

Universidad Tecnológica Nacional

Proyecto Final

Control electrónico de velocidad crucero para vehículos con motor de combustión interna

Autor:

- Nicolás Grosso
- nngg_264@yahoo.com.ar

Directores:

- Pañoni, Sergio
- Ramos, Hector
- Maggiolini, Lucas

Proyecto final presentado para cumplimentar los requisitos académicos

para acceder al título de Ingeniero Electrónico

en la

Facultad Regional Paraná

Fecha: Mayo de 2017.

Declaración de autoría:

Yo declaro que el Proyecto Final “Control electrónico de velocidad crucero para vehículos de combustión interna” y el trabajo realizado es propio. Declaro:

- Este trabajo fue realizado en su totalidad, o principalmente, para acceder al título de grado de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Paraná.
- Se establece claramente que el desarrollo realizado y el informe que lo acompaña no han sido previamente utilizados para acceder a otro título de grado o pre-grado.
- Siempre que se ha utilizado trabajo de otros autores, el mismo ha sido correctamente citado. El resto del trabajo es de autoría propia.
- Se ha indicado y agradecido correctamente a todos aquellos que han colaborado con el presente trabajo.
- Cuando el trabajo forma parte de un trabajo de mayores dimensiones donde han participado otras personas, se ha indicado claramente el alcance del trabajo realizado.

Firmas:

Fecha:

Agradecimientos:

En primer lugar quiero agradecer a la UTN Facultad Regional Paraná y a sus docentes por la posibilidad de estudiar esta carrera y por el apoyo durante mi paso por esta facultad. Además agradecer a mi madre por el apoyo moral y económico, fundamentales para esta carrera. También agradecer a mi señora por el apoyo y las motivaciones que me ha brindado. Por último a mis compañeros, que me han ayudado cada vez que los he necesitado, con quienes hemos formado una amistad para siempre.

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Paraná

Electronic Engineering

Electronic cruise control for internal combustion engine.

Nicolás Grosso.

Abstract:

This document corresponds to the realization of the final project for the degree of Electronic Engineering of the National Technological University, Paraná Regional Faculty, which describes the development of a cruise control system for vehicles driven by internal combustion engines, which consisted in the planning, management and production of the hardware and software for this purpose.

The hardware is based on a PIC microcontroller which takes signals from different sensors and digital inputs, processes them and then is in charge of controlling the angular position of the electric motor of the motorized butterfly in the intake manifold of the motor of the vehicle, managing to control the acceleration and deceleration.

About the software, it is responsible for setting the set-up parameters of the system, such as internal PID setpoints, speed limits, temperature compensations, etc. This software was programmed on a Visual Basic platform and communicates with the hardware through an RS232 interface.

The project was implemented on my own car Fiat PALIO which was adapted the necessary sensors for the operation and was equipped with a programmable electronic injection system, essential for the operation of the cruise control system.

Keywords:

Cruise, Control, speed, PID, sensor, motor, MOP, PIC, interface, HMI.

Resumen:

El presente documento corresponde a la realización del proyecto final de carrera, para el grado de Ingeniería Electrónica, de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná, donde se describe el desarrollo de un sistema de control de velocidad crucero para vehículos impulsados por motores de combustión interna, el cual consistió en la planificación, gestión y producción del hardware y software para este fin.

El hardware está basado en un microcontrolador PIC el cual toma señales de diferentes sensores y entradas digitales, las procesa y luego se encarga de controlar la posición angular del motor eléctrico de la mariposa motorizada en el múltiple de admisión del motor del vehículo, logrando controlar la aceleración y desaceleración del mismo.

Con respecto al software, éste se encarga de configurar los parámetros de puesta a punto del sistema, tales como set points de los PID internos, limitaciones de velocidad, compensaciones por temperatura, etc. Dicho software fue programado en una plataforma Visual Basic y se comunica con el hardware a través de una interfaz RS232.

El proyecto fue implementado en un vehículo de mi propiedad Fiat PALIO al cual se le adaptaron los sensores necesarios para el funcionamiento y se lo equipó con un sistema de inyección electrónica programable, imprescindible para el funcionamiento del sistema de control de velocidad crucero.

Palabras clave:

Control, velocidad, Crucero, PID, sensor, motor, MOP, PIC, interfaz, visor.

Reconocimientos:

En primer lugar, agradecer al Ing. Lucas Maggiolini por la guía que me ha dado para la elaboración de este proyecto, sobre todo en cuestiones de seguridad, muy importantes en este tipo de sistemas. En segundo lugar a la empresa donde trabajo, Smurfit Kappa, que me han brindado el tiempo y materiales para poder hacer el proyecto. Por último, a mi señora que me ayudó en todo momento cuando se lo he pedido.

Índice

Agradecimientos:	5
Abstract:.....	6
Resumen:	7
Reconocimientos:	8
Listado de figuras	11
Lista de tablas.....	13
Lista de abreviaciones	14
Lista de símbolos.....	15
Capítulo 1: Introducción.....	17
1.1 Introducción.....	17
1.1.1 Control de la mariposa motorizada.....	17
1.1.2 Control de velocidad crucero.....	18
1.2 Componentes del sistema	20
1.2.1 Pedal de acelerador electrónico	20
1.2.2 Cuerpo de mariposa motorizado	21
1.2.3 Conmutadores de freno, embrague y caja de velocidades.....	23
1.2.4 Sensor de velocidad.....	24
Capítulo 2: Marco teórico.....	25
2.1 Controladores PID	25
2.1.1 Controladores de acción proporcional (P)	25
2.1.2 Controlador de acción integral (I):	27
2.1.3 Controlador de acción proporcional e integral (PI)	28
2.1.4 Controlador de acción proporcional y derivativa (PD):	29
2.2 Sintonización de controladores PID.....	31
2.2.1 Método Ziegler y Nichols en lazo cerrado.	32
2.2.2 Método Tyreus y Luyben en lazo cerrado.	32
2.2.3 Método Ziegler y Nichols en lazo abierto.....	33
2.3 Controladores PID discretos.....	35
2.4 Efecto Windup	40
Capítulo 3: Desarrollo	41
3.1 Diagrama en bloques	41
3.2.1 Sensor de posición de acelerador:	42
3.2.2 Sensor de posición de mariposa:	43

3.2.3 Sensor de velocidad:.....	45
3.2.4 Sensor de pedales:.....	47
3.3 Hardware.....	48
3.3.1 Circuito de alimentación:.....	49
3.3.2 Entradas digitales:.....	49
3.3.4 Entrada de sensor magnético:.....	51
3.3.5 Microcontrolador:.....	52
3.3.6 Puerto serie:.....	53
3.3.7 Controlador de salida:.....	54
3.3.8 Led modo de operación:.....	55
3.4 Firmware.....	56
3.4.1 Funcionamiento general:.....	56
3.4.2 Modo configuración:.....	56
3.4.3 Modo libre:.....	61
3.4.4 Modo velocidad crucero:.....	61
3.4.5 PID control mariposa:.....	62
3.4.7 Salida de datos RS232:.....	68
3.4.8 Entrada de datos RS232:.....	69
3.5 Software de configuración.....	70
3.5.1 Funcionamiento general:.....	70
3.5.2 Configuración del puerto:.....	70
3.5.3 Envío de datos:.....	71
3.5.4 Recepción de datos:.....	71
3.6.1 Parámetros del PID de posición de mariposa:.....	72
3.6.2 Parámetros del PID de control de velocidad crucero:.....	74
Capítulo 4: Análisis de Costos.....	77
4.1 Costos de materiales:.....	77
4.2 Costos de desarrollo:.....	77
4.3 Retorno de la inversión:.....	78
4.4 Planes de venta:.....	78
Capítulo 5: Discusión y Conclusión:.....	80
Capítulo 6: Literatura Citada:.....	1

Listado de figuras

Figura 1: Vista superior del cuerpo de mariposa	18
Figura 2: Engranajes reductores del cuerpo de mariposa	18
Figura 3: Pedal de acelerador electrónico	20
Figura 4: Cuerpo de mariposa motorizado.....	21
Figura 5: Motor CC del cuerpo de mariposa	21
Figura 6: Muelles y topes de la mariposa	22
Figura 7: Potenciómetros incorporados en el cuerpo de mariposa.....	22
Figura 8: Tope eléctrico inferior del cuerpo de mariposa	22
Figura 9: Punto de reposo para marcha en emergencia del cuerpo de mariposa	23
Figura 10: Tope eléctrico superior del cuerpo de mariposa	23
Figura 11: Máxima apertura del cuerpo de mariposa	23
Figura 12: Switch embrague/freno.....	24
Figura 13: Sensor de velocidad	24
Figura 15: Respuesta temporal del controlador proporcional	26
Figura 14: Diagrama en bloques del controlador	26
Figura 16: Respuesta temporal real del controlador proporcional	27
Figura 17: Respuesta temporal del controlador integral	28
Figura 18: Respuesta temporal del controlador proporcional-integral	29
Figura 19: Respuesta temporal del controlador proporcional-derivativo	30
Figura 20: Período último.....	32
Figura 21: Sistema de control PID en lazo cerrado	33
Figura 22: Entrada escalón de un sistema en lazo abierto	33
Figura 23: Tiempo muerto T1 en lazo abierto	34
Figura 24: Tiempo de subida T2 en lazo abierto.....	34
Figura 25: Circuito PID continuo con AO	35
Figura 26: Sistema de control digital.....	36
Figura 27: Modulador mediante impulsos	37
Figura 28: Sistema de control digital.....	38
Figura 29: Diagrama en bloques del controlador	41
Figura 30: Transductor de posición de acelerador.....	42
Figura 31: Sensor de doble potenciómetro de posición de pedal de acelerador	42
Figura 32: Valores de tensión de los potenciómetros del pedal de acelerador.....	43
Figura 33: Pinout sensor pedal acelerador	43
Figura 34: Cuerpo de mariposa con sensores de posición incorporados	44
Figura 35: Potenciómetros en cuerpo de mariposa	44
Figura 36: Valores de tensión de los potenciómetros del cuerpo de mariposa.....	45
Figura 37: Pinout cuerpo de mariposa	45
Figura 38: Sensor de velocidad (VSS).....	46
Figura 39: Señal sensor de velocidad a 100 km/h	46
Figura 40: Switch freno/embrague.....	47
Figura 41: Circuito esquemático completo.....	48
Figura 42: Circuito de alimentación	49
Figura 43: Circuito de entradas digitales.....	50
Figura 44: Circuito de entradas analógicas.....	51

Figura 45: Sensor magnético.....	52
Figura 46: Circuito adaptador de sensor magnético	52
Figura 47: Circuito del microcontrolador	53
Figura 48: Circuito del ICSP	53
Figura 49: Circuito adaptador RS232 - TTL	53
Figura 50: Diagrama en bloques del driver L298	54
Figura 51: Circuito del driver del motor	55
Figura 52: Led modo operación	55
Figura 53: Software de configuración	70
Figura 54: Guardado de variables	71
Figura 55: PID cuerpo de mariposa. Respuesta de sintonización con $k_p=23$	72
Figura 56: PID cuerpo de mariposa. Respuesta de sintonización con $k_p=19$	72
Figura 57: PID cuerpo de mariposa. Respuesta a valores calculados.....	73
Figura 58: Respuesta al controlador PI ajustado	73
Figura 59: PID velocidad crucero. Respuesta de sintonización con $k_p=5$	74
Figura 60: PID velocidad crucero. Respuesta de sintonización con $k_p=6$	75

Lista de tablas

Tabla 1: Parámetros PID Z/N en lazo cerrado	32
Tabla 2: Ganancias PID Z/N en lazo cerrado	32
Tabla 3: Parámetros PID T/L en lazo cerrado.....	33
Tabla 4: Parámetros PID Z/N en lazo abierto	35
Tabla 5: Ganancias PID Z/N en lazo abierto.....	35
Tabla 6: Tensión de salida de los potenciómetros de la mariposa	43
Tabla 7: Tensión de salida de potenciómetros del cuerpo de mariposa	44
Tabla 8: constantes salida RS232	68
Tabla 9: variables salida RS232	68
Tabla 10: constantes entrada RS232	69
Tabla 11: Valores del controlador del cuerpo de mariposa.....	73
Tabla 12: Valores finales del PID del cuerpo de mariposa	74
Tabla 13: Valores del controlador de velocidad crucero	75
Tabla 14: Valores finales del controlador de velocidad crucero.....	75
Tabla 15: Costo de materiales	77
Tabla 16: Costos de desarrollo	78
Tabla 17: Costos de producción	78

Lista de abreviaciones

Lista de símbolos

Dedicado a:

Primero quiero dedicar este trabajo a mi madre, que sin su apoyo y motivación jamás hubiera podido completar esta carrera.

En segundo lugar a mi señora, quién me ha aguantado en todo momento, ayudándome sin que se lo pida, sosteniéndome en cada momento.

Por último, dedicarle este trabajo a mi familia y amigos que siempre han estado pendientes de lo que necesite a lo largo de toda mi carrera.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

En un acelerador convencional cada posición del pedal corresponde con una única posición de la mariposa. La relación entre el recorrido del pedal y el recorrido de la mariposa determinan el comportamiento del motor. Si se busca un motor que responda bien a bajas revoluciones, se debe conseguir que el recorrido del acelerador corresponda con pequeños recorridos de la mariposa, sobre todo en los primeros grados de apertura. Lo que origina una respuesta del motor pobre cuando la mariposa está muy abierta, al producirse pequeñas variaciones en caudal de aire que entra al motor. Un motor de carácter deportivo necesita recorridos más amplios de la mariposa cuando está muy abierta, empeorando la respuesta del motor a bajas revoluciones.

En el acelerador electrónico se pueden adoptar infinidad de posiciones de la mariposa teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento del motor. La central electrónica conoce en todo momento la posición del pedal del acelerador a través de la variación de la resistencia del potenciómetro. Con este dato se establece el grado óptimo de apertura de la mariposa.

En la fase de calentamiento del motor se produce una mayor apertura de la mariposa en función de la posición del pedal acelerador. Durante esta fase se intenta empobrecer la mezcla todo lo posible y retrasar el encendido, reduciendo el tiempo de calentamiento del motor, y por tanto, del catalizador. Para que el conductor no perciba la reducción de par que esto supone, la mariposa se abre más rápidamente mejorando la respuesta del motor. Además se consiguen reducir las emisiones contaminantes.

Si se acciona rápidamente el acelerador cuando el motor está estable, se producen tirones a causa de la variación tan repentina en el par suministrado y el motor rebota en la suspensión. Esta situación tan molesta se evita retrasando la apertura del acelerador para que no se produzca de forma tan brusca. El par motor aparece más lentamente, impidiendo que el motor rebote en sus soportes.

Con esto, el proyecto consta de dos sistemas:

- 1) Control de mariposa motorizada.
- 2) Control de velocidad crucero del vehículo.

1.1.1 Control de la mariposa motorizada

Para el funcionamiento, la mariposa motorizada consta de un motor de corriente continua que produce el movimiento de apertura de la misma y solidario al eje, un resorte que produce el movimiento de cierre.

El motor de CC no se encuentra solidario al eje, sino que produce el movimiento a través de engranajes reductores de velocidad, lo cual facilita el control de posición.



Figura 1: Vista superior del cuerpo de mariposa



Figura 2: Engranajes reductores del cuerpo de mariposa

El control de mariposa motorizada, lee la posición del pedal de acelerador mediante dos potenciómetros solidarios al eje del mismo y de acuerdo a la posición del mismo (de 0 a 100%) produce la apertura de la mariposa en el múltiple de admisión (de 0 a 100%). A su vez, en el eje de la mariposa se encuentran solidarios dos potenciómetros para realimentar al sistema y confirmar la posición buscada.

El sistema controla la posición de la mariposa mediante la variación de ancho de pulso PWM. También se podrá compensar de forma automática las variaciones de posición debido a las variaciones en la tensión de alimentación del motor de la mariposa, provista por la batería y el alternador del vehículo.

Además, en esa etapa, el sistema tendrá dos entradas adicionales, que le indicarán al sistema que el motor está en etapa de calentamiento (provista por la inyección electrónica del motor o mediante sensor de temperatura) y otra que le indica el encendido del equipo de aire acondicionado, al activarse estas entradas, el sistema compensará el frenado del motor para mantener las revoluciones mínimas del motor y el mismo no se detenga.

1.1.2 Control de velocidad crucero

El control de velocidad crucero del vehículo consiste en mantener la velocidad del mismo a un nivel constante, seleccionado por el conductor. Para ello, el sistema toma la velocidad en una rueda mediante un sensor magnético que lee una rueda dentada, compara con el valor seteado por el usuario y controla la apertura de la mariposa de acuerdo a la diferencia entre el valor seteado y el valor real. Este sistema estará controlado mediante un control PID que regula automáticamente la velocidad. Al mismo tiempo, tendrá entradas digitales para desactivar este modo de funcionamiento al presionar pedal de freno, de embrague y al no detectar que la caja de velocidades esté en el cambio correcto, para así evitar averías al motor. Como medida de seguridad, el control automático de velocidad se desactivará si después de un tiempo prudencial el controlador

no logra estabilizar la velocidad del vehículo al set point programado, por ejemplo, cuando el vehículo toma una subida y el controlador intenta incrementar la potencia del motor para compensar la carga adicional y no es suficiente, será necesario que se desactive el control automático y una alarma avise al conductor.

En resumen, el sistema en general constará de dos controladores PID, uno para la posición de apertura de la mariposa y otro para el control de la velocidad cruceo del vehículo. Además, tendrá diferentes entradas digitales para detectar condiciones de emergencia, y sistemas de detección de anomalías del sistema.

Además, contará con un software para conectar a PC y poder configurar todos los parámetros del sistema, principalmente las constantes de los PID's, y adicionalmente otros parámetros como ángulo de apertura mínima de la mariposa para lograr el relenty, la posición de apertura en modo calentamiento y la adición de apertura por aire acondicionado encendido.

Cabe destacar que no existe en el mercado ningún producto que controle la mariposa motorizada por sí mismo, sino que en todos los casos es la misma inyección original del auto la que controla la mariposa. Este producto estará orientado a aplicarse en automóviles de competición donde se les reemplaza la inyección electrónica original y se les coloca una programable, las cuales en su mayoría no disponen de un control de la mariposa motorizada, por lo que el usuario en estos casos suele reemplazar la misma por un sistema de apertura de mariposa mecánico.

1.2 Componentes del sistema

1.2.1 Pedal de acelerador electrónico

El pedal de acelerador electrónico consiste en el agregado de dos potenciómetros al eje del pedal convencional. Con esto logramos determinar la posición exacta del pedal para que luego el control electrónico del cuerpo motorizado de mariposa haga la apertura de la misma al ángulo que determine correcto. Si bien con un solo potenciómetro se podría determinar la posición exacta del pedal, se utiliza un segundo potenciómetro para chequear y diagnosticar el correcto funcionamiento del conjunto.

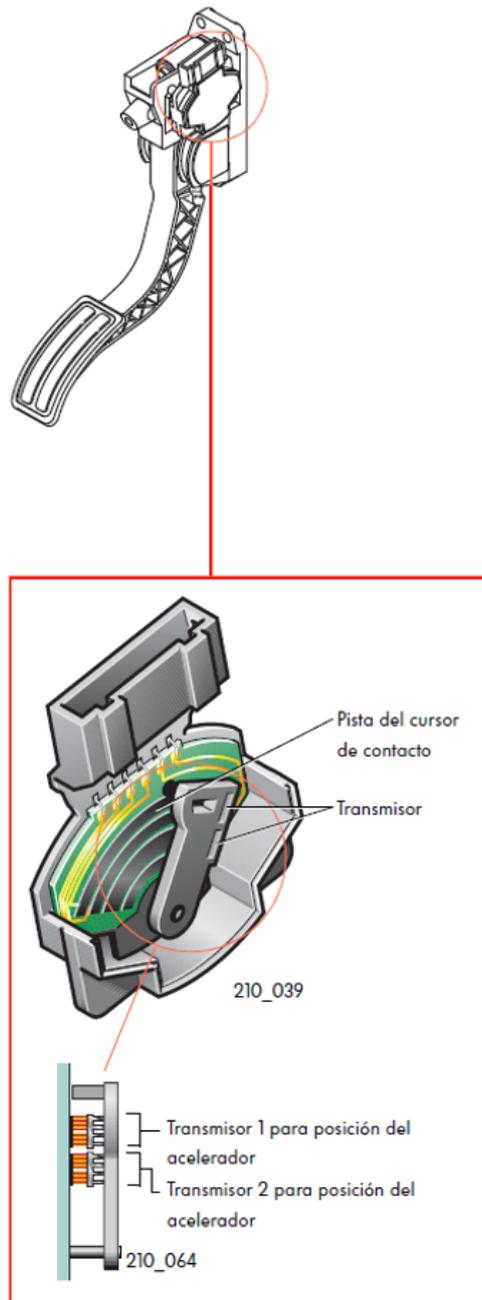


Figura 3: Pedal de acelerador electrónico

1.2.2 Cuerpo de mariposa motorizado

Va instalada en el múltiple de admisión. Se encarga de poner a disposición del motor la cantidad de aire que necesita. Al igual que el pedal de acelerador electrónico, el cuerpo de mariposa motorizado evoluciona del cuerpo de mariposa cuya apertura se producía mediante un cable de acero conectado al pedal de acelerador.

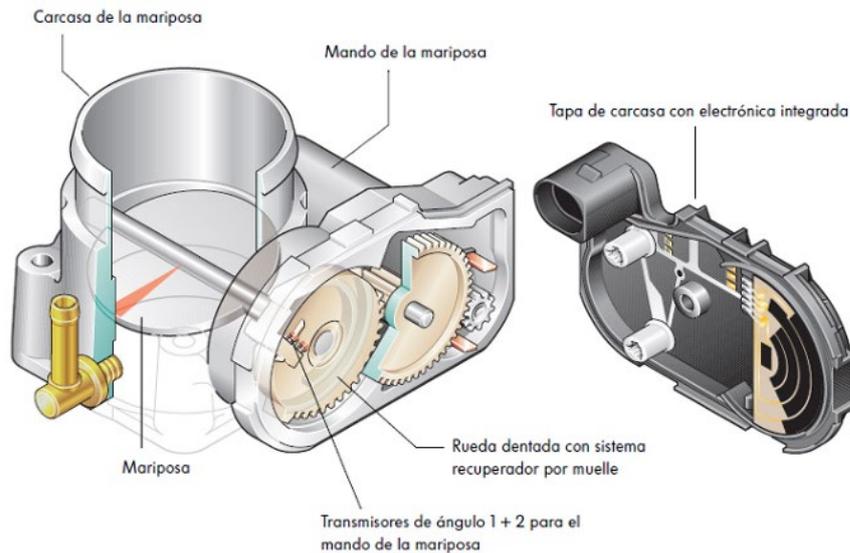
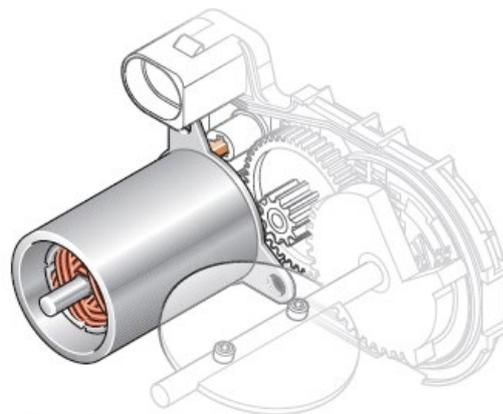


Figura 4: Cuerpo de mariposa motorizado

Incorpora un motor de corriente continua o mando, que mueve el eje de la mariposa a través de un sistema de engranajes.



Mando de la mariposa representado en la tapa de carcasa de la unidad de mando

Figura 5: Motor CC del cuerpo de mariposa

Un muelle espiralado realiza el retorno del eje al punto de cierre. Para mantener la mariposa abierta en una posición intermedia se debe hacer circular por el motor una corriente suficiente para equilibrar la fuerza del muelle. Además dispone de un tope mecánico inferior en el cual mariposa queda cerrada en esta posición. Se utiliza para el ajuste básico de la unidad de mando de la mariposa.

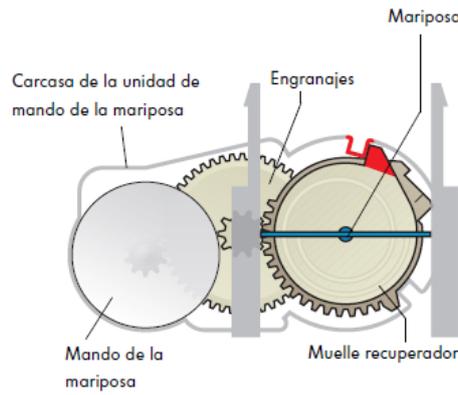


Figura 6: Muelles y topes de la mariposa

Adicionalmente y al igual que el pedal de acelerador electrónico, se incorporan solidarios al eje de la mariposa dos potenciómetros que indican la posición del mismo y permiten diagnosticar algún fallo en los mismos.

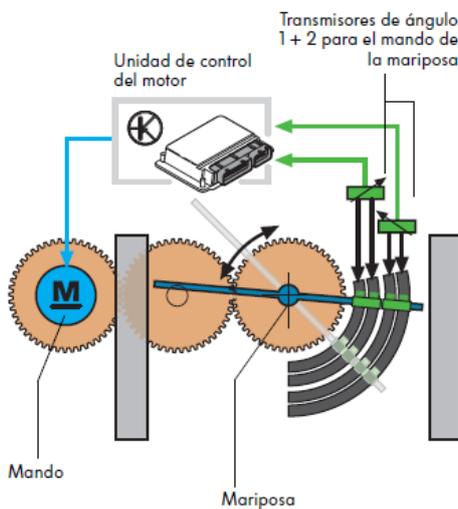


Figura 7: Potenciómetros incorporados en el cuerpo de mariposa

El tope eléctrico inferior está programado en la unidad de control del motor y se halla un poco por encima del tope mecánico inferior. La mariposa cierra como máximo hasta el tope eléctrico inferior durante el funcionamiento normal, evitándose así que la mariposa se marque en la carcasa.

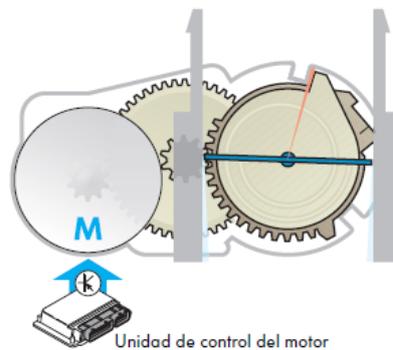


Figura 8: Tope eléctrico inferior del cuerpo de mariposa

Al no tener corriente el mando de la mariposa, el muelle recuperador tira de la mariposa a la posición de marcha de emergencia. En esa posición es posible conducir el vehículo de forma restringida, a régimen de ralentí acelerado.

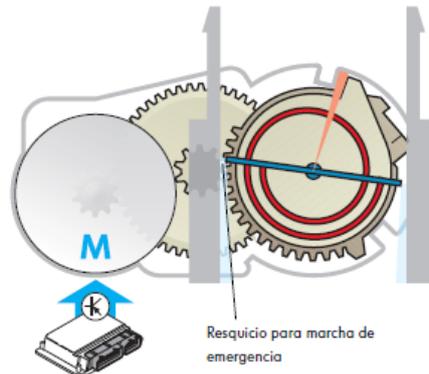


Figura 9: Punto de reposo para marcha en emergencia del cuerpo de mariposa

El tope eléctrico superior está definido en la unidad de control. Es el ángulo de apertura máxima de la mariposa durante la marcha.

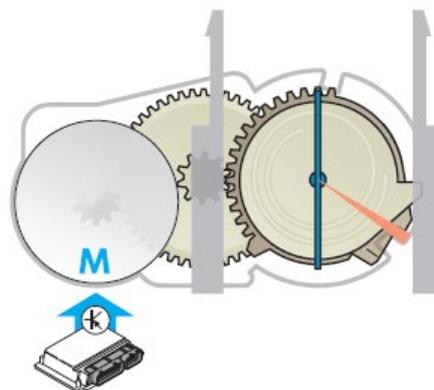


Figura 10: Tope eléctrico superior del cuerpo de mariposa

El tope mecánico superior se halla por encima del tope eléctrico superior. Sin embargo, no influye sobre las prestaciones, porque va situado en la "sombra aerodinámica" del eje de la mariposa. Si se avería el mando de la mariposa, el sistema lleva automáticamente la mariposa a la posición de marcha de emergencia.

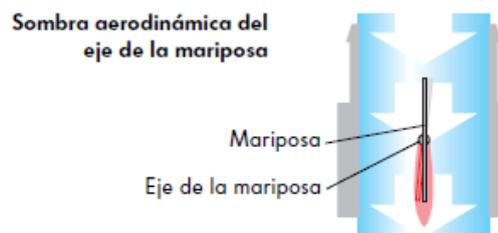


Figura 11: Máxima apertura del cuerpo de mariposa

1.2.3 Conmutadores de freno, embrague y caja de velocidades

Estos tres conmutadores se utilizan solamente para el control de velocidad. La activación de las señales de embrague y freno desactivan el control de velocidad automático para evitar la sobre aceleración del motor. Luego el conductor deberá volver a activarlo. Si al activar el modo de control automático de velocidad la señal de última marcha no está activo, el sistema no permite el modo de control automático de velocidad. Si el control automático está activado y la señal de última marcha se desactiva, el control sale del modo automático.

Las señales llegan al controlador mediante conmutadores que están instalados en los pedales de embrague y freno, y en la caja de velocidades para indicar que la misma está en la última marcha (5ta o 6ta).

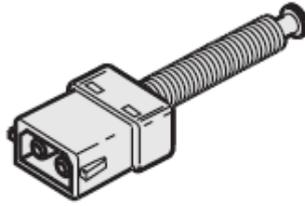


Figura 12: Switch embrague/freno

1.2.4 Sensor de velocidad

Para el control automático de velocidad, el sistema requiere una señal que indique de forma instantánea y precisa la velocidad del vehículo. Las computadoras de los vehículos disponen de esta señal como salida, la cual utilizan para indicar la velocidad en el tablero del vehículo, entre otras funciones. Aprovechando la disponibilidad de esta señal se hace uso de la misma para realimentar el sistema de control automático de velocidad.

Otra alternativa sería instalar un sensor de velocidad en la salida de la caja de velocidades para obtener una señal propia del sistema, sin alterar el cableado original del vehículo.



Figura 13: Sensor de velocidad

Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Controladores PID

Los controladores son dispositivos que nos permiten mantener una variable a un determinado valor de referencia. Por ejemplo, un controlador de temperatura será un dispositivo que nos permiten mantener la temperatura (variable a controlar) a un valor de referencia, por ejemplo 25°C. Otro sistema de control sería el de un sistema de posicionamiento, que mantendría el eje de salida de un servo motor (variable a controlar) a un ángulo determinado por el valor de referencia.

Supongamos que queremos controlar el ángulo de salida del eje de un motor con un potenciómetro, de tal forma que el eje del motor sigue el giro del potenciómetro en una relación 1:1, es decir, si giro el eje 20° hacia la izquierda el eje del motor girará 20° hacia la izquierda y lo mismo si giramos el eje hacia la derecha. Si no existieran las inercias mecánicas (tendencia de los sistemas físicos a mantener su estado de reposo o movimiento), ni las inercias eléctricas (capacitancias e inductancias), el sistema sería sencillo, solo necesitaríamos disponer de un circuito que nos indicara, si existe error y en qué dirección, de tal manera que si el error fuera cero el motor estaría parado y si el error fuera distinto de cero el motor lo haríamos girar a máxima velocidad en el sentido indicado por dicho error. Como no hay inercias el motor respondería instantáneamente ante un cambio de posición del pote de mando girando a su máxima velocidad y se pararía instantáneamente cuando el error fuera cero.

La realidad es muy distinta, si hiciéramos lo dicho anteriormente al activar el motor este tardaría un tiempo en vencer las inercias y cuando el error fuera cero tardaría otro tiempo en vencer las inercias y pararse, con lo que tendríamos un error de posición bastante grande. ¿Cómo podríamos hacer que el error fuera mínimo? La solución es estabilizarlo mediante un controlador PID que introduce cambios en la respuesta del sistema que permite hacer que este se quede estable.

Entonces, los controladores son los instrumentos diseñados para detectar y corregir los errores producidos al comparar y procesar el valor de referencia o "set point" con el valor medido del parámetro más importante a controlar en un proceso. Éste manipula la entrada al sistema para obtener el efecto deseado en la salida del sistema (realimentación). La realimentación puede ser negativa (regulación autocompensatoria) o positiva (efecto bola de nieve o círculo vicioso).

Los controladores PID tienen tres módulos el control proporcional (P), el control integral (I) y el control derivativo (D), cada uno de estos 3 controles tiene una función determinada en la estabilización del sistema.

2.1.1 Controladores de acción proporcional (P)

En estos controladores la señal de accionamiento es proporcional a la señal de error del sistema. La señal de error es la obtenida en la salida del comparador entre la señal de referencia y la señal realimentada. Es el más sencillo de los distintos tipos de control y consiste en amplificar la señal de error antes de aplicarla a la planta o proceso. La función de transferencia de este tipo de reguladores es una variable real, denominada **Kp** (constante de proporcionalidad) que determinará el grado de amplificación del

elemento de control. Si $y(t)$ es la señal de salida (salida del controlador) y $e(t)$ la señal de error (entrada al controlador) en un sistema de control proporcional tendríamos:

$$y(t) = Kp \cdot e(t)$$

Que en el dominio de Laplace será:

$$Y(s) = Kp \cdot E(s)$$

Por lo que su función de transferencia será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = Kp$$

Donde $Y(s)$ es la salida del controlador, $E(s)$ la señal de error y Kp la ganancia del bloque de control.

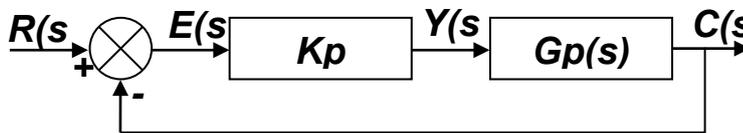


Figura 14: Diagrama en bloques del controlador

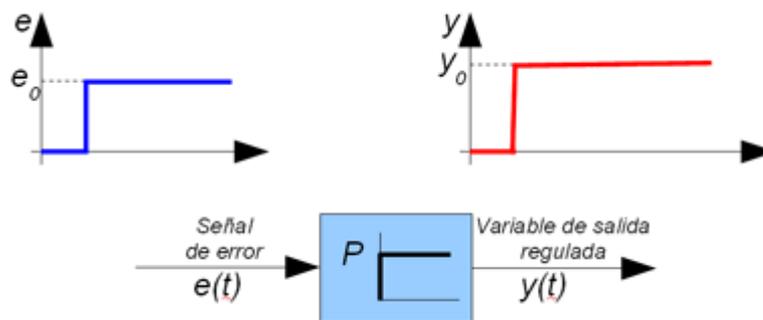


Figura 15: Respuesta temporal del controlador proporcional

Teóricamente, en este tipo de controlador, si la señal de error es cero, también lo será la salida del controlador. La respuesta, en teoría es instantánea, con lo cual el tiempo no intervendría en el control. En la práctica, no ocurre esto, si la variación de la señal de entrada es muy rápida, el controlador no puede seguir dicha variación y presentará una trayectoria exponencial hasta alcanzar la salida deseada.

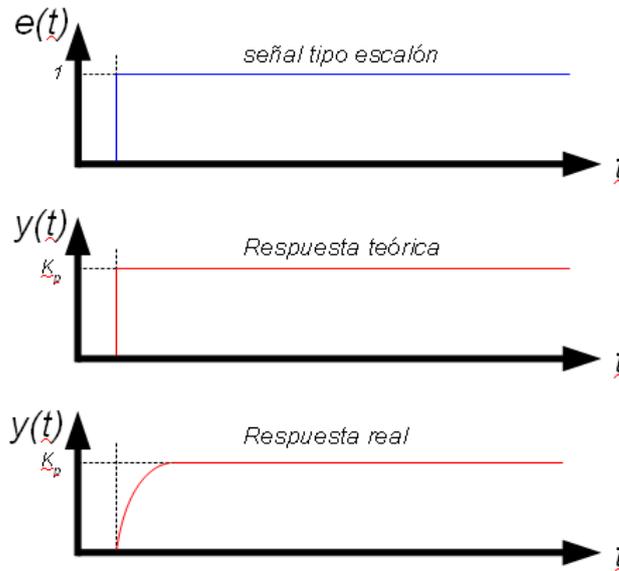


Figura 16: Respuesta temporal real del controlador proporcional

En general los reguladores proporcionales presentan una respuesta con un cierto error remanente, que el sistema es incapaz de compensar. El controlador proporcional se encargará de eliminar el error residual que da el control P, reduciéndolo a 0.

2.1.2 Controlador de acción integral (I):

En estos reguladores el valor de la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error, por lo que en este tipo de control la acción varía en función de la desviación de la salida y del tiempo en el que se mantiene esta desviación.

Si consideramos que:

$y(t)$ = Salida integral

$e(t)$ = Error (diferencia entre el valor medido medición y el set point)

Ti = Tiempo integral

La salida de este regulador es:

$$y(t) = \frac{1}{Ti} \cdot \int e(t) dt$$

Que en el dominio de Laplace, será:

$$Y(s) = \frac{1}{Ti \cdot s} E(s)$$

Por lo que su función de transferencia será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{1}{Ti \cdot s}$$

La respuesta temporal de un regulador integral es:

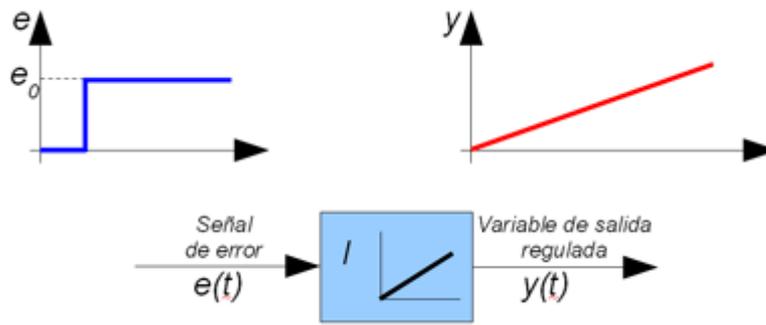


Figura 17: Respuesta temporal del controlador integral

La velocidad de respuesta del sistema de control dependerá del valor de K_i que es la pendiente de la rampa de acción integral.

El inconveniente del controlador integral es que la respuesta inicial es muy lenta y el controlador no empieza a ser efectivo hasta haber transcurrido un cierto tiempo. En cambio anula el error remanente que presenta el controlador proporcional.

2.1.3 Controlador de acción proporcional e integral (PI)

En realidad no existen controladores que actúen únicamente con acción integral, siempre actúan en combinación con reguladores de una acción proporcional, complementándose los dos tipos de reguladores, primero entra en acción el regulador proporcional (instantáneamente) mientras que el integral actúa durante un intervalo de tiempo. (T_i = tiempo integral)

La Función de transferencia del bloque de control PI responde a la ecuación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p \cdot \left(\frac{1}{T_i \cdot s} + 1 \right)$$

Donde K_p y T_i son parámetros que se pueden modificar según las necesidades del sistema. Si T_i es grande la pendiente de la rampa, correspondiente al efecto integral será pequeña y, su efecto será atenuado, y viceversa.

Respuesta temporal de un regulador PI:

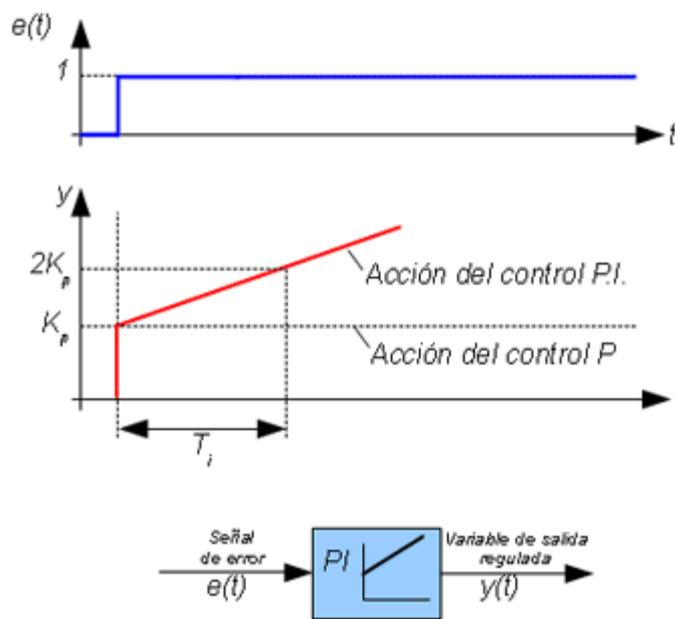


Figura 18: Respuesta temporal del controlador proporcional-integral

Por lo tanto la respuesta de un regulador PI será la suma de las respuestas debidas a un control proporcional P, que será instantánea a detección de la señal de error, y con un cierto retardo entrará en acción el control integral I, que será el encargado de anular totalmente la señal de error.

2.1.4 Controlador de acción proporcional y derivativa (PD):

El controlador derivativo se opone a desviaciones de la señal de entrada, con una respuesta que es proporcional a la rapidez con que se producen éstas.

Si consideramos que:

$y(t)$ = Salida diferencial.

$e(t)$ = Error (diferencia entre medición y set point). El set point no es otra cosa que el nivel deseado al que queremos que vuelva el sistema.

Td = Tiempo diferencial, se usa para dar mayor o menor trascendencia a la acción derivativa.

La salida de este regulador es:

$$y(t) = Td \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Que en el dominio de Laplace, será:

$$Y(s) = Td \cdot s \cdot E(s)$$

Por lo que su función de transferencia será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = Td \cdot s$$

Si la variable de entrada es constante, no da lugar a respuesta del regulador diferencial, cuando las modificaciones de la entrada son instantáneas, la velocidad de variación será muy elevada, por lo que la respuesta del regulador diferencial será muy brusca, lo que haría desaconsejable su empleo.

El regulador diferencial tampoco actúa exclusivamente (por eso no lo hemos vuleto a explicar separadamente como si hemos hecho con el integral -aunque el integral puro tampoco existe-), si no que siempre lleva asociada la actuación de un regulador proporcional (y por eso hablamos de regulador PD), la salida del bloque de control responde a la siguiente ecuación:

$$y(t) = Kp \cdot e(t) + Kp \cdot Td \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Kp y Td son parámetros ajustables del sistema. Td es llamado *tiempo derivativo* y es una medida de la rapidez con que un controlador PD compensa un cambio en la variable regulada, comparado con un controlador proporcional puro.

Que en el dominio de Laplace, será:

$$Y(s) = Kp \cdot E(s) + Kp \cdot Td \cdot s \cdot E(s)$$

Y por tanto la función de transferencia del bloque de control PD será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = Kp \cdot (Td \cdot s + 1)$$

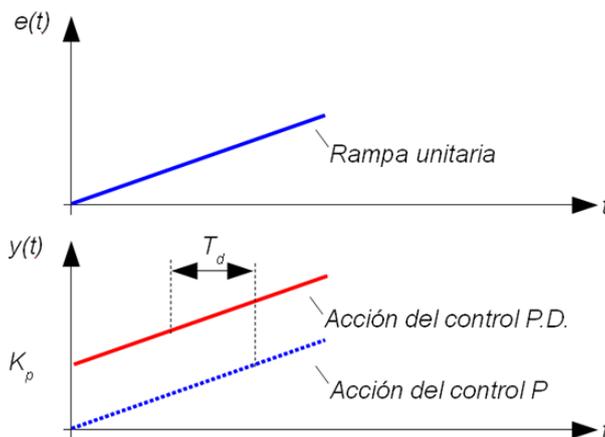


Figura 19: Respuesta temporal del controlador proporcional-derivativo

En los controladores diferenciales, al ser la derivada de una constante igual a cero, el control derivativo no ejerce ningún efecto, siendo únicamente práctico en aquellos casos en los que la señal de error varía en el tiempo de forma continua, por lo que el análisis de este controlador ante una señal de error tipo escalón no tiene sentido, por ello,

representamos la salida del controlador en respuesta a una señal de entrada en forma de rampa unitaria.

En la Figura 19: **Respuesta temporal del controlador proporcional-derivativo** se observa la respuesta que ofrece el controlador, que se anticipa a la propia señal de error. Este tipo de controlador se utiliza en sistemas que deben actuar muy rápidamente, ofreciendo una respuesta tal que provoca que la salida continuamente esté cambiando de valor.

El regulador derivativo no se emplea aisladamente, ya que para señales lentas, el error producido en la salida en régimen permanente sería muy grande y si la señal de mando dejase de actuar durante un tiempo largo la salida tendería hacia cero y con lo que no se realizaría ninguna acción de control.

La ventaja de este tipo de controlador es que aumenta la velocidad de respuesta del sistema de control. Al actuar conjuntamente con un controlador proporcional las características de un controlador derivativo, provocan una apreciable mejora de la velocidad de respuesta del sistema, aunque pierde precisión en la salida (durante el tiempo de funcionamiento del control derivativo).

Un ejemplo:

Durante la conducción de un automóvil, cuando los ojos (sensores/transductores) detectan la aparición de un obstáculo imprevisto en la carretera, o algún vehículo que invade parcialmente nuestra calzada, de forma intuitiva, el cerebro (controlador) envía una respuesta instantánea a las piernas y brazos (actuadores), al objeto de corregir la velocidad y dirección de nuestro vehículo y así evitar el choque. Al ser muy pequeño el tiempo de actuación, el cerebro tiene que actuar muy rápidamente (control derivativo), por lo que la precisión de la maniobra es muy escasa, lo que provocará que bruscos movimientos oscilatorios, (inestabilidad en el sistema) pudiendo ser causa un accidente de tráfico.

En este ejemplo, el tiempo de respuesta y la experiencia en la conducción (ajuste del controlador derivativo) provocan que el control derivativo producido por el cerebro del conductor sea o no efectivo.

2.2 Sintonización de controladores PID

Sintonizar un controlador PID significa establecer el valor que deben tener los parámetros de Ganancia (Banda Proporcional), Tiempo Integral (Reset) y Tiempo derivativo (Rate) para que el sistema responda en una forma adecuada. La primera etapa de todo procedimiento de sintonización consiste en obtener la información estática y dinámica del lazo. Existen diversos métodos para ajustar los parámetros de controladores PID, pero todos caen dentro de dos tipos:

- *Métodos en Lazo Cerrado:* la información de las características del lazo se obtienen a partir de un test realizado en lazo cerrado, usualmente con un controlador con acción proporcional pura.
- *Métodos en Lazo Abierto:* las características estáticas y dinámicas de la planta (Elemento Final de Control + Proceso + Transmisor) se obtienen de un ensayo en lazo abierto, generalmente la respuesta a un escalón (Curva de Respuesta).

2.2.1 Método Ziegler y Nichols en lazo cerrado.

El Método consiste en obtener la respuesta del sistema a una perturbación (por ejemplo un pulso en el set point) reduciendo al mínimo las ganancias integral y derivativa del controlador. Se observa la respuesta y si es amortiguada, se incrementa la ganancia hasta lograr oscilaciones sostenidas (oscilaciones con amplitud constante). La ganancia del controlador (proporcional) en este momento se denominará "Ganancia Última" y se nota **K_u** y el período de la oscilación se llama "Período Último" T_u .

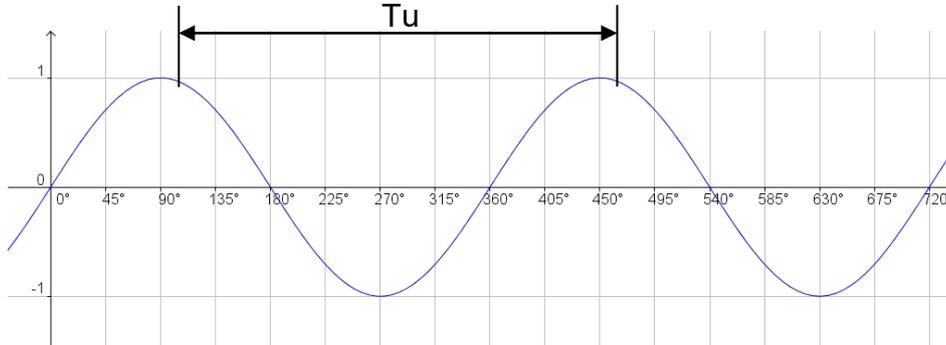


Figura 20: Período último

Luego de obtenida la ganancia última del controlador se calculan los parámetros del controlador PID con acción solo proporcional (P), proporcional e integral (PI) o proporcional integral y derivativa (PID) de acuerdo a la siguiente tabla:

	K_p	T_i	T_d
P	0.50 K_u		
PI	0.45 K_u	0.83 T_u	
PID	0.59 K_u	0.50 T_u	0.125 T_u

Tabla 1: Parámetros PID Z/N en lazo cerrado

Si los valores de tiempo T_i y T_d se traducen a ganancias, se obtiene:

$$K_i = K_p / T_i$$

$$K_d = K_p \times T_d$$

	K_p	K_i	K_d
P	0.50 K_u		
PI	0.45 K_u	0.54 K_u/T_u	
PID	0.59 K_u	1.18 K_u/T_u	0.074 $K_u \cdot T_u$

Tabla 2: Ganancias PID Z/N en lazo cerrado

2.2.2 Método Tyreus y Luyben en lazo cerrado.

Este método, como el anterior, evalúa los parámetros del controlador a partir de la ganancia última K_u y el período último T_u . Propone ajustes más suaves que el de Ziegler y Nichols y se aplica fundamentalmente a plantas que poseen un integrador.

Los valores recomendados de sintonización son:

	Kp	Ti	Td
PI	0.312 Ku	2.2 Tu	0
PID	0.45 Ku	2.2 Tu	0.158 Tu

Tabla 3: Parámetros PID T/L en lazo cerrado

2.2.3 Método Ziegler y Nichols en lazo abierto.

Este método de sintonización se adapta bien a los sistemas que son estables en lazo abierto y que presentan un tiempo de retardo desde que reciben la señal de control hasta que comienzan a actuar.

Para poder determinar la respuesta al escalón de la planta o sistema controlado, se debe retirar el controlador PID y sustituirlo por una señal escalón aplicada al accionador.

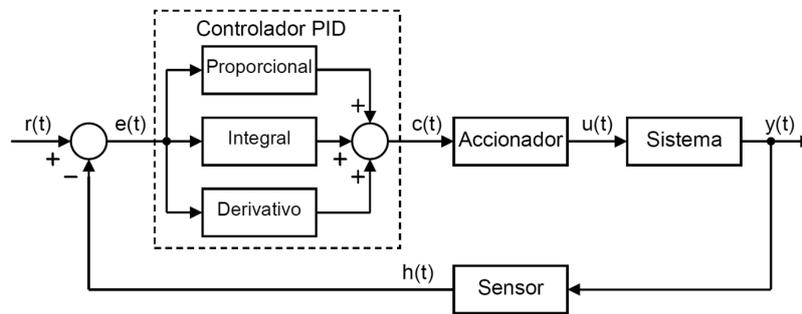


Figura 21: Sistema de control PID en lazo cerrado

En la siguiente figura se muestra la modificación que hay que realizar al sistema de control en lazo cerrado para convertirlo en un sistema en lazo abierto que responda a una señal escalón, retirando el controlador PID:

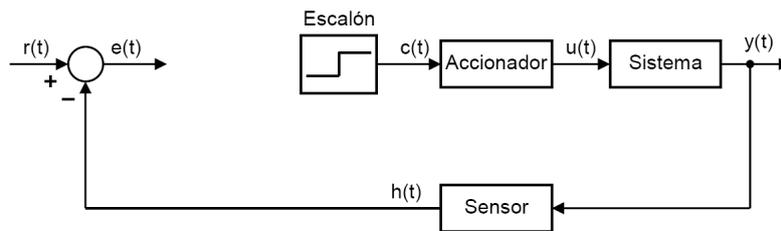


Figura 22: Entrada escalón de un sistema en lazo abierto

En la figura 23 se puede ver representado en rojo la entrada escalón al accionador o señal c(t). En azul se representa la salida del sistema medida por el sensor o señal h(t). El escalón de entrada c(t) debe estar entre el 10% y el 20% del valor nominal de entrada.

Como puede apreciarse, la respuesta del sistema presenta un retardo, también llamado tiempo muerto, representado por T1.

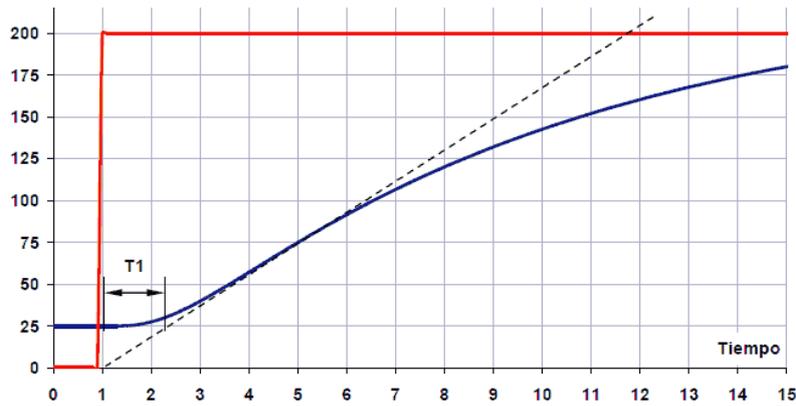


Figura 23: Tiempo muerto T1 en lazo abierto

Para calcular los parámetros se comienza por trazar una línea recta tangente a la señal de salida del sistema (curva azul). Esta tangente está dibujada en la imagen con una recta a trazos.

El tiempo T1 corresponde al tiempo muerto. Este es el tiempo que tarda el sistema en comenzar a responder. Este intervalo se mide desde que la señal escalón sube, hasta el punto de corte de la recta tangente con el valor inicial del sistema.

El tiempo T2 es el tiempo de subida. Observando la Figura 24, este tiempo se obtiene desde el punto en el que la recta tangente corta al valor inicial del sistema hasta el punto en el que la recta tangente llega al valor final del sistema.

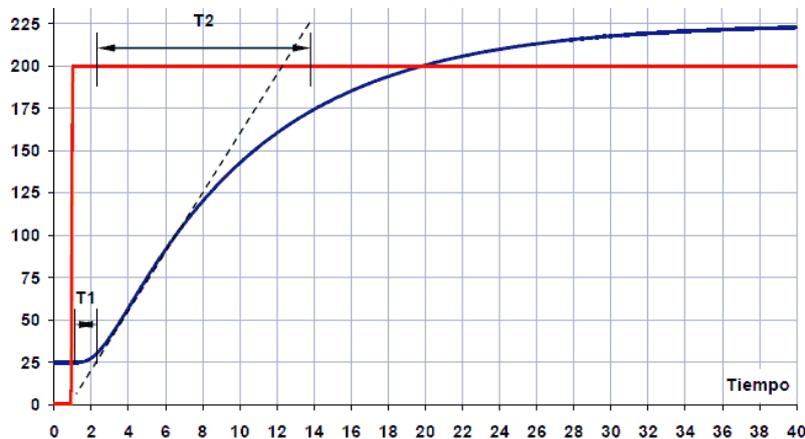


Figura 24: Tiempo de subida T2 en lazo abierto

Además de estos dos tiempos característicos también hay que calcular la variación de la señal escalón Δx y la variación de la respuesta del sistema Δy .

A partir de estos valores se puede calcular la constante del sistema K_0 :

$$K_0 = \frac{\Delta x \cdot T_2}{\Delta y \cdot T_1}$$

Y a partir de la constante K_0 se pueden calcular los parámetros del controlador PID con acción solo proporcional (P), proporcional e integral (PI) o proporcional integral y derivativa (PID):

	K_p	T_i	T_d
P	K_0		
PI	$0.9 K_0$	$3.3 T_1$	
PID	$1.2 K_0$	$2 T_1$	$0.5 T_1$

Tabla 4: Parámetros PID Z/N en lazo abierto

La constante K_p corresponde a la ganancia proporcional, T_i es la constante de tiempo integral y T_d es la constante de tiempo derivativa. En el caso de tener el controlador PID configurado con la ganancia integral K_i y derivativa K_d en vez de los tiempos T_i y T_d , hay que tener en cuenta las siguientes relaciones entre ellos:

$$K_i = K_p / T_i$$

$$K_d = K_p \times T_d$$

Con lo cual la tabla de valores para ajustar el controlador PID será la siguiente:

	K_p	K_i	K_d
P	K_0		
PI	$0.9 K_0$	$0.27 k_0/T_1$	
PID	$1.2 K_0$	$0.6 K_0/T_1$	$0.6 K_0 T_1$

Tabla 5: Ganancias PID Z/N en lazo abierto

2.3 Controladores PID discretos

Hasta ahora se ha descrito al sistema de control y a la planta como funciones continuas en el tiempo. El control PID se podría implementar haciendo un seguimiento continuo de la variable a controlar, por lo general se usan amplificadores operacionales, teniendo en cuenta la función de transferencia generada por el uso de impedancias capacitivas. Un circuito típico PID continuo se muestra en la figura.

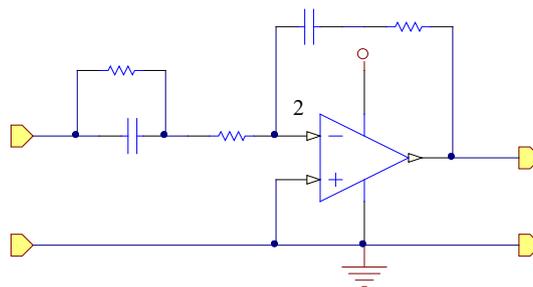


Figura 25: Circuito PID continuo con AO

En donde se puede definir las respectivas constantes del controlador de la siguiente manera:

$$K_p = \frac{RI}{R + RD}$$

$$K_d = RD \cdot CD$$

$$KI = \frac{1}{RI + CI}$$

Cuando se trabaja con microcontroladores, se hace un cambio en el tipo de señal de analógica a digital por medio de un proceso de conversión, llamado proceso de muestreo, por lo que no se puede aplicar directamente los conceptos de sintonización de controladores anteriormente vistos, ya que aparecen otros conceptos (como el retenedor de orden cero) los cuales modifican la función de transferencia del sistema y del controlador debido al cambio de variable.

Así como en el tiempo continuo se tiene a la transformada de Laplace para simplificar los cálculos y obtener de manera sencilla las funciones de transferencia, en el análisis en tiempo discreto se utiliza la *transformada z*, la cual, para una función continua $x(t)$, está definida de la siguiente forma:

$$X(z) = Z[x(t)] = Z[x(kT)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) \cdot z^{-k}$$

Donde T , es el período de muestreo del conversor analógico–digital y $k \in Z$.

Los elementos básicos de un controlador digital se muestran en la siguiente figura.

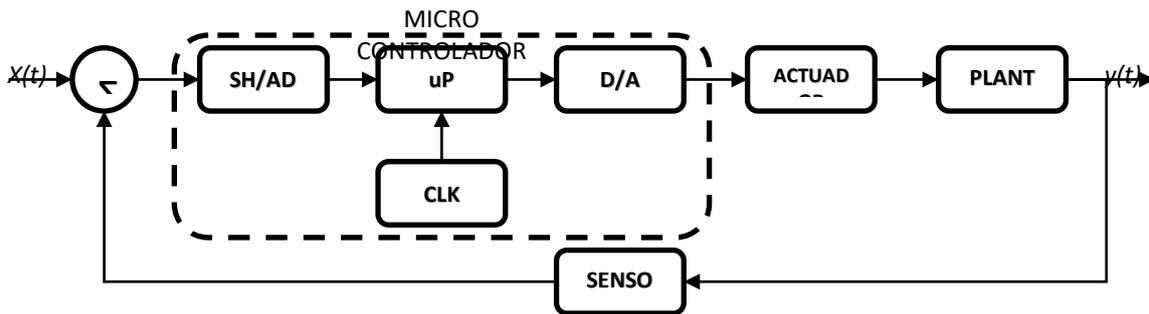


Figura 26: Sistema de control digital

La operación del controlador se maneja por el reloj. La señal de error se convierte a forma digital mediante un circuito de muestreo y retención y el convertidor analógico–digital. En la parte del microcontrolador es muy importante el proceso de muestreo y retención, ya que es el proceso donde cambia la señal de analógica a digital. Se puede entender mejor esta conversión si se supone que la señal digital $x^*(t)$ es el resultado de multiplicar la señal continua $x(t)$ por la función impulso, es decir, se obtiene una secuencia de impulsos separadas en el tiempo $T[seg]$ cuya amplitud es el valor de $x(t)$ en el instante de muestreo. Matemáticamente esto es:

$$x^*(t) = x(0) \cdot \delta(t) + x(T) \cdot \delta(t - T) + \dots + x(kT) \cdot \delta(t - kT) + \dots$$

$$x^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) \cdot \delta(t - kT)$$

Recordemos que $\delta(t - kT) = 0 \forall t \neq kT$

Podemos definir entonces la salida $x^*(t)$, como el producto de la señal continua $x(t)$ y una señal portadora δ_T (función impulso unitario):

$$x^*(t) = x(t) \cdot \delta_T(t)$$

$$\delta_T(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT)$$

A este tipo de muestreador se le conoce como *modulador mediante impulsos* y se ilustra en la siguiente figura.

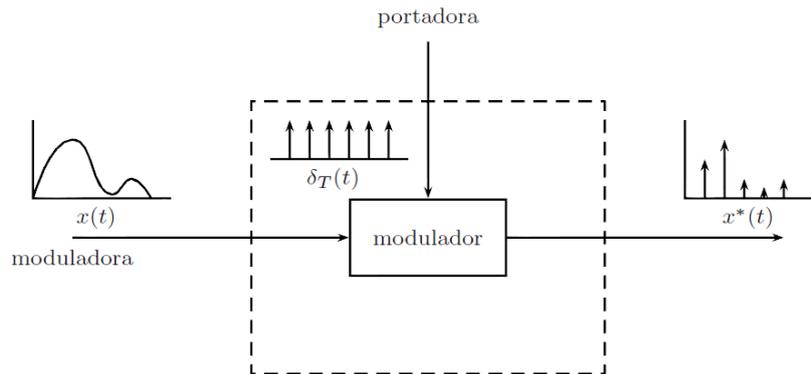


Figura 27: Modulador mediante impulsos

Tomando la transformada de Laplace a la ecuación anterior tenemos:

$$X^*(s) = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) \cdot e^{-kTs}$$

Donde $e^{Ts} = z$, entonces

$$X^*(s) = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) \cdot z^{-k}$$

Y comparando esta ecuación con $X(z)$ tenemos que:

$$X^*(s) = X(z)$$

Podemos concluir entonces que la transformada de Laplace de la señal muestreada mediante impulsos $x^*(t)$ ha mostrado ser la misma que la transformada z de la señal $x(t)$, si se define $z = e^{Ts}$.

En casos reales, la señal muestreada se debe mantener fija o constante hasta el próximo instante de muestreo, lo cual genera la curva escalonada. En si la retención de datos es un proceso de generación de una señal en tiempo continuo $h(t)$, a partir de una señal en tiempo discreto $x^*(t)$. Se puede expresar $h(t)$, matemáticamente, entre dos intervalos consecutivos de muestreo, es decir $kT \leq t < (k + 1)T$, aproximándola mediante un polinomio en τ como:

$$h(kT + \tau) = a_n \tau^n + a_{n-1} \tau^{n-1} + \dots + a_1 \tau + a_0 \text{ donde } 0 \leq \tau < T$$

Como el retenedor en el caso real mantiene el valor de $x^*(t)$ entre muestreos consecutivos, es decir, en el intervalo de tiempo $0 \leq \tau < T$, la ecuación anterior se reduce a:

$$h(kT + \tau) = a_0$$

Y debido a que en el momento de muestreo las dos funciones tienen el mismo valor, es decir, $h(kT) = x^*(kT)$, la ecuación que describe el comportamiento de la función muestreada y mantenida en el tiempo es:

$$h(kT + t) = x^*(kT) \text{ para } 0 \leq t < T$$

Con la cual, aplicando transformada de Laplace y luego de unas operaciones, hallamos la función de transferencia del sistema retenedor, llamado *retenedor de orden cero*:

$$G_{h0} = \frac{1 - e^{-Ts}}{s}$$

El sistema de control digital queda entonces de la siguiente manera:

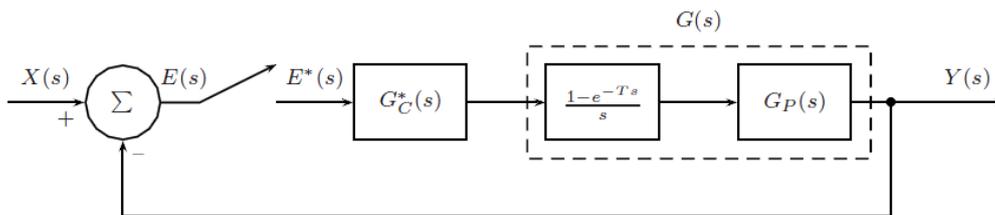


Figura 28: Sistema de control digital

El tiempo de muestreo T es un factor importante en el controlador discreto, ya que afecta a la función de transferencia del sistema debido al cambio de variable de tiempo continuo a discreto, esto se hace evidente en la aparición del retenedor de orden cero.

Las características de la respuesta transitoria del controlador en tiempo discreto también se ven afectadas por el valor del tiempo de muestreo T . Una regla práctica es muestrear de ocho a diez veces durante un ciclo de las oscilaciones senoidales amortiguadas de la salida del sistema en lazo cerrado.

La asignación de los polos en tiempo discreto en función del tiempo de muestreo T y del factor de amortiguamiento relativo está determinado por la ecuación:

$$|z| = e^{-T\epsilon\omega_n}$$

El tiempo de muestreo afecta también el error en estado estable del sistema de control. Para una entrada rampa, se define de la siguiente manera:

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v}$$

Donde K_v , se conoce como constante de error de velocidad estática y está definida por:

$$K_v = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{(1 - z^{-1})G(z)}{T}$$

Nótese que al aumentar el tiempo de muestreo el error en estado estacionario frente a una entrada rampa (error de velocidad estática) aumenta.

Para calcular el tiempo de muestreo se disponen, como condiciones de diseño el tiempo de asentamiento t_s y el factor de amortiguamiento relativo ε . Tomando el criterio del 2%, el tiempo de asentamiento se define como:

$$t_s = \frac{4}{\varepsilon\omega_n}$$

Con lo que se puede calcular el tiempo de muestreo en función de la frecuencia natural amortiguada ω_d , teniendo en cuenta que, como se mencionó anteriormente, se debe muestrear de ocho a diez veces durante cada oscilación, tenemos entonces, que el tiempo de muestreo está definido por:

$$T = \frac{2\pi}{10\omega_d}$$

La función de transferencia del controlador en tiempo discreto se conoce como *función de transferencia pulso*, la cual se halla discretizando la función de transferencia de un controlador PID en tiempo continuo. Para esto se aproximan la parte integral con la sumatoria trapezoidal y la parte derivativa con la diferencia entre dos puntos, con lo que obtenemos:

$$m(kT) = K \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} + \frac{T_d}{T} [e(kT) - e((h-1)T)] \right\}$$

Donde $e(t)$ es la señal de entrada al controlador, $m(t)$ es la salida del controlador, K es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral, T_d es el tiempo derivativo y T es el período de muestreo.

Tomando la transformada z de la ecuación y realizando algunas manipulaciones algebraicas tenemos:

$$M(z) = K \left[1 + \frac{T}{2T_i} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1-z^{-1}) \right] E(z)$$

La cual se puede describir de la siguiente manera:

$$M(z) = \left[K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} + K_d(1-z^{-1}) \right] E(z)$$

Definiendo:

$$K_p = K - \frac{KT}{2T_i}$$

$$K_i = \frac{KT}{T_i}$$

$$K_d = \frac{KT_d}{T}$$

Resulta evidente la diferencia entre las constantes de sintonización del controlador de tiempo continuo y de tiempo discreto.

2.4 Efecto Windup

El término Integral del un controlador PID digital proporciona la "memoria" para permitir que dicho controlador continúe generando correcciones cuando la variable del proceso no es igual al punto de ajuste o "set pint". Para hacer esto, el término integral acumula el error detectado después de cada ciclo de control para usarlo en el siguiente ciclo, como el error en "t-1". Cuando la salida del controlador (una válvula de control, por ejemplo) se ve limitada porque las condiciones del proceso la mantienen completamente abierta o completamente cerrada y la variable del proceso todavía no está en el valor del punto de ajuste, el término integral continúa aumentando por el error restante. Cuando las condiciones del proceso cambian para permitir que la válvula de control haga su trabajo una vez más, el valor del término integral es tan grande que incluso cuando el signo del error cambia, la salida puede no responder hasta que se termine de compensar el gran aumento de dicho término.

La solución más frecuente es dejar de aumentar el término integral cuando la salida está abierta o cerrada por completo. Otras soluciones hacen que el controlador vaya a modo manual y luego se reinicialice cuando cambian las condiciones del límite de apertura de la válvula.

Capítulo 3: Desarrollo

3.1 Diagrama en bloques

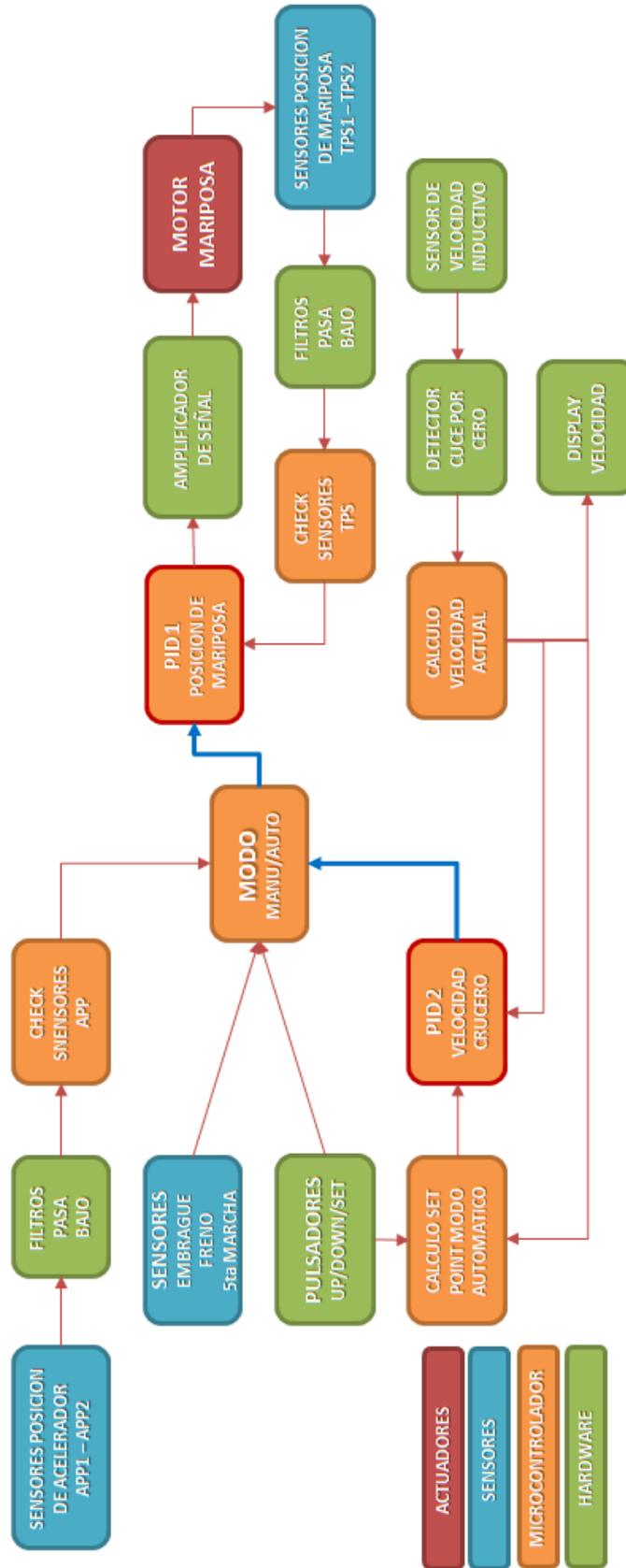


Figura 29: Diagrama en bloques del controlador

3.2 Sensores

3.2.1 Sensor de posición de acelerador:

Para el sensado de la posición del pedal del acelerador se utilizó un potenciómetro comercial aplicado comúnmente en automóviles Renault, el cual consta de una rueda con un muelle y un cable que se conecta al pedal del acelerador. Cuando se acciona el pedal del acelerador gira la rueda y cuando se suelta el pedal la rueda vuelve a su posición inicial debido a la acción del muelle. A su vez, el eje de la rueda se conecta a un potenciómetro doble (CTA 4089) que varía su resistencia de acuerdo a la posición de la rueda.

El controlador alimenta los potenciómetros con 5 Volts. Los mismos no son iguales entre sí, por lo que los voltajes de salida de ambos son diferentes, de manera que el controlador reconoce la señal de cada uno de ellos, puesto que el valor de tensión de salida es diferente. La unidad de control trabaja por defecto con el potenciómetro 1 pero compara en todo momento la señal entregada por ambos, de manera que puede detectar cualquier anomalía de funcionamiento, y en caso de falla, el controlador advierte la misma y continúa operando con potenciómetro 2.



Figura 30: Transductor de posición de acelerador



Figura 31: Sensor de doble potenciómetro de posición de pedal de acelerador

Los valores de las tensiones de salidas de los potenciómetros son los de la siguiente tabla:

Posición	0	25	50	75	100
P1(V)	1,04	1,91	2,85	3,75	4,6
P2(V)	0,51	0,94	1,44	1,87	2,31

Tabla 6: Tensión de salida de los potenciómetros de la mariposa

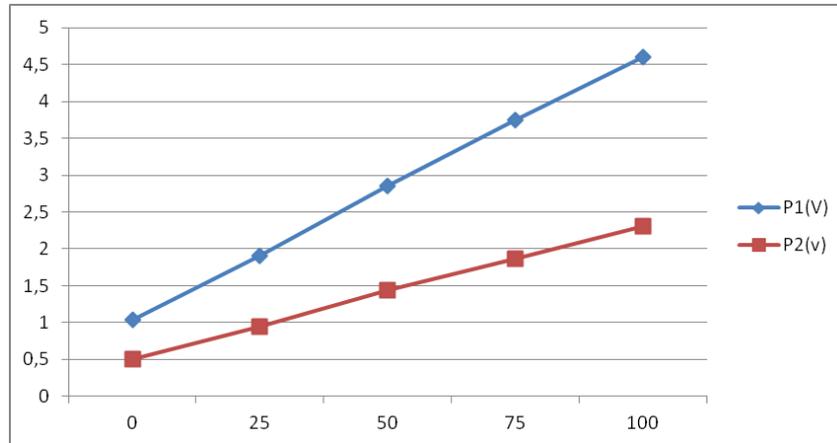


Figura 32: Valores de tensión de los potenciómetros del pedal de acelerador

En la siguiente figura se presenta el pinout del sensor:

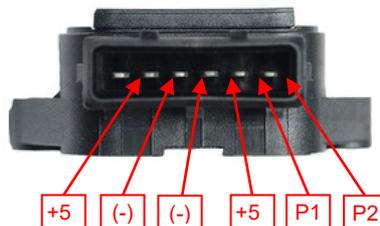


Figura 33: Pinout sensor pedal acelerador

3.2.2 Sensor de posición de mariposa:

El cuerpo de mariposa motorizado tiene incorporado dos potenciómetros que indican la posición de la válvula de entrada de aire al motor. Las señales de estos potenciómetros son utilizadas por el controlador como señal de feedback de la posición requerida, por lo cual es muy importantes que funcionen correctamente ya que un error en estas señales traería aparejado un incorrecto posicionamiento de la mariposa, por lo tanto un incorrecto y peligroso funcionamiento del motor.



Figura 34: Cuerpo de mariposa con sensores de posición incorporados

Los potenciómetros consisten en un circuito impreso y dos cursores que se mueven solidarios al eje del cuerpo de mariposa.

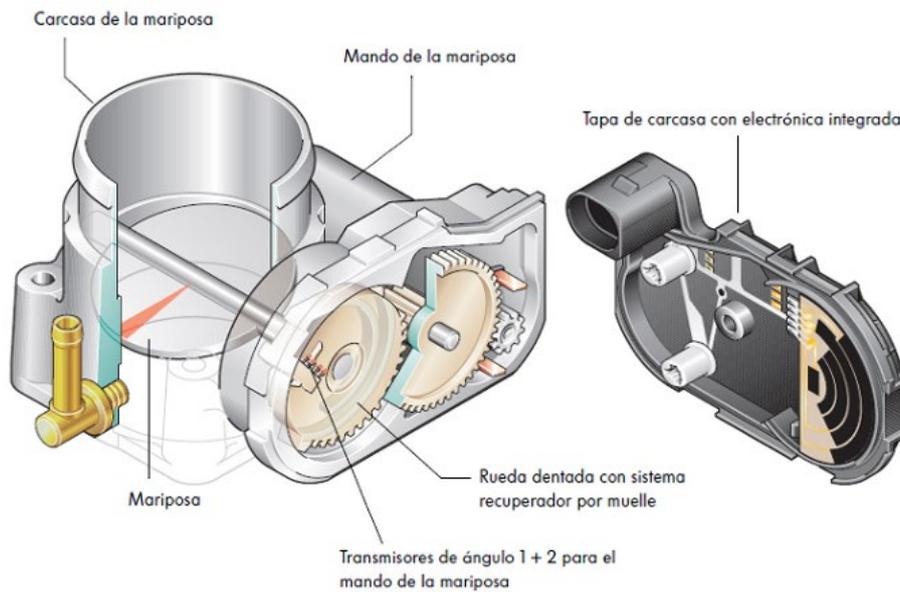


Figura 35: Potenciómetros en cuerpo de mariposa

Según las mediciones realizadas, los valores de salida de los potenciómetros son los siguientes:

Posición	0	25	50	75	100
P1(V)	0,5	1,6	2,62	3,72	4,8
P2(v)	4,67	3,55	2,5	1,4	0,31

Tabla 7: Tensión de salida de potenciómetros del cuerpo de mariposa

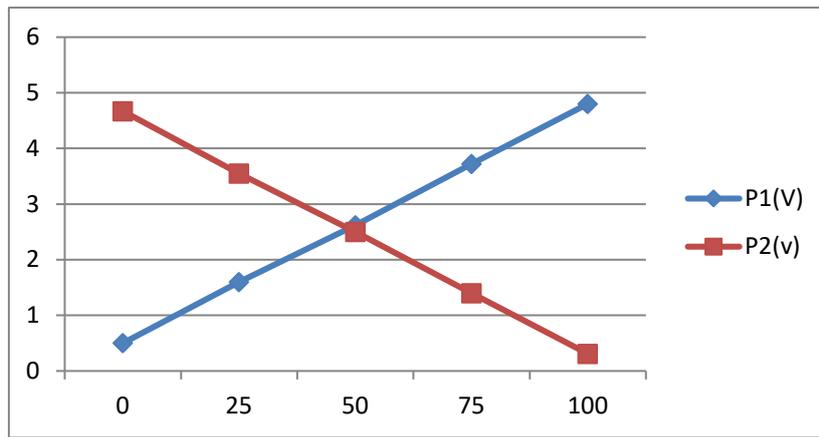


Figura 36: Valores de tensión de los potenciómetros del cuerpo de mariposa

Como se puede apreciar en la Figura 36, la señal de P1 crece al incrementar el ángulo de apertura y la señal de P2 decrece. El valor de la suma de ambas señales es constante, alrededor de 5.15 V. Esto se utiliza para chequear el correcto funcionamiento de la señal de feedback de la posición de mariposa. Si la suma no es constante o está fuera del margen de tolerancia admitido, el controlador entra en emergencia y deja de enviar señal al motor que mueve la apertura de la mariposa. Al ocurrir esto, la mariposa queda en la posición de reposo mecánica dejando el motor a ciertas RPM que le permiten circular hasta un punto seguro.

En la Figura 37 se presenta el pinout del cuerpo de mariposa:

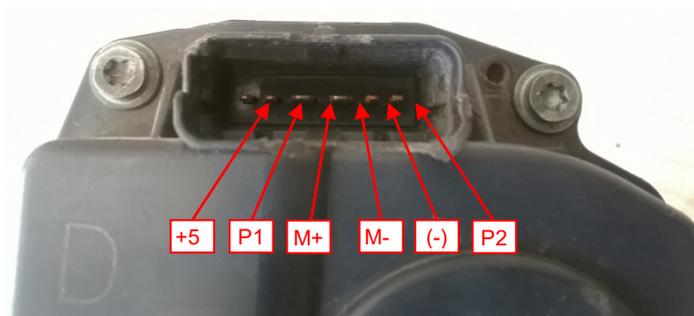


Figura 37: Pinout cuerpo de mariposa

3.2.3 Sensor de velocidad:

El sensor de velocidad es el que le indica al controlador la velocidad actual del vehículo. Generalmente se encuentra ubicado en la caja de velocidades del vehículo aunque en algunos casos se lo puede encontrar en la junta homocinética del mismo. Comercialmente se utilizan dos tipos de sensores: magnéticos (2 cables) y de efecto hall (3 cables). En ambos casos entregan una señal de frecuencia variable proporcional a la velocidad del vehículo. En esta aplicación se utilizó el sensor original del auto el cual se ubica en la caja de velocidades y es de 3 cables, o sea de efecto HALL.

Según los datos relevados, el sensor utilizado entrega una frecuencia de 10 Hz cada 1 km/h de velocidad del vehículo y su comportamiento es lineal.



Figura 38: Sensor de velocidad (VSS)

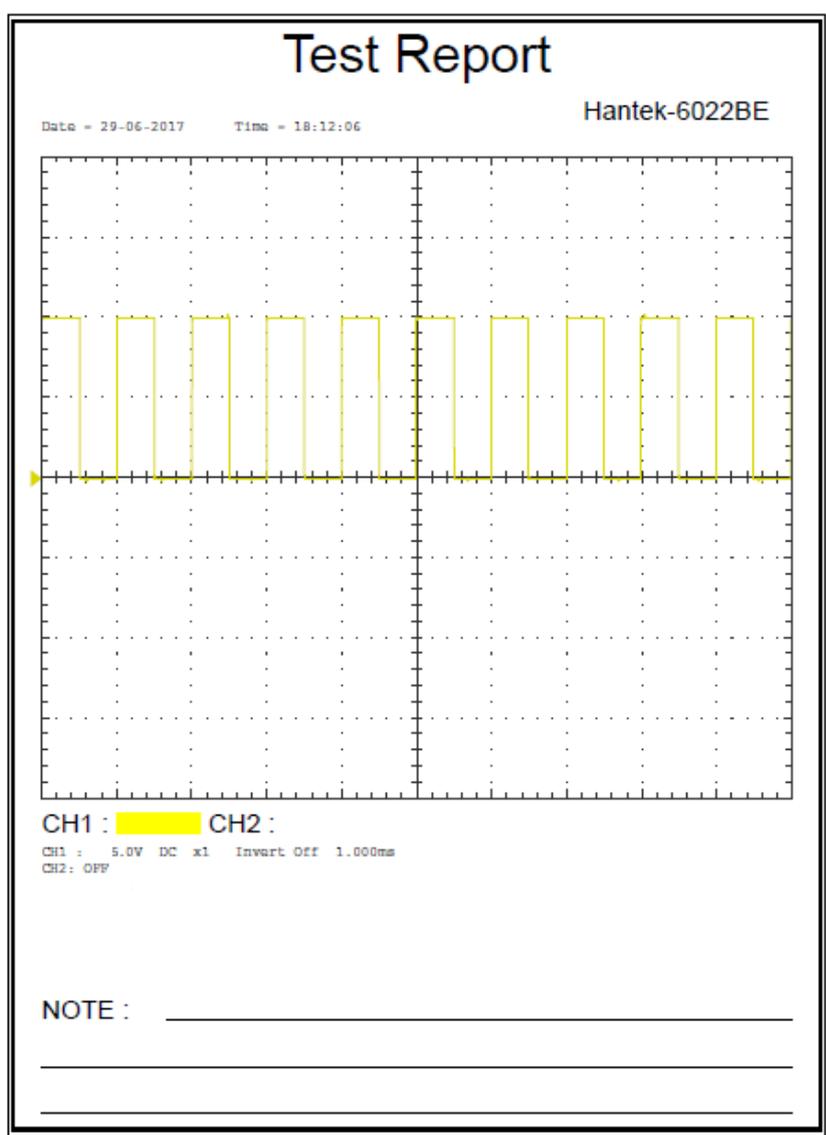


Figura 39: Señal sensor de velocidad a 100 km/h

3.2.4 Sensor de pedales:

Para un funcionamiento seguro el sistema de de control de velocidad crucero se deberá desactivar bajo ciertas condiciones. Alguna de ellas son si se presionan los pedales de embrague o de freno. Para ello, el sistema cuenta con switchs que detectan los movimientos de dichos pedales. Para el caso del freno, se comparte la señal que activa la luz trasera, pero para el embrague el vehículo no cuenta con un sensor que detecte el accionamiento. Para ello se adaptó un sensor similar al del pedal del freno que informa al sistema la activación del embrague. Estos switchs son del tipo ON/OFF normalmente cerrados.



Figura 40: Switch freno/embrague

3.3 Hardware

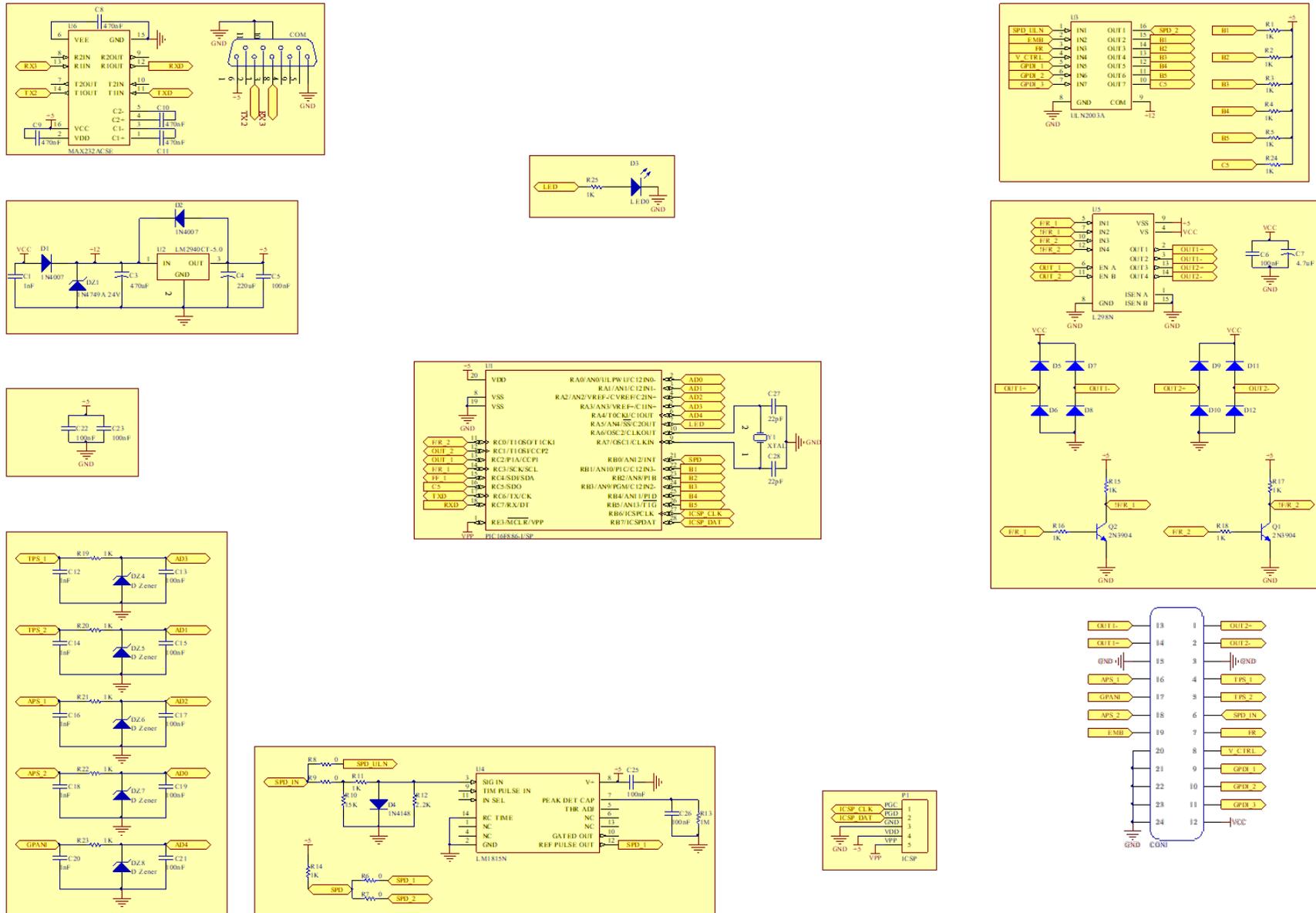


Figura 41: Circuito esquemático completo

3.3.1 Circuito de alimentación:

La alimentación del circuito proviene de la propia batería del vehículo, nominalmente de 12.5V con el vehículo detenido y 13.7V con el vehículo en marcha y su elemento de carga funcionando correctamente.

Internamente, los diferentes integrados digitales se alimentan con 5V los cuales son provistos a través de U2 y una serie de capacitores y diodos que ofician de filtros y protecciones varias.

El circuito integrado que regula los 5V de corriente continua es el LM2940CT-5.0 el cual está diseñado con fines automotrices ya que logra una regulación correcta de los 5V@1A con bajas fluctuaciones de salida a partir de alimentaciones de 6.25V con lo que permite operar aún con baterías agotadas o ciclos de arranque. Además, soporta una tensión de alimentación máxima de 26V, lo que le posibilita operar aún cuando el elemento de carga de la batería del vehículo se encuentre defectuoso. Adicionalmente, cuenta con protecciones internas en caso de que se conecte la batería del vehículo en forma inversa o que se supere la tensión de alimentación máxima que soporta el regulador.

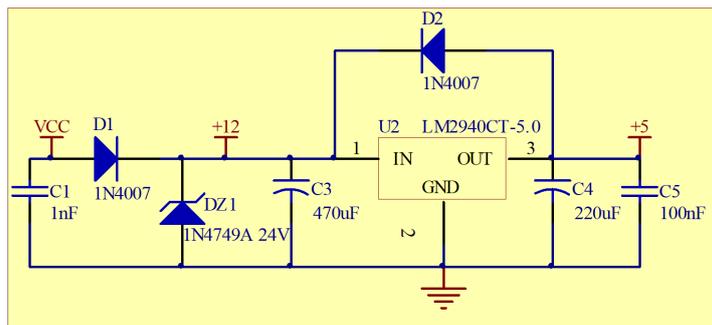


Figura 42: Circuito de alimentación

3.3.2 Entradas digitales:

Las entradas de señales digitales se realizan a través de un array de transistores encapsulados en el integrado "U3" ULN2003. En estas entradas se conectan los switches de freno, embrague, sensor de velocidad tipo hall y el pulsador que da inicio al control de velocidad crucero. Además cuenta con tres entradas adicionales de propósitos generales para futuras ampliaciones de la aplicación. A través de estos transistores se acondicionan las señales para que tengan los niveles de tensión que requieren las entradas del microcontrolador.

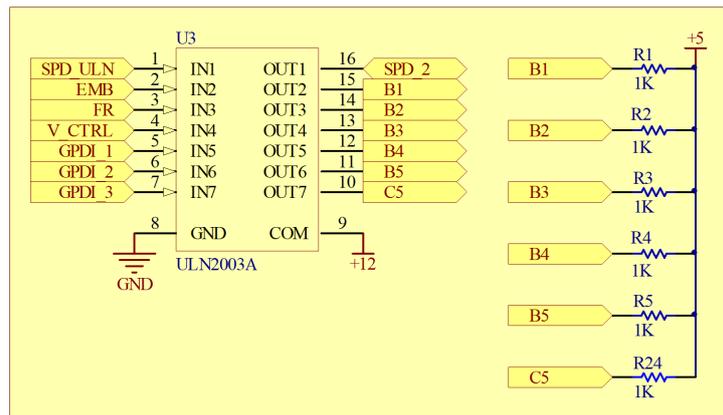


Figura 43: Circuito de entradas digitales

3.3.3 Entradas analógicas:

Las entradas de señales analógicas se realizan a través de una serie de filtros RC y diodos zener para proteger las entradas del microcontrolador. El filtrado de las señales es muy importante debido a que algunos de los componentes eléctricos del vehículo generan niveles de ruido que pueden afectar la lectura de los sensores analógicos. Los componentes con los que debemos tener mayor cuidado son:

- El alternador o elemento de carga: un incorrecto funcionamiento puede generar tanto ruido eléctrico como ruido magnético.
- El sistema de encendido: compuesto por bobinas, cables de bujías y bujías el sistema de encendido trabaja con tensiones de salida de varios miles de voltios aunque a baja corriente, pero si no se utilizan elementos adecuados para evitar la propagación del ruido estos pueden ser muy nocivos para cualquier circuito electrónico.
- Luces de xenón: si el vehículo cuenta con este tipo de luces, debemos tener cuidado ya que los transformadores y circuitos electrónicos que requiere este tipo de luminarias funcionan con alta tensión, siendo propensos a generar suficiente ruido eléctrico para provocar lecturas erróneas en las entradas analógicas.

Teniendo en cuenta las posibles fuentes de ruido mencionadas, al momento de instalar el equipo debemos procurar ubicar su cableado lo más alejado posible de dichos elementos para evitarnos errores de lectura de señales.

El sistema cuenta con 5 entradas analógicas, todas con rango de 0 a 5V. Dos de esas entradas son para las señales de los potenciómetros de la mariposa (TPS_1 y TPS_2). Otras dos señales son para los potenciómetros del pedal del acelerador (APS_1 y APS_2) y una quinta entrada queda libre de propósitos generales para futuras ampliaciones de la aplicación (GPANI).

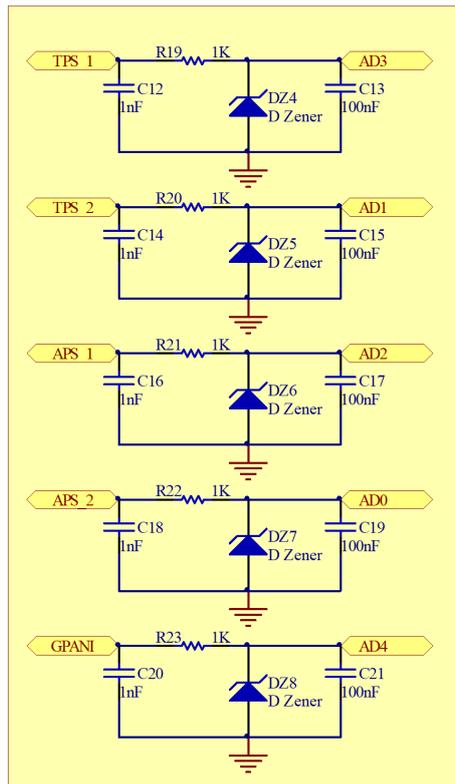


Figura 44: Circuito de entradas analógicas

3.3.4 Entrada de sensor magnético:

Para mayor versatilidad, el sistema cuenta con la posibilidad de una entrada de velocidad a través de un sensor de tipo magnético. El sensor funciona mediante la variación del campo magnético generada por el paso de los dientes de una rueda dentada acoplada a algún eje del vehículo que gire a una velocidad proporcional a la velocidad lineal de dicho vehículo. Los dientes que pasan delante del sensor, varían el entrehierro entre el engranaje y el sensor; el flujo disperso induce una tensión de corriente alterna cuya amplitud y frecuencia depende de las revoluciones.

El sensor consta de una carcasa tubular, en cuyo interior se monta un imán permanente y un bobinado de cobre, el flujo magnético creado por el imán sufre, debido al paso de los dientes de la rueda dentada, oscilaciones causadas por la variación del entrehierro. Tales oscilaciones inducen una fuerza electromotriz en el bobinado, en cuyos terminales hay una tensión alterna, positiva cuando el diente queda orientado hacia el sensor, y negativa cuando el sensor queda entre medio de los dientes. El valor de pico de la tensión de salida del sensor depende de la distancia entre el sensor y el diente.

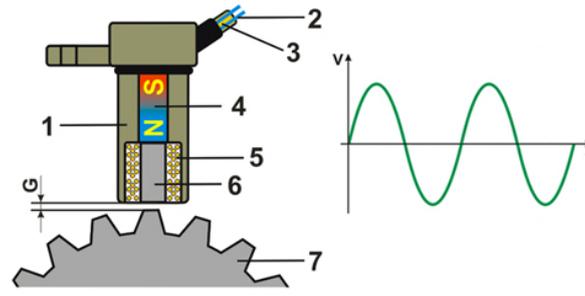


Figura 45: Sensor magnético

1. Cuerpo del sensor.
2. Cables de señal de salida.
3. Malla anti ruido.
4. Imán permanente.
5. Bobinado.
6. Perno.
7. Rueda dentada

Dado que esta señal no puede ser procesada directamente por el microcontrolador, debemos adaptarla a niveles adecuados para su correcta lectura. Esto se realiza a través de U4 (LM1815N) que es un circuito integrado que toma la señal del sensor magnético, detecta los cambios de polaridad en el mismo y produce una señal cuya frecuencia es igual a la del sensor magnético, sin provocar un corrimiento de fase, con la ventaja que permite lecturas a bajas frecuencias y bajos voltajes de salida del sensor. Éste integrado cuenta con una salida transistorizada de colector abierto tipo NPN y a través de una resistencia PULL UP a 5V logramos que el microcontrolador obtenga una señal adaptada a los niveles que puede procesar. Cabe aclarar que como en este caso no se utilizó un sensor magnético para registrar la velocidad, el circuito no fue implementado.

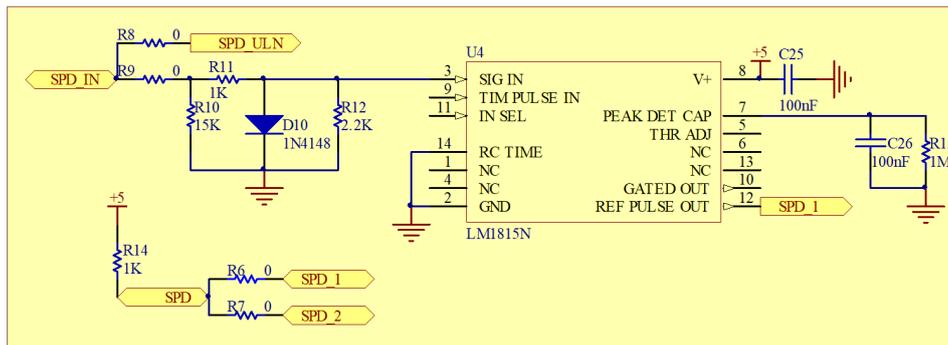


Figura 46: Circuito adaptador de sensor magnético

3.3.5 Microcontrolador:

El microcontrolador (U1) es el responsable de tomar las señales de los sensores, procesarla y controlar el ángulo de apertura de la mariposa. El microcontrolador utilizado es un PIC16F886 de Microchip. Está configurado para una velocidad del bus principal de 20 MHz a través de un cristal externo de ésta frecuencia. Cuenta con una memoria flash de 8192 words, 256 bytes de memoria EEPROM, 11 conversores A/D de 10 bits, 2 temporizadores de 8 bits y 1 temporizador de 16 bits, 24 entradas/salidas configurables, 2

salidas PWM. Además cuenta con un puerto de comunicaciones USART que en esta aplicación es utilizado para monitorear datos y configurar algunos parámetros desde un software en una PC y comunicación ICSP (In Circuit Serial Programming) que permite la programación del microcontrolador sin la necesidad de removerlo de la placa.

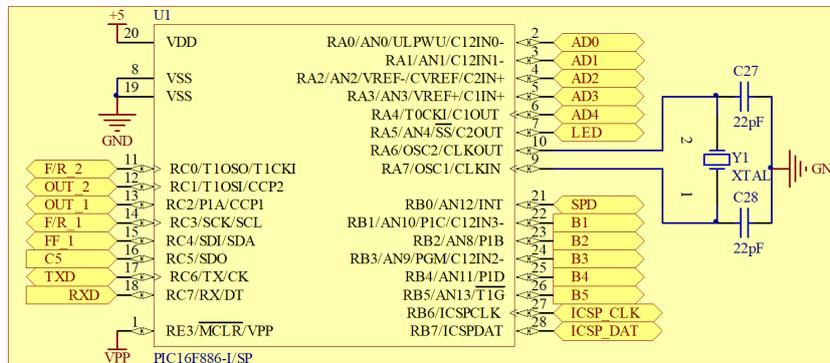


Figura 47: Circuito del microcontrolador

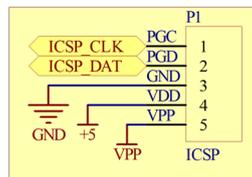


Figura 48: Circuito del ICSP

3.3.6 Puerto serie:

El puerto serie se utiliza para que el sistema envíe datos de la posición de todos los sensores, de la velocidad del vehículo y otras variables de estado, como por ejemplo, si está presionado el freno, el embrague, si está en modo de control de velocidad cruceo, etc. y también para recibir datos enviados por el software de configuración, como por ejemplo, los valores de las constantes de los controladores PID.

Para adaptar los niveles de tensión de RS232 a TTL se utilizó el circuito integrado MAX232 que junto a algunos capacitores logran adaptar los niveles de tensión para el correcto funcionamiento.

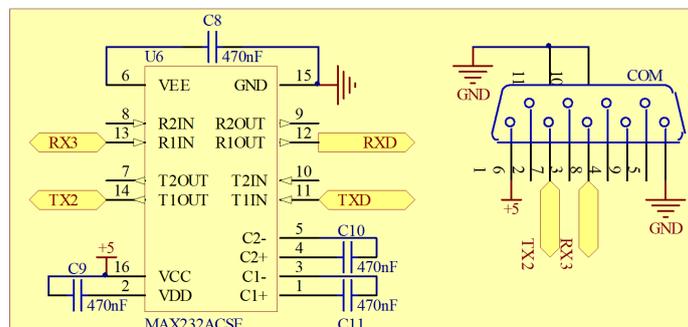


Figura 49: Circuito adaptador RS232 - TTL

3.3.7 Controlador de salida:

El objetivo final del sistema es controlar en todo momento el ángulo de apertura de la mariposa que permite la entrada de aire al motor. Ya sea en modo normal o en modo de control de velocidad crucero, el sistema debe controlar todo el tiempo éste ángulo de apertura. Para controlar la apertura de la mariposa, ésta tiene solidaria a su eje un motor de corriente continua y un muelle que lo regresa a su posición de reposo. Para vencer la fuerza del resorte, al motor se le debe inyectar una corriente proporcional al ángulo de apertura que necesitemos en la mariposa. Para esto disponemos del circuito integrado L298N (U5). Se trata de un driver en puente H doble, de alta tensión, alta corriente, diseñado para ser controlado por señales TTL y controlar cargas inductivas tales como relés, solenoides, motores de corriente continua y motores paso a paso. Cuenta con dos entradas para habilitar o deshabilitar el dispositivo independientemente de las señales de entrada, y dos pines más para seleccionar el sentido de circulación de la corriente y pines para indicar la marcha. Los emisores de los transistores inferiores de cada puente están conectados entre sí y el terminal externo correspondiente puede utilizarse para la conexión de una resistencia de sensado de corriente externa. Se proporciona una entrada de alimentación adicional para que la lógica funcione a un voltaje más bajo.

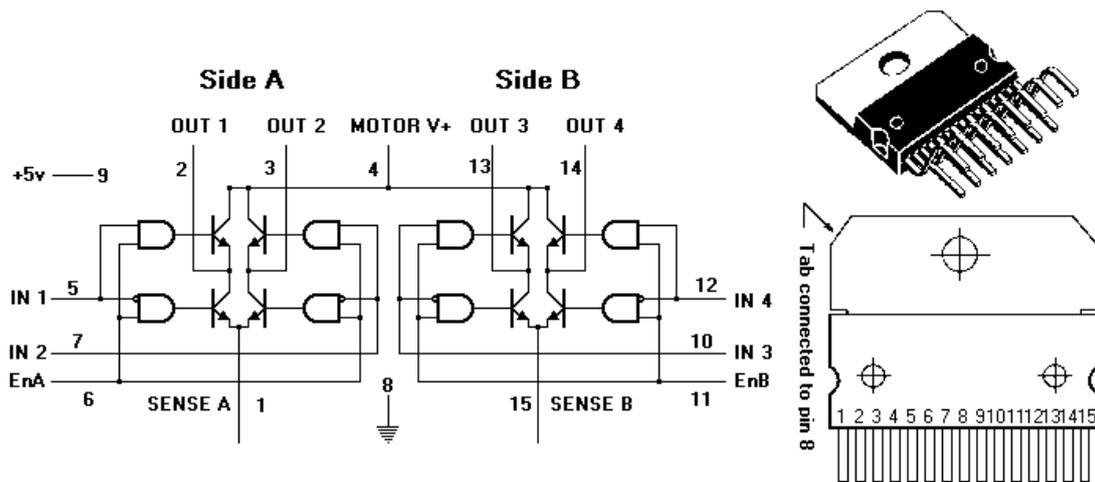


Figura 50: Diagrama en bloques del driver L298

En esta aplicación, el microcontrolador maneja U5 a través de dos señales, la que llega al pin EnA de U5 es una señal PWM que controla la corriente que circula por el motor de corriente continua. Luego la señal IN1 e IN2 controlan el sentido de giro del motor ya que el punto de reposo de la mariposa no es el punto de mínima apertura. Las señales IN1 e IN2 siempre deben ser contrarias para evitar un mal funcionamiento de U5, esto se logra a través de un transistor que invierte dicha señal. Si bien el driver L298 está diseñado para controlar hasta dos motores de corriente continua, en esta aplicación solo se utiliza un solo canal del driver pero se dejan conectadas todas las señales del segundo canal para futuras ampliaciones de la aplicación.

Finalmente, el motor se conecta entre los bornes OUT1 y OUT2 del driver. En estos bornes de salida se adicionan diodos para proteger los transistores internos de picos generados por los circuitos inductivos.

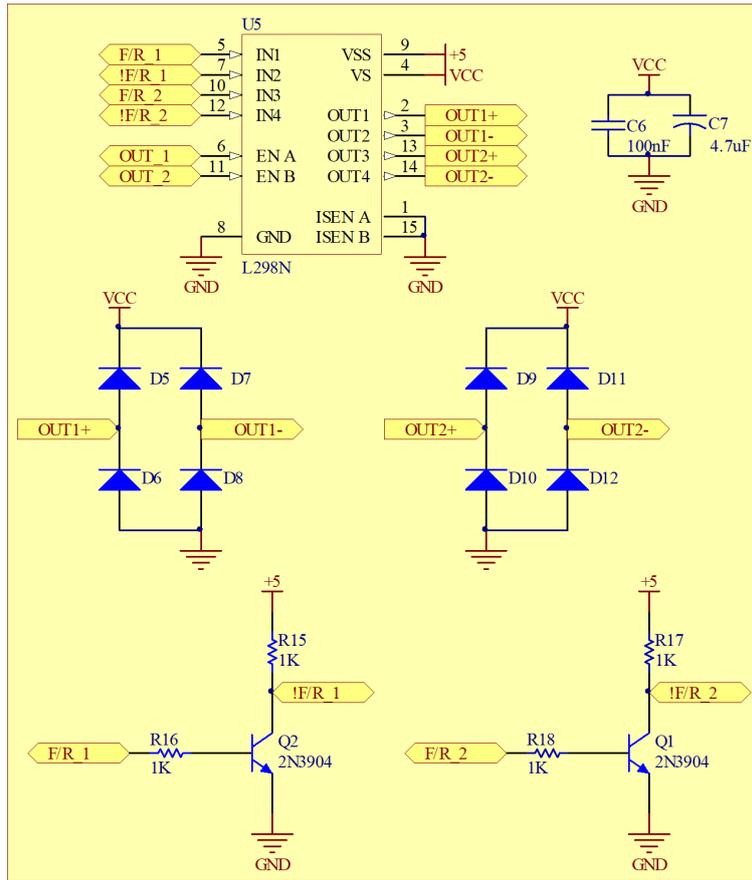


Figura 51: Circuito del driver del motor

3.3.8 Led modo de operación:

El sistema cuenta con un diodo LED que indica si está operando en modo normal o en modo velocidad crucero. Cuando está apagado el sistema está en modo normal y cuando esta destellando está en modo velocidad crucero. A este les lo controla directamente el microcontrolador y se debe ubicar en un lugar visible para el conductor del vehículo.

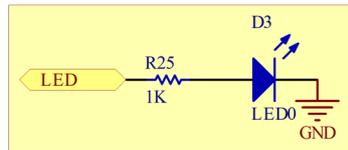


Figura 52: Led modo operación

3.4 Firmware

3.4.1 Funcionamiento general:

El firmware del microcontrolador está programado en lenguaje C con el compilador *PIC C Compiler*. El mismo está dividido en 3 etapas:

- Modo configuración.
- Modo libre.
- Modo velocidad crucero.

En el *modo configuración* se tratan de establecer los parámetros del sistema, tales como posiciones mínimas y máximas de los dos potenciómetros del pedal de acelerador, los máximos y mínimos de los dos potenciómetros del cuerpo de la mariposa, ciclo útil mínimo para que producir un movimiento del cuerpo de mariposa y ciclo útil de reposo que es el ciclo útil necesario para que la mariposa no se cierre por efecto del resorte asociado a esta.

El modo libre es cuando la posición de la mariposa del acelerador es directamente proporcional a la posición del acelerador. En este caso se calcula la posición del pedal, se envía esa información al PID que controla la posición de la mariposa y este se encarga de mantener la mariposa del acelerador en el valor fijado por la posición del pedal.

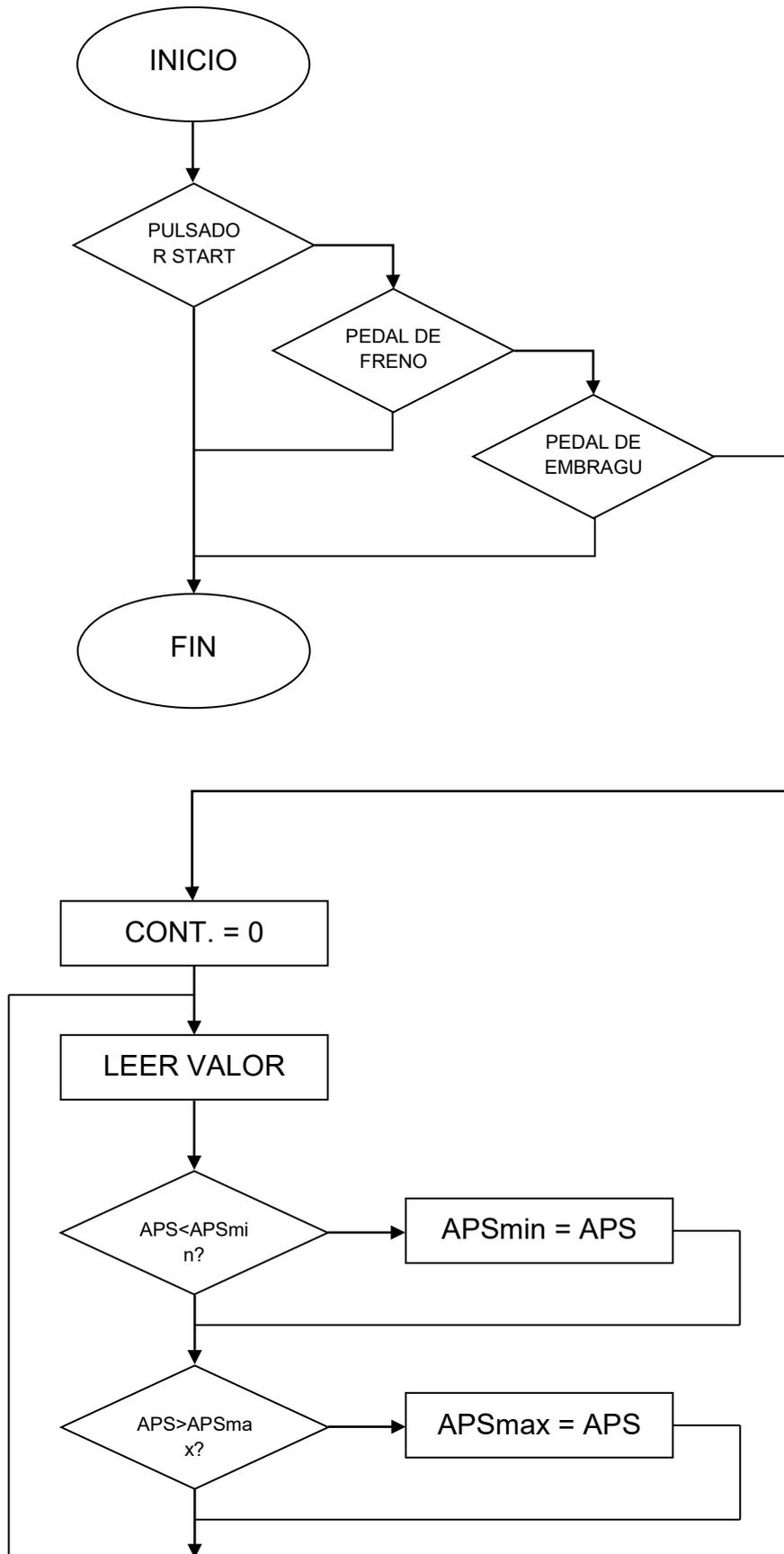
En el *modo velocidad crucero* la posición del pedal de acelerador no es tenida en cuenta. Al momento de iniciar este modo de operación se toma como set point el valor de velocidad actual del vehículo, este valor se envía a un PID que trata de mantener el valor seteado estable y cuya salida se envía al PID que controla la posición de la mariposa del acelerador. Cuando la velocidad varía fuera del valor seteado, el PID que trata de mantener la velocidad del vehículo estable variará el set point del PID que controla la mariposa del acelerador para compensar dicha variación. A su vez, si se presionan los pedales de embrague o freno el modo velocidad crucero se desactivará automáticamente y se volverá al modo libre. Adicionalmente, si el PID de velocidad está mucho tiempo tratando de compensar una desaceleración del vehículo, este modo se desactivará para que el usuario corrija si es que debe cambiar de marcha o hay alguna anomalía en el sistema.

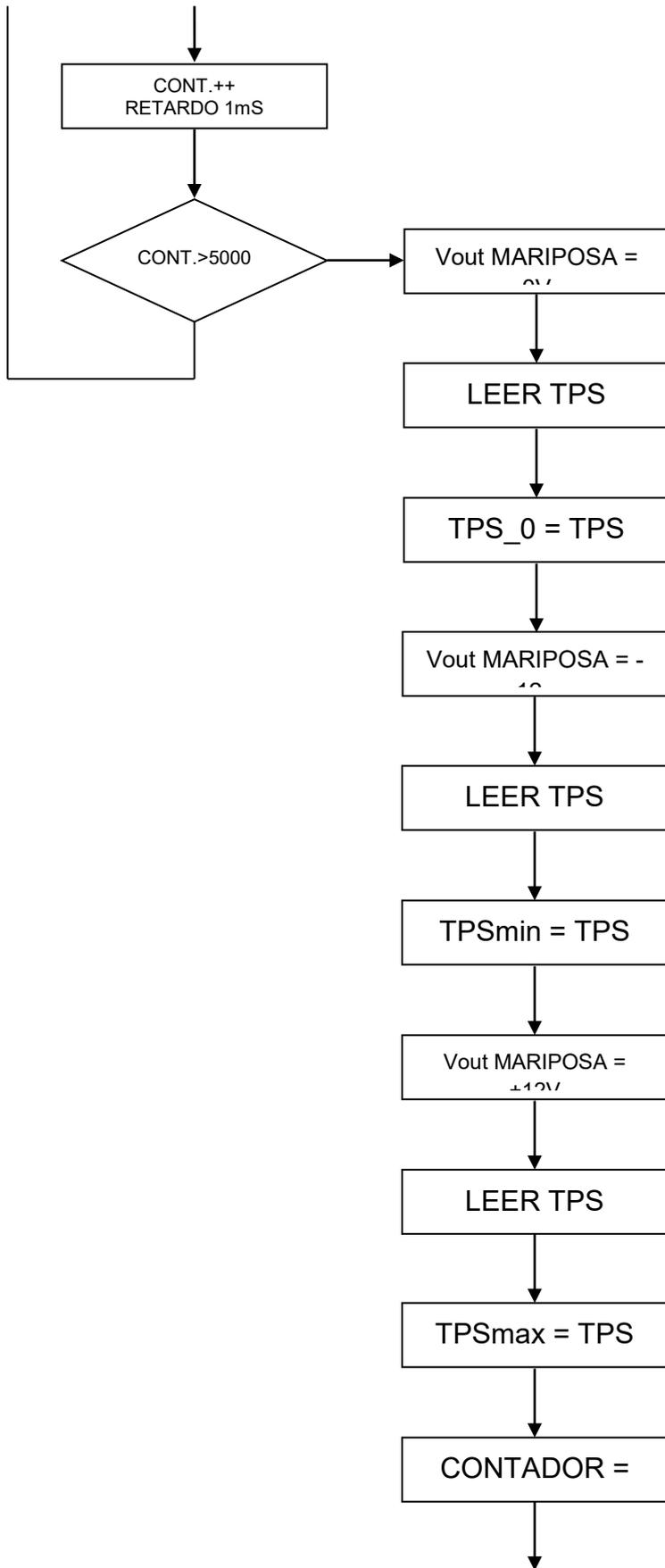
3.4.2 Modo configuración:

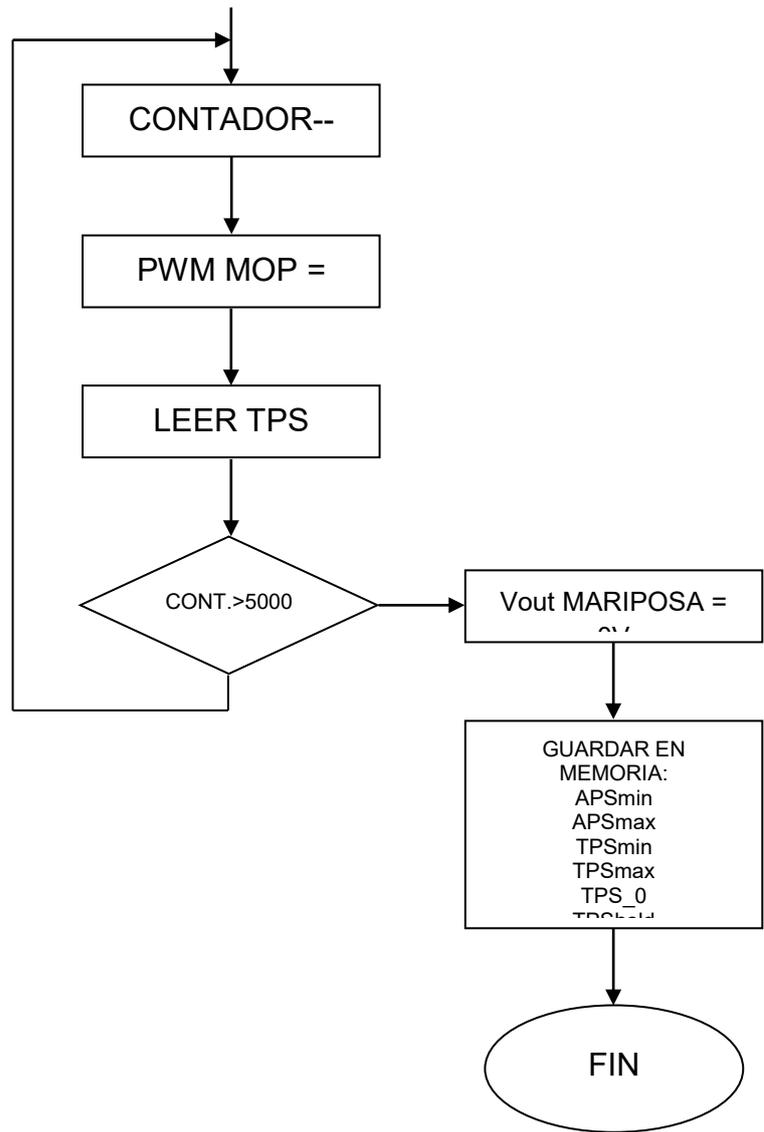
Esta rutina del programa establece cuales serán los límites de las posiciones de los sensores y los actuadores. Esta configuración solo se debería efectuar la primera vez que se utiliza el equipo al momento de instalarlo. Para ingresar a esta rutina el usuario o quien quiera configurar el sistema debe alimentar el equipo teniendo presionados el embrague, el freno y el switch de modo velocidad crucero al mismo tiempo sin darle marcha al vehículo. Cuando esto ocurre el sistema espera unos segundos para que el usuario presione el acelerador al máximo y luego lo deje volver al mínimo para establecer el rango de trabajo del mismo. Posteriormente sin aplicar tensión alguna al motor de la mariposa del acelerador detecta cuales son los valores de reposo de los potenciómetros de la mariposa. Luego aplica una tensión negativa al motor de la mariposa del acelerador para detectar el punto mínimo de apertura de la misma y luego aplica una tensión positiva

para detectar el punto de apertura máximo. Finalmente aplica un pulso PWM con 100% de ciclo útil a la mariposa para que esta se abra al máximo y luego decreuenta el ciclo útil hasta detectar que la mariposa comienza a cerrarse. Hecho esto, establece el valor de PWM necesario para que la mariposa permanezca abierta pero en reposo, luego un valor de PWM un 25% por encima del valor de reposo para establecer el valor necesario para producir la apertura de la mariposa pero que la apertura no sea brusca y por último se establece un valor de PWM un 15% por debajo del valor de reposo que será el valor necesario para que la mariposa se cierre pero no de manera brusca.

En el siguiente diagrama de flujo muestra la lógica de funcionamiento de este modo.





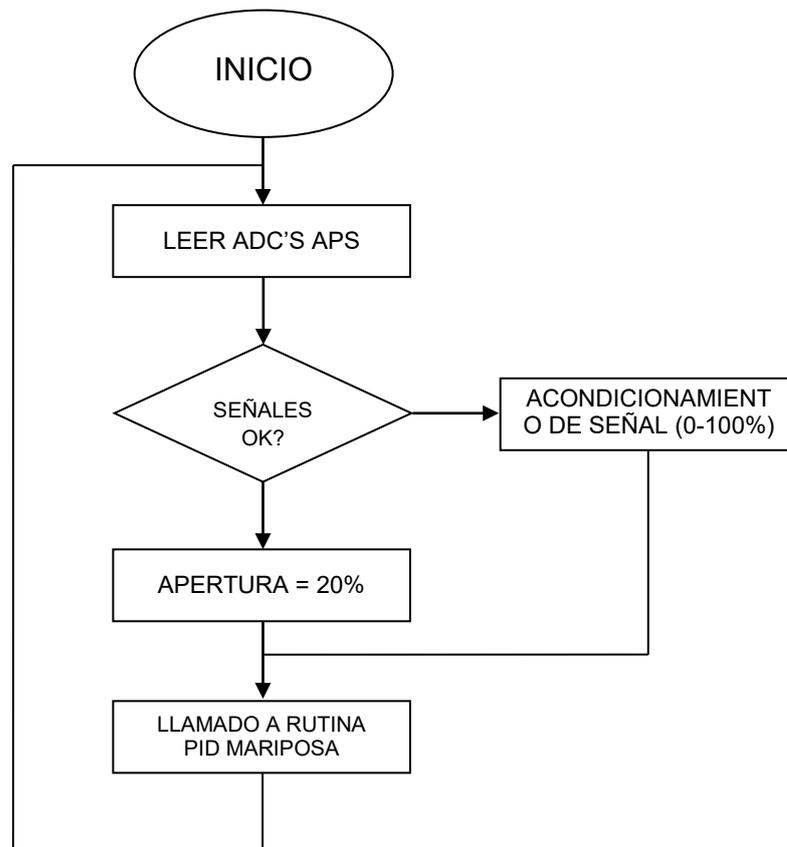


3.4.3 Modo libre:

Esta rutina del programa toma los valores de la posición del pedal de acelerador y los envía al PID que controla la posición de la mariposa. La respuesta esperada es que el porcentaje de apertura de la mariposa sea igual al porcentaje de presión que se ejerce sobre el acelerador. Antes de enviar los datos, éstos se acondicionan de acuerdo a los máximos y mínimos detectados en la etapa de configuración, enviando un valor de 0 a 100 al controlador de acuerdo al valor deseado de apertura de la mariposa. En posteriores mejoras del sistema se puede proporcionar una curva no lineal (logarítmica, por ejemplo) entre la presión sobre el pedal y la apertura de la mariposa, para obtener diferentes modos de conducción (normal, deportiva, económica, etc.).

Como medida de seguridad el pedal del acelerador dispone de dos potenciómetros para detectar posibles fallas en alguno de ellos. Si una falla ocurre, se enciende el LED de falla y se envía una señal al cuerpo de mariposa para que produzca una apertura del 20% para que el conductor pueda circular hasta un punto seguro y revisar el problema.

En el siguiente diagrama de flujo se muestra la lógica de funcionamiento de este modo.



3.4.4 Modo velocidad crucero:

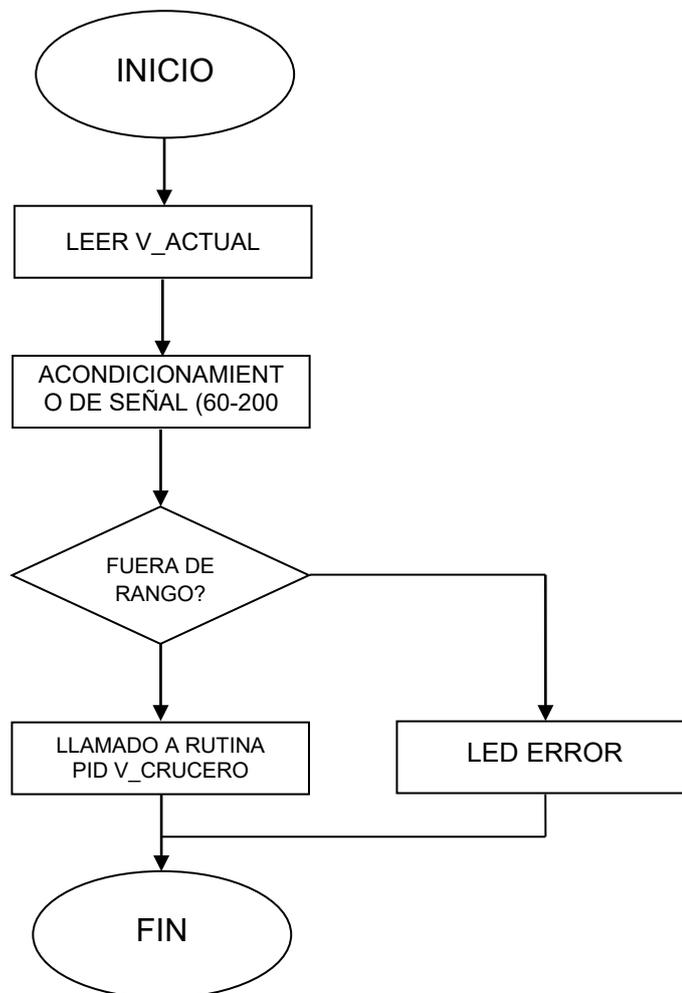
Esta rutina del programa toma el valor de velocidad actual del vehículo al momento de iniciar este modo de funcionamiento y trata de mantenerlo estable mientras este modo siga activo. Para esto ignora el valor de la posición del pedal del acelerador y lo reemplaza por una variable interna que aumenta o disminuye de acuerdo a la velocidad

del vehículo. Para esto ejecuta un controlador PID que trata de mantener estable la velocidad y envía datos al controlador PID de la mariposa del acelerador para que esta abra o cierre de acuerdo a la velocidad.

Adicionalmente, se incorporó una rutina de control que hace que el controlador salga de este modo de trabajo si la mariposa está abierta en su totalidad y la velocidad deseada no ha sido alcanzada pasado cierto tiempo. En este caso activa una alarma y vuelve al modo normal, ya que esta situación advierte un funcionamiento anómalo del vehículo. Lo mismo ocurre si estando en este modo la velocidad desciende de 60 KM/H.

Otra medida de seguridad implementada está en la desactivación de este modo de trabajo al detectar que se presionó el pedal del freno, el embrague o que la caja de velocidades está en punto muerto; la finalidad es evitar daños al motor o causar un accidente de tránsito debido a un posible mal funcionamiento del vehículo.

En el siguiente diagrama de flujo se muestra la lógica de funcionamiento de este modo.



3.4.5 PID control mariposa:

Esta rutina del programa recibe un valor deseado de apertura de la mariposa del acelerador y un controlador PID proporciona la corriente necesaria para que el motor asociado al eje de la mariposa produzca el ángulo de apertura deseado.

Este PID tiene en cuenta los valores obtenidos en el modo configuración, con los cuales establece los porcentajes deseados y reales. Las constantes del PID se graban previamente mediante un software externo que permite el ingreso manual de los valores calculados previamente.

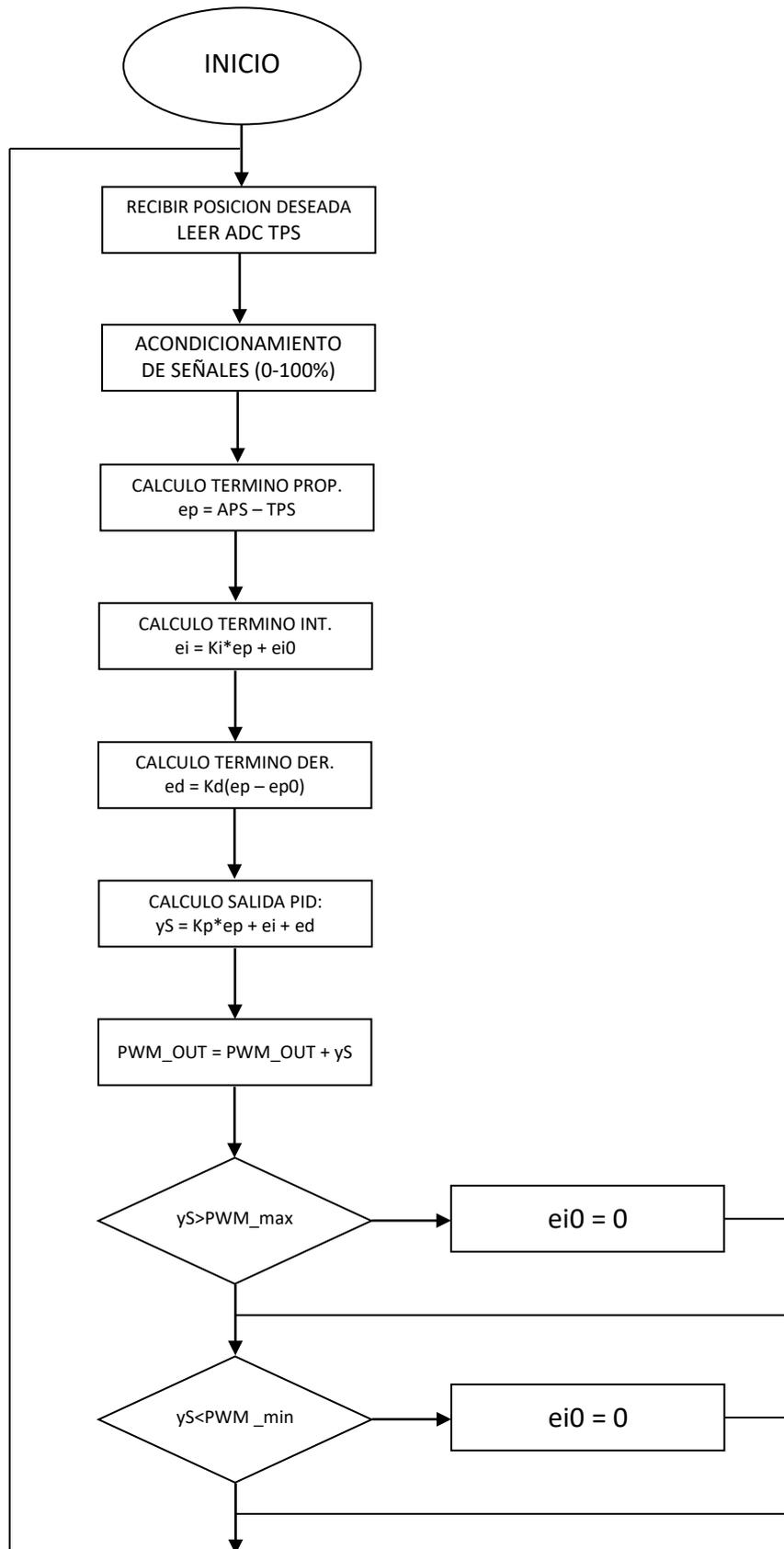
Como medida de seguridad, el cuerpo de mariposa cuenta con dos potenciómetros para chequear el correcto funcionamiento del mismo. En el caso de detectar una anomalía, no se envía ninguna señal al motor del cuerpo de la mariposa y ésta queda posicionada en su punto de reposo, produciendo una aceleración moderada del motor del vehículo que le permite al usuario circular a un espacio seguro y revisar el problema.

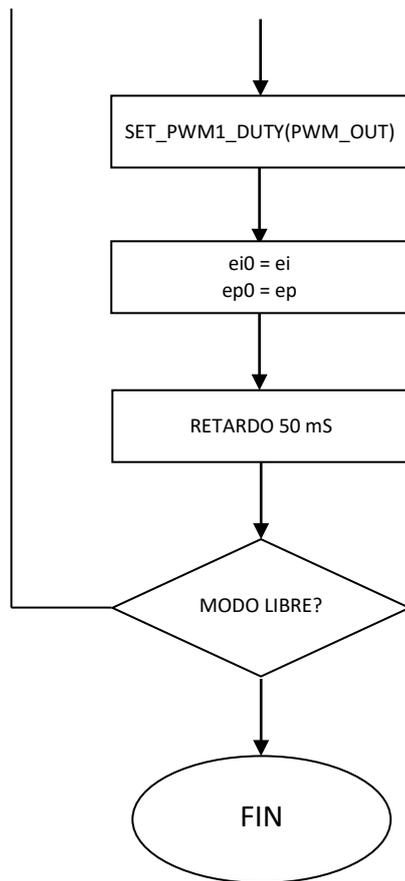
Adicionalmente, el PID cuenta con una rutina que evita el “efecto windup”, impidiendo que los valores del controlador integral aumenten la cuenta si la salida ha llegado a alguno de los límites permitidos. Si esto ocurre, pone en cero el valor acumulado de la componente integral y prosigue la operación normalmente.

El período de muestreo de los sensores se estableció en 50 mS como punto de partida para el cálculo de las constantes del PID y luego no fue modificado ya que con este valor y las constantes calculadas el sistema funciona correctamente, aunque la posibilidad de controlar el período de muestreo podría agregarse en futuras ampliaciones del proyecto.

El valor de apertura de la mariposa puede ser enviado desde el pedal del acelerador o del PID que controla la velocidad cruceo del vehículo, dependiendo del modo de trabajo que se esté ejecutando.

En el siguiente diagrama de flujo muestra la lógica de funcionamiento de este modo. A modo de simplificar el diagrama de flujo se omiten las rutinas de acondicionamiento de señales.





3.4.6 PID control velocidad crucero:

Esta rutina del programa toma el valor de velocidad deseada y ejecuta un controlador PID que intenta mantener estable dicha velocidad, compensando posibles cambios de pendientes del camino, cambios en las direcciones del viento y cualquier otro factor que pueda provocar una variación de velocidad del vehículo.

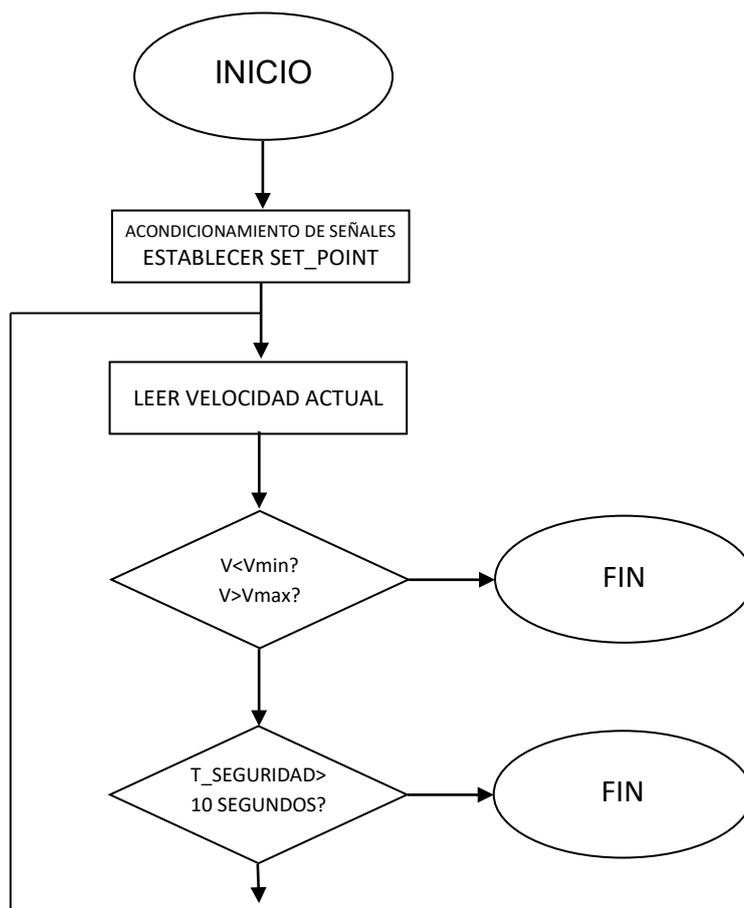
Este PID tiene en cuenta los valores obtenidos en el modo configuración, con los cuales establece las velocidades deseadas y reales. Las constantes del PID se graban previamente mediante un software externo que permite el ingreso manual de los valores calculados previamente.

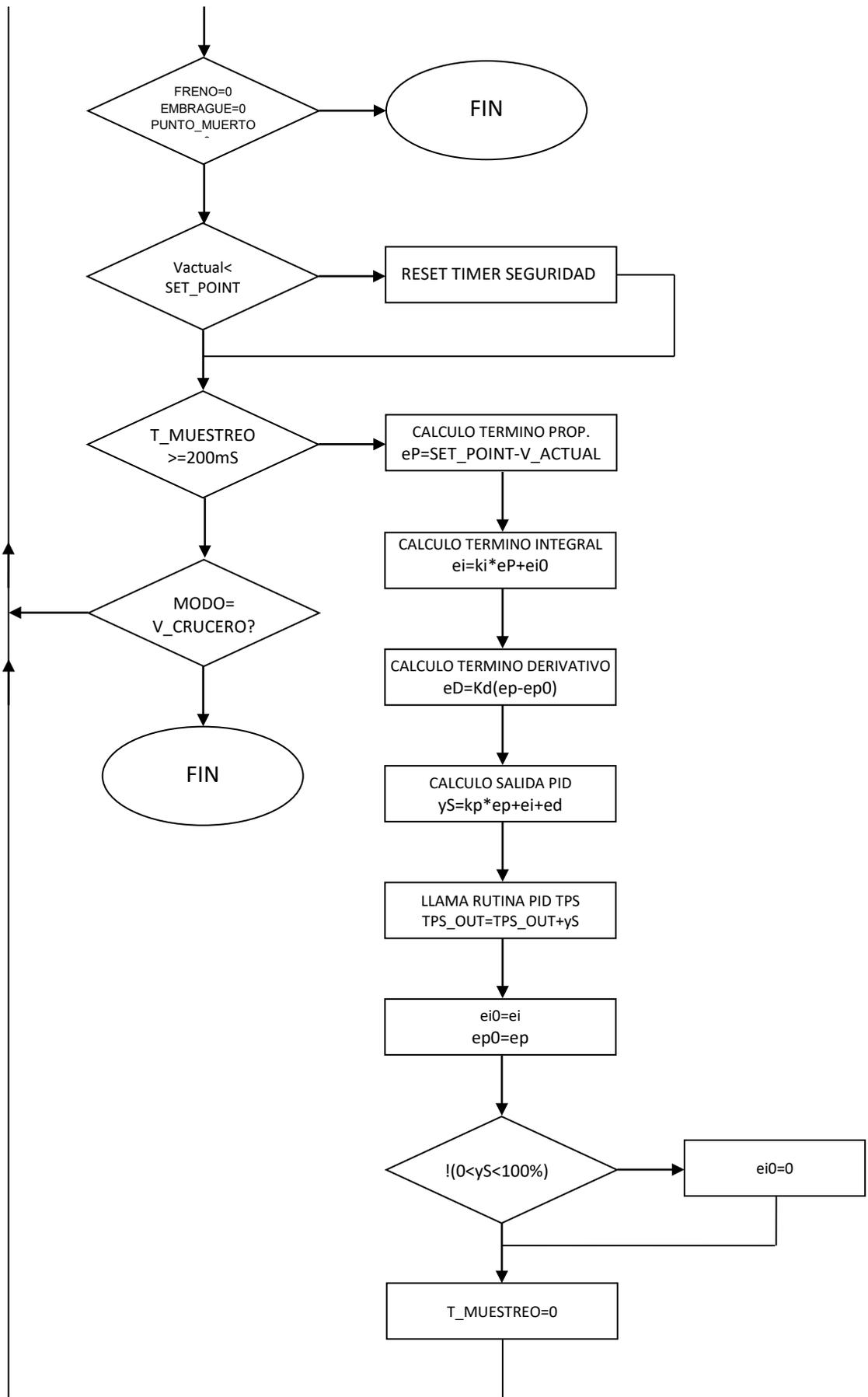
Como medida de seguridad, el programa cuenta con una rutina que detecta si el cuerpo de mariposa está abierto en su totalidad y la velocidad del vehículo no llega al valor deseado pasado cierto tiempo preestablecido. En este caso, da aviso al conductor y sale de este modo pasando a operar en modo normal.

Asimismo, la rutina cuenta con un chequeo constante de los pedales de freno y embrague y del punto muerto de la caja de velocidades. En caso de activarse alguna de estas señales el programa pasa a modo normal hasta volver a activar este modo nuevamente.

El período de muestreo de los sensores se estableció en 200 mS como punto de partida para el cálculo de las constantes del PID y luego no fue modificado ya que con este valor y las constantes calculadas el sistema funciona correctamente, aunque la posibilidad de controlar el período de muestreo podría agregarse en futuras ampliaciones del proyecto.

En el siguiente diagrama de flujo muestra la lógica de funcionamiento de este modo. A modo de simplificar el diagrama de flujo se omiten las rutinas de acondicionamiento de señales.





3.4.7 Salida de datos RS232:

El controlador cuenta con una rutina que envía un array de datos al iniciar por única vez antes de ejecutar cualquier otra rutina. Estos son datos de configuración del sistema y están ordenados según la siguiente tabla:

Variable	Función
TPS_MIN	Valor mínimo de la posición del pedal de acelerador
TPS_MAX	Valor máximo de la posición del pedal de acelerador
APS_MIN_1	Valor mínimo de posición del cuerpo de mariposa, primer sensor
APS_MIN_2	Valor mínimo de posición del cuerpo de mariposa, segundo sensor
APS_MAX_1	Valor máximo de posición del cuerpo de mariposa, primer sensor
APS_MAX_2	Valor máximo de posición del cuerpo de mariposa, segundo sensor
KP_VEL	Constante proporcional del PID de control de velocidad crucero
KI_VEL	Constante integral del PID de control de velocidad crucero
KD_VEL	Constante derivativa del PID de control de velocidad crucero
KP_APS	Constante proporcional del PID de control de la posición del cuerpo de mariposa
KI_APS	Constante integral del PID de control de la posición del cuerpo de mariposa
KD_APS	Constante derivativa del PID de control de la posición del cuerpo de mariposa
\r\n	Salto de línea y vuelta al inicio

Tabla 8: constantes salida RS232

Luego, el controlador comienza a enviar datos de las variables del sistema a intervalos de 10 mS los cuales sirven para que el software de configuración los analice y se puedan calcular los valores adecuados de las constantes de los PID. Además sirven para diagnosticar si hay alguna falla en un sensor. Los datos salen en un array según la siguiente tabla:

Variable	Función
TPS_ACT	Valor actual de la posición del pedal de acelerador
APS_ACT_1	Valor actual de la posición del cuerpo de mariposa, primer sensor
APS_ACT_2	Valor actual de la posición del cuerpo de mariposa, segundo sensor
VEL_ACT	Velocidad actual del vehículo
PW_APS	Valor de PWM de salida del PID de control del cuerpo de mariposa
OUT_TPS	Valor de salida del PID de control de velocidad crucero
\r\n	Salto de línea y vuelta al inicio

Tabla 9: variables salida RS232

3.4.8 Entrada de datos RS232:

El controlador permite cambiar los valores de las constantes de ambos PID. Para esto cuenta con una interrupción que lee el puerto serie cuando llega algún dato. Al momento de la llegada de datos, el controlador los ordena en un array y luego cambia los parámetros de ambos PID y los graba en la memoria EPROM del controlador. A continuación se muestra una tabla con el orden de los datos que espera el controlador:

Variable	Función
KP_VEL	Constante proporcional del PID de control de velocidad crucero
KI_VEL	Constante integral del PID de control de velocidad crucero
KD_VEL	Constante derivativa del PID de control de velocidad crucero
KP_APS	Constante proporcional del PID de control de la posición del cuerpo de mariposa
KI_APS	Constante integral del PID de control de la posición del cuerpo de mariposa
KD_APS	Constante derivativa del PID de control de la posición del cuerpo de mariposa

Tabla 10: constantes entrada RS232

3.5 Software de configuración

3.5.1 Funcionamiento general:

El software de configuración tiene dos objetivos. El primero es de enviarle al controlador los parámetros de los PID para su correcto funcionamiento. El segundo es recibir los datos de las variables de estado que envía el controlador y almacenarlas en un archivo para luego ser analizados.

Con el fin de facilitar el manejo para el usuario, el software se presenta en una única pantalla que permite ejecutar todas las funciones, tanto de envío como de recepción de datos. Además, muestra los datos de los valores mínimos y máximos de las posiciones de los potenciómetros tanto del pedal como del cuerpo de mariposa, siempre y cuando se establezca la conexión antes de encender el controlador. Esta es una futura corrección para próximas versiones.

A continuación, se muestra la pantalla de manejo del software:



Figura 53: Software de configuración

Debido a la simplicidad del software, éste ha sido desarrollado en Visual Basic 6, el cual cuenta con los componentes correspondientes para ejecutar todas las funciones necesarias de cada rutina.

3.5.2 Configuración del puerto:

Esta rutina permite configurar las variables más importantes del puerto: el puerto disponible en la PC y la velocidad de transmisión, aunque ésta última por el momento se mantiene fija en 9600 baudios ya que el controlador está programado en esta velocidad, pero en futuras ampliaciones podría ser cambiada. Los demás parámetros de transmisión (paridad, bit de datos, bit de parada, etc) están ocultos para el usuario.

En caso de no disponer de un puerto serie en la computadora, puede ser instalado un adaptador USB serie el cual se encuentra disponible en cualquier tienda de informática y su costo es relativamente bajo.

Para iniciar el envío o recepción de datos se debe presionar el botón “ABRIR PUERTO”. Si el mismo está ocupado o no disponible aparecerá un mensaje al usuario informando la situación. Mientras no se presione este pulsador, el resto de las funciones del programa permanecerán deshabilitadas. Al finalizar las tareas se debe presionar el botón “CERRAR PUERTO” para dejar disponible el puerto.

3.5.3 Envío de datos:

Mediante la instrucción SerialPort1.Write() se ejecuta la rutina encargada de enviar los datos de parametrización de los PID que controlan la posición del cuerpo de mariposa y la velocidad crucero del vehículo.

Los valores se toman de los 6 “TextBox” donde el usuario introduce cada una de las constantes en los espacios disponible y luego presionar el “CommandButton” “ENVIAR DATOS”. Inmediatamente se envían los datos y el controlador toma los valores y los pone en ejecución.

Cuando se inicia el controlador, este envía los valores de los parámetros del PID para que el software los tenga disponibles y puedan ser visualizados en el programa.

3.5.4 Recepción de datos:

En esta rutina se reciben los array de datos enviados por el controlador y se guardan en un archivo de texto. Los datos están separados por tabuladores y saltos de líneas para que luego sean procesados como planilla de cálculo. Para futuras actualizaciones del software, se escribirá el archivo directamente en formato de planilla de cálculos para facilitar el procesamiento de los mismos.

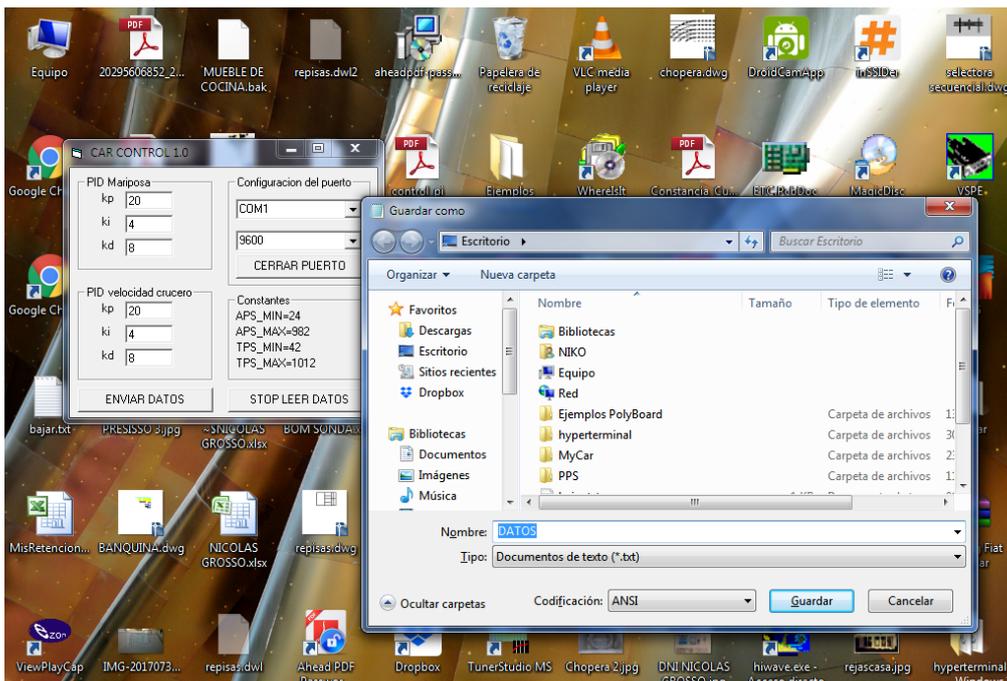


Figura 54: Guardado de variables

3.6 Cálculo de parámetros de los controladores PID

3.6.1 Parámetros del PID de posición de mariposa:

Para el cálculo de los parámetros del controlador PID de control de mariposa se utilizó el método Ziegler – Nichols en lazo cerrado, explicado en la página 32. Para esto se ajustaron los parámetros del modo integral y derivativo en cero y se le introdujo un set point constante. Luego se fue ajustando el parámetro proporcional hasta obtener una respuesta oscilatoria de amplitud constante que no sobrepase los límites mecánicos de la mariposa. Con el fin de simplificar los cálculos, solo se toman los valores incrementales de los potenciómetros del pedal de acelerador y del cuerpo de mariposa.

Estableciendo una constante proporcional de 28 y las integrales y derivativas en cero, se introduce una consigna constante de entrada y el resultado fue el siguiente:

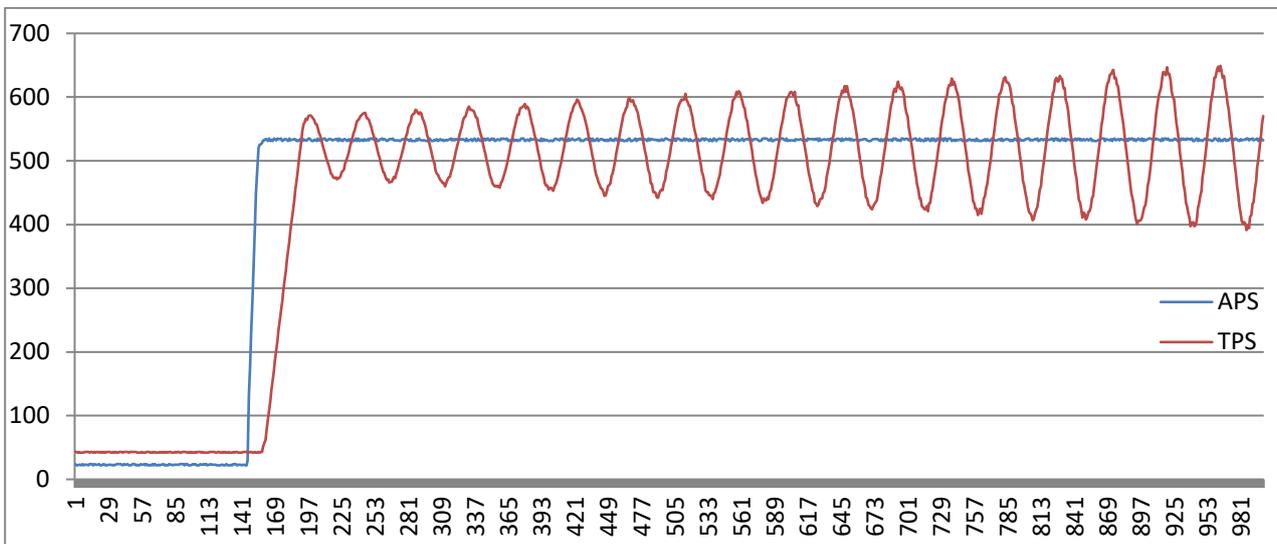


Figura 55: PID cuerpo de mariposa. Respuesta de sintonización con $k_p=23$

Como se puede ver en el gráfico, el movimiento se torno oscilatorio en aumento en torno al set point del sensor en el pedal del acelerador. Por lo tanto se procedió a bajar el valor de la constante proporcional hasta obtener un valor oscilante dentro de un rango acotado con $k_p=19$. El resultado obtenido fue el siguiente:

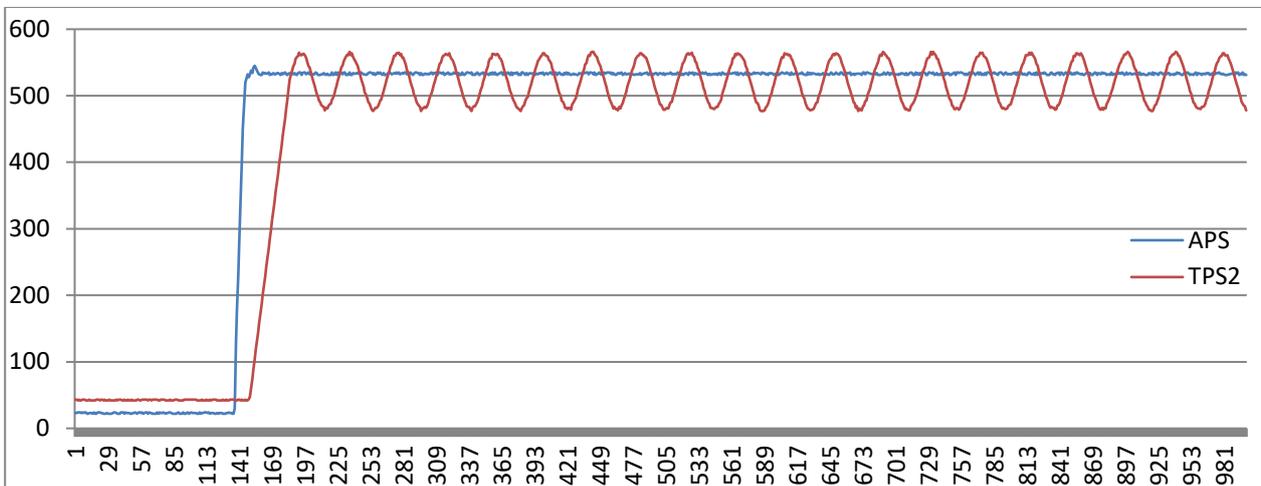


Figura 56: PID cuerpo de mariposa. Respuesta de sintonización con $k_p=19$

Estos valores permitieron el cálculo de los parámetros aplicando el método Ziegler – Nichols en lazo cerrado con $K_u=18$ y $T_u=0.4$ segundos (el período entre muestras es de 10mS) obteniendo:

	Kp	Ki	Kd
P	9		
PI	8.1	24.3	
PID	10.6	53.1	0.53

Tabla 11: Valores del controlador del cuerpo de mariposa

Con estos valores, se probó el controlador PID y se obtuvo la siguiente respuesta:

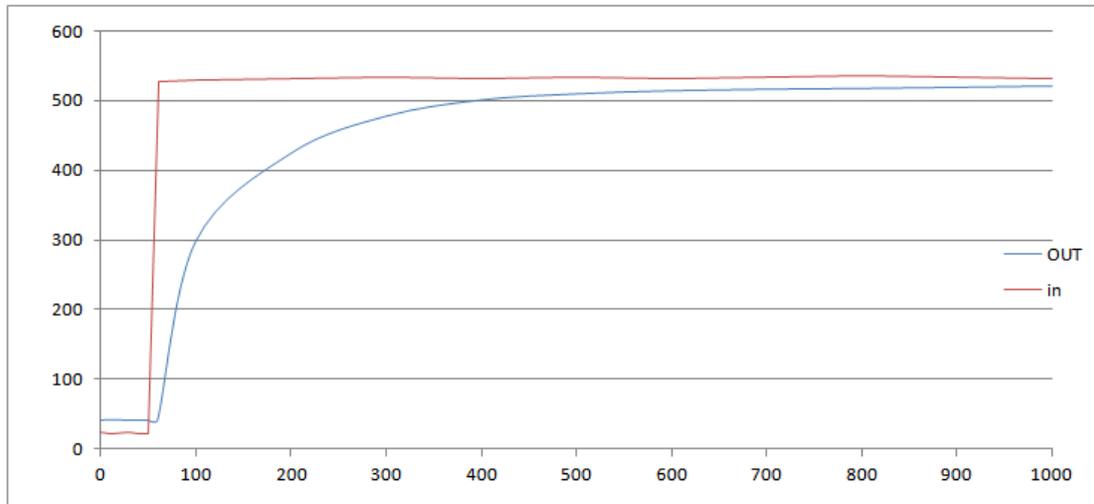


Figura 57: PID cuerpo de mariposa. Respuesta a valores calculados

Al tener un tiempo de muestreo de 10 [ms] podemos apreciar que el controlador tarda unos 4 segundos en llegar al valor deseado, el cual es muy lento para el uso requerido. Por lo tanto se procedió a ajustar los valores del PID para obtener la respuesta buscada. En primer lugar, se eliminó la componente derivativa, ya que tornaba muy inestable el sistema. Luego se incrementó la componente proporcional y se fueron haciendo pruebas hasta obtener el siguiente gráfico:

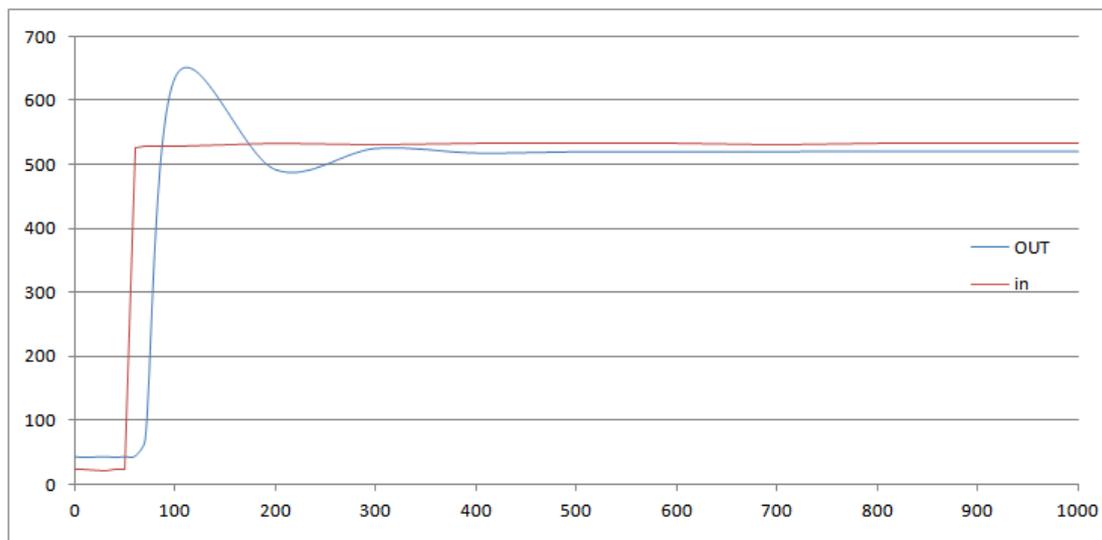


Figura 58: Respuesta al controlador PI ajustado

Como podemos ver en el gráfico, la respuesta es del tipo sub amortiguada y alcanza el valor deseado de posición de mariposa antes de los 100 [ms] y se pasa un poco del valor hasta estabilizarse en el punto requerido, lo cual fue algo buscado intencionalmente para tener una reacción del vehículo más rápida al acelerar bruscamente. Habitualmente en los autos de serie, cuando aceleramos de forma repentina obtenemos una respuesta bastante lenta del motor, lo cual puede resultar un poco molesto para el conductor. Por supuesto que esto lo programan los fabricantes para lograr una mayor eficiencia en el consumo del combustible pero no es lo que se buscó en este caso ya que esta aplicación está pensada para vehículos de competición.

Finalmente, los valores utilizados en el controlador fueron los siguientes:

	Kp	Ki	Kd
PID	18	22	0

Tabla 12: Valores finales del PID del cuerpo de mariposa

Estos valores del PID se pueden utilizar exclusivamente en el modelo de cuerpo de mariposa con el que se trabajó. En caso de utilizar otro modelo se deberán repetir los cálculos y obtener nuevos valores ya que estos mismos parámetros harían que el nuevo cuerpo de mariposa se torne inestable.

3.6.2 Parámetros del PID de control de velocidad crucero:

Para el cálculo de los parámetros del controlador PID de control de velocidad crucero también se utilizó el método Ziegler – Nichols en lazo cerrado, explicado en la página 32. Para esto se ajustaron los parámetros del modo integral y derivativo en cero y se le introdujo un set point constante. Luego se fue ajustando el parámetro proporcional hasta obtener una respuesta oscilatoria de amplitud constante acotada que no sobrepase los límites del sistema y de velocidad máxima legales permitidos en la zona de pruebas.

Estableciendo una constante proporcional de 5 y las integrales y derivativas en cero, se introduce una consigna constante de entrada y el resultado fue el siguiente:

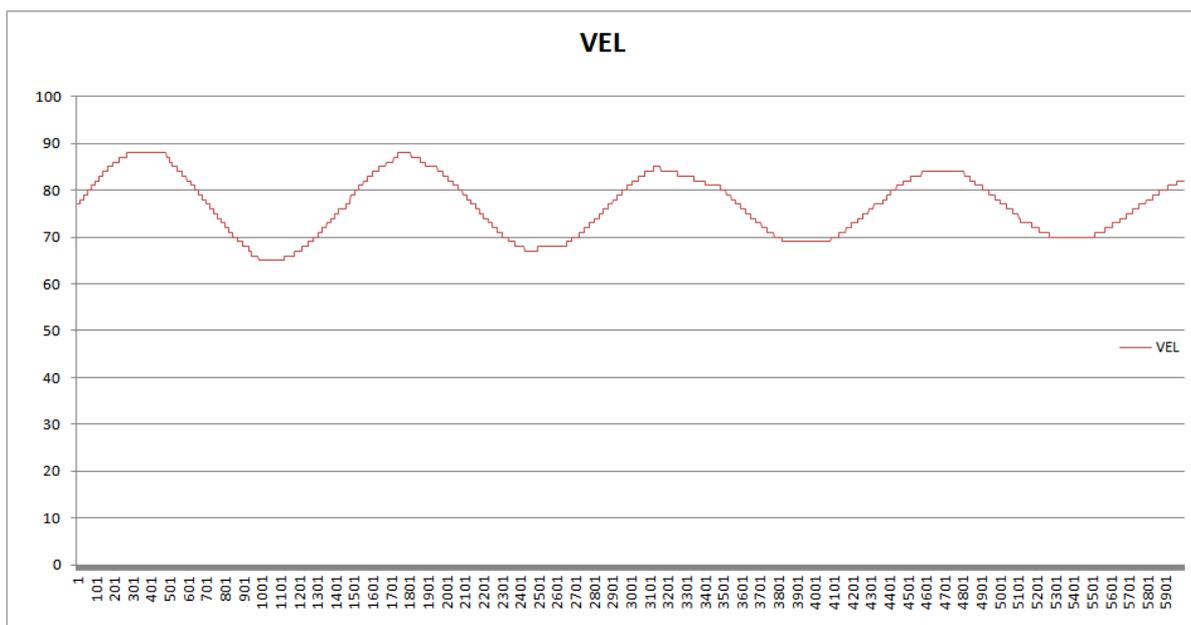


Figura 59: PID velocidad crucero. Respuesta de sintonización con kp=5

Como se puede ver en la Figura 59: PID velocidad crucero. Respuesta de sintonización con $k_p=5$, si bien los valores no son muy homogéneos, se puede apreciar que el movimiento se torna oscilatorio pero con tendencias a estabilizarse, pero el tiempo de estabilización es muy largo ya que el intervalo de muestreo es de 10 [mS], por lo tanto lo que se aprecia en la gráfica son 60 segundos de registro. Se espera un valor de estabilización un poco más corto.

Luego, incrementando el valor de la constante proporcional a 6 se obtuvo el siguiente resultado:

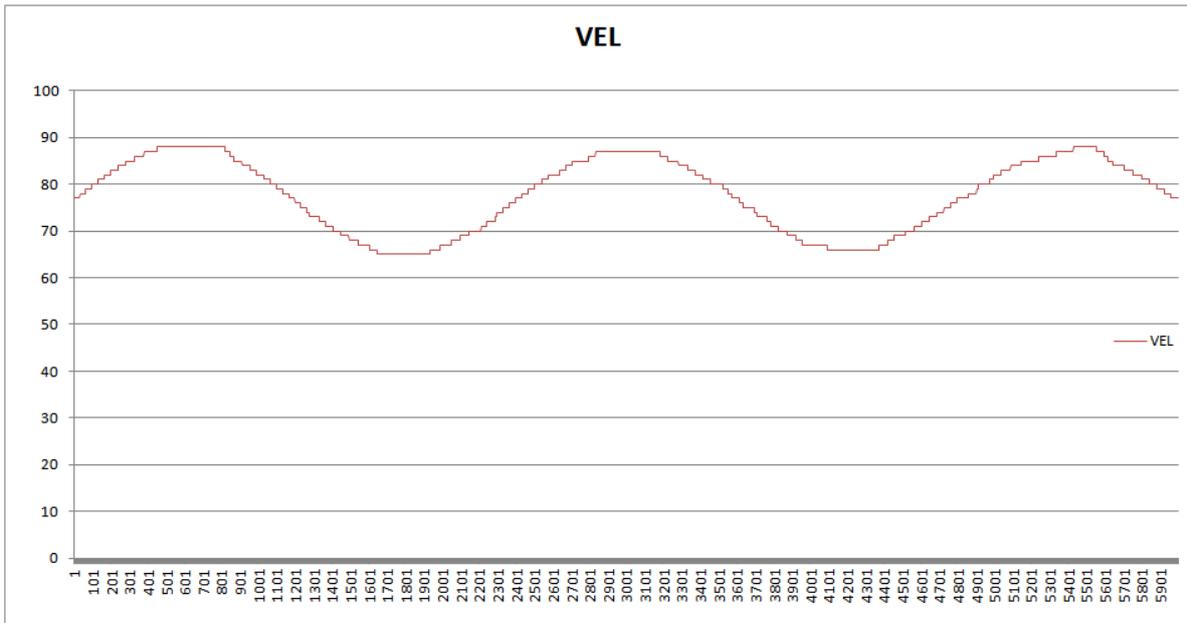


Figura 60: PID velocidad crucero. Respuesta de sintonización con $k_p=6$

Estos valores permitieron el cálculo de los parámetros aplicando el método Ziegler – Nichols en lazo cerrado con $k_u=6$ y $T_u=25$ segundos (el período entre muestras es de 10mS) obteniendo:

	Kp	Ki	Kd
P	3		
PI	2.7	0.13	
PID	3.54	0.30	11

Tabla 13: Valores del controlador de velocidad crucero

Con estos valores, si bien la respuesta fue muy buena, se decidió reducir la componente derivativa ya que tornaban el sistema inestable, con aceleraciones un tanto bruscas aunque dentro de los valores de tolerancia.

Finalmente los valores utilizados en el controlador PID y fueron los siguientes:

	Kp	Ki	Kd
P	3	0.5	5

Tabla 14: Valores finales del controlador de velocidad crucero

Con estos valores, la respuesta del controlador fue la siguiente:

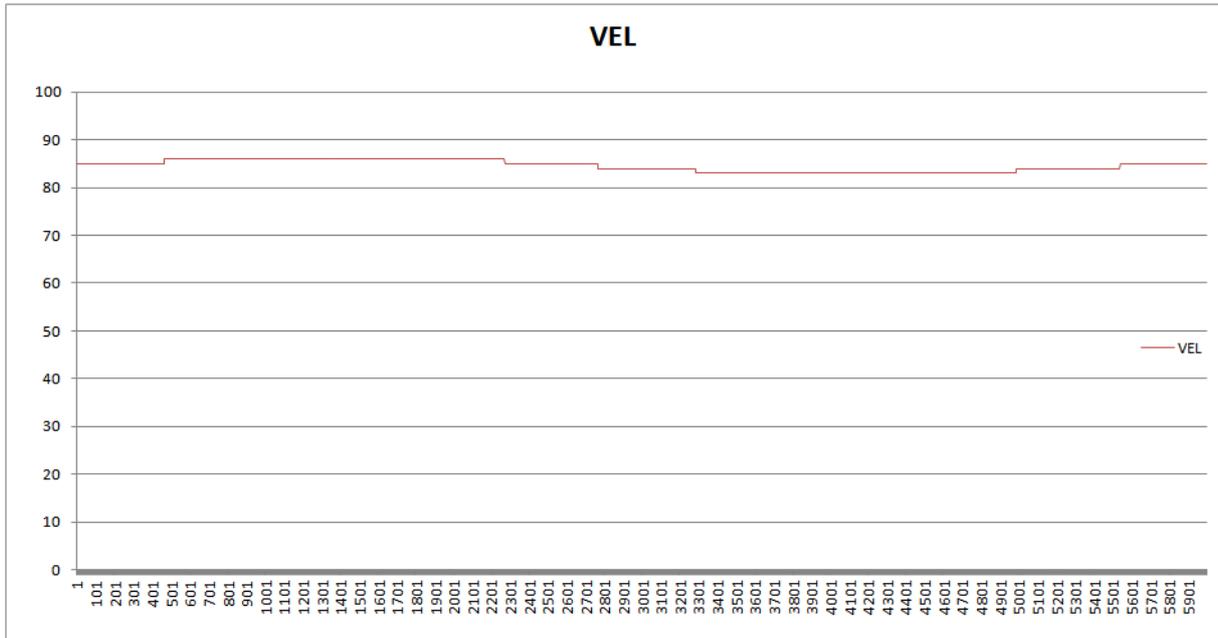


Figura 61: PID velocidad crucero. Respuesta de final obtenida

Dado que el control de velocidad crucero debe ser activado al llegar a la velocidad deseada, el controlador no tiene la necesidad de controlar un salto abrupto de velocidad sino que se dedica a mantener la velocidad actual. Esto se puede ver en la Figura 51: Circuito del driver del motor, donde la velocidad oscila muy poco en los 60 segundos muestreados obteniendo los resultados deseados.

Capítulo 4: Análisis de Costos

Al analizar los costos finales del proyecto se tuvieron en cuenta tres aspectos: costos de materiales, tiempo de desarrollo y retorno de la inversión, los cuales están detallados a continuación.

4.1 Costos de materiales:

El costo de los materiales está dividido en dos grupos: lo que refiere al hardware y electrónica del proyecto y luego los materiales necesarios para adaptar al vehículo el cuerpo de mariposas motorizado y los sensores.

En la siguiente tabla pueden observarse dichos costos:

Material	Costo	Observaciones
Componentes electrónicos	\$ 750	Incluye placa, PIC, L298, RS232, fichas y accesorios
Sensor freno	\$ 0	Ya existente en el vehículo
Sensor embrague	\$ 210	
Sensor punto muerto	\$ 250	
Sensor de velocidad	\$ 0	Ya existente en el vehículo
Sensor doble potenciómetro pedal acelerador	\$ 1.500	
Cuerpo de mariposa	\$ 0	Donación
Base adaptación cuerpo de mariposa	\$ 400	
Adaptación filtro de aire	\$ 220	
Sensor posición de mariposa	\$ 0	Incluido en el cuerpo de mariposa
Cable de acelerador	\$ 150	
Total: \$ 3.480		

Tabla 15: Costo de materiales en pesos

4.2 Costos de desarrollo:

El costo de desarrollo se hizo en base a las horas que llevó implementar el proyecto y el costo por hora de trabajo a un valor estimado. Dicho valor horario se estableció en 200 pesos. Se subdividieron las diferentes etapas para obtener un cálculo lo más preciso posible.

En la siguiente tabla pueden observarse dichos costos:

Labor	Horas	Costo
Organización de etapas del proyecto	4	\$ 800
Diseño de las placas	16	\$ 3.200
Armado y prueba del hardware	20	\$ 4.000
Primera etapa de programación: PID cuerpo de mariposa	60	\$ 12.000
Adaptación del vehículo	40	\$ 8.000
Instalación del sistema	16	\$ 3.200
Prueba y correcciones de funcionamiento del hardware y PID 1	8	\$ 1.600

Segunda etapa de programación: PID control velocidad cruce	30	\$ 6.000
Prueba y correcciones de funcionamiento del hardware y PID 2	24	\$ 4.800
Elaboración de informe final	60	\$ 12.000
Total:	278	\$ 55.600

Tabla 16: Costos de desarrollo en pesos

Como puede observarse, el costo total del proyecto se estimó en \$59080, incluyendo materiales y desarrollo.

4.3 Retorno de la inversión:

Para el cálculo del posible retorno de la inversión se toma como referencia el costo del hardware en una producción de lotes de 25 unidades.

En la siguiente tabla pueden observarse los costos de producción:

Imputación	Costo
Componentes electrónicos	\$560
Logística	\$80
Mano de obra armado	\$10
Packaging	\$100
Total por lote	\$750
Total por unidad	\$30

Tabla 17: Costos de producción en dólares

Nota: estos costos están expresados en dólares.

Como podemos observar, el costo de producción por unidad sería de unos 30 dólares, actualmente alrededor de 600 pesos.

Estimando una venta mensual de 4 unidades a un costo 120 dólares, obtendríamos una ganancia de 90 dólares por unidad vendida, lo que generaría una ganancia de 4320 dólares en un año, actualmente alrededor de 86400 pesos, con lo que el proyecto quedaría pagado en aproximadamente 8 meses de producción.

4.4 Planes de venta:

El sistema está orientado a dos tipos de usuarios:

En primer lugar quienes estén interesados principalmente en el control de la mariposa motorizada, que generalmente son vehículos utilizados para competencias deportivas que cuando eliminan la computadora original para utilizar una programable pierden la funcionalidad del comando del cuerpo de mariposa, el cual no pueden cambiar por una mecánica por cuestiones reglamentarias. Para este tipo de usuarios la estrategia de ventas sería a través de redes sociales, apuntando a grupos de discusiones que aglomeren a este tipo de usuarios, ofreciendo el producto directamente a cada participante o en general.

En segundo lugar, para usuarios que viajan durante mucho tiempo o hagan viajes largos que quieran agregar la funcionalidad de control de velocidad cruce a sus vehículo

que no lo traigan de fábrica, lo cual les traería aparejado un mayor confort de viaje y un ahorro en el consumo de combustible. Para este caso, la estrategia sería la venta a través de páginas web de venta masiva, pagando el costo de posicionamiento en dichas páginas por algunos meses hasta que el producto sea reconocido en el mercado. Además, se ofrecería a través de redes sociales a grupos de usuarios de las diferentes marcas de autos, los cuales siempre se encuentran entusiasmados por mejorar sus vehículos.

Capítulo 5: Discusión y Conclusión:

Este proyecto nació netamente de una necesidad de mercado. En reiteradas oportunidades se ha planteado la necesidad de impulsar un proyecto de control de cuerpo de mariposa electrónico que se adapte a los actuadores disponibles en el mercado, especialmente de automovilismo deportivo, debido a las exigencias reglamentarias de conservar ciertas piezas originales del vehículo. Actualmente para poder controlar los cuerpos de mariposa se debe disponer de un sistema de inyección electrónica integral que disponga de control de cuerpo de mariposa, los cuales suelen ser muy costosos. Con este proyecto se logró que los potenciales clientes que ya disponen de un sistema de inyección de bajo costo no tengan que realizar inversiones tan altas para solucionar el problema. Adicionalmente, mientras se pensaba la idea, surgió la posibilidad de que, con el agregado de un sensor de pulsos, brindar la posibilidad de ofrecer un control de control de velocidad crucero del vehículo, que si bien no es importante en autos de competición, lograría una ampliación del mercado simplemente agregando “unas líneas de programación”.

Investigando el mercado local, solo se pudo encontrar un producto similar pero el fabricante indicaba que el mismo aún se encontraba en desarrollo, aunque solamente ofrecía control de posición de mariposa pero no de velocidad crucero. Luego investigando en sitios fuera del país se encontraron productos similares pero que sólo se aplicaban a algunos modelos de vehículos en particular, no ofreciendo la posibilidad de adaptarlo a cualquier otro que no esté en sus listas de compatibilidades.

Analizando los costos de fabricación y posible costo de venta se percibe que se pudo lograr un producto económico para el cliente y con un buen margen de ganancia, el cual se puede ampliar considerablemente comprando componentes electrónicos al por mayor y produciendo lotes más grandes. Esto se pudo comprobar ya que numerosos futuros clientes se han mostrado interesados en el producto luego de mencionar el costo del mismo.

Como principal inconveniente técnico que se encontró en la primera etapa del proyecto fue la inestabilidad del sistema MOTOR CC-MUELLE que controlan la apertura de la mariposa ya que el rozamiento inicial del eje hacía que cuando este se movía, inyectando la misma cantidad de corriente, el mismo se iba al fondo de la escala muy rápidamente imposibilitando controlar su posición. Esto se resolvió inyectando un pequeño pulso de corriente inicial al mover en sentido de apertura el eje, y controlando el tiempo del pulso, se logra un pequeño movimiento al inicio que vence el rozamiento estático y el resto del movimiento se hace con una corriente que controla el PID. Se esperaba que el sistema de ignición del vehículo o el alternador de carga de batería inyecten ruido en el sistema, pero con filtros de primer orden en las entradas analógicas y en la fuente de alimentación se obtuvo un resultado satisfactorio. Influyó también el uso de elementos en buenas condiciones del sistema de ignición del vehículo, tales como bobinas especiales para inyección electrónica, cables antiparasitarios y bujías resistivas.

Otro contratiempo que sufrió el proyecto fue que se debió hacer una adaptación del cuerpo de mariposas al vehículo de prueba ya que éste originalmente contaba con un

cuerpo de mariposas mecánico, con cable, el cual fue removido y mediante una placa adaptadora se instaló el cuerpo de mariposas motorizado, lo cual llevó bastante tiempo de diseño, fabricación y adaptación.

Durante el desarrollo del proyecto han surgido algunas ideas para mejorarlo que podrían ser aplicadas en futuras ampliaciones del mismo. Para esto se dejaron disponibles algunas entradas analógicas y digitales lo cual permitirían aplicar mejoras sin la necesidad de cambiar el hardware.

Para el control del cuerpo de mariposa se plantearon las siguientes posibilidades de ampliación del proyecto:

- Implementar rutinas que calculen automáticamente los valores del PID.
- Posibilidad de configurar automáticamente los parámetros del cuerpo de mariposa y del pedal de acelerador de tal forma que el usuario no deba cargar estos parámetros sino que se configuren solos, facilitando la instalación del equipo.
- Posibilidad de instalación de señal de temperatura del vehículo para producir una pequeña apertura de la mariposa cuando el motor está frío y lograr un ralentí a mayores revoluciones.
- Posibilidad de programar diferentes curvas de apertura de mariposa respecto al pedal del acelerador que le permitan al usuario tener diferentes modos de conducción, por ejemplo, deportiva (más brusca), de ahorro de combustible (más suave) o modo normal (intermedia)
- La opción de limitar a cierto ángulo la apertura máxima permitida de la mariposa con el fin de que el motor no entregue toda la potencia disponible (modo parking).

Para el modo de velocidad crucero se dejan abiertas las siguientes posibilidades de mejora:

- Implementar rutinas que calculen automáticamente los valores del PID.
- Posibilidad de aumentar la velocidad del vehículo temporalmente cierto porcentaje a través de un pulsador o el pedal de acelerador para, por ejemplo, hacer un sobrepaso en ruta sin la necesidad de desactivar el modo velocidad crucero y volverlo activar.
- Eventualmente se podría memorizar una velocidad determinada para que el usuario simplemente apretando un botón haga que el vehículo llegue a dicha velocidad sin tener que acelerar hasta la velocidad deseada y luego entrar en modo control de velocidad crucero.

Capítulo 6: Literatura Citada:

- Katsuhiko Ogata (1998). Ingeniería de control moderna, Tercera edición, Pearson Educación.
- Ogata, Katsuhiko (1996). Sistemas de control en tiempo discreto. Segunda edición. Editorial Prentice Hall.
- Steeve Erasmo Toledo Chojolán (2007). Diseño de controladores pid en tiempo discreto, y análisis de respuesta utilizando herramientas computacionales. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Programa autodidáctico 210. Acelerador electrónico - Diseño y funcionamiento. Publicación interna VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg
- Eduardo García Breijo. Compilador C CCS y simulador Proteus para microcontroladores PIC. Editorial AlfaOmega. 2008.
- Ing. Sergio V. Szklanny. Ing. Carlos Behrends (2006). Sistemas Digitales de Control de Procesos. AADECA. Editores S.R.L.
- Ing. Sergio V. Szklanny (2016). Curso Ajusto Óptimo de Lazos de Control. SVS consultores.
- Maria J. Sanchez, Jesus Alcalá, Luis Quijada, Patricia Farías, Luis Gonzalez, Mary Carmen (2015). Teoría de control – Controladores y sistemas de control. Instituto Universitario Politécnico “Santiago Mariño” Republica de Venezuela.
- Michael Leonard. (2013). How to Design the Perfect PCB.
- Muhammad H. Rashid, Muhammad H. Rasid Virgilio González y Pozo Agustín Suárez Fernández (2004). Electrónica de Potencia. Pearson Educación.
- Los sensores automotrices en la práctica. Revista TTM. México.
- Catálogo Bosch de sensores 201