo de controlador, y como se ha comentado anteriormente irá conectado a la conexión de 4-pin del controlador, en los puertos J3 según la figura 6.3.

En la figura 6.4 se puede ver una imagen del programador, con los botones de los que dispone para seleccionar los parámetros y cambiar sus valores.

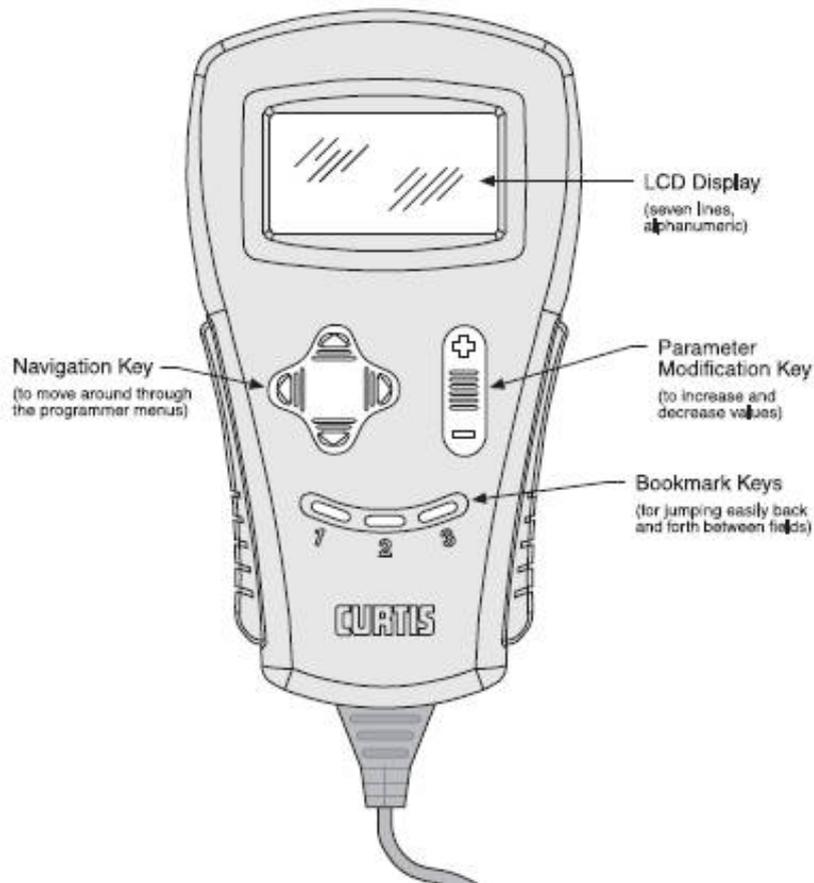


Fig 6.4 – Programador 1311.

En lo que respecta al sensor de velocidad, la controladora espera una señal de pulsos que normalmente tiene 4 pulsos por cada revolución del motor, esto significa que el motor debe de tener 8 polos. También es posible cambiar esta configuración, para poder utilizar un motor o sensor diferente, programando la controladora.

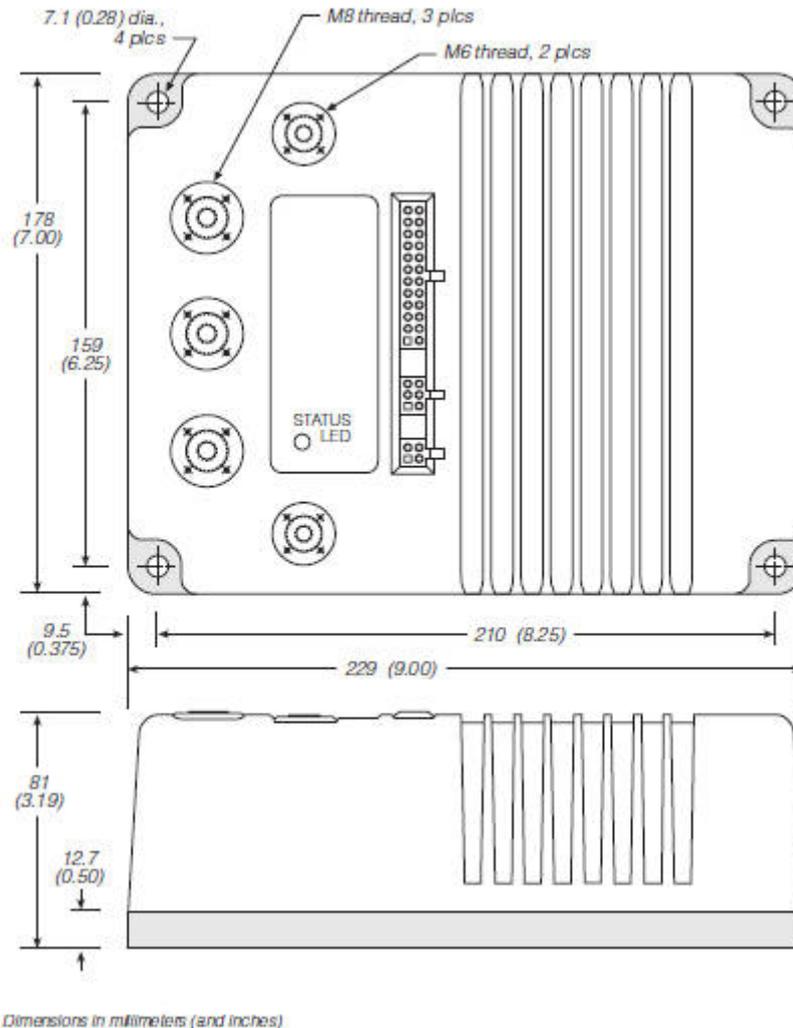


Fig 6.5 – Dimensiones de la controladora.

En la figura 6.5 se muestra una imagen con todas las dimensiones de la controladora instalada en el coche.

6.2 MOTOR ELÉCTRICO

El motor del que dispone el vehículo es un motor de corriente continua de 4,3 kW, con una tensión máxima de funcionamiento de 48 Voltios. Este motor es del tipo brushless (sin escobillas) y tiene una excitación de tipo Shunt. Además la potencia del motor esta aplicada al eje delantero, por lo tanto el vehículo será de tracción delantera.

En la figura 6.6 se puede ver una fotografía del motor del vehículo, con una etiqueta con los datos.



Fig 6.6 – Fotografía del motor eléctrico del vehículo.

El motor eléctrico es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. Son máquinas eléctricas rotatorias compuestas por un estator y un rotor.

Algunos motores además pueden funcionar de manera inversa y transformar la energía mecánica en energía eléctrica, se dice que funcionan como generadores o en modo generador, esto es muy útil en vehículos para poder recargar las baterías utilizando la energía cinética o potencial que se gana en el movimiento del vehículo, esta característica se utiliza especialmente en vehículos híbridos.

Se dividen en dos grandes tipos: motores de corriente continua y motores de corriente alterna. Los motores de corriente alterna se utilizan normalmente para aplicaciones de mayor potencia, y se dividen en motores síncronos y motores asíncronos.



- Motor asíncrono o motor de inducción: Este motor utiliza un campo magnético rotatorio en el estator que gira alrededor del eje del motor, el rotor es sensible al magnetismo provocado en el estator y se mueve siguiendo el campo magnético, pero a una velocidad ligeramente menor que el campo, de ahí que se llamen motores asíncronos.
- Motor síncrono: En este caso el motor funciona a la velocidad de sincronismo, la velocidad del campo rotario del estator. Esta velocidad depende de la frecuencia de la corriente y del número de polos que tenga el motor.

Los tipos de motores de corriente continua que utilizan un devanado inductor para crear el campo magnético se clasifican según como se dispone la excitación del bobinado, pueden ser en serie, en paralelo (Shunt), o compuesto (Compound). Según qué conexión se use el funcionamiento del motor tiene unas características u otras.

- Motor serie: Como es una conexión en serie la armadura del motor y el devanado inductor tienen la misma corriente pasando a través de ellos. En un motor en serie el flujo por polo depende de la corriente en la armadura y, por consiguiente, de la carga. Los motores en serie son utilizados para aplicaciones que requieran un alto par de arranque, ya que funcionan con un gran par a velocidades bajas. En vehículos es de gran uso porque por el motor se desacelera cuando el vehículo sube una cuesta, pero funciona a gran velocidad cuando el terreno es plano.

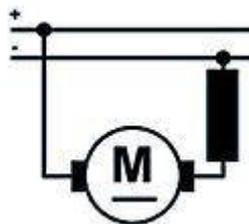


Fig 6.7– Esquema de conexión de un motor eléctrico en serie.

La figura 6.7 muestra como es la conexión de un motor serie.



- Motor en paralelo o Shunt: En este caso la corriente por la armadura y la corriente por el devanado inductor son independientes, la carga no afecta a la excitación. Para mejorar el funcionamiento cuando la carga cambia habría que implementar un reóstato en serie con el devanado inductor para poder controlar la corriente que pasa por la excitación. En general el par de arranque es inferior al de un motor en serie, y la velocidad apenas varía con la variación de carga. Por ello el motor shunt se suele utilizar en aplicaciones donde la velocidad es relativamente constante o se necesita un rango amplio de velocidades.

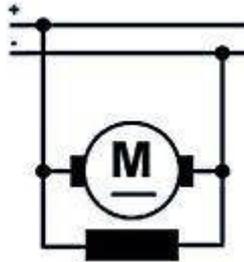


Fig 6.8 – Esquema de conexión de un motor Shunt.

La figura 6.8 muestra un motor Shunt conectado correctamente.

- Motor compuesto o Compound: Este motor tiene tanto un campo en serie como un campo en paralelo, la fuerza magnetomotriz de ambos campos se suma. Cuando la carga aumenta, la corriente por el campo en serie aumenta, pero no la corriente del campo paralelo, y la fuerza magnetomotriz es mayor con carga que sin carga.

Esto provee una característica de velocidad que no es tan “dura” o plana como la del motor Shunt, ni tan “suave” como la de un motor serie. Los motores de corriente continua Compound son algunas veces utilizados donde se requiera una respuesta estable de par constante para un rango de velocidades amplio.

También puede invertirse el devanado en serie para crear un campo compuesto diferencial, que disminuye la fuerza cuando aumenta la carga, pero esta forma tiene pocas aplicaciones.

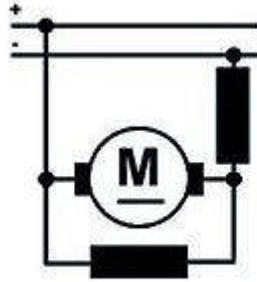


Fig 6.9 – Esquema de conexión de un motor Compound.

En la figura 6.9 se puede ver como es la conexión de un motor Compound.

Además de estos tres tipos de conexión también existen motores llamados de excitación independiente en los que la corriente por el bobinado y por la armadura del motor son independientes.

Para motores más pequeños también pueden utilizarse imanes permanentes para crear el campo magnético que excite a motor, pero la potencia de estos imanes es pequeña, por lo tanto la potencia de estos tipos de motores es inferior a los que utilizan inducción electromagnética [9].

6.3 POTENCIOMETRO DEL PEDAL DEL ACELERADOR

El pedal del acelerador que se encuentra en el vehículo, está conectado a un potenciómetro, que según el pedal este más o menos pulsado generará una señal eléctrica. Esta señal es la que va directamente a la controladora.

Evidentemente el vehículo ya dispone de este elemento dado que viene con el instalado.

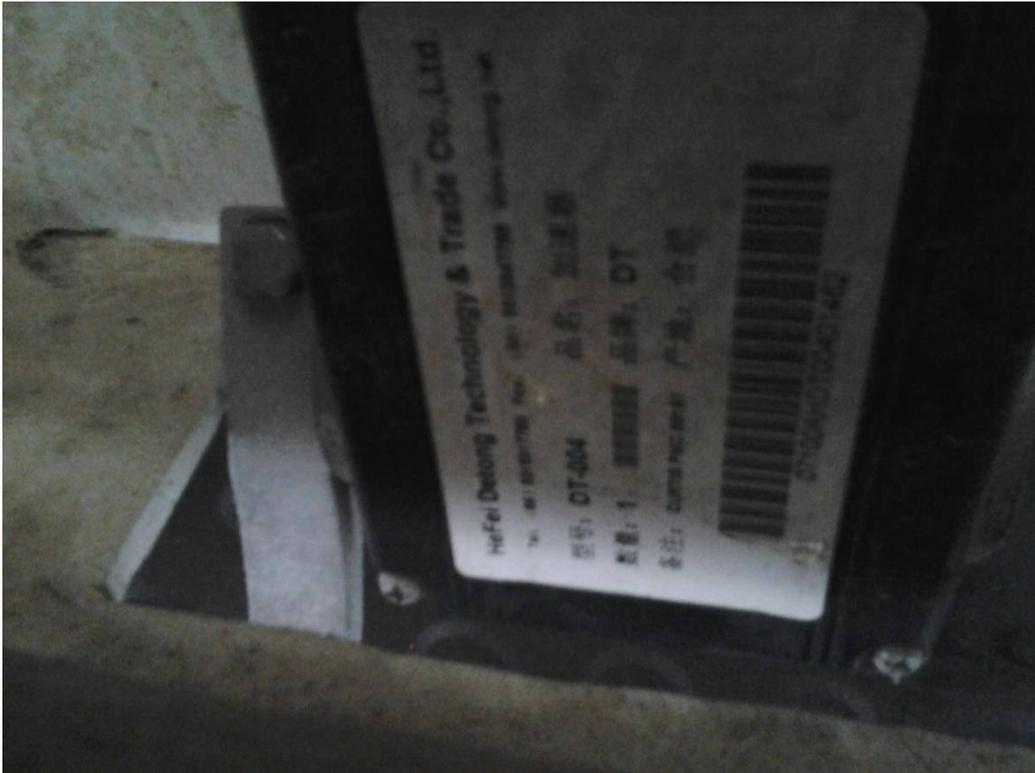


Fig 6.10 – Fotografía del potenciómetro.

En la figura 6.10 se puede ver una fotografía del potenciómetro instalado en el vehículo, que está directamente conectado al pedal del acelerador.

6.4 SENSOR DE EFECTO HALL

El sensor que se utilizara será un “Allegro” tipo “UGN3132”, se basa en el llamado efecto Hall, y funciona detectando variaciones del campo magnético cercano a él, cada variación significa que un polo del motor eléctrico ha pasado y entonces el sensor lo traduce en un evento en la señal de pulsos, es decir, cada dos polos significaran un pulso, y dependiendo del número de polos del motor, habrá más o menos pulsos por cada revolución.

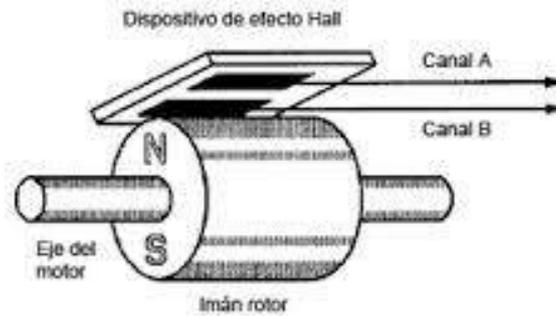


Fig 6.11 – Sensor efecto Hall.

En la figura 6.11 se muestra como está realizado de forma básica un sensor de efecto Hall.

Este sensor dispone de 3 conexiones, una para la entrada de tensión para que el dispositivo pueda funcionar (El suministro de tensión para que el dispositivo funcione tiene que ser de entre 4.5 y 24 Voltios), una señal de tierra para referenciar, y la señal de salida de pulsos que se utilizara para medir la velocidad.

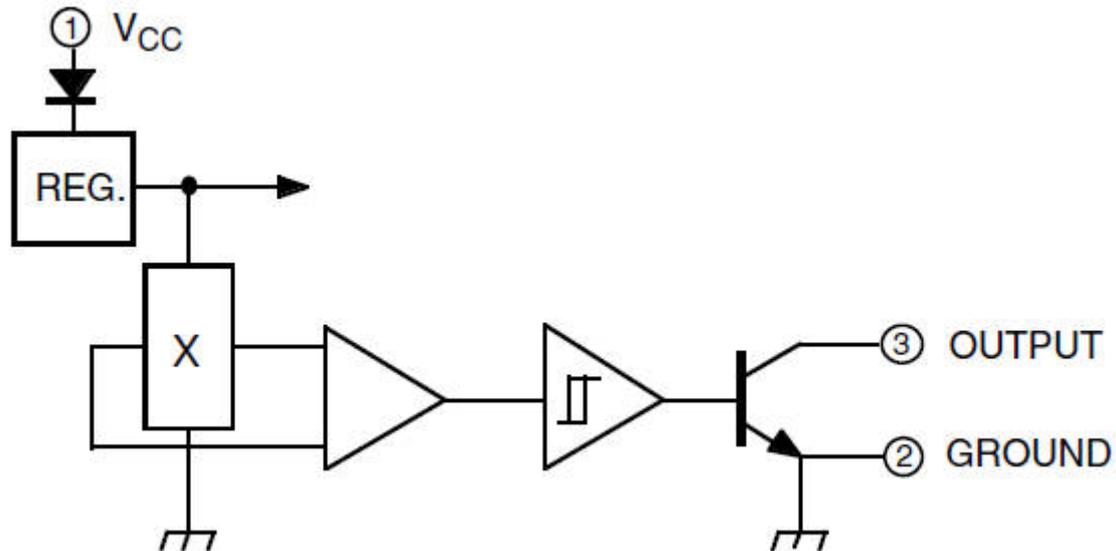


Fig 6.12– Esquema funcional del sensor.

En la figura 6.12 se muestra el esquema funcional del sensor que se utilizará.



6.5 TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS

La tarjeta de adquisición de datos (DAQ) que se utilizara será una "NI USB-6009" de National Instruments, esta tarjeta dispone de 32 conexiones las cuales se dividen la mitad en señales digitales y la otra mitad en señales analógicas, también se reparten las conexiones entre terminales de entrada y salida, además, se conecta a una computadora mediante una conexión USB típica, gracias al cable USB que viene incluido con la tarjeta.



Fig 6.12– Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009.

En la figura 6.12 se puede ver una fotografía de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009, donde los puertos están situados a derecha e izquierda, unos son los puertos analógicos, y otros los digitales.

El cometido de esta DAQ es ser el paso intermedio entre la computadora y el coche, transformando las señales digitales de la computadora a señales analógicas necesarias para el vehículo (tensión de entrada entre 0 y 5 Voltios para la controladora por ejemplo, o la señal para la bomba hidráulica de los frenos.), y transmisión de datos realimentados como la velocidad del motor para así comprobar el correcto funcionamiento del vehículo.

En la figura 6.14 se pueden ver todas las conexiones de las que dispone la tarjeta, y a continuación se describirán todas sus funciones.

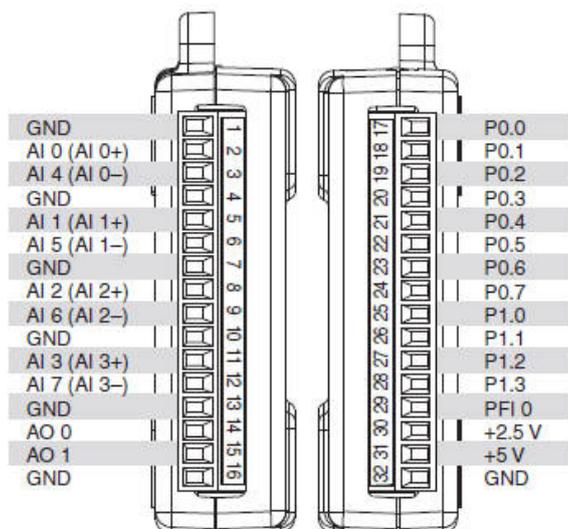


Fig 6.14- Conexiones de la NI USB-6009.

Respecto la parte analógica, la tarjeta dispone de hasta 8 canales de entrada, los cuales pueden ser utilizados como entradas referenciadas a tierra, o 4 canales para medir las diferencias entre 2 entradas. Dispone además de 2 canales de salida referenciados a una tierra común entre ellos. La resolución de esta tarjeta es de 13 bits para las entradas simples, y 14 bits para las entradas diferenciales.

Y respecto la parte digital dispone de 12 canales configurables para servir tanto de entrada como de salida, y un canal que se puede utilizar como disparador digital o como contador de 32 bits.

Este contador se utilizara como contador de pulsos para medir la velocidad del motor con el sensor de efecto Hall.

6.6 SISTEMA DE SELECCIÓN MANUAL-AUTOMÁTICO

Por seguridad no se debe eliminar la posibilidad del control manual del vehículo como si de un vehículo normal se tratara, para ello se tiene que diseñar un sistema para que ambos mecanismos puedan funcionar aunque no de forma simultánea.

Para ello se ha decidido utilizar un conmutador simple de 3 polos, de accionamiento manual, que se colocara en el salpicadero del coche de forma que sea de fácil acceso para los ocupantes del vehículo.



Fig 6.15 – Ejemplo de un conmutador simple de 3 polos.

En la figura 6.15 se muestra una fotografía de un conmutador de 3 polos que se puede encontrar en cualquier tienda de electrónica.

De esta forma, en caso de un mal funcionamiento del sistema en un momento dado, se podrá desactivar el acelerador automático para evitar una colisión o cualquier otro problema, aumentando de esta forma la seguridad del vehículo.

Se utilizará el polo común como salida de la señal que irá directamente a la controladora Curtis, y los otros dos polos serán los del potenciómetro del pedal del acelerador para la conducción manual, y la señal generada por el programa y que viene de la tarjeta de adquisición.

En la figura 6.15 se puede ver un esquema simple de como estarán conectados la tarjeta de adquisición de datos, el potenciómetro del que dispone el pedal del acelerador en el coche, y la controladora que recibe una de las dos señales.

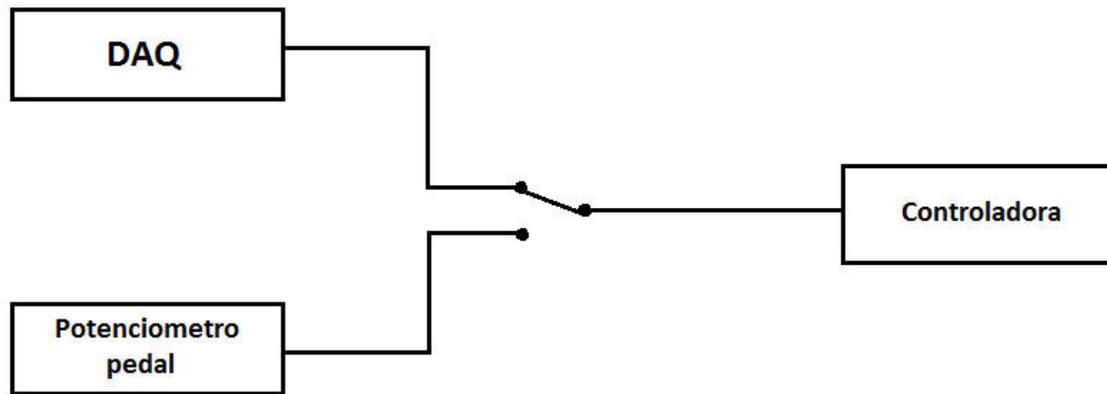


Fig 6.16 – Esquema de conexiones del selector Manual-Automático.

Otra opción que se podría haber llevado a cabo pero se descartó por cuestiones de seguridad, sería la utilización de un conmutador controlado por tensión, o un relé, que mantendría la señal que proviene de la tarjeta como la señal que llega a la controladora, a menos que se pise el pedal del acelerador, en este caso la señal que actuaría sería la del potenciómetro del pedal.

Esta opción conlleva que el conductor tenga menos control en caso de emergencia, dependiendo más del sistema. Además la dificultad de la implementación es mayor y por lo tanto existen más posibilidades de fallo, por estas razones se escogió llevar a cabo la primera idea.

6.7 SISTEMA DE FRENOS

Nuestro vehículo dispone de un sistema de frenos habitual como del que se habló en el apartado "5 MECANISMO DE FRENADO", para este proyecto será necesario modificarlo para que el sistema de control diseñado tenga efecto sobre el sistema de frenos también.

Para traducir la señal eléctrica que nos dará el sistema de control en una presión en el circuito de frenos, se utilizara una bomba electrónica, la cual se elegirá en función de la potencia necesaria.

Lo más complejo de será conseguir hacer funcionar el circuito hidráulico con ambas formas de accionamiento (bomba electrónica y pedal de



freno), ya que como se ha comentado será necesario por seguridad mantener la acción manual de frenado.

Para hacer eso se ha decidido colocar la bomba electrónica en paralelo a la bomba del sistema original de frenos, y unir ambas mediante una válvula especial en forma de "T" que hace que puedan funcionar ambas formas de accionamiento a la vez.

Esta válvula dispondrá de una membrana o una bola que se moverá para dejar el paso libre a uno de los dos conductos de "entrada", a cuál de los dos conductos deje paso dependerá de la relación de presiones que estén ejerciendo en ese momento, de forma que tenga prioridad el accionamiento mediante el pedal de freno.

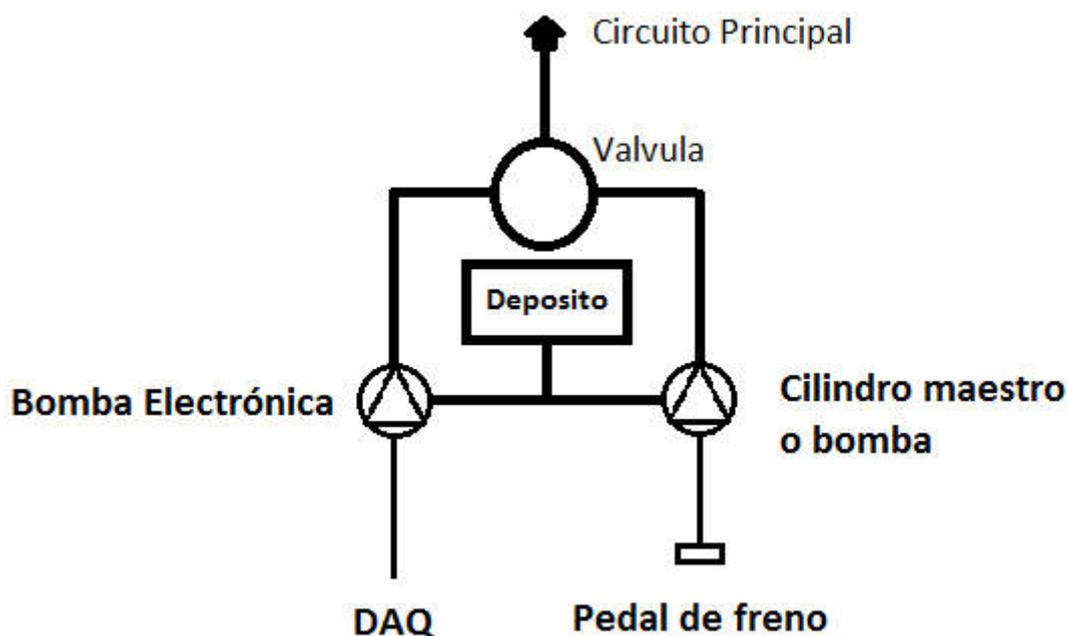


Fig 6.17 – Esquema del nuevo sistema de frenos.

En la figura 6.17 se muestra como sería la configuración del circuito de frenos una vez realizada la modificación, donde a partir de la válvula instalada, el circuito sería el mismo que antes.



6.7.1 Bomba electrónica

Respecto a la bomba electrónica que será elegida para nuestro sistema deberá tener unas condiciones de presión máxima similares a las de la bomba mecánica que acciona el pedal de freno.

De un experimento anterior se conoce que la bomba mecánica ejerce sobre el circuito una presión máxima de 50 kg/cm^2 , que equivalen a unos 50 bares de presión.

Por lo tanto la bomba a instalar deberá ejercer una presión máxima similar a los 50 bares que tiene la bomba mecánica, para evitar problemas se elegirá una presión máxima superior.

Se han buscado electrobombas de poco tamaño para que puedan ser instaladas en el vehículo, la mejor opción se ha encontrado en el catálogo de HAWE HYDRAULIK. La serie NPC es una central hidráulica compacta ideada para ser fácilmente transportable, funciona con corriente continua y es para trabajos de corta duración.

Como este tipo de bombas pueden alcanzar unos 700 bares de presión, no se necesitara la de mayor potencia, y de hecho la presión máxima que podrá ejercer la bomba elegida será mayor de la necesaria, por lo tanto nunca se trabajara a la máxima potencia.



Fig 6.18 – Central hidráulica compacta NPC de Hawe Hydraulik.

En la figura 6.18 se puede ver una fotografía de la electrobomba que se utilizará.

Esta bomba dispone de varias opciones y tamaños, como la aplicación que se le dará no necesita de su máxima potencia, se elegirá un modelo más pequeño que se acerque a nuestras necesidades.

Modelo básico	Código de caudal	0,2	0,31	0,44	0,61	0,87	1,05
NPC 11	Desplazamiento V_g (cm ³ /rev)	0,09	0,14	0,20	0,28	0,36	0,46
	Caudal de marcha en vacío Q_0 (l/min)	0,27	0,42	0,59	0,83	1,07	1,36
	Presión de trabajo $p_{m\acute{a}x}$ (bar)	750	640	450	320	250	190
NPC 12	Código de caudal	0,4	0,65	0,94	1,28	1,71	2,14
	Desplazamiento V_g (cm ³ /rev)	0,15	0,24	0,34	0,46	0,6	0,76
	Caudal de marcha en vacío Q_0 (l/min)	0,45	0,71	1,02	1,39	1,81	2,29
	Presión de trabajo $p_{m\acute{a}x}$ (bar)	750	660	470	350	270	210

Fig 6.19 – Tabla de características de la serie NPC.

En la figura 6.19 se muestra las posibilidades de modelos que se tienen, la NPC 11 y la NPC 12 con sus diferentes tamaños, como todas tienen



mayor presión máxima que la necesaria se escogerá la mayor, es decir la NPC 11 /1,05.

El modelo NPC 11 tiene una potencia nominal aproximada de 0,3 kW, mientras que el NPC 12 tiene el doble.

Se puede elegir una bomba con una válvula regulable de presión, para que nunca sobrepase los 70 bares. Además se tiene más opciones como la tensión de alimentación o si necesita válvula retorno o no.

El modelo elegido será el **NPC 11 /1,05 - 2/190 - R - 24**, que tiene una tensión de alimentación de 24V.

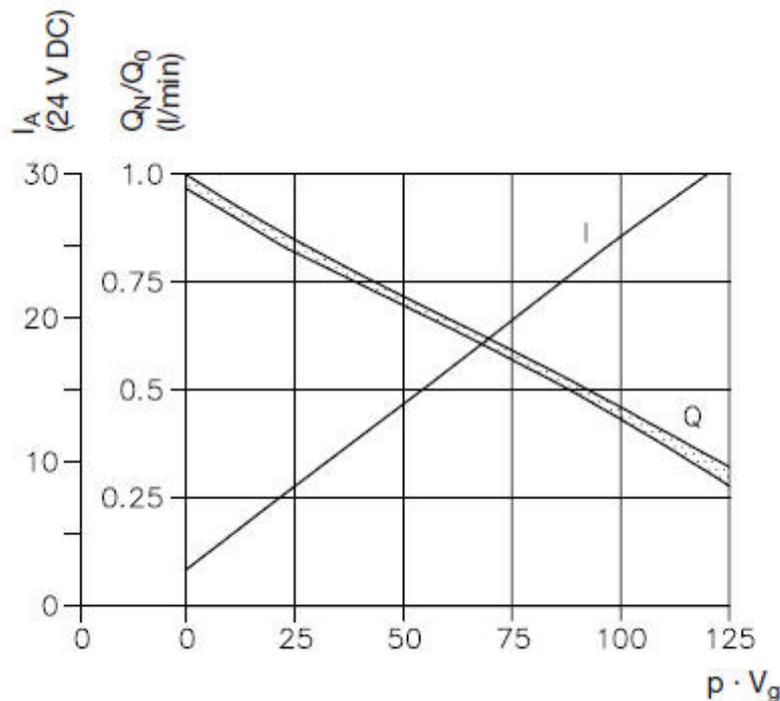


Fig 6.20 – Curvas de corriente y de caudal.

En la figura 6.20 se muestran en un mismo gráfico las curvas de corriente y de caudal.

En la figura 6.21 se muestra el esquema hidráulico de la electrobomba utilizada.

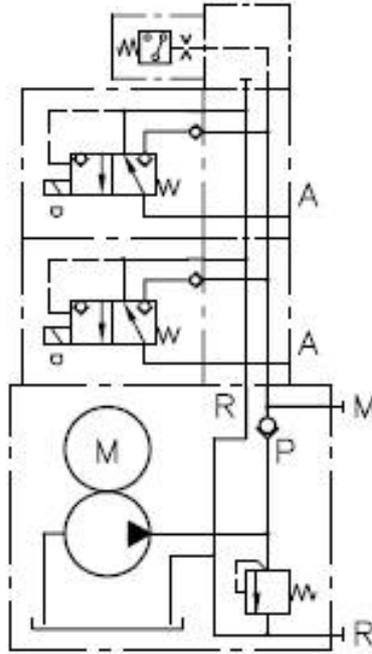


Fig 6.22 – Esquema hidráulico de la central hidráulica compacta NPC.

En la figura 6.22 se pueden ver los planos de la electrobomba con todas las dimensiones.

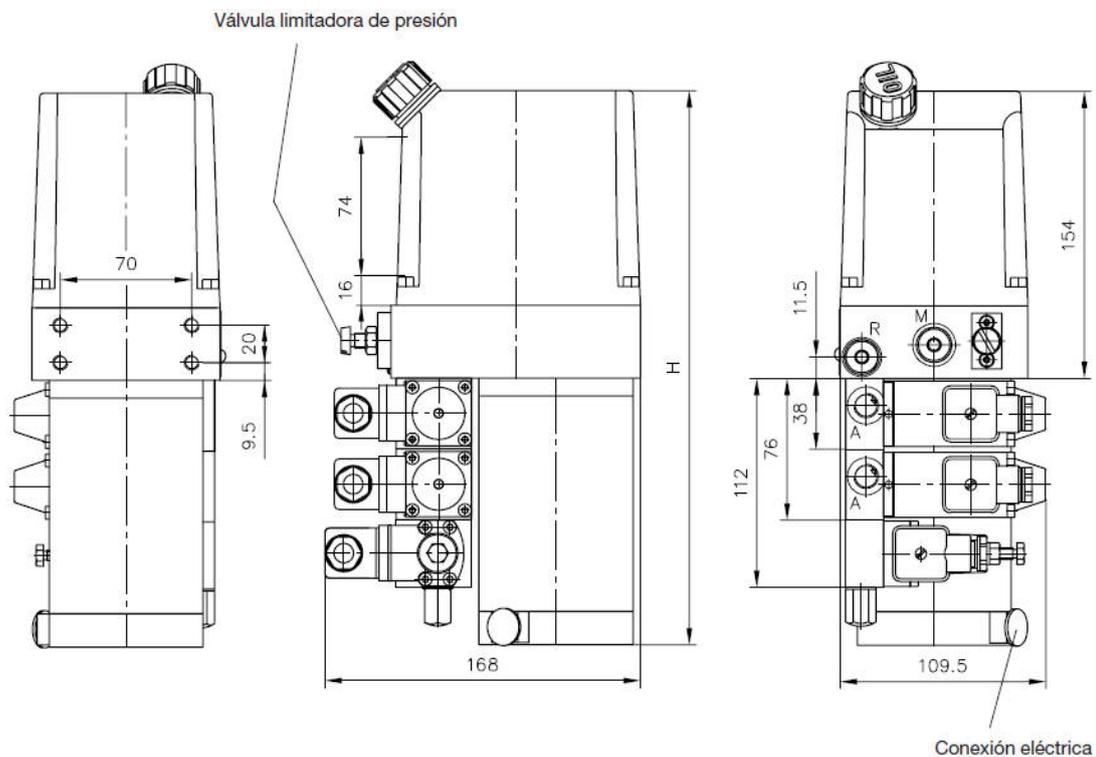


Fig 6.22 – Dimensiones de la central hidráulica compacta NPC



6.7.2 Válvula direccional

La válvula que necesitaremos será una válvula 3/2 (de 3 vías y 2 posiciones), las vías serán la de salida que va a los frenos, y las 2 de entrada, una para la bomba electrónica, y otra para el accionamiento manual del pedal de freno.

Las dos posiciones serán la posición para el control electrónico o para el control manual, y se seleccionaran dependiendo de si el pedal de freno está siendo pulsado o no, por tanto el accionamiento será hidráulico.

La válvula elegida también será de HAWE HYDRAULIK, y será de la serie BVG, que tiene modelos de 2 vías o de 3 vías. El modelo elegido será el **BVG 3 Z – H**.



Fig 6.22 – Válvula BVG de 2/2.

En la figura 6.22 se puede ver una imagen de una válvula de la serie BVG del catálogo de HAWE HYDRAULIK, mientras que en la figura 6.23 se muestra el esquema hidráulico de una válvula de 3 vías y 2 posiciones como la utilizada.

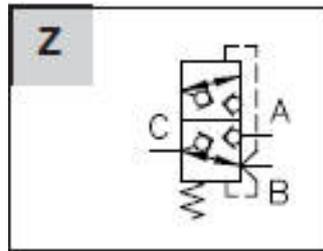
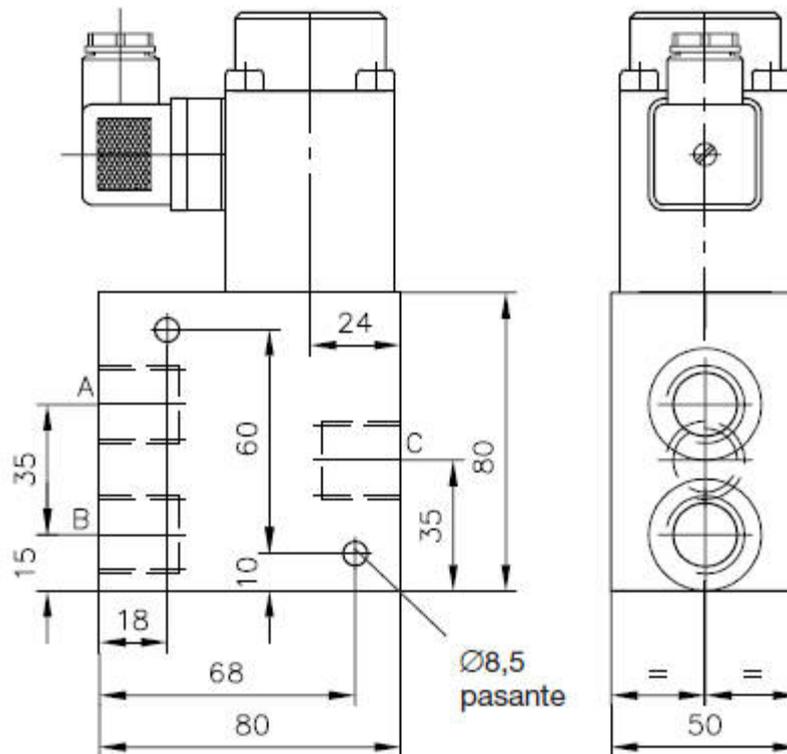


Fig 6.23 – Esquema hidráulico de una válvula 3/2.

En nuestro caso la vía C que es la común será conectada al circuito hidráulico que va hacia los frenos, mientras que las vías A y B serán conectadas indistintamente a las bombas, una a la electrobomba, y la otra a la bomba del sistema hidráulico original.



Conexiones según ISO 228/1:
A, B y C = G 1/2

Fig 6.24 – Dimensiones de la válvula BVG Z con accionamiento eléctrico.

En la figura 6.24 se muestran los planos de la válvula de 3 vías de accionamiento eléctrico. Mientras que en la figura 6.25 se muestra el detalle de cómo sería el accionamiento hidráulico.

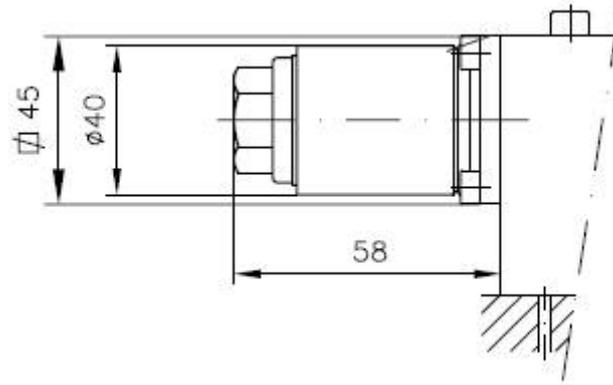


Fig 6.25 – Accionamiento hidráulico de la válvula.



7 CÁLCULOS

7.1 IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DEL VEHÍCULO

Para realizar la identificación habrá que construir 2 matrices, que formaran parte de un sistema de ecuaciones que se resolverá para obtener la matriz de coeficientes, tal y como se explicó en el apartado "3.1 Identificación de sistemas".

La primera matriz, que llamamos "Y" se construirá utilizando los valores obtenidos de la velocidad en los distintos momentos de la toma de datos:

$$Y = \begin{pmatrix} v_2 \\ v_3 \\ \dots \\ v_n \end{pmatrix}$$

Y la segunda matriz "Z", incluirá además datos de la señal de acelerador/freno que denominaremos "AcBr".

$$Z = \begin{pmatrix} v_1 & v_0 & AcBr_1 \\ v_2 & v_1 & AcBr_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ v_{n-1} & v_{n-2} & AcBr_{n-1} \end{pmatrix}$$

El sistema a resolver será:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ v_3 \\ \dots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 & v_0 & AcBr_1 \\ v_2 & v_1 & AcBr_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ v_{n-1} & v_{n-2} & AcBr_{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X(1) \\ X(2) \\ \dots \\ X(3) \end{pmatrix}$$

Obteniendo así el vector X con los coeficientes de la función de transferencia del sistema identificado.

Para resolver el sistema se ha utilizado matlab, habiendo construido ya las matrices "Y" y "Z" se utiliza el comando "X=Z\Y" que resuelve el sistema y nos da los valores de X.

$$X = \begin{pmatrix} 1.5086 \\ -0.5289 \\ 0.9541 \end{pmatrix}$$



7.2 VELOCIDAD MEDIDA POR EL SENSOR DE EFECTO HALL

Tal y como se dijo en la sección de Hardware, el sensor de efecto hall mide las variaciones magnéticas del motor para calcular su velocidad, su señal de salida consistirá en una señal con pulsos cuya frecuencia dependerá de la velocidad a la que vaya el motor. Se deben hacer algunos cálculos para pasar de la señal de pulsos a un valor de la velocidad.

El motor eléctrico es de 4 polos, es decir, que cada vuelta completa del motor, significara una señal pulsante con 2 valores altos y 2 bajos, con una amplitud igual si el motor funciona a velocidad constante, y una amplitud muy similar si el motor está acelerando o desacelerando.

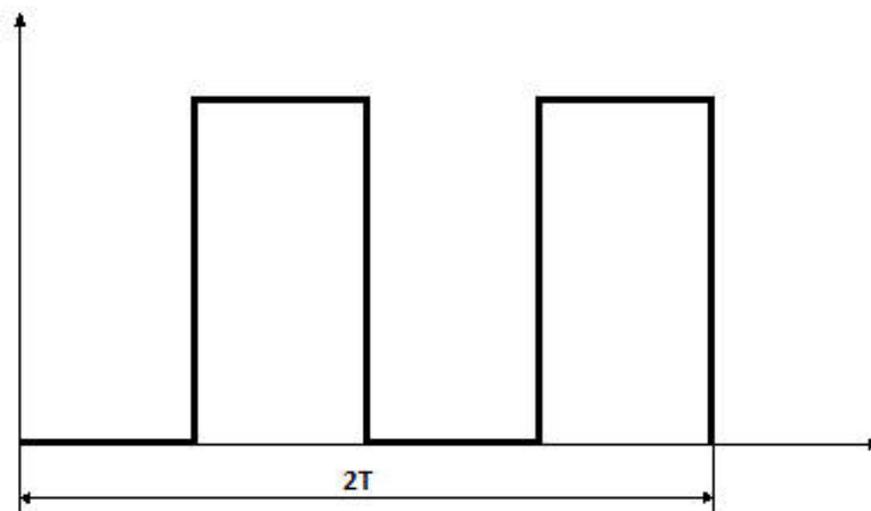


Fig 7.1 – Pulsos producidos por una vuelta del motor.

En la figura 7.1 se puede ver cómo sería una señal de pulsos que podría darnos el sensor.

Por lo tanto una revolución del motor significa 2 periodos de la señal de pulsos.

La velocidad angular de las ruedas será entonces:

$$\omega = \frac{1 \text{ rev}}{2 \cdot T}$$



Debido a que el vehículo eléctrico no es muy potente vamos a suponer que el deslizamiento entre los neumáticos y el asfalto es nulo, y por lo tanto la velocidad de las ruedas es la misma que la velocidad del vehículo. Por lo tanto, si pasamos de velocidad angular a velocidad lineal tenemos que:

$$V = \omega \cdot R$$

Siendo "R" el radio de las ruedas delanteras, que es de 20 cm.

Sustituyendo la primera ecuación en la segunda se obtiene:

$$V = \frac{R}{2 \cdot T}$$

Con esta ecuación podemos pasar directamente del periodo de los pulsos obtenido con el sensor Hall, a la velocidad del vehículo, únicamente necesitando el valor del radio de las ruedas delanteras.

Por ejemplo para una velocidad de 30 km/h, se tiene que:

$$\frac{30km}{h} = \frac{30}{3.6} = 8.33 \frac{m}{s}$$

$$8.33 = \frac{0.2}{2 \cdot T} \rightarrow T = \frac{0.2}{2 \cdot 8.33} = 0.012s$$

De la misma forma para unas velocidades de 5km/h o de 50km/h:

$$5km/h \rightarrow 0.072 s$$

$$50km/h \rightarrow 0.0072 s$$

Por lo tanto para el rango de velocidades del coche, el periodo de los pulsos del sensor estará comprendido entre 0.1 segundos para velocidades bajas, y 0.007 segundos para velocidades altas, aproximadamente.



ANEXO 1

CODIGO MATLAB PARA LAS SIMULACIONES

Utilizando el editor de ficheros de matlab, creamos un fichero “.m” en el cual introducimos todos los comandos necesarios para realizar todas las simulaciones que hicimos. En este apartado se copiara dichos comandos y se explicaran las funcionalidades de cada comando.

En verde estás los comentarios aclaratorios, y en negro los comandos que se ejecutarán con el fichero.

```
clear; close all; clc; % Comandos para reiniciar datos

% Parámetros necesarios para el modelo
m=500; % Masa
g=9.81; % Gravedad
R=0.2; % Radio de las ruedas
J=0.5; % Momento de inercia de las ruedas
Cf=0.1; % Coeficiente de fricción
ro=1.23; % Densidad del aire
Av=1.5; % Área expuesta al viento
Cd=0.29; % Coeficiente aerodinámico
Cr=0.01; % Coeficiente de rodadura
lr=1; % Distancia eje trasero - centro
lf=1; % Distancia eje delantero - centro
H=0.5; % Altura del centro de gravedad
L=lf+lr; % Distancia entre ejes
B=10; % Coeficiente B de Pacejka
C=1.9; % Coeficiente C de Pacejka
D=1; % Coeficiente D de Pacejka
E=0.97; % Coeficiente E de Pacejka
th=0; % Pendiente de la carretera
Vw=0; % Velocidad del Viento
Pf=m*g*(lr*cos(th)+H*sin(th))/L; % Peso inicial rueda delantera
Pr=m*g*(lf*cos(th)-H*sin(th))/L; % Peso inicial rueda trasera
```



```

alpha=0.01; %Aceleración angular
Kbf=10; %Coeficiente freno delantero
Kbr=5; %Coeficiente freno trasero
N=1; %Relación De W entrada-salida
Re=10; %Resistencia Armadura Motor
L=1; %Inductancia Armadura Motor
Kt=40; %Constante Par Electromagnético
Kb=0.3; % Constante Fuerza Contra Electromotriz

%Entradas
vin=0.2; %Valor inicial de la velocidad (No puede ser 0 porque el modelo no funciona
        bien si no hay velocidad)
V0=48; % Ganancia para la tensión necesaria en el motor

%Simulación
ts=1e-3; % Periodo de muestreo del modelo.
ts2=0.1; % Periodo de muestreo de los sistemas que se implementaran
tfin=60; % Tiempo de simulación
tol=1e-3; % Tolerancia de la simulación
sim('Modelo');
t=v(:,1);wf=v(:,3);v=v(:,2); s=s(:,2); AcBr=AcBr(:,2); % Se crean matrices en matlab
para guardar los datos
figure(1)
subplot(2,1,1); plot(t,v,t,wf); % Grafica con la velocidad del vehículo y de las ruedas
subplot(2,1,2); plot(t,s); % Grafica con las distancia recorrida

%Identificación del Modelo
%Se crea la función de transferencia y el espacio de estados tal y como se explicó en el
apartado "Técnicas de control"
Y=v(3:end);Z=[v(2:end-1) v(1:end-2) AcBr(2:end-1)];
X=Z\Y;
Gm=tf([X(3) 0],[1 -X(1) -X(2)],ts2)
A2=[0 1;X(2) X(1)];B2=[0;1];C2=[0 X(3)];D2=[0];
Gss=ss(A2,B2,C2,D2)

```



```

[Num,Den]=tfdata(Gm,'v'); % Se calculan el numerador y el denominador de la función
de transferencia
pole(Gm) % Se calculan los polos del sistema

% A continuación hay otra forma de realizar la identificación con comandos de matlab
que se podría utilizar
% data=iddata(v,AcBr,ts2);
% Gss=ssest(data,2,'Ts',ts2,'form','canonical')
% A2=Gss.a;B2=Gss.b;C2=Gss.c;
% gmodel = ss(A2, B2, C2, Gss.d, ts2)
% u = AcBr;
% lsim(gmodel,u,t); hold on;
% plot(t,v,'r');

%Simulacion del PID
sim('modeloPID');
t=vmodel(:,1);v1=vmodel(:,2);v2=vmodel(:,3); % Se guardan los datos en matrices
figure(2)
plot(t,v1,t,v2) %Se dibuja la velocidad resultante del modelo "real" y del modelo de
estados

%Simulacion con Realimentacion de estados
Mc=ctrb(A2,B2);RangoMc=rank(Mc) % Cálculo de la controlabilidad
Mo=obsv(A2,C2);RangoMo=rank(Mo) % Cálculo de la observabilidad
z1=[0.9 0.9]; z2=[0.5 0.5]; % Polos para el sistema y para el observador
Ka=acker(A2,B2,z1) % Cálculo de la matriz K por Ackermann

%Cálculo de la ganancia para igualar el valor final, tal y como se explicó en el apartado
"Técnicas de control":
syms z K1
A3=A2-B2*Ka;B3=B2*K1;
G=C2*inv(z*eye(2)-A3)*B3;
K0=double(limit(K1/G,z,1))
La=acker(A2',C2',z2)' % Cálculo de la matriz L por Ackermann
sim('ModeloEstados');

```



Los parámetros que no se encuentren establecidos en el anterior código estarán en los ficheros de Simulink, como por ejemplo los valores del PID o el PI para la realimentación de estados.

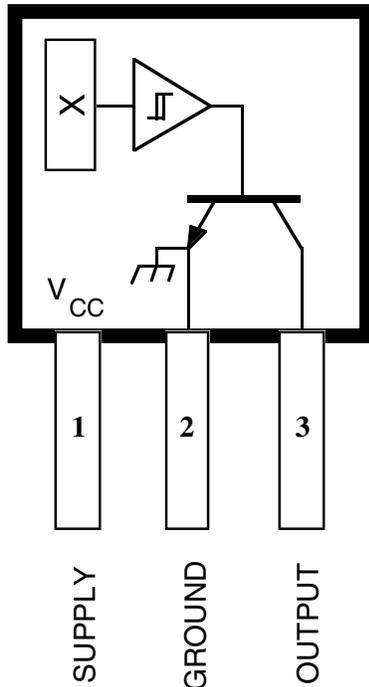


ANEXO 2

HOJAS DE CARACTERISTICAS

3132 AND 3133

ULTRA-SENSITIVE BIPOLAR HALL-EFFECT SWITCHES



Dwg. PH-003A

Pinning is shown viewed from branded side.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage, V_{CC}	25 V
Reverse Battery Voltage, V_{RCC}	-35 V
Magnetic Flux Density, B	Unlimited
Output OFF Voltage, V_{OUT}	25 V
Continuous Output Current, I_{OUT} ..	25 mA
Operating Temperature Range, T_A	
Prefix UGL	-40°C to +150°C
Prefix UGN	-20°C to +85°C
Prefix UGS	-40°C to +125°C
Storage Temperature Range,	
T_S	-65°C to +150°C

These Hall-effect switches are designed for magnetic actuation using a bipolar magnetic field, i.e., a north-south alternating field. They combine extreme magnetic sensitivity with excellent stability over varying temperature and supply voltage. The high sensitivity permits their use with multi-pole ring magnets over relatively large distances.

Each device includes a voltage regulator, quadratic Hall voltage generator, temperature stability circuit, signal amplifier, Schmitt trigger, and open-collector output on a single silicon chip. The on-board regulator permits operation with supply voltages of 4.5 to 24 V. The switch output can sink up to 25 mA. With suitable output pull up, they can be used directly with bipolar or MOS logic circuits.

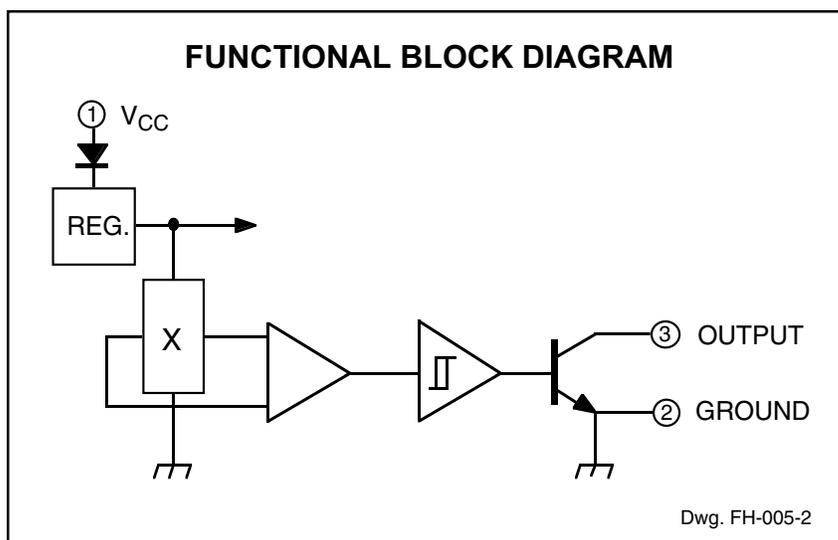
The three package styles available provide a magnetically optimized package for most applications. Suffix 'LT' is a miniature SOT-89/TO-243AA transistor package for surface-mount applications; suffixes 'U', and 'UA' feature wire leads for through-hole mounting. Prefix 'UGN' devices are rated for continuous operation over the temperature range of -20°C to +85°C, prefix 'UGS' devices over an extended range of -40°C to +125°C, and prefix 'UGL' devices over the range of -40°C to +150°C.

FEATURES

- 4.5 V to 24 V Operation
- Reverse Battery Protection
- Superior Temperature Stability
- Superior Supply Voltage Stability
- Activate with Multi-Pole Ring Magnets
- Solid-State Reliability
- Small Size
- Constant Output Amplitude
- Resistant to Physical Stress

Always order by complete part number including prefix and suffix, e.g., **UGN3132LT**.

3132 AND 3133 BIPOLAR HALL-EFFECT SWITCHES



ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $T_A = +25^\circ\text{C}$

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Limits			
			Min.	Typ.	Max.	Units
Supply Voltage	V_{CC}	Operating	4.5	—	24	V
Output Saturation Voltage	$V_{OUT(SAT)}$	$I_{OUT} = 20\text{ mA}$, $B \geq B_{OP}$	—	145	400	mV
Output Leakage Current	I_{OFF}	$V_{OUT} = 24\text{ V}$, $B \leq B_{RP}$	—	<1.0	10	μA
Supply Current	I_{CC}	$V_{CC} = 24\text{ V}$, $B \leq B_{RP}$	—	4.3	9.0	mA
Output Rise Time	t_r	$V_{CC} = 12\text{ V}$, $R_L = 820\ \Omega$, $C_L = 20\text{ pF}$	—	0.04	2.0	μs
Output Fall Time	t_f	$V_{CC} = 12\text{ V}$, $R_L = 820\ \Omega$, $C_L = 20\text{ pF}$	—	0.18	2.0	μs

MAGNETIC CHARACTERISTICS over operating temperature and voltage range.

Characteristic	Symbol	Device Type*	Limits			
			Min.	Typ.	Max.	Units
Operate Point	B_{OP}	3132	—	32	95	G
		3133	—	32	75	G
Release Point	B_{RP}	3132	-95	-20	—	G
		3133	-75	-20	—	G
Hysteresis	B_{hys}	Both	30	52	—	G

NOTE: As used here, negative flux densities are defined as less than zero (algebraic convention.)

Typical values are at $T_A = +25^\circ\text{C}$ and $V_{CC} = 12\text{ V}$.

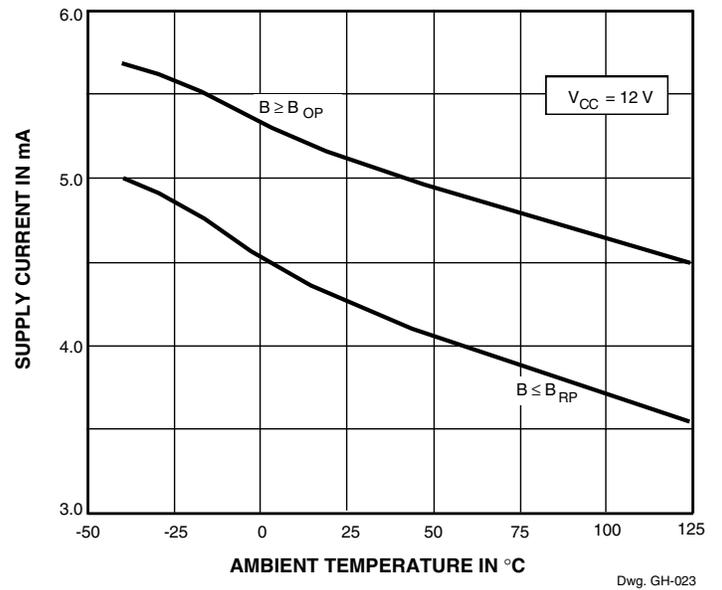
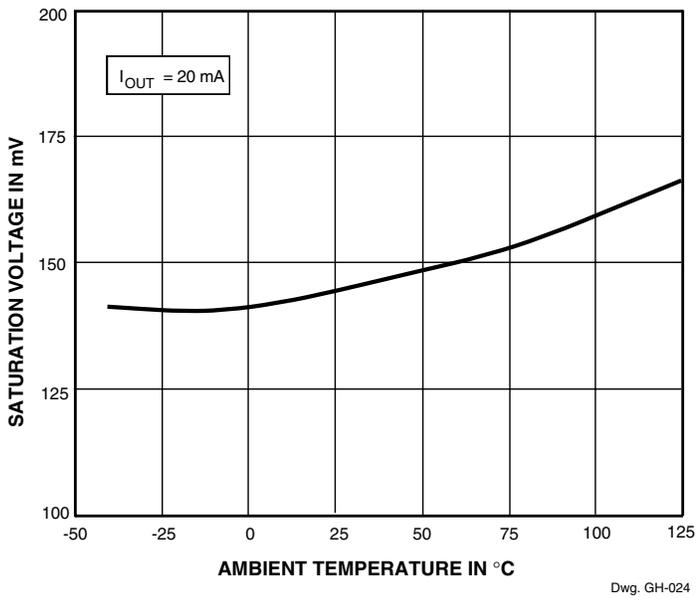
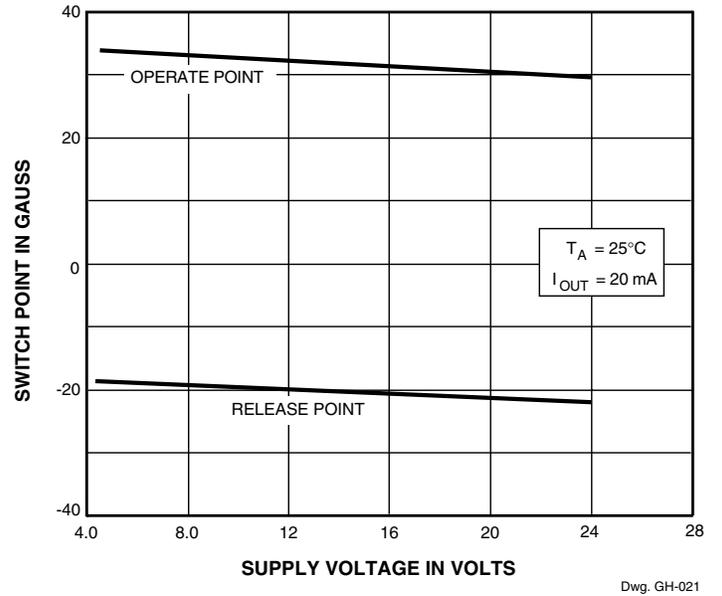
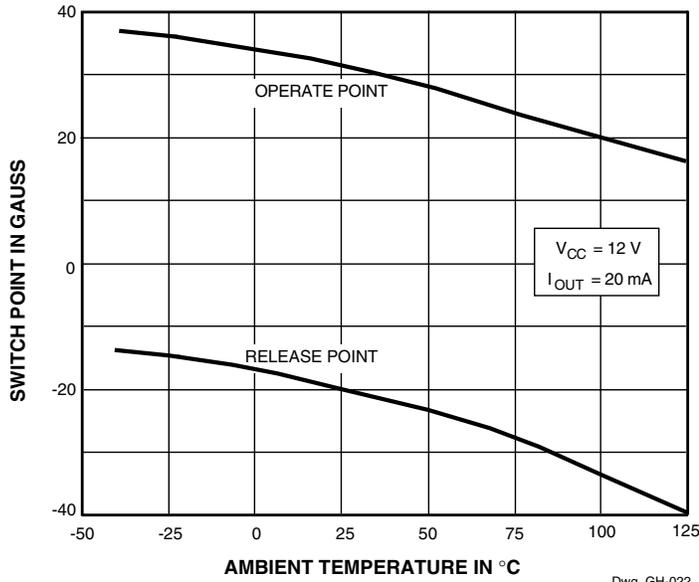
* Complete part number includes a prefix denoting operating temperature range (UGL, UGN, or UGS) and a suffix denoting package type (LT, U, or UA).



115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000
Copyright © 1996,1999, Allegro MicroSystems, Inc.

3132 AND 3133 BIPOLAR HALL-EFFECT SWITCHES

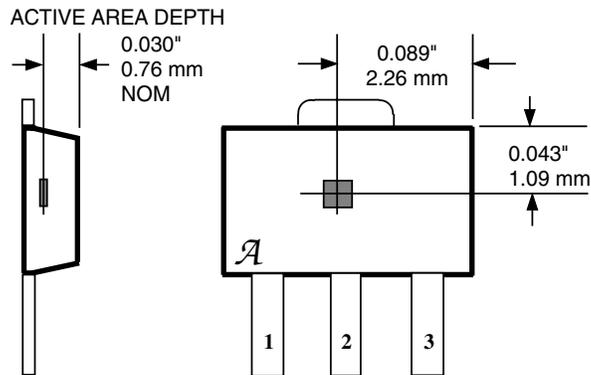
TYPICAL CHARACTERISTICS



3132 AND 3133
BIPOLAR
HALL-EFFECT SWITCHES

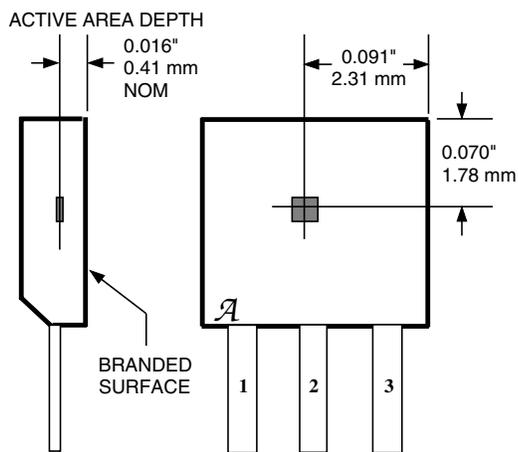
SENSOR LOCATIONS
 ($\pm 0.005"$ [0.13mm] die placement)

SUFFIX "LT"



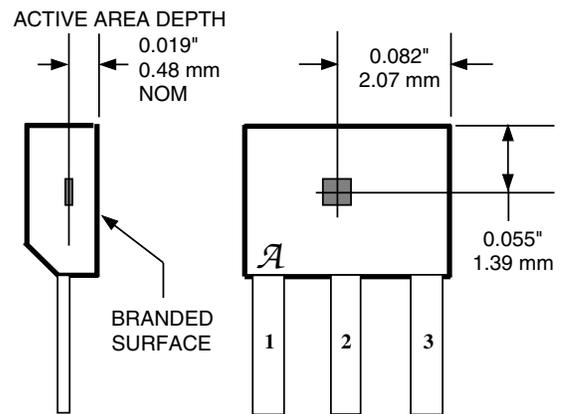
Dwg. MH-008-2C

SUFFIX "U"



Dwg. MH-002-2B

SUFFIX "UA"

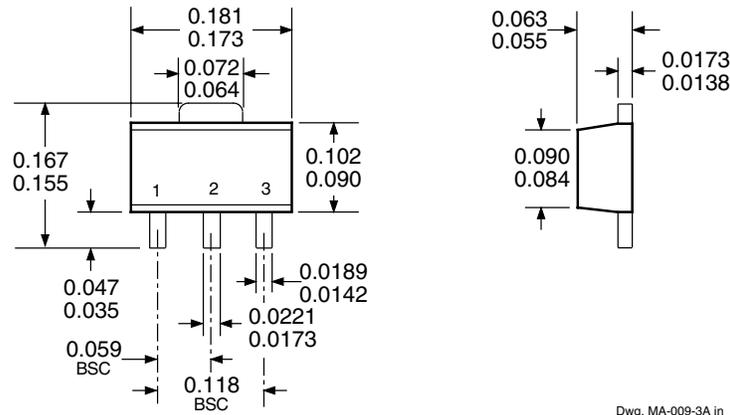


Dwg. MH-011-10

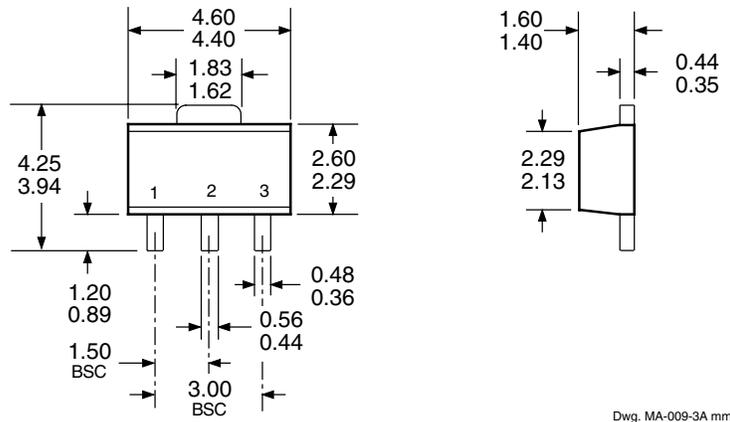
3132 AND 3133 BIPOLAR HALL-EFFECT SWITCHES

PACKAGE DESIGNATOR 'LT' (SOT-89/TO-243AA)

Dimensions in Inches
(for reference only)



Dimensions in Millimeters
(controlling dimensions)



NOTES: 1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).

2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.

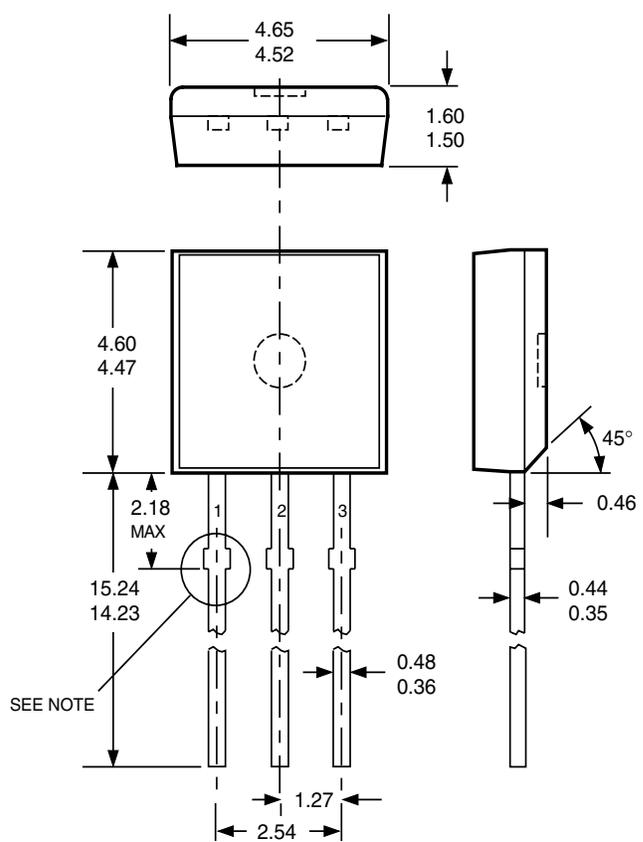
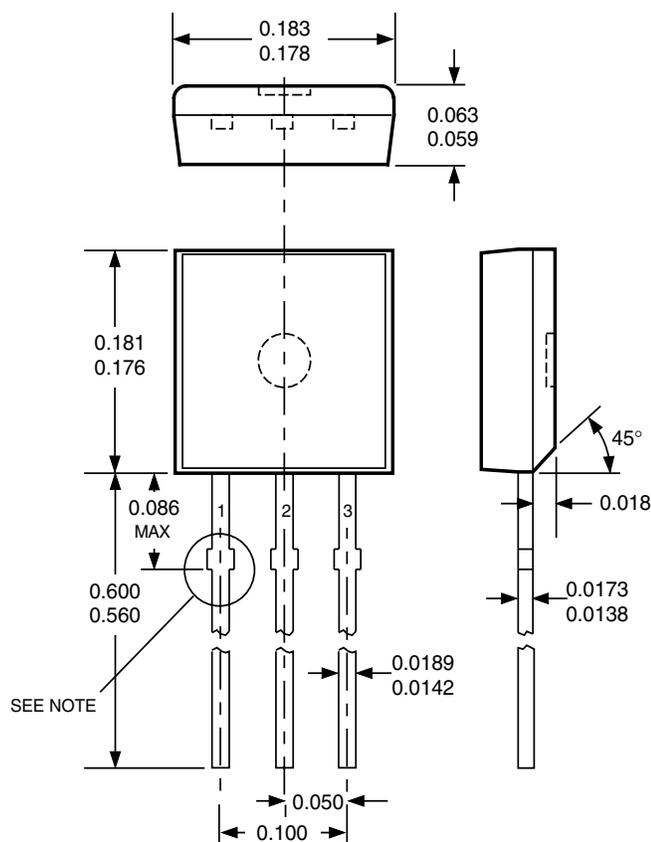
3. Height does not include mold gate flash.

3132 AND 3133 BIPOLAR HALL-EFFECT SWITCHES

PACKAGE DESIGNATOR 'U'

Dimensions in Inches
(controlling dimensions)

Dimensions in Millimeters
(for reference only)



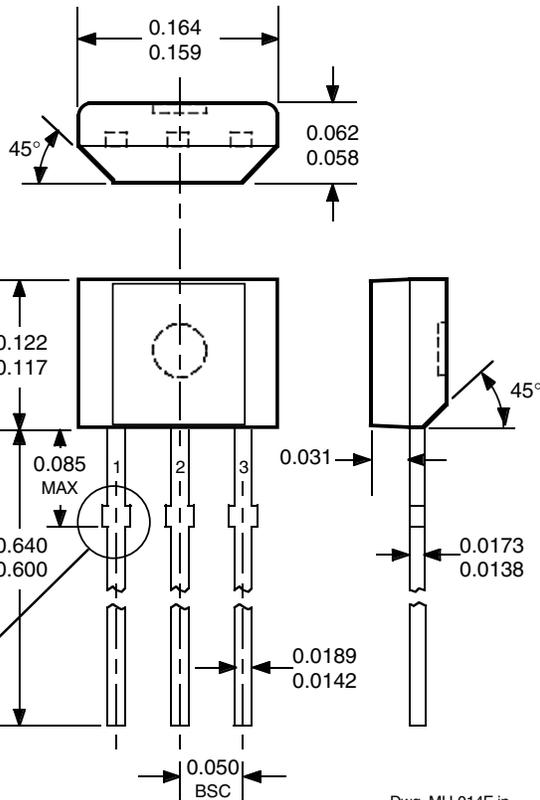
**Devices in the 'U' package are
NOT RECOMMENDED FOR NEW DESIGN**

- NOTES: 1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).
- Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.
 - Height does not include mold gate flash.
 - Recommended minimum PWB hole diameter to clear transition area is 0.035" (0.89 mm).
 - Where no tolerance is specified, dimension is nominal.

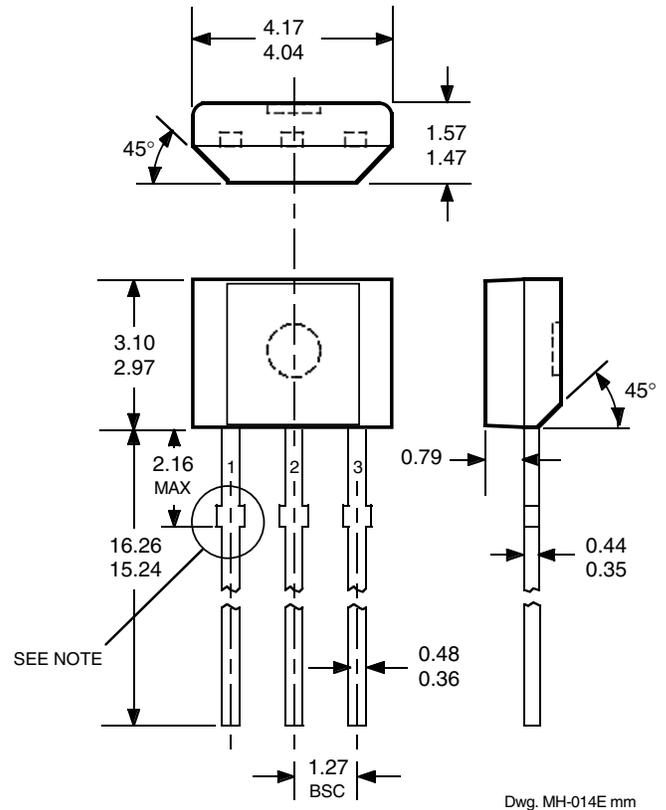
3132 AND 3133 BIPOLAR HALL-EFFECT SWITCHES

PACKAGE DESIGNATOR 'UA'

Dimensions in Inches
(controlling dimensions)



Dimensions in Millimeters
(for reference only)



- NOTES: 1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).
2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.
3. Height does not include mold gate flash.
4. Recommended minimum PWB hole diameter to clear transition area is 0.035" (0.89 mm).
5. Where no tolerance is specified, dimension is nominal.

The products described herein are manufactured under one or more of the following U.S. patents: 5,045,920; 5,264,783; 5,442,283; 5,389,889; 5,581,179; 5,517,112; 5,619,137; 5,621,319; 5,650,719; 5,686,894; 5,694,038; 5,729,130; 5,917,320; and other patents pending.

Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

Allegro products are not authorized for use as critical components in life-support appliances, devices, or systems without express written approval.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use.

3132 AND 3133
BIPOLAR
HALL-EFFECT SWITCHES

HALL-EFFECT SENSORS SELECTION GUIDE

Partial Part Number	Avail. Oper. Temp.	Characteristics at T _A = +25°C			Features	Notes
		BOP(max)	BRP(min)	B _{hys} (typ)		
HALL-EFFECT UNIPOLAR SWITCHES in order of BOP and B_{hys}						
3240	E/L	+50	+5.0	10	chopper stabilized	1
3210	E	±70	±5.0	7.7	micropower, chopper stabilized	
3361	E	+120	+50	5.0*	2-wire, chopper stabilized	
3362	E	+120	+50	5.0*	2-wire, chopper stabilized	
3161	E	+160	+30	20	2-wire	
3141	E/L	+160	+10	55		
3235	S	+175	+25	15*	output 1	2
		-25	-175	15*	output 2	2
5140	E	+200	+50	55	300 mA output	1, 3
3142	E/L	+230	+75	55		
3143	E/L	+340	+165	55		
3144	E/L	+350	+50	55		
3122	E/L	+400	+140	105		
3123	E/L	+440	+180	105		
3121	E/L	+450	+125	105		
3150	J	+40 to +850	-	20	programmable, chopper stabilized	1
HALL-EFFECT LATCHES & BIPOLAR SWITCHES[†] in order of BOP and B_{hys}						
3260	E/L	+30	-30	20	bipolar, chopper stabilized	
3280	E/L	+40	-40	45	chopper stabilized	
3134	E/L	+50	-50	27	bipolar switch	
3133	K/L/S	+75	-75	52	bipolar switch	
3281	E/L	+90	-90	100	chopper stabilized	
3132	K/L/S	+95	-95	52	bipolar switch	
3187	E/L	+150	-150	100*		
3177	S	+150	-150	200		
3625	S	+150	-150	200	900 mA outputs	1, 3, 5
3626	S	+150	-150	200	400 mA outputs	1, 3, 5
3195	E/L	+160	-160	220		1, 4
3197	L	+160	-160	230		1
3175	S	+170	-170	200		
3188	E/L	+180	-180	200*		
3283	E/L	+180	-180	300	chopper stabilized	
3189	E/L	+230	-230	100*		
3275	S	+250	-250	100*		5
3185	E/L	+270	-270	340*		

Operating Temperature Ranges:

S = -20°C to +85°C, E = -40°C to +85°C, J = -40°C to +115°C, K = -40°C to +125°C, L = -40°C to +150°C

Notes 1. Protected.

2. Output 1 switches on south pole, output 2 switches on north pole for 2-phase, bifilar-wound, unipolar-driven brushless dc motor control.

3. Power driver output.

4. Active pull down.

5. Complementary outputs for 2-phase bifilar-wound, unipolar-driven brushless dc motor control.

* Minimum.

† Latches will not switch on removal of magnetic field; bipolar switches may switch on removal of field but require field reversal for reliable operation over operating temperature range.



USER GUIDE AND SPECIFICATIONS

NI USB-6008/6009

Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device

Français Deutsch 日本語 한국어 简体中文
ni.com/manuals

This user guide describes how to use the National Instruments USB-6008 and National Instruments USB-6009 data acquisition (DAQ) devices and lists specifications.

The NI USB-6008/6009 provides connection to eight single-ended analog input (AI) channels, two analog output (AO) channels, 12 digital input/output (DIO) channels, and a 32-bit counter with a full-speed USB interface. Table 1 compares the devices.

Table 1. NI USB-6008 and NI USB-6009 Comparison

Feature	NI USB-6008	NI USB-6009
AI resolution	12 bits differential, 11 bits single-ended	14 bits differential, 13 bits single-ended
Maximum AI sample rate, single channel*	10 kS/s	48 kS/s
Maximum AI sample rate, multiple channels (aggregate)*	10 kS/s	48 kS/s
DIO configuration	Open collector [†]	Each channel individually programmable as open collector or active drive [†]
* System-dependent. [†] This document uses NI-DAQmx naming conventions. Open-drain is called open collector and push-pull is called active drive.		

Figure 1 shows key functional components of the NI USB-6008/6009.

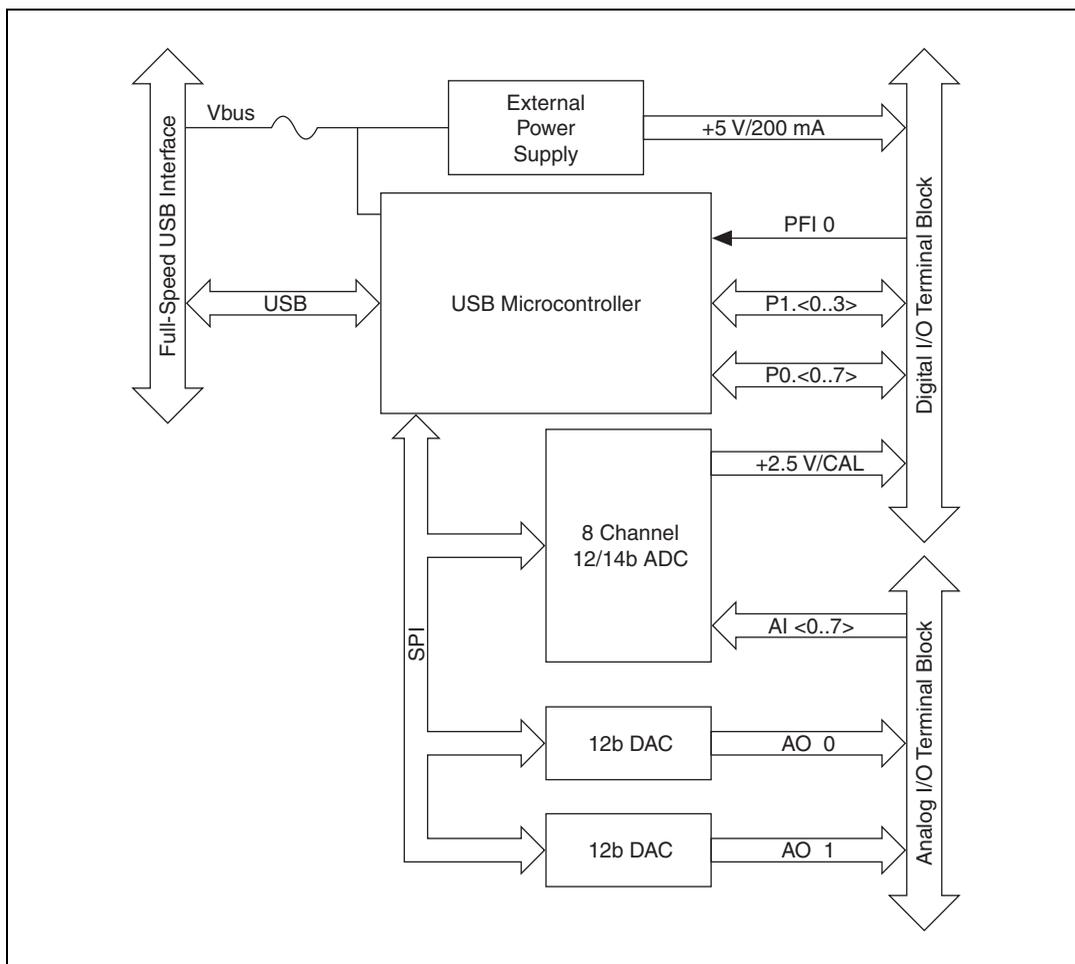


Figure 1. NI USB-6008/6009 Block Diagram

Contents

Safety Guidelines	3
Electromagnetic Compatibility Guidelines	3
Unpacking	4
Setting Up the NI USB-6008/6009	4
Using the NI USB-6008/6009 in an Application	6
Features	7
USB Connector and USB Cable Strain Relief	7
LED Indicator	8
Screw Terminal Connector Plugs	8
Firmware	8
Cables and Accessories	9
Pinout and Signal Descriptions	9

Analog Input	11
Analog Input Modes and Signal Sources	11
Floating Signal Sources	12
Ground-Referenced Signal Sources	13
Taking Differential Measurements	14
Taking Referenced Single-Ended Measurements	15
Digital Trigger	15
Analog Output	16
Connecting Analog Output Loads	16
Minimizing Glitches on the Output Signal	16
Digital I/O	17
Source/Sink Information	18
I/O Protection	19
Power-On States	19
Static DIO	19
PFI 0	19
Using PFI 0 as a Digital Trigger	19
Using PFI 0 as an Event Counter	19
External Reference and Power Source	20
+2.5 V External Reference	20
+5 V Power Source	20
Specifications	20
Where to Go from Here	27
Example Programs	27
Related Documentation	27
Where to Go for Support	30

Safety Guidelines

Operate the NI USB-6008/6009 device only as described in this user guide.



Caution Do not operate the NI USB-6008/6009 in a manner not specified in this document. Misuse of the device can result in a hazard. You can compromise the safety protection built into the device if the device is damaged in any way. If the device is damaged, contact National Instruments for repair.



Caution Do not substitute parts or modify the device except as described in this document. Use the device only with the chassis, modules, accessories, and cables specified in the installation instructions. You must have all covers and filler panels installed during operation of the device.



Caution Do not operate the device in an explosive atmosphere or where there may be flammable gases or fumes. If you must operate the device in such an environment, it must be in a suitably rated enclosure.

Electromagnetic Compatibility Guidelines

This product was tested and complies with the regulatory requirements and limits for electromagnetic compatibility (EMC) as stated in the product specifications. These requirements and limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference when the product is operated in its intended operational electromagnetic environment.

This product is intended for use in industrial locations. There is no guarantee that harmful interference will not occur in a particular installation, when the product is connected to a test object, or if the product is used in residential areas. To minimize the potential for the product to cause interference to radio and

television reception or to experience unacceptable performance degradation, install and use this product in strict accordance with the instructions in the product documentation.

Furthermore, any changes or modifications to the product not expressly approved by National Instruments could void your authority to operate it under your local regulatory rules.



Caution To ensure the specified EMC performance, operate this product only with shielded cables and accessories.



Caution This product may become more sensitive to electromagnetic disturbances in the operational environment when test leads are attached or when connected to a test object.



Caution Emissions that exceed the regulatory requirements may occur when this product is connected to a test object.



Caution Changes or modifications not expressly approved by National Instruments could void the user's authority to operate the hardware under the local regulatory rules.

Unpacking

The NI USB-6008/6009 device ships in an antistatic package to prevent electrostatic discharge (ESD). ESD can damage several components on the device.



Caution *Never* touch the exposed pins of connectors.

To avoid ESD damage in handling the device, take the following precautions:

- Ground yourself with a grounding strap or by touching a grounded object.
- Touch the antistatic package to a metal part of your computer chassis before removing the device from the package.

Remove the device from the package and inspect it for loose components or any other signs of damage. Notify NI if the device appears damaged in any way. Do not install a damaged device in your computer or chassis.

Store the device in the antistatic package when the device is not in use.

Setting Up the NI USB-6008/6009

Complete the following steps to get started with the NI USB-6008/6009.



Note For information about non-Windows operating system support, refer to the *Getting Started with NI-DAQmx Base for Linux and Mac OS X Users* document available from ni.com/manuals.

1. Install the application software (if applicable), as described in the installation instructions that accompany your software.
2. Install NI-DAQmx¹.



Note The NI-DAQmx software is included on the disk shipped with your kit and is available for download at ni.com/support. The documentation for NI-DAQmx is available after installation from **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQ**. Other NI documentation is available from ni.com/manuals.

¹ NI USB-6008/6009 devices are supported by NI-DAQmx 7.5 and later.

3. Install the 16-position screw terminal connector plugs by inserting them into the connector jacks as shown in Figure 2.

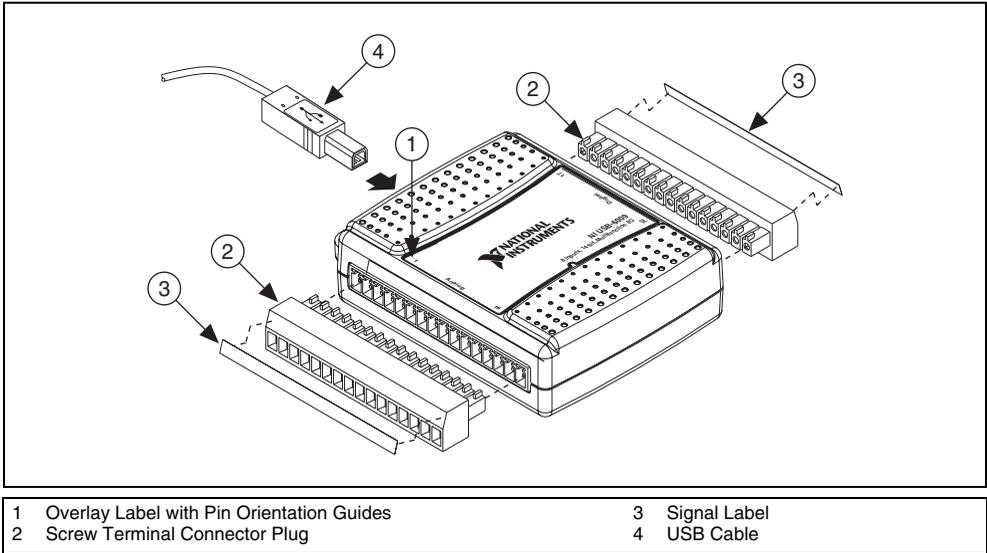


Figure 2. Signal Label Application Diagram

4. Affix the provided signal labels to the screw terminal connector plugs. You can choose labels with pin numbers, signal names, or blank labels, as shown in Figure 3. Choose one of the labels, align the correct label with the terminals printed on the top panel of your device and apply the label, as shown in Figure 2.

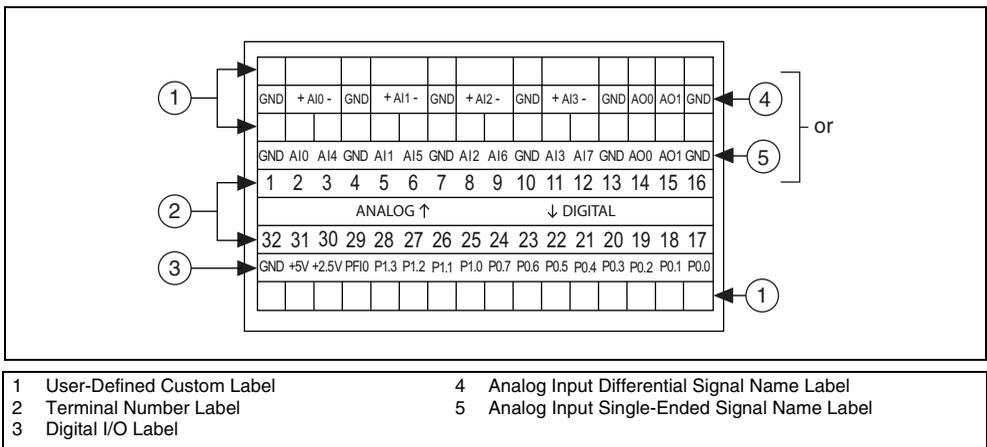


Figure 3. NI USB-6008/6009 Signal Labels



Note After you label the screw terminal connector plugs, you must only insert them into the matching connector jack, as indicated by the overlay label on the device.

5. Plug one end of the USB cable into the NI USB-6008/6009 and the other end into an available USB port on the computer.



6. Double-click the **Measurement & Automation** icon, shown at left, on the desktop to open Measurement & Automation Explorer (MAX).
7. Expand **My System»Devices and Interfaces** and verify that the NI USB-6008/6009 is listed. If your device does not appear, press <F5> to refresh the view in MAX. If your device is still not recognized, refer to ni.com/support/daqmx for troubleshooting information.
8. Self-test your device in MAX by right-clicking **NI USB-600x** and selecting **Self-Test**. Self-test performs a brief test to determine successful device installation. When the self-test finishes, a message indicates successful verification or if an error occurred. If an error occurs, refer to ni.com/support/daqmx.



Caution To ensure the specified EMC performance, operate this product only with shielded cables and accessories.

9. Connect the wires (16 to 28 AWG) of a shielded, multiconductor cable to the screw terminals by stripping 6.35 mm (0.25 in.) of insulation, inserting the wires into the screw terminals, and securely tightening the screws with the flathead screwdriver to a torque of 0.22–0.25 N · m (2.0–2.2 lb · in.). Refer to Figure 6 for the NI USB-6008/6009 pinout.
If using a shielded cable, connect the cable shield to a nearby GND terminal.



Note For information about sensors, go to ni.com/sensors. For information about IEEE 1451.4 TEDS smart sensors, go to ni.com/teds.

10. Run a Test Panel in MAX by right-clicking **NI USB-600x** and selecting **Test Panels**.
Click **Start** to test the device functions, or **Help** for operating instructions. Click **Close** to exit the test panel.

Using the NI USB-6008/6009 in an Application

You can use the DAQ Assistant through many NI application software programs to configure virtual and measurement channels. Table 2 lists DAQ Assistant tutorial locations for NI applications.

Table 2. DAQ Assistant Tutorial Locations

NI Application	Tutorial Location
LabVIEW	Go to Help»LabVIEW Help . Next, go to Getting Started with LabVIEW»Getting Started with DAQ»Taking an NI-DAQmx Measurement in LabVIEW .
LabWindows™/CVI™	Go to Help»Contents . Next, go to Using LabWindows/CVI»Data Acquisition»Taking an NI-DAQmx Measurement in LabWindows/CVI .
Measurement Studio	Go to NI Measurement Studio Help»Getting Started with the Measurement Studio Class Libraries»Measurement Studio Walkthroughs»Walkthrough: Creating a Measurement Studio NI-DAQmx Application .
LabVIEW SignalExpress	Go to Help»Taking an NI-DAQmx Measurement in SignalExpress .

Refer to the [Where to Go from Here](#) section for information about programming examples for NI-DAQmx and NI-DAQmx Base.

Features

The NI USB-6008/6009 features a USB connector, USB cable strain relief, two screw terminal connector plugs for I/O, and an LED indicator, as shown in Figure 4.

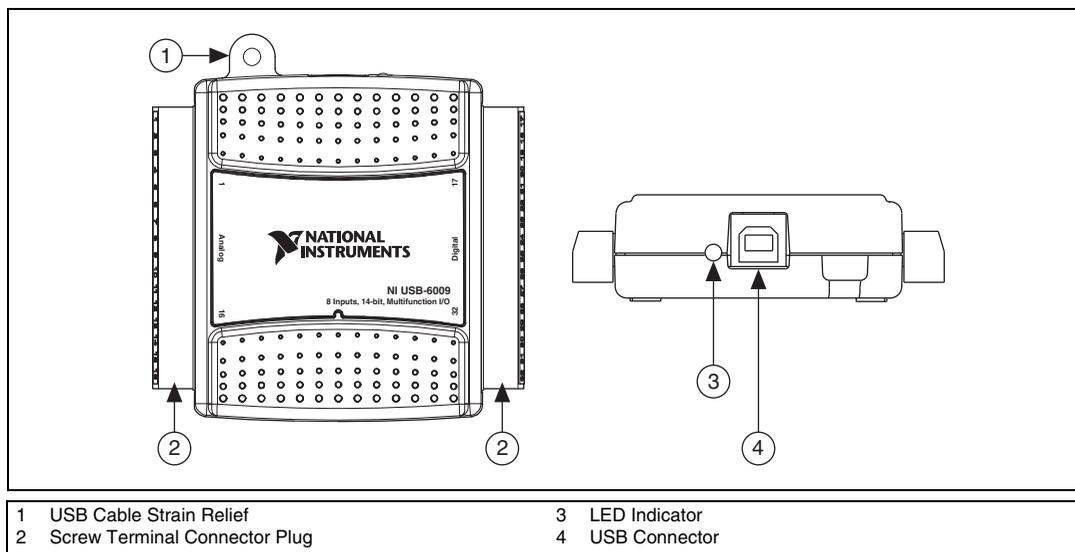


Figure 4. NI USB-6008/6009 Top and Back Views

USB Connector and USB Cable Strain Relief

The NI USB-6008/6009 features a USB connector for full-speed USB interface. You can provide strain relief for the USB cable by threading a zip tie through the USB cable strain relief ring and tightening around a looped USB cable, as shown in Figure 5.

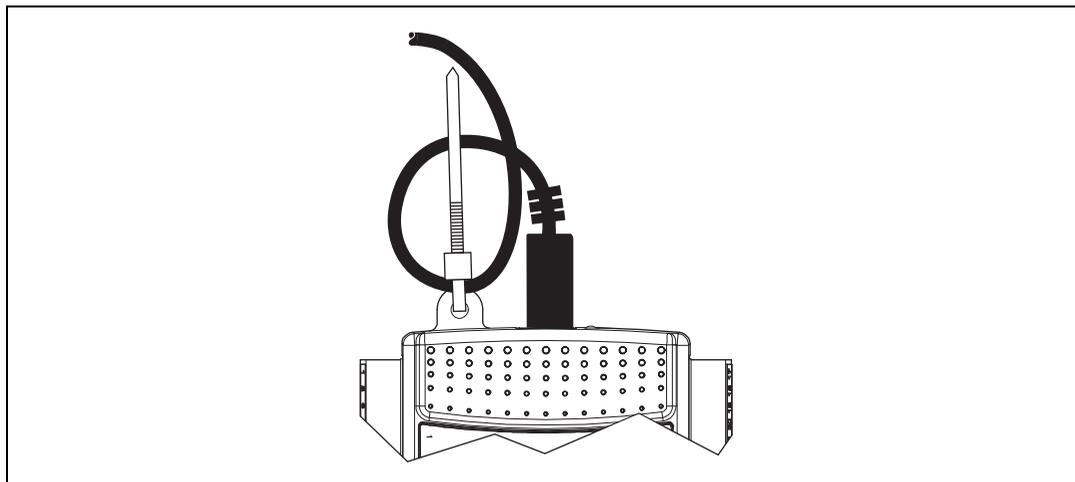


Figure 5. NI USB-6008/6009 Strain Relief

LED Indicator

The NI USB-6008/6009 device has a green LED indicator that indicates device status, as listed in Table 3. When the device is connected to a USB port, the LED blinks steadily to indicate that the device is initialized and is receiving power from the connection.

Table 3. LED State/Device Status

LED State	Device Status
Not lit	Device not connected or in suspend
On, not blinking	Device connected but not initialized, or the computer is in standby mode. In order for the device to be recognized, the device must be connected to a computer that has NI-DAQmx installed on it.
Single-blink	Operating normally

Screw Terminal Connector Plugs

The NI USB-6008/6009 ships with one detachable screw terminal connector plug for analog signals and one detachable screw terminal connector plug for digital signals. These screw terminal connectors provide 16 connections that use 16–28 AWG wire. Refer to step 4 of the [Setting Up the NI USB-6008/6009](#) section for information about selecting labels for the screw terminal connector plugs. Refer to the [Pinout and Signal Descriptions](#) section for the device pinout and signal descriptions.

You can order additional connectors and labels for your device. Refer to the [Cables and Accessories](#) section for ordering information.

Firmware

The firmware on the NI USB-6008/6009 refreshes whenever the device is connected to a computer with NI-DAQmx. NI-DAQmx automatically uploads the compatible firmware version to the device. The firmware version may be upgraded when new versions of NI-DAQmx release.

Cables and Accessories

Table 4 contains information about cables and accessories available for the NI USB-6008/6009. For a complete list of accessories and ordering information, refer to the pricing section of the NI USB-6008 or NI USB-6009 product page at ni.com.

Table 4. NI USB-6008/6009 Cables and Accessories

Accessory	Part Number	Description
USB-6008/6009 Accessory Kit	779371-01	Four additional screw-terminal connectors, connector labels, and a screwdriver
USB-6000 Series Prototyping Accessory	779511-01	Unshielded breadboarding accessory for custom-defined signal conditioning and prototyping. You can use up to two accessories per device.
Hi-Speed USB Cable	184125-01 184125-02	1 m and 2 m lengths
<p>Caution: For compliance with Electromagnetic Compatibility (EMC) requirements, this product must be operated with shielded cables and accessories. If unshielded cables or accessories are used, the EMC specifications are no longer guaranteed unless all unshielded cables and/or accessories are installed in a shielded enclosure with properly designed and shielded input/output ports.</p>		

Pinout and Signal Descriptions

Figure 6 shows the pinout of the NI USB-6008/6009. Analog input signal names are listed as single-ended analog input name, AI x , and then differential analog input name, (AI x +/-). Refer to Table 5 for a detailed description of each signal.

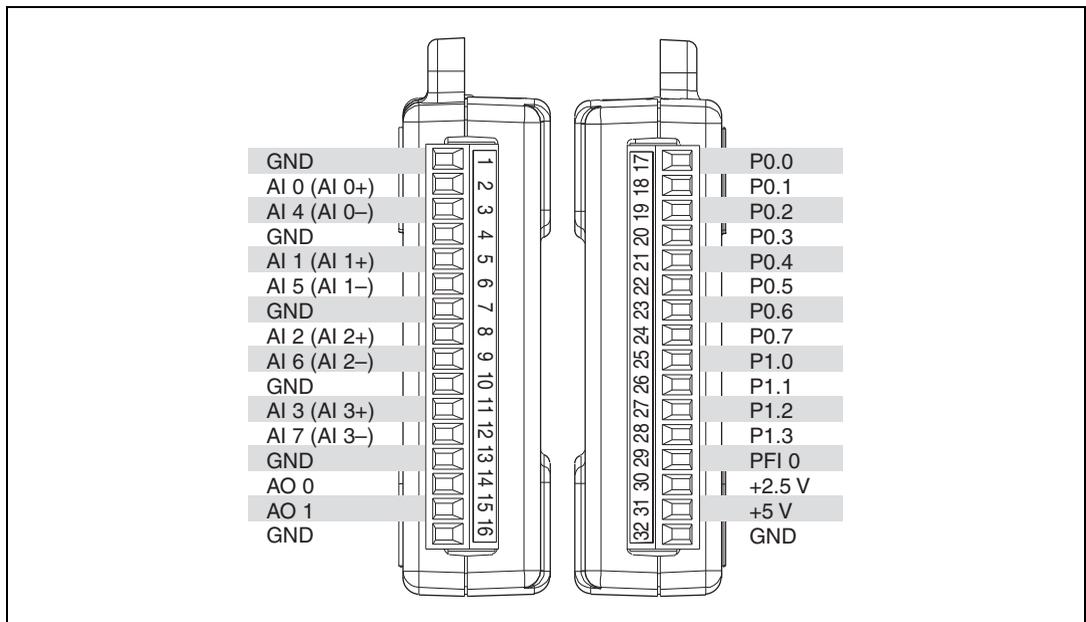


Figure 6. NI USB-6008/6009 Pinout

Table 5. Signal Descriptions

Signal Name	Reference	Direction	Description
GND	—	—	Ground —The reference point for the single-ended analog input measurements, analog output voltages, digital signals, +5 VDC supply, and +2.5 VDC at the I/O connector, and the bias current return point for differential mode measurements.
AI <0..7>	Varies	Input	Analog Input Channels 0 to 7 —For single-ended measurements, each signal is an analog input voltage channel. For differential measurements, AI 0 and AI 4 are the positive and negative inputs of differential analog input channel 0. The following signal pairs also form differential input channels: AI<1, 5>, AI<2, 6>, and AI<3, 7>. Refer to the Analog Input section for more information.
AO <0, 1>	GND	Output	Analog Output Channels 0 and 1 —Supplies the voltage output of AO channel 0 or AO channel 1. Refer to the Analog Output section for more information.
P0.<0..7>	GND	Input or Output	Port 0 Digital I/O Channels 0 to 7 —You can individually configure each signal as an input or output. Refer to the Digital I/O section for more information.
P1.<0..3>	GND	Input or Output	Port 1 Digital I/O Channels 0 to 3 —You can individually configure each signal as an input or output. Refer to the Digital I/O section for more information.
PFI 0	GND	Input	PFI 0 —This pin is configurable as either a digital trigger or an event counter input. Refer to the PFI 0 section for more information.
+2.5 V	GND	Output	+2.5 V External Reference —Provides a reference for wrap-back testing. Refer to the +2.5 V External Reference section for more information.
+5 V	GND	Output	+5 V Power Source —Provides +5 V power up to 200 mA. Refer to the +5 V Power Source section for more information.

Analog Input

The NI USB-6008/6009 has eight analog input channels that you can use for four differential analog input measurements or eight single-ended analog input measurements.

Figure 7 shows the analog input circuitry of the NI USB-6008/6009.

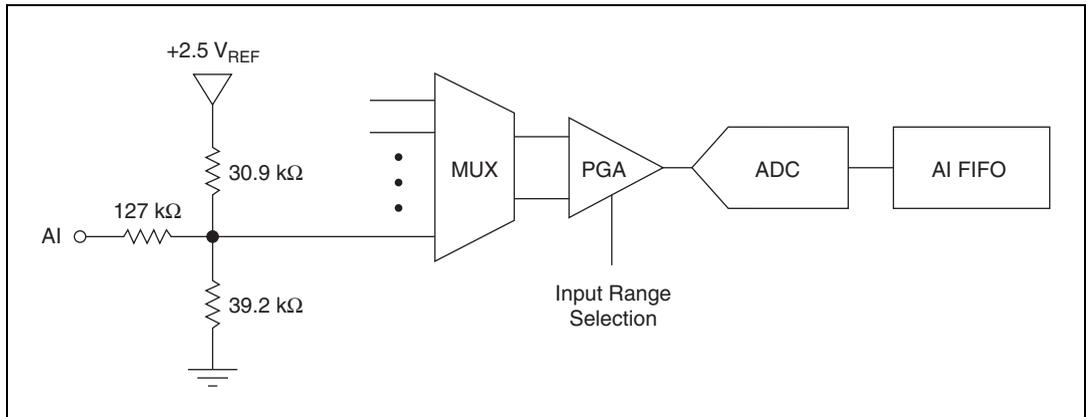


Figure 7. NI USB-6008/6009 Analog Input Circuitry

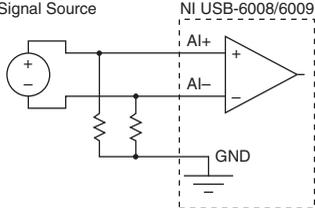
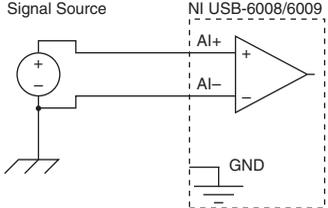
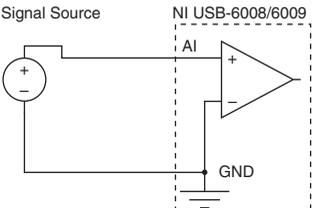
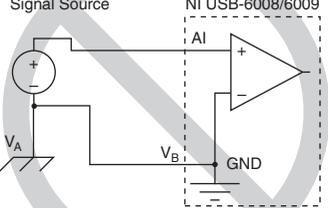
The main blocks featured in the NI USB-6008/6009 analog input circuitry are as follows:

- **MUX**—The NI USB-6008/6009 has one analog-to-digital converter (ADC). The multiplexer (MUX) routes one AI channel at a time to the PGA.
- **PGA**—The programmable-gain amplifier provides input gains of 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, or 20 when configured for differential measurements and gain of 1 when configured for single-ended measurements. The PGA gain is automatically calculated based on the voltage range selected in the measurement application.
- **ADC**—The analog-to-digital converter (ADC) digitizes the AI signal by converting the analog voltage into digital code.
- **AI FIFO**—The NI USB-6008/6009 can perform both single and multiple analog-to-digital conversions of a fixed or infinite number of samples. A first-in-first-out (FIFO) buffer holds data during AI acquisitions to ensure that no data is lost.

Analog Input Modes and Signal Sources

You can configure the AI channels on the NI USB-6008/6009 to take differential or referenced single-ended (RSE) measurements. Table 6 summarizes the recommended analog input mode(s) for floating signal sources and ground-referenced signal sources. Refer to Table 5 for more information about I/O connections for single-ended or differential measurements.

Table 6. Analog Input Configurations

Analog Input Mode	<p align="center">Floating Signal Sources (Not Connected to Building Ground)</p> <p>Examples:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ungrounded thermocouples • Signal conditioning with isolated outputs • Battery devices 	<p align="center">Ground-Referenced Signal Sources</p> <p>Example:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plug-in instruments with non-isolated outputs
Differential (DIFF)		
Referenced Single-Ended (RSE)		<p align="center">NOT RECOMMENDED</p>  <p align="center">Ground-loop potential ($V_A - V_B$) are added to measured signal.</p>

Floating Signal Sources

A floating signal source is not connected to the building ground system, but has an isolated ground-reference point. Some examples of floating signal sources are outputs of transformers, thermocouples, battery-powered devices, optical isolators, and isolation amplifiers. An instrument or device that has an isolated output is a floating signal source.

Refer to the NI Developer Zone document, *Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals*, for more information. To access this document, go to ni.com/info and enter the Info Code `rdfwn3`.

When to Use Differential Connections with Floating Signal Sources

Use DIFF input connections for any channel that meets any of the following conditions:

- Your application requires input ranges other than ± 10 V.
- The input signal is low level and requires greater accuracy.
- The leads connecting the signal to the device are greater than 3 m (10 ft).
- The input signal requires a separate ground-reference point or return signal.

- The signal leads travel through noisy environments.
- Two analog input channels, AI+ and AI–, are available for the signal.

DIFF signal connections reduce noise pickup and increase common-mode noise rejection. DIFF signal connections also allow input signals to float within the working voltage of the device.

Refer to the [Taking Differential Measurements](#) section for more information about differential connections.

When to Use Referenced Single-Ended (RSE) Connections with Floating Signal Sources

Only use RSE input connections if the input signal meets all of the following conditions:

- The input signal can share a common reference point, GND, with other signals that use RSE.
- Your application permits the use of the ± 10 V input range.
- The leads connecting the signal to the device are less than 3 m (10 ft).

DIFF input connections are recommended for greater signal integrity for any input signal that does not meet the preceding conditions.

In the single-ended modes, more electrostatic and magnetic noise couples into the signal connections than in DIFF configurations. The coupling is the result of differences in the signal path. Magnetic coupling is proportional to the area between the two signal conductors. Electrical coupling is a function of how much the electric field differs between the two conductors.

With this type of connection, the PGA rejects both the common-mode noise in the signal and the ground potential difference between the signal source and the device ground.

Refer to the [Taking Referenced Single-Ended Measurements](#) section for more information about RSE connections.

Ground-Referenced Signal Sources

A ground-referenced signal source is a signal source connected to the building system ground. It is already connected to a common ground point with respect to the device, assuming that the computer is plugged into the same power system as the source. Non-isolated outputs of instruments and devices that plug into the building power system fall into this category.

The difference in ground potential between two instruments connected to the same building power system is typically between 1 and 100 mV, but the difference can be much higher if power distribution circuits are improperly connected. If a grounded signal source is incorrectly measured, this difference can appear as measurement error. Follow the connection instructions for grounded signal sources to eliminate this ground potential difference from the measured signal.

Refer to the NI Developer Zone document, *Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals*, for more information. To access this document, go to ni.com/info and enter the Info Code `rdFwn3`.

When to Use Differential Connections with Ground-Referenced Signal Sources

Use DIFF input connections for any channel that meets any of the following conditions:

- Your application requires input ranges other than ± 10 V.
- The input signal is low level and requires greater accuracy.
- The leads connecting the signal to the device are greater than 3 m (10 ft).
- The input signal requires a separate ground-reference point or return signal.
- The signal leads travel through noisy environments.
- Two analog input channels, AI+ and AI–, are available for the signal.

DIFF signal connections reduce noise pickup and increase common-mode noise rejection. DIFF signal connections also allow input signals to float within the working voltage of the device.

Refer to the *Taking Differential Measurements* section for more information about differential connections.

When to Use Referenced Single-Ended (RSE) Connections with Ground-Referenced Signal Sources

Do *not* use RSE connections with ground-referenced signal sources. Use differential connections instead.

As shown in the bottom-rightmost cell of Table 6, there can be a potential difference between GND and the ground of the sensor. In RSE mode, this ground loop causes measurement errors.

Taking Differential Measurements

For differential signals, connect the positive lead of the signal to the AI+ terminal, and the negative lead to the AI- terminal.

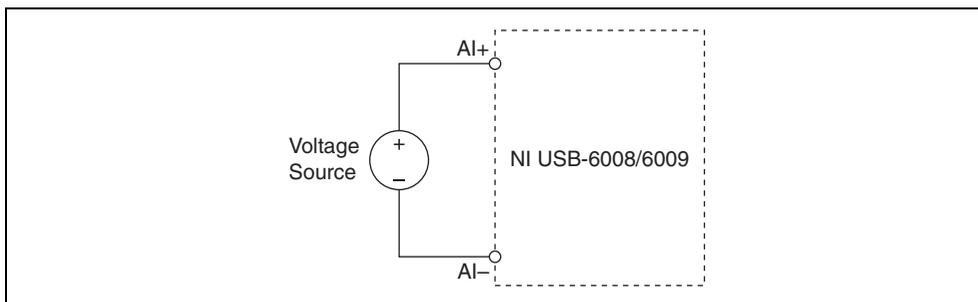


Figure 8. Connecting a Differential Voltage Signal

The differential input mode can measure ± 20 V signals in the ± 20 V range. However, the maximum voltage on any one pin is ± 10 V with respect to GND. For example, if AI 1 is +10 V and AI 5 is -10 V, then the measurement returned from the device is +20 V.

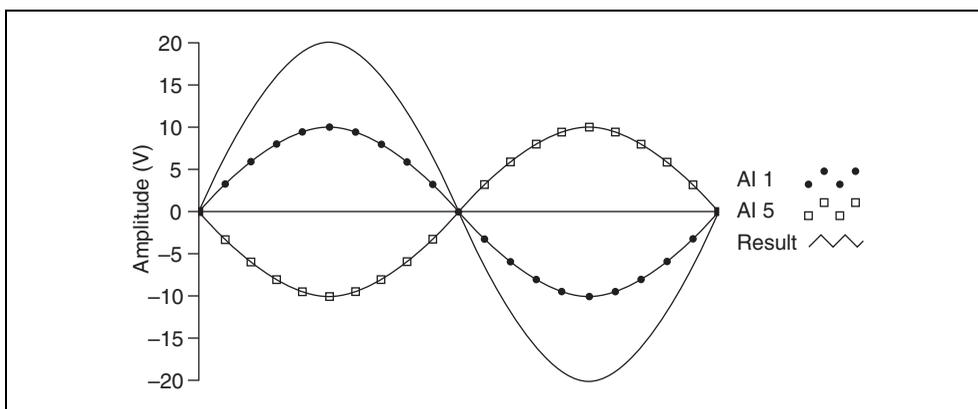


Figure 9. Example of a Differential 20 V Measurement

Connecting a signal greater than ± 10 V on either pin results in a clipped output.

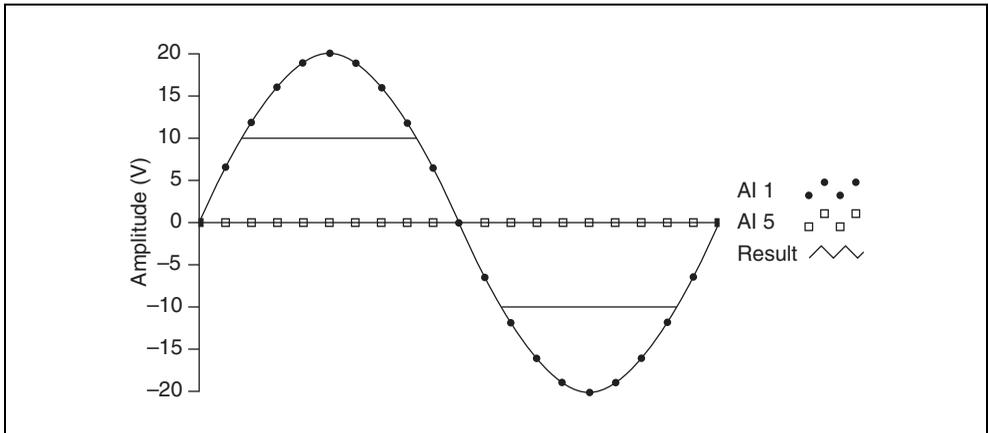


Figure 10. Exceeding ± 10 V on AI Returns Clipped Output

Taking Referenced Single-Ended Measurements

To connect referenced single-ended (RSE) voltage signals to the NI USB-6008/6009, connect the positive voltage signal to an AI terminal, and the ground signal to a GND terminal, as shown in Figure 11.

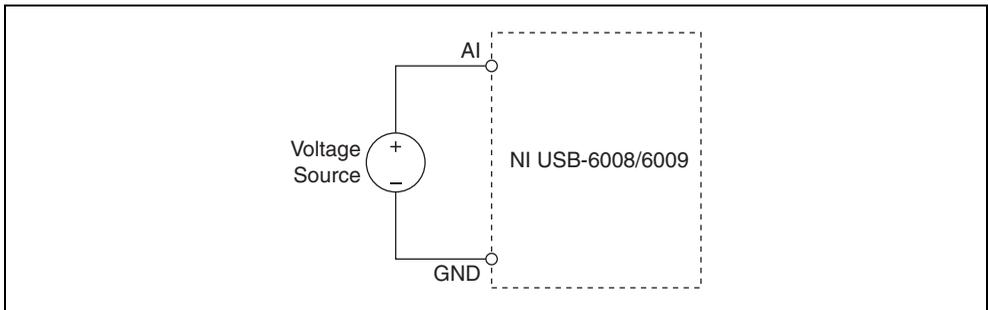


Figure 11. Connecting a Referenced Single-Ended Voltage Signal

When no signals are connected to the analog input terminal, the internal resistor divider may cause the terminal to float to approximately 1.4 V when the analog input terminal is configured as RSE. This behavior is normal and does not affect the measurement when a signal is connected.

Digital Trigger

You can configure PFI 0 as a digital trigger input for analog input tasks. Refer to the [Using PFI 0 as a Digital Trigger](#) section for more information.

Analog Output

The NI USB-6008/6009 has two independent analog output channels that can generate outputs from 0 to 5 V. All updates of analog output channels are software-timed. GND is the ground-reference signal for the analog output channels.

Figure 12 shows the circuitry of one analog output channel on the NI USB-6008/6009.

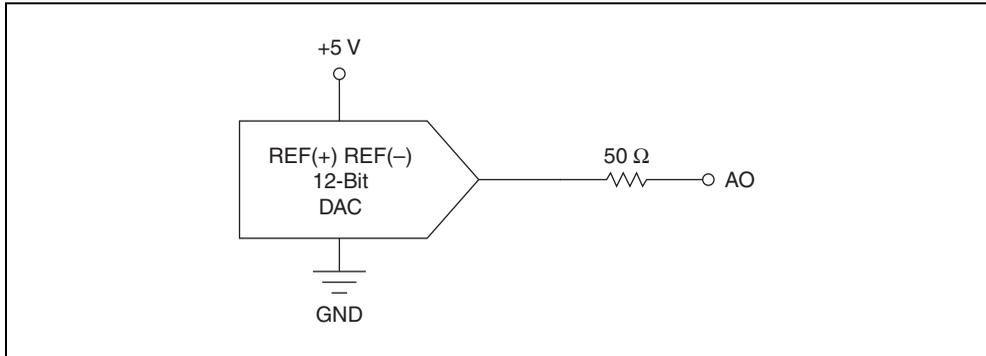


Figure 12. Circuitry of One Analog Output Channel

The main block featured in the NI USB-6008/6009 analog output circuitry is the digital-to-analog converter (DAC), which converts digital codes to analog voltages. There is one DAC for each analog output line.

Connecting Analog Output Loads

To connect loads to the NI USB-6008/6009, connect the positive lead of the load to the AO terminal, and connect the ground of the load to a GND terminal, as shown in Figure 13.

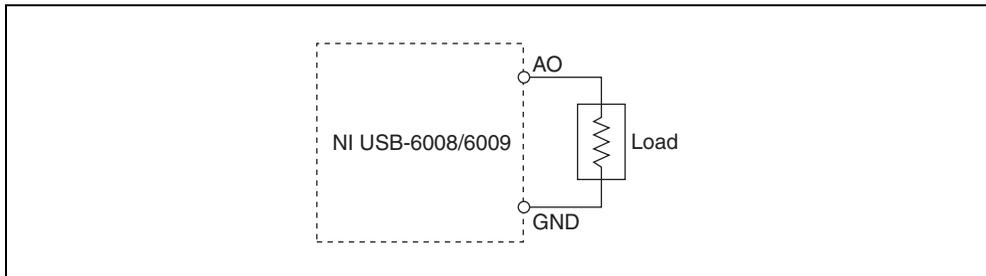


Figure 13. Connecting a Load

Minimizing Glitches on the Output Signal

When you use a DAC to generate a waveform, you may observe glitches in the output signal. These glitches are normal; when a DAC switches from one voltage to another, it produces glitches due to released charges. The largest glitches occur when the most significant bit of the DAC code changes. You can build a lowpass deglitching filter to remove some of these glitches, depending on the frequency and nature of the output signal. For more information about minimizing glitches, refer to the KnowledgeBase document, *Reducing Glitches on the Analog Output of MIO DAQ Devices*. To access this document, go to ni.com/info and enter the Info Code `exszez`.

Digital I/O

The NI USB-6008/6009 has 12 digital lines on two ports, Port 0 has eight lines, P0.<0..7>, and Port 1 has four lines, P1.<0..3>. GND is the ground-reference signal for the digital I/O ports. You can individually program all lines as inputs or outputs.

Figure 14 shows P0.<0..7> connected to example signals configured as digital inputs and digital outputs. You can configure P1.<0..3> similarly.

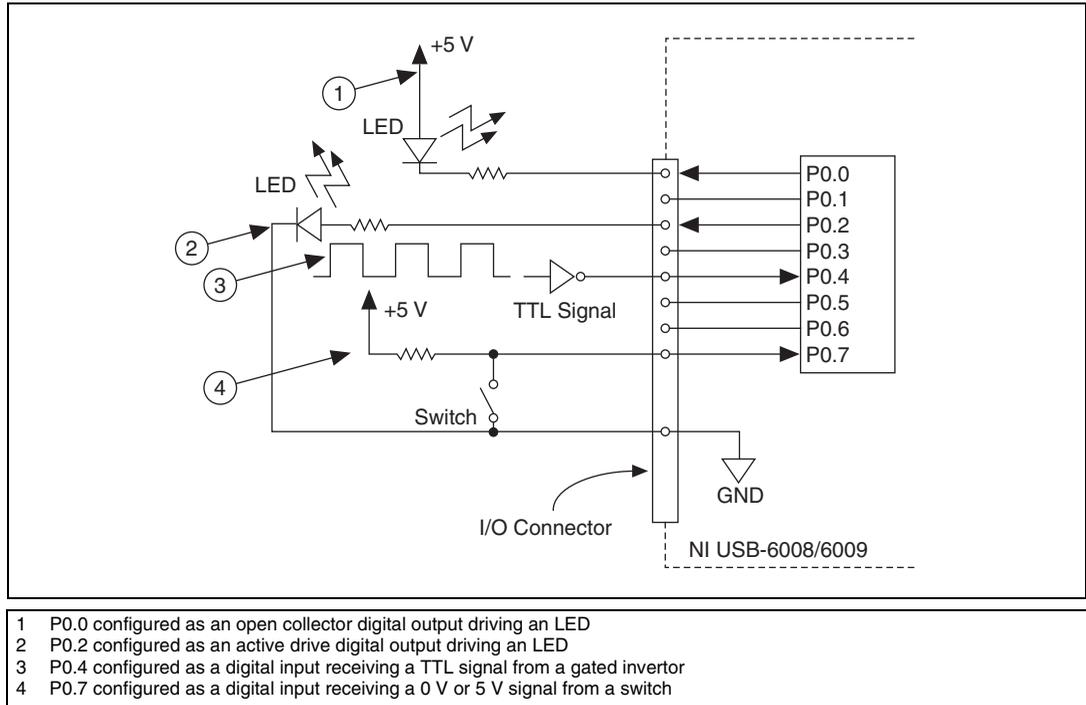


Figure 14. Example of Connecting a Load



Caution Exceeding the maximum input voltage ratings or maximum output ratings, which are listed in the [Specifications](#) section, can damage the device and the computer. National Instruments is *not* liable for any damage resulting from such signal connections.

Source/Sink Information

The default configuration of the NI USB-6008/6009 digital I/O ports is open collector, allowing 5 V operation, with an onboard 4.7 k Ω pull-up resistor. An external user-provided pull-up resistor can be added to increase the source current drive up to a 8.5 mA limit per line as shown in Figure 15.¹

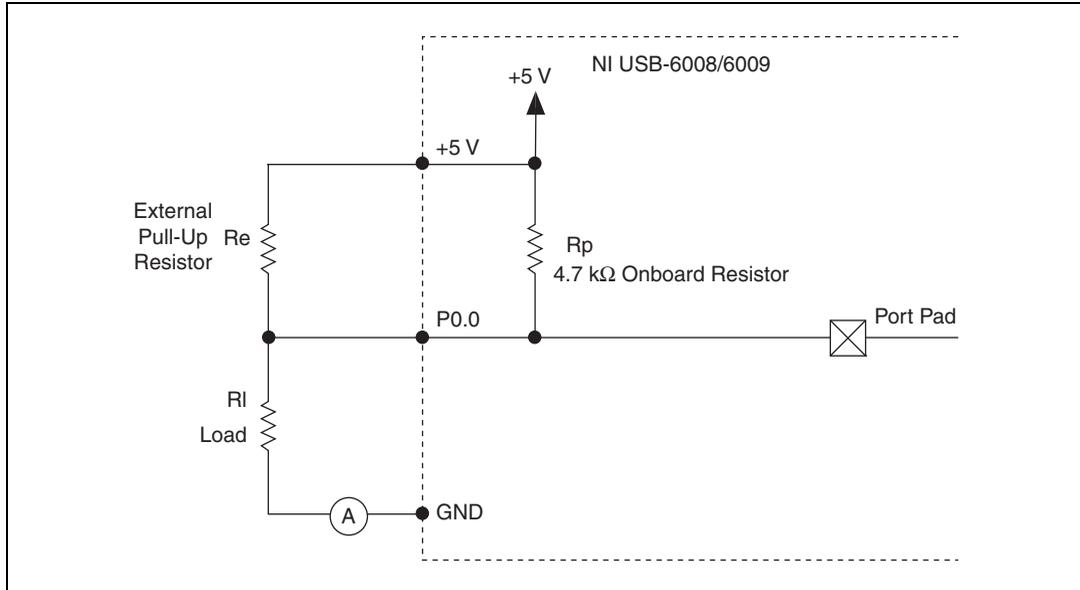


Figure 15. Example of Connecting an External User-Provided Resistor

The NI USB-6009 ports can also be configured as active drive using the NI-DAQmx API, allowing 3.3 V operation with a source/sink current limit of ± 8.5 mA. For more information about how to set the DIO configuration, refer to the KnowledgeBase document, *Configuring NI Devices to be Open-Drain (Open Collector) or Push-Pull (Active Drive)*. To access this document, go to ni.com/info and enter the Info Code `ex52sp`.

Complete the following steps to determine the value of the user-provided pull-up resistor:

1. Place an ammeter in series with the load.
2. Place a variable resistor between the digital output line and the +5 V supply.
3. Set P0.0 to high.
4. Adjust the variable resistor until the ammeter current reads as the intended current. The intended current must be less than 8.5 mA.
5. Remove the ammeter and variable resistor from your circuit.
6. Measure the resistance of the variable resistor. The measured resistance is the ideal value of the pull-up resistor.
7. Select a static resistor value for your pull-up resistor that is greater than or equal to the ideal resistance.
8. Reconnect the load circuit and the pull-up resistor.

¹ This document uses NI-DAQmx naming conventions. Open-drain is called open collector and push-pull is called active drive.

I/O Protection

To protect the NI USB-6008/6009 against overvoltage, undervoltage, and overcurrent conditions, as well as ESD events, you should avoid these fault conditions by using the following guidelines:

- If you configure a DIO line as an output, do *not* connect it to any external signal source, ground signal, or power supply.
- If you configure a DIO line as an output, understand the current requirements of the load connected to these signals. Do *not* exceed the specified current output limits of the DAQ device.
National Instruments has several signal conditioning solutions for digital applications requiring high current drive.
- If you configure a DIO line as an input, do *not* drive the line with voltages outside of its normal operating range. The DIO lines have a smaller operating range than the AI signals.
- Treat the DAQ device as you would treat any static-sensitive device. Always properly ground yourself and the equipment when handling the DAQ device or connecting to it.

Power-On States

At system startup and reset, the hardware sets all DIO lines to high-impedance inputs. The DAQ device does not drive the signal high or low. Each line has a weak pull-up resistor connected to it.

Static DIO

Each of the NI USB-6008/6009 DIO lines can be used as a static DI or DO line. You can use static DIO lines to monitor or control digital signals. All samples of static DI lines and updates of DO lines are software-timed.

PFI 0

PFI 0 is configurable as either a digital trigger input or an event counter input.

Using PFI 0 as a Digital Trigger

When an analog input task is defined, you can configure PFI 0 as a digital trigger input. When the digital trigger is enabled, the AI task waits for a rising or falling edge on PFI 0 before starting the acquisition. To use AI Start Trigger (ai/StartTrigger) with a digital source, specify PFI 0 as the source and select a rising or falling edge.

Using PFI 0 as an Event Counter

You can configure PFI 0 as a source for counting digital edges. In this mode, falling-edge events are counted using a 32-bit counter. For more information about event timing requirements, refer to the [Specifications](#) section.

External Reference and Power Source

The NI USB-6008/6009 creates an external reference and supplies a power source. All voltages are relative to ground (GND).

+2.5 V External Reference

The NI USB-6008/6009 creates a high-purity reference voltage supply for the ADC using a multi-state regulator, amplifier, and filter circuit. You can use the resulting +2.5 V reference voltage as a signal for self-test.

+5 V Power Source

The NI USB-6008/6009 supplies a 5 V, 200 mA output. You can use this source to power external components.



Note When the device is in USB suspend, the output is disabled.

Specifications

The following specifications are typical at 25 °C, unless otherwise noted.

Analog Input

Analog inputs

Differential.....	4
Single-ended	8, software-selectable

Input resolution

NI USB-6008	
Differential.....	12 bits
Single-ended	11 bits
NI USB-6009	
Differential.....	14 bits
Single-ended	13 bits

Max sample rate (aggregate)¹

NI USB-6008	10 kS/s
NI USB-6009	48 kS/s

Converter type.....Successive approximation

AI FIFO.....512 bytes

Timing resolution.....41.67 ns (24 MHz timebase)

Timing accuracy.....100 ppm of actual sample rate

Input range

Differential	$\pm 20\text{ V}^2$, $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 4\text{ V}$, $\pm 2.5\text{ V}$, $\pm 2\text{ V}$, $\pm 1.25\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$
Single-ended	$\pm 10\text{ V}$

¹ System-dependent.

² $\pm 20\text{ V}$ means that $|AI+ - (AI-)| \leq 20\text{ V}$. However, AI+ and AI- must both be within $\pm 10\text{ V}$ of GND. Refer to the [Taking Differential Measurements](#) section for more information.

Working voltage.....±10 V
 Input impedance.....144 kΩ
 Overvoltage protection.....±35 V
 Trigger sourceSoftware or external digital trigger
 System noise¹
 Differential
 ±20 V range5 mVrms
 ±1 V range0.5 mVrms
 Single-ended
 ±10 V range5 mVrms
 Absolute accuracy at full scale, differential²

Range (V)	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
±20	14.7	138
±10	7.73	84.8
±5	4.28	58.4
±4	3.59	53.1
±2.5	2.56	45.1
±2	2.21	42.5
±1.25	1.70	38.9
±1	1.53	37.5

Absolute accuracy at full scale, single-ended

Range (V)	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
±10	14.7	138

Analog Output

Analog outputs2
 Output resolution12 bits
 Maximum update rate150 Hz, software-timed
 Output range0 to +5 V
 Output impedance50 Ω
 Output current drive5 mA
 Power-on state0 V

¹ System noise measured at maximum sample rate.

² Input voltages may not exceed the working voltage range.

Slew rate.....	1 V/μs
Short circuit current	50 mA
Absolute accuracy (no load)	
Typical.....	7 mV
Maximum at full scale	36.4 mV

Digital I/O

Digital I/O lines	
P0.<0..7>.....	8 lines
P1.<0..3>.....	4 lines
Direction control	Each channel individually programmable as input or output
Output driver type ¹	
NI USB-6008	Open collector
NI USB-6009	Each channel individually programmable as open collector or active drive
Compatibility	TTL, LVTTTL, CMOS
Absolute maximum voltage range	-0.5 to 5.8 V with respect to GND
Pull-up resistor.....	4.7 kΩ to 5 V
Power-on state.....	Input
Digital logic levels	

Level	Min	Max
Input low voltage	-0.3 V	0.8 V
Input high voltage	2.0 V	5.8 V
Input leakage current	—	50 μA
Output low voltage (I = 8.5 mA)	—	0.8 V
Output high voltage		
Active drive, I = -8.5 mA	2.0 V	3.5 V
Open collector, I = -0.6 mA, nominal	2.0 V	5.0 V
Open collector, I = -8.5 mA, with external pull-up resistor	2.0 V	—

External Voltage

+5 V output (200 mA maximum)	
Minimum	+4.85 V
Typical.....	+5 V
+2.5 V output (1 mA maximum)	+2.5 V
+2.5 V accuracy	0.25% maximum
Reference temperature drift	50 ppm/°C maximum

¹ This document uses NI-DAQmx naming conventions. Open-drain is called open collector and push-pull is called active drive.

Event Counter

Number of counters	1
Resolution	32 bits
Counter measurements.....	Edge counting (falling-edge)
Counter direction	Count up
Pull-up resistor.....	4.7 k Ω to 5 V
Maximum input frequency.....	5 MHz
Minimum high pulse width.....	100 ns
Minimum low pulse width.....	100 ns
Input high voltage	2.0 V
Input low voltage	0.8 V

Bus Interface

USB specification	USB 2.0 full-speed
USB bus speed	12 Mb/s

Power Requirements

USB

4.10 to 5.25 VDC

Typical.....	80 mA
Maximum.....	500 mA

USB suspend

Typical.....	300 μ A
Maximum.....	500 μ A

Physical Characteristics

Dimensions	Refer to Figure 16.
Without connectors	63.5 mm \times 85.1 mm \times 23.2 mm (2.50 in. \times 3.35 in. \times 0.91 in.)
With connectors	81.8 mm \times 85.1 mm \times 23.2 mm (3.22 in. \times 3.35 in. \times 0.91 in.)

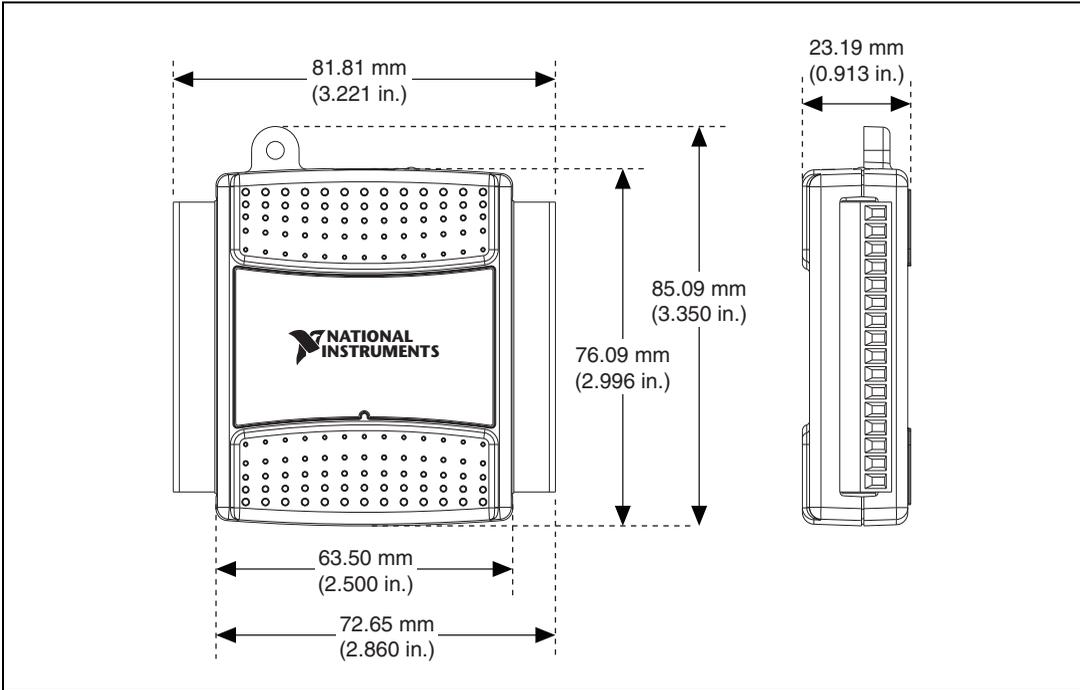


Figure 16. NI USB-6008/6009 Dimensions

Weight

- Without connectors54 g (1.9 oz)
- With connectors84 g (3 oz)

- I/O connectorsUSB series B receptacle,
(2) 16 position screw terminal plugs
- Screw-terminal wiring16 to 28 AWG
- Torque for screw terminals0.22–0.25 N · m (2.0–2.2 lb · in.)

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

Safety Voltages

Connect only voltages that are within these limits.

Channel-to-GND±30 V max, Measurement Category I

Measurement Category I is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as *MAINS* voltage. *MAINS* is a hazardous live electrical supply system that powers equipment. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.



Caution Do not use this module for connection to signals or for measurements within Measurement Categories II, III, or IV.

Environmental

Temperature (IEC 60068-2-1 and IEC 60068-2-2)

Operating0 to 55 °C

Storage–40 to 85 °C

Humidity (IEC 60068-2-56)

Operating5 to 95% RH, noncondensing

Storage5 to 90% RH, noncondensing

Pollution Degree (IEC 60664)2

Maximum altitude.....2,000 m

Indoor use only.

Safety

This product meets the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1



Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or the [Online Product Certification](#) section.

Electromagnetic Compatibility

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326-1 (IEC 61326-1): Class A emissions; Basic immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



Note In the United States (per FCC 47 CFR), Class A equipment is intended for use in commercial, light-industrial, and heavy-industrial locations. In Europe, Canada, Australia and New Zealand (per CISPR 11) Class A equipment is intended for use only in heavy-industrial locations.



Note Group 1 equipment (per CISPR 11) is any industrial, scientific, or medical equipment that does not intentionally generates radio frequency energy for the treatment of material or inspection/analysis purposes.



Note For EMC declarations and certifications, and additional information, refer to the [Environmental Management](#) section.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

Online Product Certification

To obtain product certifications and the Declaration of Conformity (DoC) for this product, visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Environmental Management

NI is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial to the environment and to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *NI and the Environment* Web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.



Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)

EU Customers The symbol indicates that the waste products should be disposed of separately from municipal household waste according to Directive 2002/96/EC of the European Parliament and the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE). At the end of the product life cycle, all products must be sent to a WEEE collection and recycling center. Proper disposal of WEEE reduces the environmental impact and risk to human health due to potentially hazardous substances that are generally used in such equipment. Your cooperation in the correct disposal of the products will contribute to the effective usage of natural resources. For information about the available collection and recycling scheme in a particular country, refer to ni.com/citizenship/weee.

电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息，请登录 ni.com/environment/rohs_china。(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)

Where to Go from Here

This section lists where you can find example programs for the NI USB-6008/6009 and relevant documentation.

Example Programs

NI-DAQmx and NI-DAQmx software include example programs to help you get started programming with the NI USB-6008/6009. Modify example code and save it in an application, or use examples to develop a new application, or add example code to an existing application.

NI-DAQmx

To locate NI software examples, go to ni.com/info and enter the Info Code `daqmexp`. For additional examples, refer to zone.ni.com.

To run examples without the device installed, use an NI-DAQmx simulated device. For more information, in Measurement & Automation Explorer (MAX), select **Help»Help Topics»NI-DAQmx»MAX Help for NI-DAQmx** and search for simulated devices.

NI-DAQmx Base

NI-DAQmx Base examples are accessible from **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx Base»Examples**.

Related Documentation

Each application software package and driver includes information about writing applications for taking measurements and controlling measurement devices. The following references to documents assume you have NI-DAQmx 9.3 or later, and where applicable, version 8.5 or later of the NI application software.

NI-DAQmx

The *NI USB-6008/6009 Quick Start* packaged with the NI USB-6008/6009 describes how to install NI-DAQmx software, install the device, and confirm that your device is operating properly.

The *NI-DAQ Readme* lists which devices, ADEs, and NI application software are supported by this version of NI-DAQ. Select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQ»NI-DAQ Readme**.

The *NI-DAQmx Help* contains API overviews, general information about measurement concepts, key NI-DAQmx concepts, and common applications that are applicable to all programming environments. Select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQ»NI-DAQmx Help**.

NI-DAQmx Base (Linux/Mac OS X/LabVIEW PDA 8.x)

The *NI-DAQmx Base Getting Started Guide* describes how to install your NI-DAQmx Base software, your NI-DAQmx Base-supported DAQ device, and how to confirm that your device is operating properly. In Windows, select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx Base»Documentation»NI-DAQmx Base Getting Started Guide**.

The *Getting Started with NI-DAQmx Base for Linux and Mac OS X Users* document describes how to install your NI-DAQmx Base software, your NI-DAQmx Base-supported DAQ device, and how to confirm that your device is operating properly on your Linux or Mac machine.

The *NI-DAQmx Base Readme* lists which devices are supported by a version of NI-DAQmx Base. In Windows, select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx Base»DAQmx Base Readme**.

The *NI-DAQmx Base VI Reference Help* contains VI reference and general information about measurement concepts. In LabVIEW, select **Help»NI-DAQmx Base VI Reference Help**.

The *NI-DAQmx Base C Function Reference Help* contains C reference and general information about measurement concepts. In Windows, select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx Base»Documentation»C Function Reference Help**.



Note All NI-DAQmx Base documentation for Linux is installed at `/usr/local/natinst/nidaqmxbase/documentation`.



Note All NI-DAQmx Base documentation for Mac OS X is installed at `/Applications/National Instruments/NI-DAQmx Base/documentation`.

LabVIEW

If you are a new user, use the *Getting Started with LabVIEW* manual to familiarize yourself with the LabVIEW graphical programming environment and the basic LabVIEW features you use to build data acquisition and instrument control applications. Open the *Getting Started with LabVIEW* manual by selecting **Start»All Programs»National Instruments»LabVIEW»LabVIEW Manuals** or by navigating to the `labview\manuals` directory and opening `LV_Getting_Started.pdf`.

Use the *LabVIEW Help*, available by selecting **Help»LabVIEW Help** in LabVIEW, to access information about LabVIEW programming concepts, step-by-step instructions for using LabVIEW, and reference information about LabVIEW VIs, functions, palettes, menus, and tools. Refer to the following locations on the **Contents** tab of the *LabVIEW Help* for information about NI-DAQmx:

- **Getting Started with LabVIEW»Getting Started with DAQ**—Includes overview information and a tutorial to learn how to take an NI-DAQmx measurement in LabVIEW using the DAQ Assistant.
- **VI and Function Reference»Measurement I/O VIs and Functions»DAQmx - Data Acquisition VIs and Functions**—Describes the LabVIEW NI-DAQmx VIs and functions.
- **Property and Method Reference»NI-DAQmx Properties** contains the property reference.
- **Taking Measurements**—Contains the conceptual and how-to information you need to acquire and analyze measurement data in LabVIEW, including common measurements, measurement fundamentals, NI-DAQmx key concepts, and device considerations.

LabWindows/CVI

The **Data Acquisition** book of the *LabWindows/CVI Help* contains *Taking an NI-DAQmx Measurement in LabWindows/CVI*, which includes step-by-step instructions about creating a measurement task using the DAQ Assistant. In LabWindows™/CVI™, select **Help»Contents**, then select **Using LabWindows/CVI»Data Acquisition**. This book also contains information about accessing detailed information through the *NI-DAQmx Help*.

The **NI-DAQmx Library** book of the *LabWindows/CVI Help* contains API overviews and function reference for NI-DAQmx. Select **Library Reference»NI-DAQmx Library** in the *LabWindows/CVI Help*.

Measurement Studio

If you program your NI-DAQmx-supported device in Measurement Studio using Visual C# or Visual Basic .NET, you can interactively create channels and tasks by launching the DAQ Assistant from MAX or from within Visual Studio. You can use Measurement Studio to generate the configuration code based on your task or channel. Refer to the *DAQ Assistant Help* for additional information about generating code.

The *NI Measurement Studio Help* is fully integrated with the Microsoft Visual Studio help. To view this help file in Visual Studio, select **Measurement Studio»NI Measurement Studio Help**. For information related to developing with NI-DAQmx, refer to the following topics within the *NI Measurement Studio Help*:

- For step-by-step instructions on how to create an NI-DAQmx application using the Measurement Studio Application Wizard and the DAQ Assistant, refer to *Walkthrough: Creating a Measurement Studio NI-DAQmx Application*.
- For help with NI-DAQmx methods and properties, refer to *NationalInstruments.DAQmx Namespace* and *NationalInstruments.DAQmx.ComponentModel Namespace*.
- For conceptual help with NI-DAQmx, refer to *Using the Measurement Studio NI-DAQmx .NET Library* and *Developing with Measurement Studio NI-DAQmx*.
- For general help with programming in Measurement Studio, refer to *Getting Started with the Measurement Studio Class Libraries*.

To create an application in Visual Basic .NET or Visual C#, follow these general steps:

1. In Visual Studio, select **File»New»Project** to launch the New Project dialog box.
2. In the Project types pane, expand the **Visual Basic** or **Visual C#** node, depending on which language you want to create the project in, and select **Measurement Studio**.
3. Choose a project type. You add DAQ tasks as a part of this step.

ANSI C without NI Application Software

The *NI-DAQmx Help* contains API overviews and general information about measurement concepts. Select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQ»NI-DAQmx Help**.

The *NI-DAQmx C Reference Help* describes the NI-DAQmx Library functions, which you can use with National Instruments data acquisition devices to develop instrumentation, acquisition, and control applications. Select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQ»Text-Based Code Support»NI-DAQmx C Reference Help**.

.NET Languages without NI Application Software

With the Microsoft .NET Framework version 2.0 or later, you can use NI-DAQmx to create applications using Visual C# and Visual Basic .NET without Measurement Studio. You need Microsoft Visual Studio .NET 2005 or later for the API documentation to be installed.

The installed documentation contains the NI-DAQmx API overview, measurement tasks and concepts, and function reference. This help is fully integrated into the Visual Studio documentation. To view the NI-DAQmx .NET documentation, go to **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQ»Text-Based Code Support**. For function reference, refer to the *NationalInstruments.DAQmx Namespace* and *NationalInstruments.DAQmx.ComponentModel Namespace* topics. For conceptual help, refer to the *Using the Measurement Studio NI-DAQmx .NET Library* and *Developing with Measurement Studio NI-DAQmx* sections.

To get to the same help topics from within Visual Studio 2005 or 2008, go to **Help»Contents** and select **Measurement Studio** from the **Filtered By** drop-down list. To get to the same help topics from within

Visual Studio 2010, go to **Help»View Help** and select **NI Measurement Studio Help** from the **Related Links** section.

Training Courses

If you need more help getting started developing an application with NI products, NI offers training courses. To enroll in a course or obtain a detailed course outline, refer to ni.com/training.

Technical Support on the Web

For additional support, refer to ni.com/support or zone.ni.com.



Note You can download these documents at ni.com/manuals.

DAQ specifications and some DAQ manuals are available as PDFs. You must have Adobe Acrobat Reader with Search and Accessibility 5.0.5 or later installed to view the PDFs. Refer to the Adobe Systems Incorporated Web site at www.adobe.com to download Acrobat Reader. Refer to the National Instruments Product Manuals Library at ni.com/manuals for updated documentation resources.

Where to Go for Support

The National Instruments Web site is your complete resource for technical support. At ni.com/support you have access to everything from troubleshooting and application development self-help resources to email and phone assistance from NI Application Engineers.

A Declaration of Conformity (DoC) is our claim of compliance with the Council of the European Communities using the manufacturer's declaration of conformity. This system affords the user protection for electromagnetic compatibility (EMC) and product safety. You can obtain the DoC for your product by visiting ni.com/certification. If your product supports calibration, you can obtain the calibration certificate for your product at ni.com/calibration.

National Instruments corporate headquarters is located at 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas, 78759-3504. National Instruments also has offices located around the world to help address your support needs. For telephone support in the United States, create your service request at ni.com/support and follow the calling instructions or dial 512 795 8248. For telephone support outside the United States, visit the Worldwide Offices section of ni.com/niglobal to access the branch office Web sites, which provide up-to-date contact information, support phone numbers, email addresses, and current events.

CVI, LabVIEW, National Instruments, NI, ni.com, the National Instruments corporate logo, and the Eagle logo are trademarks of National Instruments Corporation. Refer to the *Trademark Information* at ni.com/trademarks for other National Instruments trademarks. The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries. Other product and company names mentioned herein are trademarks or trade names of their respective companies. For patents covering National Instruments products/technology, refer to the appropriate location: **Help»Patents** in your software, the `patents.txt` file on your media, or the *National Instruments Patent Notice* at ni.com/patents. Refer to the *Export Compliance Information* at ni.com/legal/export-compliance for the National Instruments global trade compliance policy and how to obtain relevant HTS codes, ECCNs, and other import/export data.

Central hidráulica compacta del tipo NPC

para funcionamiento de corta duración con motor de corriente continua

Caudal $Q_{m\acute{a}x}$ = aprox. 2,29 l/min
 Presión de trabajo $p_{m\acute{a}x}$ = 750 bar
 Tensión de alimentación = 24 V ó 12 V DC



1. Descripción general

Las centrales hidráulicas compactas del tipo NPC han sido especialmente concebidas para las aplicaciones en las que es necesaria una gran movilidad (p. ej., en obras, etc.), la alimentación energética se produce a través de una fuente de alimentación de corriente continua y las operaciones son de corta duración (p. ej., remachar, encrespado, estampar y trabajos similares).

2. Versiones disponibles, datos principales

Ejemplo de pedido: **NPC 11 /0,31 - 1/320 - R - 24 - BWH 1 - NN - 33 - G 24**
NPC 12 /0,4 - 2/750 - R - 12 - BWH 1 - 1 ¹⁾

Modelo básico y tamaño	Potencia nominal aprox. (kW)
NPC 11	0,3
NPC 12	0,6

Válvula limitadora de presión con ajuste de presión	
1/...	fija
2/...	regulable

Válvula de retorno en P	
-	sin
R	con

Bloques adicionales
 Montaje directo del bloque de válvulas

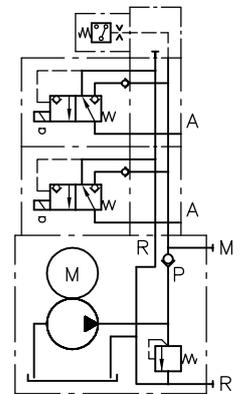
- Modelo BWN 1, BWH 1 D 7470 B/1
- Modelo VB01 D 7302
- Modelo BVH D 7788 BV

Tensión del motor
 (para ver los datos de rendimiento tabla del apartado 3.2)

12 V DC
 24 V DC

Modelo básico	Código de caudal	0,2	0,31	0,44	0,61	0,87	1,05
NPC 11	Desplazamiento V_g (cm ³ /rev)	0,09	0,14	0,20	0,28	0,36	0,46
	Caudal de marcha en vacío Q_0 (l/min)	0,27	0,42	0,59	0,83	1,07	1,36
	Presión de trabajo $p_{m\acute{a}x}$ (bar)	750	640	450	320	250	190
NPC 12	Código de caudal	0,4	0,65	0,94	1,28	1,71	2,14
	Desplazamiento V_g (cm ³ /rev)	0,15	0,24	0,34	0,46	0,6	0,76
	Caudal de marcha en vacío Q_0 (l/min)	0,45	0,71	1,02	1,39	1,81	2,29
	Presión de trabajo $p_{m\acute{a}x}$ (bar)	750	660	470	350	270	210

Esquema hidráulico



Bomba básica

¹⁾ con placa tipo BWH 1 - 1 a 750 bar

3. Otros parámetros

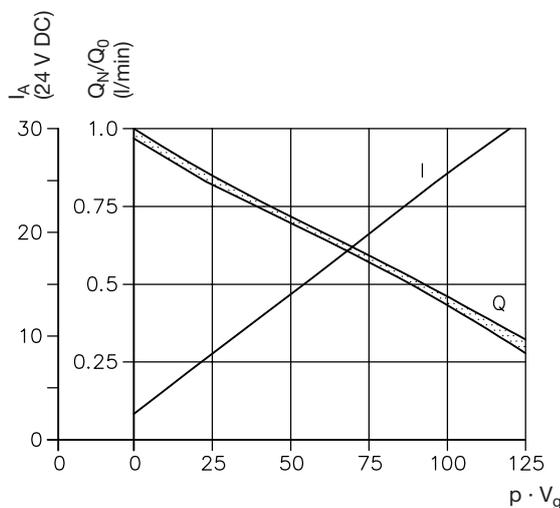
3.1 Parámetros generales e hidráulicos

Denominación	Bomba de pistones radiales (bomba de caudal fijo) para funcionamiento de corta duración con motor de corriente continua				
Sentido de giro	indistinta				
Racordaje de unión	según unidades de montaje				
Posición de montaje	en posición vertical				
Fijación	4xM8				
Fluido hidráulico	Aceite hidráulico según DIN 51 524 TI.1 hasta 3; ISO VG 10 hasta 68 según DIN 51 519 Margen de viscosidad: mín. aprox. 4; máx. aprox. 800 mm ² /s Servicio óptimo: aprox. 10 ..0,500 mm ² /s También apropiado para medios de presión biodegradables del tipo HEES (éster sintético) a temperaturas de servicio de hasta aprox. +70°C				
Temperaturas	Ambiente: aprox. -40...+60°C Aceite: -25...+80°C, prestar atención al margen de viscosidad Admite una temperatura de arranque de hasta -40°C (prestar atención a las viscosidades) cuando la temperatura final constante en el servicio subsiguiente es, como mínimo, superior en 20K. Fluidos hidráulicos biodegradables: Observar los datos del fabricante. No superior a +70°C si se tiene en cuenta la compatibilidad del sellado.				
Llenado de aceite	1,0 litro de volumen total; 0,5 litros de volumen útil				
Masa (peso) kg (sin llenado de aceite)	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td>NPC 11</td> <td>NPC 12</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>8</td> </tr> </table>	NPC 11	NPC 12	6	8
NPC 11	NPC 12				
6	8				

3.2 Datos eléctricos

	NPC 11		NPC 12	
	24 V	12 V	24 V	12 V
Tensión nominal U_N	24 V	12 V	24 V	12 V
Potencia nominal P_N	0,1 / 0,3 kW	0,1 / 0,25 kW	0,6 kW	0,6 kW
Corriente nominal I_N	5,6 / 22 A DC	10,5 / 35 A DC	35 A DC	70 A DC
Núm. de revoluciones nominal n_N	3000 / 2000 min ⁻¹			
Tipo de protección	IP 44			
Tipo de material aislante	F			
Conexión eléctrica	Conector orientable 2 St. 6,3x0,8			
Tiempos de carga permitidos	1 $p_{m\acute{a}x}$	ED ≤ 10%		
	0,5 $p_{m\acute{a}x}$	ED ≤ 20%		
	0,3 $p_{m\acute{a}x}$	ED ≤ 30%		
sección transversal recomendada	2x 4 mm ²	(≤ 35 A)		
	2x 6 mm ²	(> 35 A)		

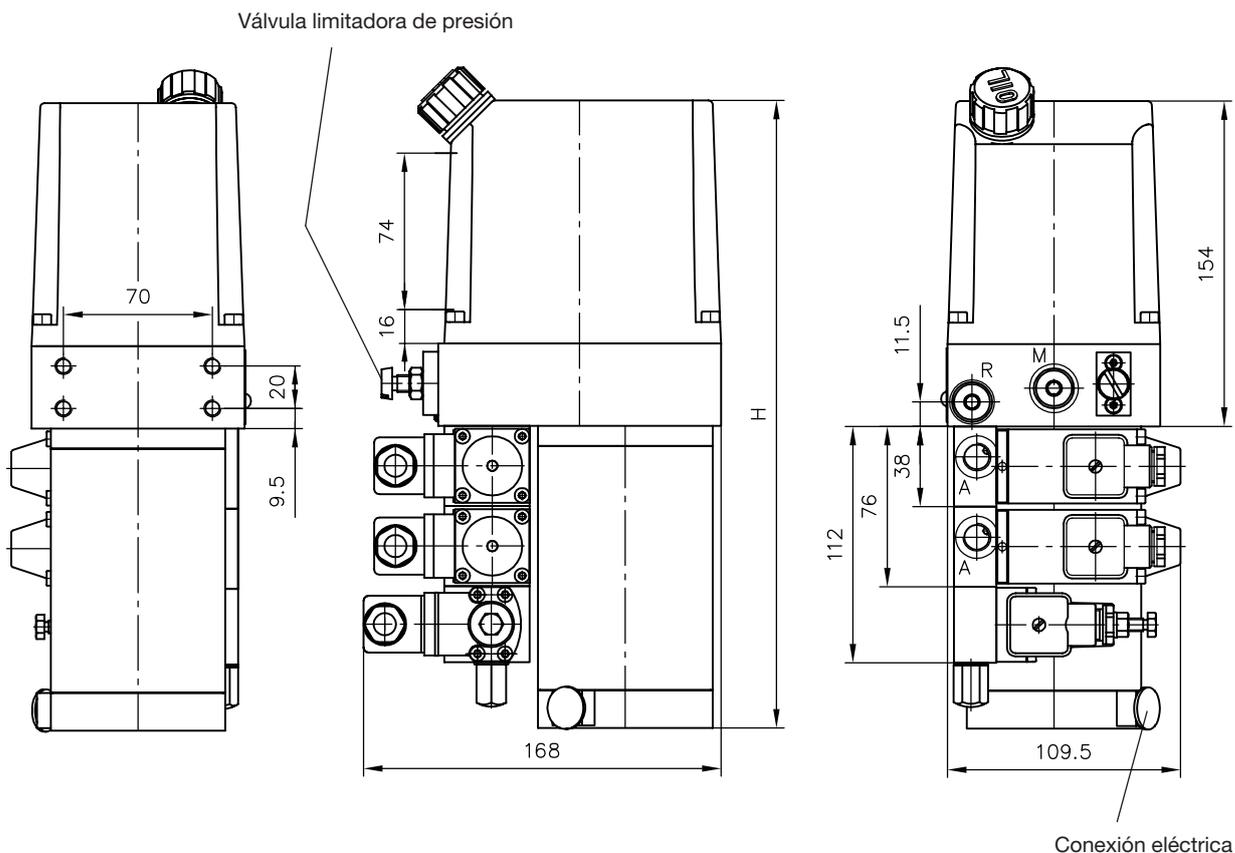
Consumo de corriente real y curva característica de caudal



4. Dimensiones generales

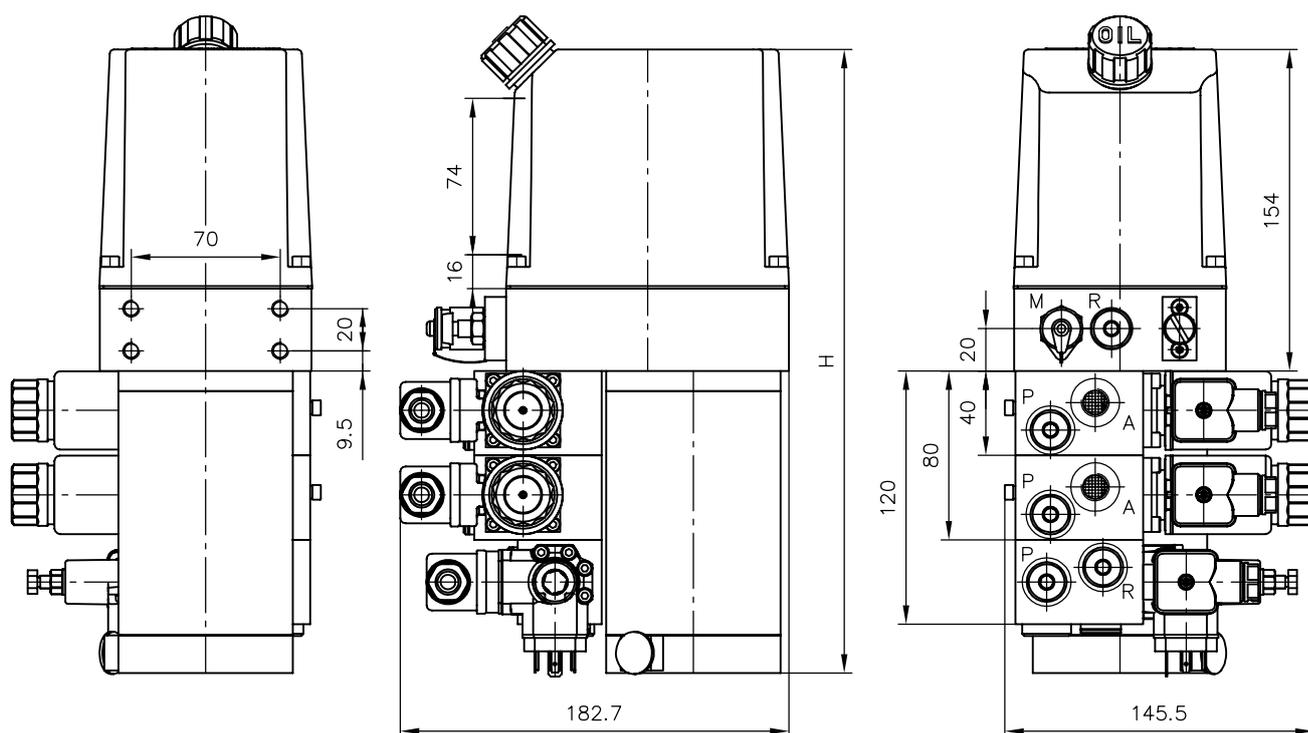
Todas las medidas se indican en mm. Se reserva el derecho a introducir modificaciones.

Ejemplo con válvula de banco tipo BWN 1 o BWH 1



	H
NPC 11	297
NPC 12	357

Ejemplo con válvula de banco tipo BVH



Válvulas de asiento de 2/2 y 3/2 vías de los tipos BVG y BVP

para cualquier dirección del aceite, estancas y exentas de aceite de drenaje

Todas las conexiones pueden ser sometidas a presión

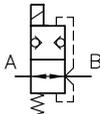
Presión de trabajo $p_{m\acute{a}x}$ = 320 bar
Caudal $Q_{m\acute{a}x}$ = 50 l/min

Otras válvulas con el mismo función:

- Modelo BVG 11(12 y 2), BVP 11(2) véase anexo en el apartado 5.1, no emplear los modelos de final de producción para las planificaciones nuevas
- Modelo BVG, BVP 1 D 7765 ($Q_{m\acute{a}x}$ = 20 l/min, $p_{m\acute{a}x}$ = 400 bar)
- Modelo NBVP 16 D 7765 N ($Q_{m\acute{a}x}$ = 20 l/min, $p_{m\acute{a}x}$ = 400 bar)
- Modelo BVE D 7921 ($Q_{m\acute{a}x}$ = 70 l/min, $p_{m\acute{a}x}$ = 400 bar)
- Modelo VP D 7915 ($Q_{m\acute{a}x}$ = 15 l/min, $p_{m\acute{a}x}$ = 400 bar)

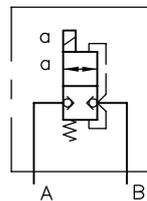
Versión para conexión en línea

Ejemplo: Modelo BVG 3 S-G 24



Versión para montaje sobre placa

Ejemplo: Modelo BVP 3 R-G 12



1. Descripción general

Las electroválvulas estancas de 2/2 y 3/2 vías aquí descritas con accionamiento eléctrico, hidráulico o neumático han sido diseñadas como válvulas de asiento cónico. Todas las conexiones pueden ser sometidas a la misma presión gracias a la compensación interna de la presión.

Mediante la recuperación por muelle, la posición cero o neutral se adopta automáticamente en estado no accionado. Los elementos utilizados para la construcción de esta válvula son de acero, las piezas interiores más importantes para el funcionamiento están templadas y trabajan sumergidas en aceite sin necesidad de mantenimiento; el cono y el asiento están rectificadas.

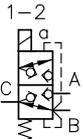
2. Versiones disponibles, datos principales

Ejemplos de pedido:

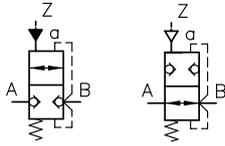
BVG 3 R/B 2,5 - WG 230
BVP 3 Z - P

Esquemas hidráulicos completos
(aplicar los esquemas de accionamiento análogamente a todos los esquemas hidráulicos)

Conexión en línea

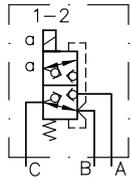


BVG 3 Z - G...
BVG 3 Z - WG...

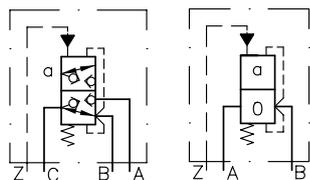


BVG 3 R - H BVG 3 S - P

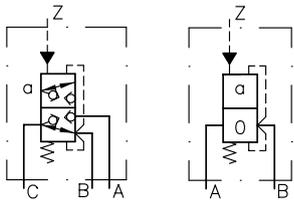
Montaje sobre placa



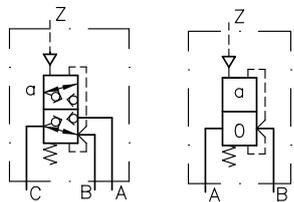
BVP 3 Z - G...
BVP 3 Z - WG...



BVP 3 Z - H BVP 3 R(S) - H



BVP 3 Z - H 1/4 BVP 3 R(S) - H 1/4



BVP 3 Z - P BVP 3 R(S) - P

Tabla 1: Modelo básico y tamaño ¹⁾

Código	Tipo y tamaño de conexión	Caudal Q _{máx} (l/min)	Presión P _{máx} (bar)
BVG 3	Conexión en línea G 1/2 ISO 228/1	50	320
BVP 3	Montaje sobre placa	50	320

Tabla 2: Esquemas hidráulicos

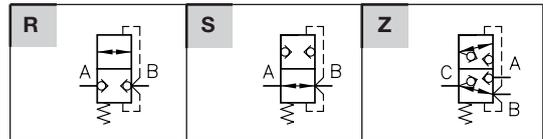


Tabla 3: Chiclé adicional (en las conexiones A, B y C, véase también apart. 3.1)

Código	Ø (mm)	Núm. para realizar pedido posterior		Rango de presión de carga del sistema o del acumulador
		BVG 3..	BVP 3..	
B 2,5	2,5	7405 014 b	7405 013-2,5	en torno a 300 bar
B 3	3	7405 014 c	7405 013-3,0	en torno a 200 bar
B 3,5	3,5	7405 014 d	7405 013-3,5	en torno a 150 bar
B 4	4	7405 014 e	7405 013-4,0	en torno a 100 bar
2)	0 2)	7405 014 a	7405 013	--

Tabla 4: Tipo de accionamiento

Accionamiento	Código			Datos principales, véase también apartado 3.2
	con conector eléctrico	Conector eléctrico con diodo luminiscente	sin conector eléctrico	
eléctrico	G 12 G 24 WG 110 WG 230	L 12 L 24 --- ---	X 12 X 24 X 98 X 205	U _N = 12 V DC U _N = 24 V DC U _N = 110 V AC, 50/60 Hz (98 V DC) ³⁾ U _N = 230 V AC, 50/60 Hz (205 V DC) ³⁾
hidráulico	H H 1/4	Conexión de pilotaje externo G 1/4. Sólo para mod. BVP 3!		Presión de pilotaje: p _{St mín} = 24 bar p _{St máx} = 320 bar
neumático	P	Conexión de pilotaje externo G 1/4		Presión de pilotaje: p _{St mín} = 4 bar p _{St máx} = 15 bar
Esquemas de accionamiento	eléctrico	hidráulico Código H 1/4	neumático Código H	

- 1) Modelos BVG 11(12, 2) y BVP 11(2) véase apart. 5.1, no emplear los modelos de final de producción para una planificación nueva
- 2) sin taladro; para el taladrado por el cliente según las curvas características Δp-Q de los chiclés, apart. 3.1
- 3) Bobina de corriente continua (98 V DC, 205 V DC) con puente de rectificación en el conector eléctrico

3. Otros parámetros

3.1 Parámetros generales e hidráulicos

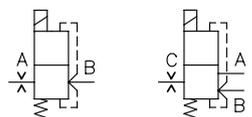
Posición de montaje	indistinta
Solapamiento en electroválvulas estancas de 3/2 vías	negativo (el cambio de una a otra dirección del aceite no concluye hasta la posición final). Durante el proceso de conmutación, todos los pasos están unidos entre sí
Presión de trabajo	$p_{m\acute{a}x} = 320 \text{ bar}$
Capacidad estática	Conexiones A, B y C aprox. $2 \times p_{m\acute{a}x}$ (640 bar)
Material de la caja y tratamiento de superficie	Acero nitrurado al gas (válvula básica)
Masa (peso) aprox. kg	

completo con accionamiento	BVG 3 R BVG 3 S	BVG 3 Z	BVP 3 R BVP 3 S	BVP 3 Z
eléctrico	2,3	3,3	2,3	2,4
hidráulico	1,9	2,9	1,9	2,0
neumático	1,9	2,6	1,9	1,7

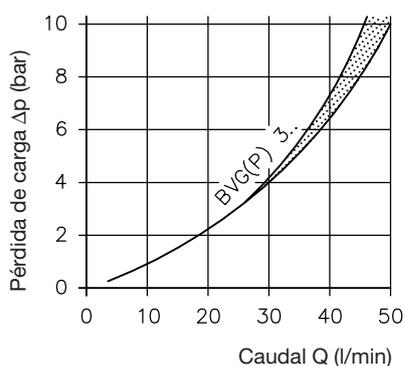
Fluido hidráulico	Aceite hidráulico según DIN 51 524, partes 1 - 3; ISO VG 10 hasta 68 según DIN 51 519 Margen de viscosidad: mín. aprox. 4; máx. aprox. 1500 mm ² /s Servicio óptimo: aprox. 10...500 mm ² /s También apropiado para fluidos hidráulicos biodegradables del tipo HEPG (polialquilen-glicol) y HEES (éster sintético) a temperaturas de servicio aprox. de hasta +70°C.
Temperaturas	Ambiente: aprox. -40...+80°C Aceite: -25...+80°C, prestar atención al margen de viscosidad Permitida una temperatura de arranque de hasta -40°C (prestar atención a las viscosidades) cuando la temperatura final constante en el servicio subsiguiente es, como mínimo, superior en 20K. Fluidos hidráulicos biodegradables: Observar los datos del fabricante. No superior a +70°C si se tiene en cuenta la compatibilidad del sellado. Atención: Observar la limitación referente al tiempo de conexión de los electroimanes en pos. 3.2.

Caudal	$Q_{m\acute{a}x}$ según apartado 2 válido para $p_{m\acute{a}x} = 320 \text{ bar}$ accionamiento electromagnético en circuitos de bomba habituales. En caso de presiones inferiores a 150 bar (accionado por bobina) o en todos los demás tipos de accionamiento se puede rebasar hasta el 50% del $Q_{m\acute{a}x}$, siempre que la pérdida de carga sea admisible.
--------	---

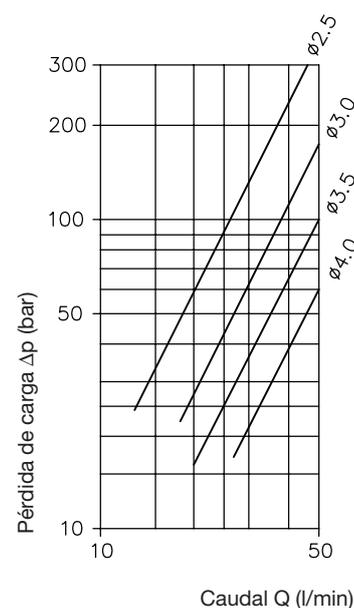
Limitación de caudal	En conexiones de acumulador o en caso de conexión a circuitos de alta presión con grandes caudales de bomba (conductos anulares, sistemas de alimentación centralizados), los caudales se deben limitar, en función de la presión del sistema, con chiclés a $Q_{m\acute{a}x}$ según apart. 2.
Electroválvula estanca de 2/2 vías de 3/2 vías	El chiclé se tiene que situar siempre en el lado del acumulador. En válvulas ..Z.. se inserta en la conexión C. Si se desea en la conexión A o B, este hecho se tiene que indicar en el texto escrito. Para más detalles, véase la tabla 3, apartado 2.

Curvas características $\Delta p - Q$

Válvula básica



Chiclés adicionales



Viscosidad del aceite durante la medición aprox. 60 mm²/s

3.2 Accionamientos

Datos eléctricos

		Las bobinas han sido fabricadas y testadas según la VDE 0580			
Código		G 12 L12 X12	G 24 L24 X24	WG 110 --- ---	WG 230 --- ---
Corriente nominal	U_N (V)	12	24	110	230
		Tensión continua DC		Tensión alterna AC, 50 y 60 Hz	
Potencia nominal	P_N (W)	33,2	30,0	32,8	33,0

Conectoreléctrico
DIN EN 175 301-803
(conexión y esquemas hidráulicos)
todos los conectores
otros conectores, véase D 7163

Tensión continua
Modelo G...

Modelo L..

Tensión alterna
Modelo WG..

Vista de la bobina

Tipo de conmutación (valor orientativo)	ON u OFF: aprox. 50...60 ms, en WG... 2-3 veces más largo	Tiempo de conexión relativo en funcionamiento (sellado ED del 100% sellado en la bobina)
Conmutaciones/hora	aprox. 2000, aproximadamente con la misma distribución	
Tipo de protección	IP 65 (IEC 60529) (conector correctamente montado)	
Tipo de material aislante	F	
Temperatura de contacto	aprox. 98°C, con una temperatura ambiente de 20°C	
Energía de desconexión	$W_A \leq 0,5$ Ws	
Tratamiento de superficie (bobina)	DIN 50961-Fe/Zn 12 bk cC	

		hidráulico (código H, H 1/4)	neumático (código P)
Presión de pilotaje	$p_{St \text{ mín}}$	24 bar	4 bar
	$p_{St \text{ máx}}$	320 bar	15 bar
Presión residual permitida en el conducto de pilotaje para retorno seguro a la posición cero		< 2 bar	---
Posibilidad de sobrecarga estática Z hasta		aprox. 1,5 $p_{St \text{ máx}}$ bar	aprox. 1,5 $p_{St \text{ máx}}$ bar
Volumen de pilotaje (geométrico)		0,6 cm ³	3 cm ³
Material de la caja y tratamiento de superficie		Acero (cabezal del mando) galvanizado	Aluminio (cabezal del mando) anodizado negro

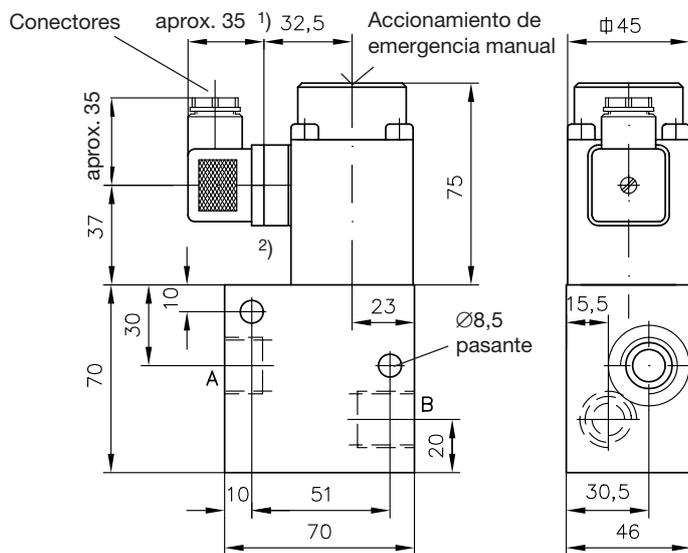
4. Dimensiones generales

Todas las medidas se indican en mm. Se reserva el derecho a introducir modificaciones.

4.1 Versión para conexión en línea

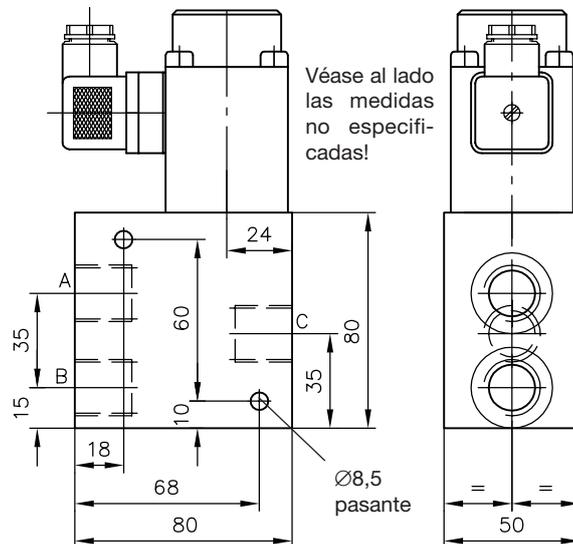
Representación con accionamiento eléctrico (código **G..** ó **WG..**); los demás tipos de accionamiento, véase a continuación

Modelo BVG 3 R(S)



Conexiones según ISO 228/1:
A y B = G 1/2

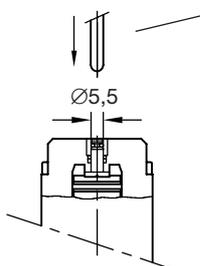
Modelo BVG 3 Z



Conexiones según ISO 228/1:
A, B y C = G 1/2

Véase al lado las medidas no especificadas!

accionamiento de emergencia manual



Herramienta auxiliar para accionar (no utilizar piezas de cantos vivos).

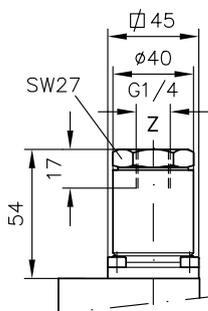
Presionando el perno de latón visible en el lado superior con un pasador de acero, un destornillador, etc., se puede accionar la válvula.

Atención: La presión en la conexión B carga el perno de latón en la superficie de Ø5, es decir, 100 bar aprox. 240 N!

- 1) **Atención:** Esta medida depende de la marca y según la norma DIN EN 175 301-803 puede tener un máximo de 40 mm.
- 2) La bobina también se puede montar como conector eléctrico girado en 4x90°.

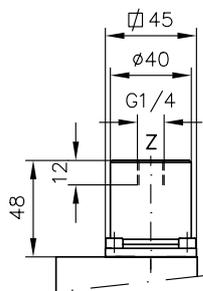
Accionamiento hidráulico

Código **H 1/4**



Accionamiento neumático

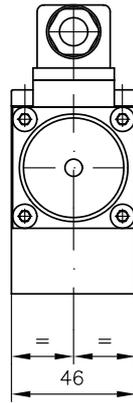
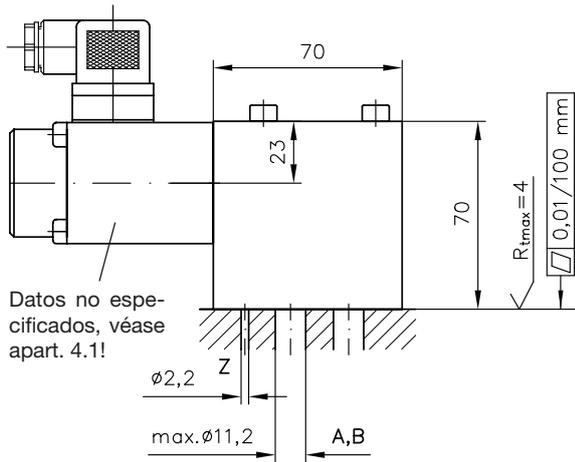
Código **P**



4.2 Versión para montaje sobre placa

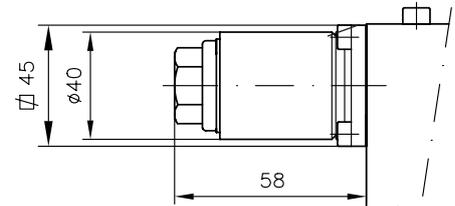
Representación con accionamiento eléctrico (código G.. ó WG..); los demás accionamientos, véase apartado 4.1

Modelo BVP 3 R(S)



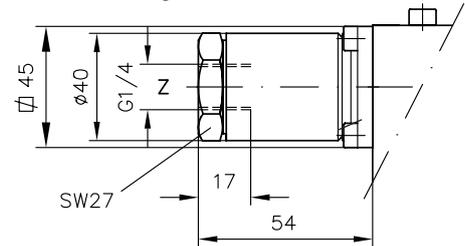
Accionamiento hidráulico

Código H

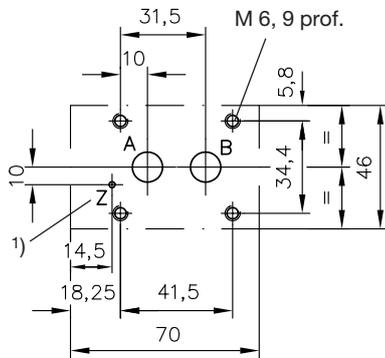


La conexión de pilotaje Z se encuentra en el elemento de válvula (véase al lado)

Código H 1/4

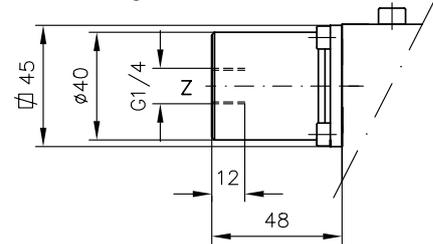


Disposición de los orificios en la placa base (vista superior)

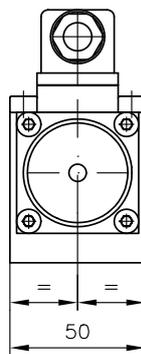
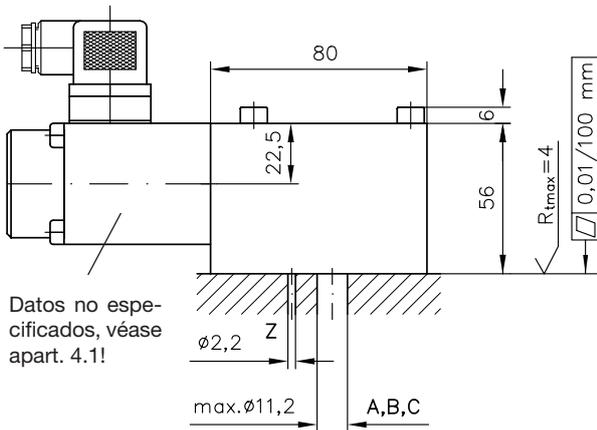


Accionamiento neumático

Código P



Modelo BVP 3 Z

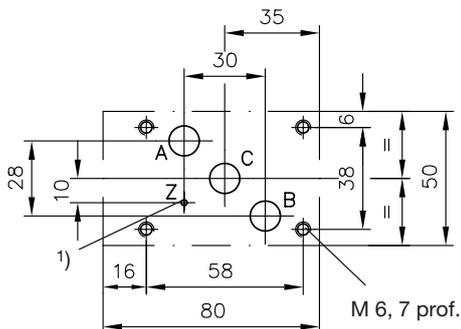


Etanqueidad de las conexiones A, B, C: con juntas tóricas 13,95x2,62 NBR 90 Sh

Conexión Z: con junta tórica 2,54x1,78 NBR 90 Sh

Disponible como juego de juntas DS 7400-3 al realizar un pedido de repuestos, incluyendo juntas tóricas para el accionamiento código H, H 1/4.

Disposición de los orificios en la placa base (vista superior)



1) Conexión de pilotaje Z sólo disponible en caso de accionamiento hidráulico (código H)!

5. Anexo

5.1 Modelo BVG 11(12 y 2) o BVP 11(2)

No utilizar modelos de final de producción para planificaciones nuevas (alternativa, modelos BVG 1 y BVP 1 según D 7765)

Ejemplos de pedodo:

BVG 11 R - G 24
BVP 2 S/B 1,5 - WG 230

Tabla 5: Modelo básico y tamaño

Código	Tipo y tamaño de conexión	Caudal $Q_{\text{máx}}$ (l/min)	Presión $p_{\text{máx}}$ (bar)
BVG 11	G 1/4	12	320
BVG 12	G 3/8	20 ¹⁾	
BVG 2	G 3/8	20	
BVP 11	Montaje sobre placa	12	320
BVP 2		20	

Tabla 6: Chiclé adicional (en las conexiones A, B y C, véase también apartado 3.1)

Modelo básico	Código	∅ (mm)	para realizar pedido posterior
BVG 11	B 0,6	0,6	7406 012 b
	B 0,8	0,8	7406 012 c
	B 1,1	1,1	7406 012 d
	B 1,3	1,3	7406 012 f
	B 1,5	1,5	7406 012 h
	²⁾	0	7406 012 a
BVG 2	B 0,4	0,4	7400 003 k
	B 0,5	0,5	7400 003 l
	B 0,6	0,6	7400 003 d
	B 0,7	0,7	7400 003 m
	B 0,8	0,8	7400 003 e
	B 0,9	0,9	7400 003 n
	B 1,0	1,0	7400 003 o
	B 1,1	1,1	7400 003 g
	B 1,3	1,3	7400 003 h
	B 1,5	1,5	7400 003 c
	B 2,0	2,0	7400 003 f
	B 2,5	2,5	7400 003 i
	B 4,0	4,0	7400 003 b
	²⁾	0	7400 003 a
BVP 11 BVP 2	B 0,6	0,6	7921 012-0,6
	B 0,8	0,8	7921 012-0,8
	B 1,1	1,1	7921 012-1,1
	B 1,3	1,3	7921 012-1,3
	B 1,5	1,5	7921 012-1,5
	B 2,0	2,0	7921 012-2,0
	B 2,5	2,5	7921 012-2,5
²⁾	0	7921 012	

Tabla 7: Tipos de accionamiento

Accionamiento	Código, observación
eléctrico 	G 12, L 12, X 12 G 24, L 24, X 24 WG 100, X 98 WG 230, X 205 G 24 EX³⁾ modelo antideflagrante $U_N = 24 \text{ V DC}$; $p_{\text{máx}} = 220 \text{ bar}$!
manual 	A para modelo BVG 11(12) ! Material de carcasa y tratamiento de superficie = acero (carcasa de palanca nitrurada al gas) Par de accionamiento = aprox. 70 Nm a 320 bar

Esquemas hidráulicos (véase tabla 2, apart. 2)

Atención: Esquema hidráulico Z no disponible para modelo BVG -12 !

- 1) con accionamiento eléctrico:
20 l/min hasta 200 bar
12 l/min hasta 320 bar y $\leq 80\%$ ED
véase también apartado 3.1 „Caudal“
- 2) sin taladro; para taladrar por el cliente
Curvas características Δp -Q de los chiclés, apartado 3.1
- 3) sólo en el modelo BVP 11(2), no disponible para modelo BVG.. (insuficiente tamaño de bloque y efecto de refrigeración resultante)

Otros parámetros

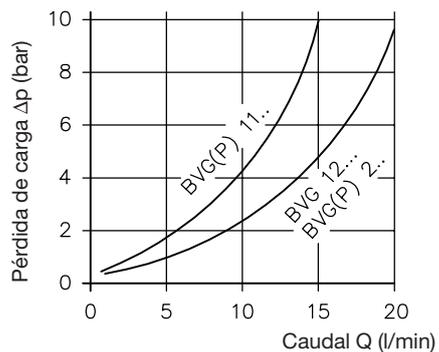
Datos generales y eléctricos, véase apartado 3.1 ó 3.2

Masa (peso) aprox. kg

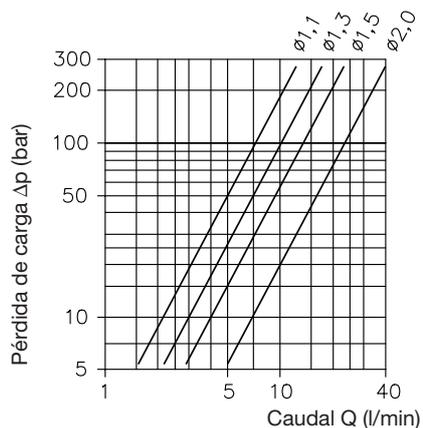
acompleto con accionamiento	BVG 11 R(S) BVG 12 R(S)	BVG 11 Z	BVP 11 R(S)	BVP 11 Z
eléctrico	1,0	1,6	0,9	1,0
manual	0,6	---	---	---
acompleto con accionamiento	BVG 2 R(S)	BVG 2 Z	BVP 2 R(S)	BVP 2 Z
eléctrico	1,3	1,7	1,1	1,4

Curvas características
 $\Delta p - Q$

Válvula básica



Chiclés adicionales



Viscosidad del aceite durante la medición aprox. 60 mm²/s

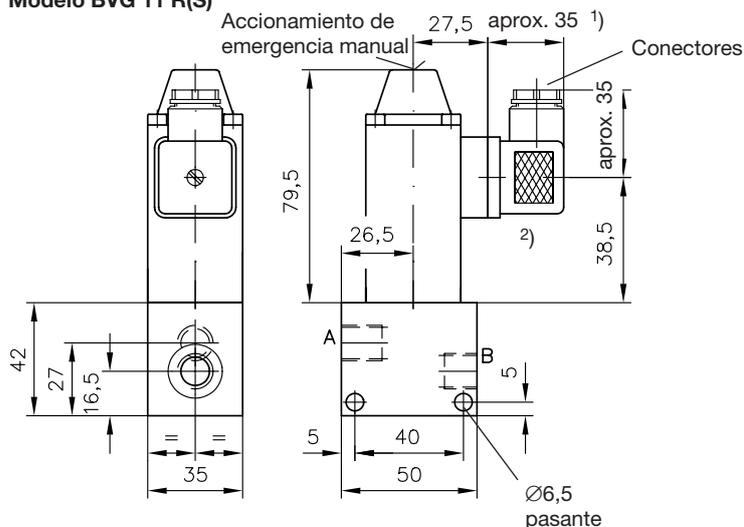
Dimensiones generales

Todas las medidas se indican en mm. Se reserva el derecho a introducir modificaciones.

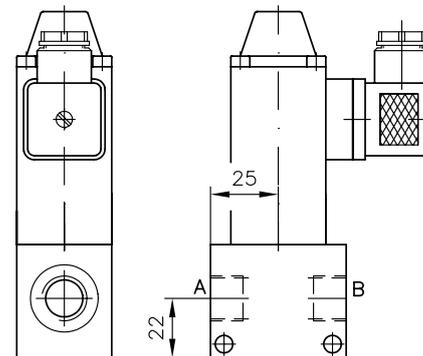
Versión para conexión en línea

Representación con accionamiento eléctrico (código **G..** ó **WG..**); accionamiento manual, véanse a continuación

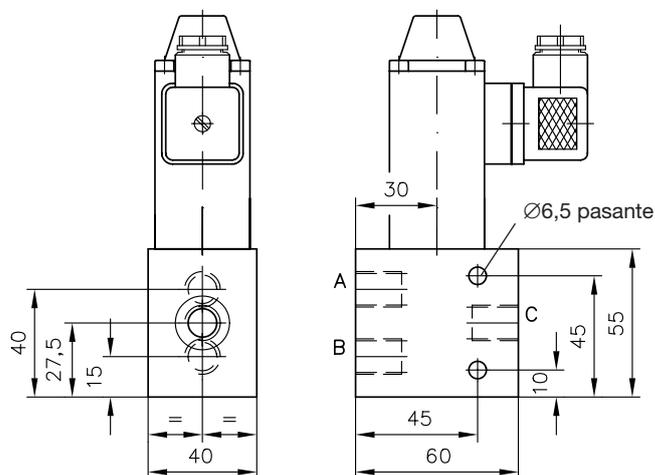
Modelo BVG 11 R(S)



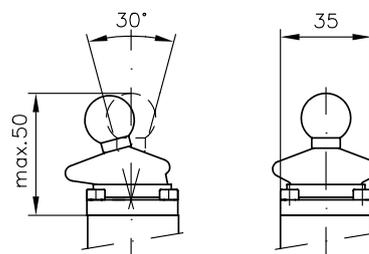
Modelo BVG 12 R(S)



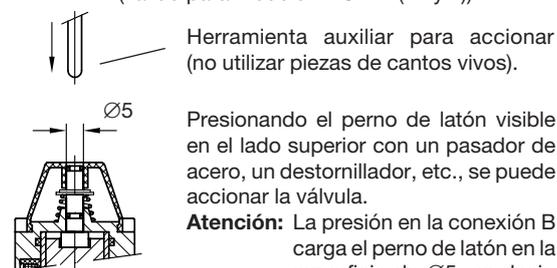
Modelo BVG 11 Z



Accionamiento manual código A
(válido para modelo BVG ..11(12))



Accionamiento de emergencia manual
(válido para modelo BVG ..11(12 y 2))



Herramienta auxiliar para accionar (no utilizar piezas de cantos vivos).

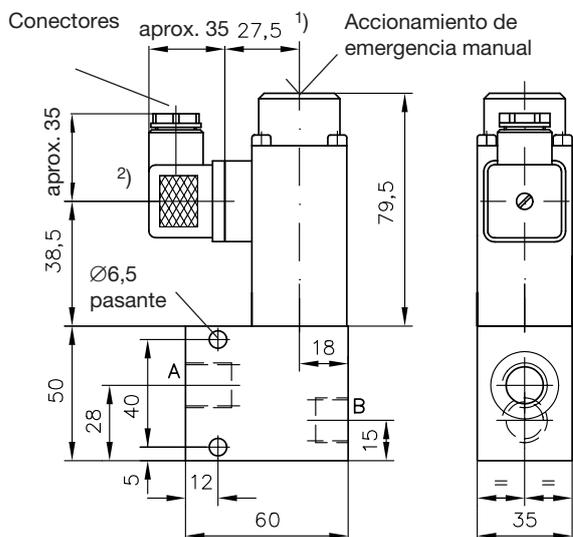
Presionando el perno de latón visible en el lado superior con un pasador de acero, un destornillador, etc., se puede accionar la válvula.

Atención: La presión en la conexión B carga el perno de latón en la superficie de Ø5, es decir, 100 bar aprox. 195 N!

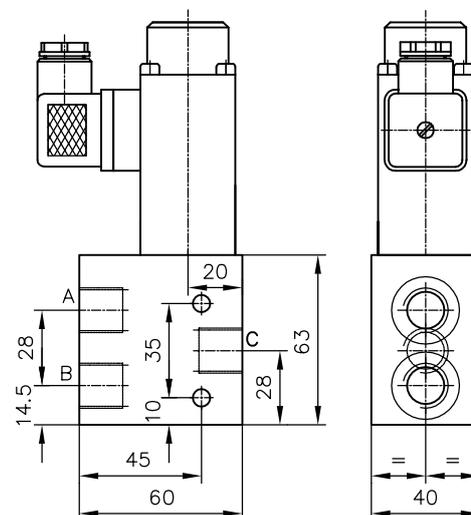
Conexiones según ISO 228/1:

A, B y C = G 1/4 (BVG -11 R, S y Z)
= G 3/8 (BVG -12 R y S)

Modelo BVG 2 R(S)



Modelo BVG 2 Z



Conexiones según ISO 228/1:

A, B y C = G 3/8

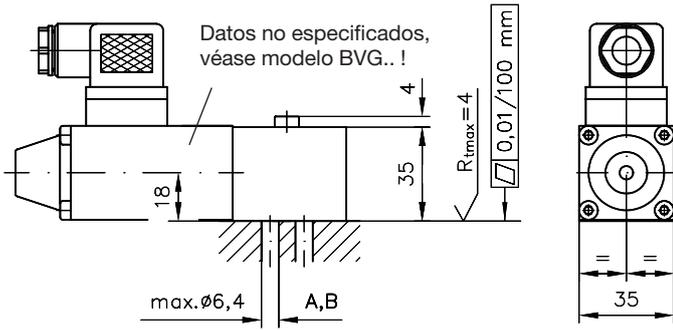
1) **Atención:** Esta medida depende de la marca y según la norma DIN EN 175 301-803 puede tener un máximo de 40 mm.

2) La bobina también se puede montar como conector eléctrico girado en 4x90°.

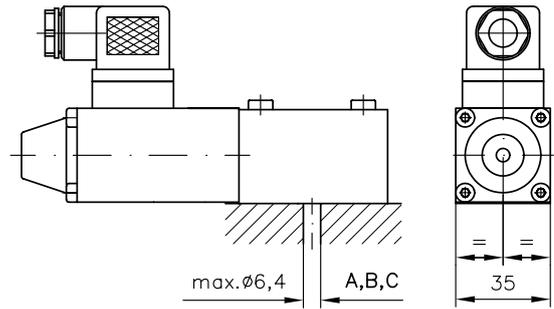
Versión para montaje sobre placa

Representación con accionamiento eléctrico (código **G..** ó **WG..**); accionamiento manual, véase modelo BVG..

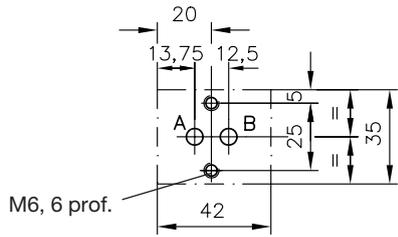
Modelo BVP 11 R(S)



Modelo BVP 11 Z



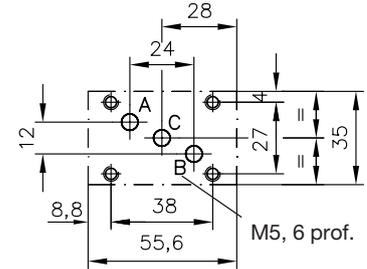
Disposición de los orificios en la placa inferior (vista superior)



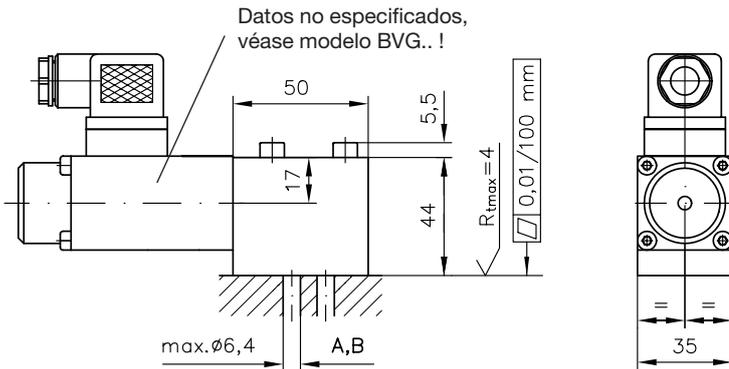
Estanqueidad de las conexiones A, B y C con juntas tóricas 7,65x1,78 NBR 90 Sh.

Disponible como juego de juntas DS 7400-1 al realizar un pedido de repuestos.

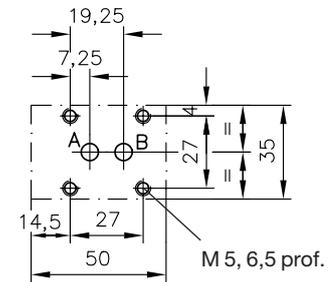
Disposición de los orificios en la placa inferior (vista superior)



Modelo BVP 2 R(S)



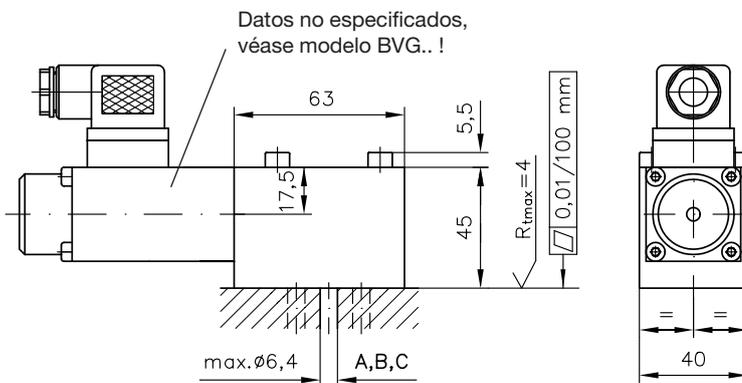
Disposición de los orificios en la placa base (vista superior)



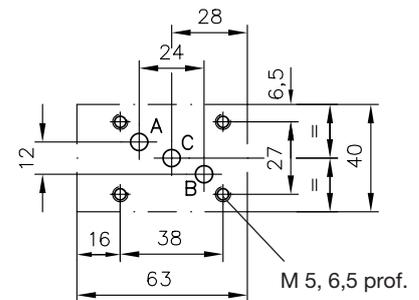
Estanqueidad de las conexiones A, B y C con juntas tóricas 7,65x1,78 NBR 90 Sh.

Disponible como juego de juntas DS 7400-1 al realizar un pedido de repuestos.

Modelo BVP 2 Z



Disposición de los orificios en la placa base (vista superior)



Estanqueidad de las conexiones A, B y C con juntas tóricas 7,65x1,78 NBR 90 Sh.

Disponible como juego de juntas DS 7400-1 al realizar un pedido de repuestos.

5.2 Electroválvula estanca de 2/2 vías con válvula antirretorno en derivación

La válvula BVG-2R se puede suministrar en una versión modificada con válvula antirretorno para evitar la posición de bloqueo B→A.

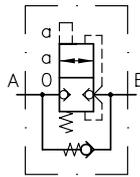
Ejemplo de pedido: BVG R 2 R - ...

Denom. del apartado 5.1

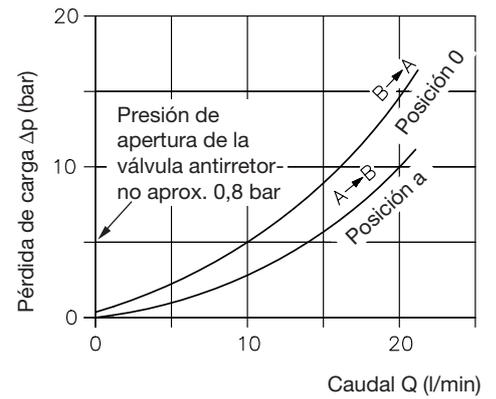
R = Válvula antirretorno en derivación

Nota: Esquema de medidas y medidas (peso) idénticos al modelo BVG 2 R según apartado 5.1

Esquema hidráulico



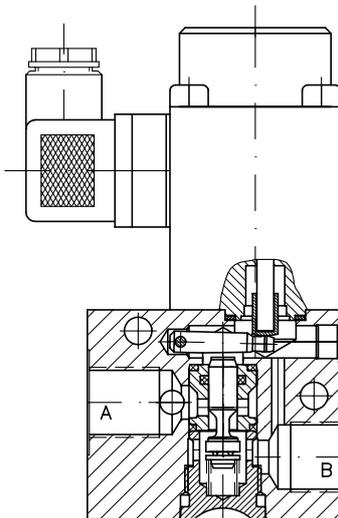
Curvas características $\Delta p - Q$



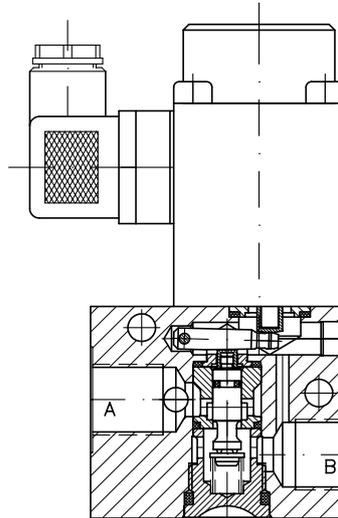
5.3 Esquemas seccionales (de serie, según apartado 2)

Para simplificar el principio de funcionamiento se representan aquí los esquemas seccionales en estado conectado. Válido para todos los accionamientos según tabla 4.

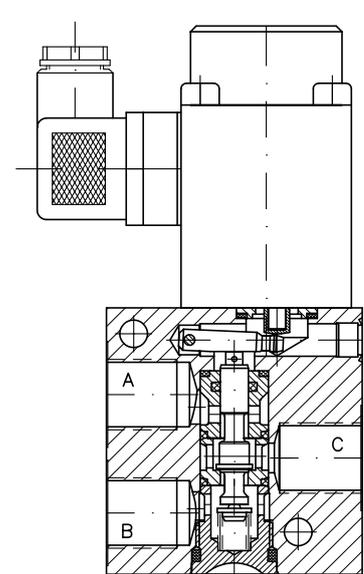
Modelo BVG 3 R..



Modelo BVG 3 S..



Modelo BVG 3 Z..





BIBLIOGRAFÍA

- [1] Michael Short, Michael J. Pont and Qiang Huang. "Safety and Reliability of Distributed Embedded Systems: Simulation of Vehicle Longitudinal Dynamics". Embedded Systems Laboratory Technical Report, 2004.
- [2] H Pacejka. "Tyre and vehicle dynamics". Butterworth-Heinemann 2012.
- [3] Benjamin C. Kuo. "Sistemas de Control Automático". Prentice Hall, 1996.
- [4] Katsuhiko Ogata. "Ingeniería de control moderna". Pearson Educación, 1998.
- [5] Katsuhiko Ogata. "Sistemas de Control en tiempo discreto". Prentice Hall, 1996.
- [6] Luis Moreno, Santiago Garrido, Carlos Balaguer. "Ingeniería de Control (Modelado y control de sistemas dinámicos)". Ariel, 2003.
- [7] Sergio Domínguez, Pascual Campoy, José María Sebastián, Agustín Jiménez. "Control en el Espacio de Estado". Prentice Hall, 2001.
- [8] Ramos P.Ñeco, Oscar Reinoso, Nicolás García, Rafael Aracil. "Apuntes de Sistemas de Control". ECU (Editorial Club Universitario), 2003
- [9] Theodore Wildi. "Maquinas eléctricas y sistemas de Potencia". Pearson Educacion, 2007.
- [10] [http://es.wikipedia.org/wiki/Vehículo autónomo](http://es.wikipedia.org/wiki/Vehículo_autónomo) - 2/07/2014
- [11] [http://es.wikipedia.org/wiki/Vehículo eléctrico](http://es.wikipedia.org/wiki/Vehículo_eléctrico) - 4/07/2014
- [12] <http://www.car.upm-csic.es/autopia/> - 4/07/2014
- [13] <http://en.wikipedia.org/wiki/Brake> - 29/08/2014