

---

Universidad Nacional de Mar del Plata  
Facultad de Ingeniería

# SISTEMA DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA PARA MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Ezequiel M. Muñoz Gaspari

Director: Ing. Walter Kloster

Diciembre de 2015



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

---

## Resumen

En el presente trabajo se trata el abordaje de la implementación de un sistema de inyección para un motor de combustión interna. Para eso fue necesario estudiar el funcionamiento de un motor, denotando los detalles mas importantes y caracterizando la respuesta ideal esperada por algunos parámetros del mismo.

Luego se indago sobre los sensores y actuadores que desempeñan funciones prioritarias en relación a la inyección de combustible, definiendo sus características mas importantes. También se detalla el uso de mapas de avance tanto para el encendido como para la inyección de combustible.

Seguidamente se elabora un modelo del motor con el fin de realizar ensayos sobre el mismo. Después, se enumeran los principios de funcionamiento de los controladores de inyección a implementar, con sus características mas significativas, e incluso se los desarrolla en un motor simulacional como es Simulink, para poder aplicarlo sobre el modelo del motor obtenido. Posteriormente se muestran todas las mediciones obtenidas de los distintos parámetros evaluados, adjuntas a explicaciones de lo que puede observarse.

Después, se realiza todo el desarrollo teórico y práctico para la implementación del sistema de inyección, planteándose todas las condiciones que debe cumplir. Frente a la imposibilidad de ensayar al sistema sobre un vehículo, se elabora un sistema de encendido autónomo, que se prueba sobre un vehículo Fiat Palio alimentado con GNC.

Por último, se lleva a cabo la implementación del sistema de encendido en el vehículo, y se realizan comparaciones entre la central electrónica original y el sistema elaborado.

Al final del trabajo se encuentran las conclusiones de la experiencia, y se plantean las posibilidades que existen con respecto a trabajo futuro en este tema.

---

## Agradecimientos

Quiero agradecer a mi director Ing. Walter Kloster por la dedicación y el apoyo brindado para llevar a cabo la realización de este proyecto, teniendo un compromiso total para despejarme todo tipo de dudas que fueron ocurriendo.

Debo agradecer a mis padres, Laura y Daniel, que siempre fueron mi guía con su ejemplo de sacrificio, para lograr este gran objetivo. También, les agradezco el amor que me dieron todos los días.

Gracias Anita, por brindarme el calor de un hogar y tratarme como si fuera tu hijo.

Agradezco a mis abuelos, Olga, Elva, José y Carlos, que desinteresadamente me han solucionado muchos problemas para poder llevar adelante esta carrera.

Y gracias infinitas para Lurdes, que siempre me brindo todo, apoyándome en los momentos mas difíciles y enseñándome los mejores momentos de mi vida.

---

# Índice general

<b>1. Introducción.....</b>	<b>11</b>
1.1. Origen de los sistemas de inyección.....	11
1.2. Problemática planteada.....	11
1.3. Objetivos.....	12
1.4. Organización del proyecto.....	12
<b>2. Principio de funcionamiento del motor.....</b>	<b>15</b>
2.1. Introducción.....	15
2.2. Ciclos de trabajo.....	15
2.3. Características de la mezcla.....	16
2.4. Consumo específico.....	18
<b>3. Sensores, actuadores y funcionamiento de la ECU.....</b>	<b>19</b>
3.1. Introducción.....	19
3.2. Sensores.....	19
3.2.1. Sensor de rotación.....	19
3.2.2. Sensor de temperatura de agua.....	20
3.2.3. Sensor de presión de admisión o sensor de flujo de masa de aire.....	22
3.2.4. Sensor de posición de mariposa.....	24
3.2.5. Sensor de oxígeno.....	25
3.2.6. Sensor de detonación.....	26
3.3. Actuadores.....	27
3.3.1 Inyector de combustible.....	27

---

3.3.2. Bobina de encendido.....	28
3.3.3. Relay de abastecimiento.....	30
3.3.4. Motor de ralentí o motor de paso a paso.....	30
3.3.5. Válvula de recirculación de gases.....	31
3.3.6. Otros actuadores.....	32
3.4. Principio de funcionamiento de la ECU.....	33
3.5. Mapa de inyección y mapa de encendido.....	33
3.6. Tiempo de apertura del inyector y de conmutación del encendido.....	34
<b>4. Modelo del motor.....</b>	<b>35</b>
4.1. Introducción.....	35
4.2. Desarrollo del modelo.....	36
4.3. Modelo del aire.....	38
4.4. Aire por la mariposa de admisión.....	39
4.5. Válvula de admisión.....	42
4.6. Presión del múltiple de admisión.....	44
4.7. Inyección de combustible.....	45
4.8. Inyección de combustible en el múltiple de admisión.....	46
4.9. Dinámica del motor.....	50
4.10. Generación del par motor.....	50
4.11. Dinámica de las revoluciones del motor.....	52
4.12. Dinámica de los gases de escape.....	54
4.13. Sonda lambda.....	56
<b>5. Controlador de inyección.....</b>	<b>57</b>
5.1. Introducción.....	57

---

5.2. Estados de carga del motor y estrategias.....	58
5.3. Topología del controlador de inyección.....	59
5.4. Controlador proporcional.....	60
5.5. Controlador derivativo.....	66
<b>6. Sistema de encendido.....</b>	<b>73</b>
6.1. Introducción.....	73
6.2. Tiempo de conmutación.....	73
6.3. Avance de encendido.....	74
6.4. Elaboración de un sistema autónomo.....	75
<b>7. Evaluación de los controladores de inyección.....</b>	<b>76</b>
7.1. Introducción.....	76
7.2. Estado estacionario - Controlador proporcional.....	76
7.3. Estado estacionario - Controlador derivativo.....	83
7.4. Transitorio positivo – Controlador proporcional.....	90
7.5. Transitorio positivo – Controlador derivativo.....	97
7.6. Resumen de la experiencia.....	103
<b>8. Implementación del sistema.....</b>	<b>104</b>
8.1. Introducción.....	104
8.2. Condiciones a cumplir.....	104
8.3. Topología propuesta.....	107
8.4. Elección del microcontrolador.....	108
8.5. Objetivos de las etapas pre y post microcontrolador.....	109
8.6. Desarrollo practico.....	109

---

8.7. Vehículo de ensayo.....	110
8.8. Etapa de entrada.....	111
8.9. Etapa de salida.....	114
8.10. Circuito completo.....	119
8.11. Problemática ocurrida.....	120
8.12. Procesamiento de señal – Sistema de encendido.....	121
<b>9. Ensayo sobre el vehículo.....</b>	<b>125</b>
9.1. Implementación en el vehículo.....	125
9.2. Resultados obtenidos.....	125
<b>10. Conclusiones.....</b>	<b>127</b>
10.2. Conclusiones particulares.....	127
10.3. Trabajo a futuro.....	128
<b>Apéndice A: Código fuente.....</b>	<b>129</b>
<b>Apéndice B: Bibliografía consultada.....</b>	<b>133</b>

---

# Nomenclatura

## Abreviaciones

A/C	(Air condition): Aire acondicionado.
ECU	(Electronic central unit): Unidad central de electrónica.
EGR	(Exhaust gas recirculation): Recirculaciones de gases de escape.
MAF	(Mass air flow): Flujo de masa de aire.
MAP	(Manifold absolute pressure): Presión absoluta del múltiple de admisión.
NTC	(Negative temperature coefficient): Coeficiente de temperatura negativo.
PMS	Punto muerto superior.
PTC	(Positive temperature coefficient): Coeficiente de temperatura positivo.
RPM	Revoluciones por minuto.
TPS	(Throttle position sensor): Sensor de posición de mariposa.

## Símbolos

$\lambda$	Relación másica de aire y combustible [-]
$\alpha$	Apertura angular de la mariposa de admisión [°]
$\theta$	Angulo del cigüeñal [°]
$\eta_{vol}$	Rendimiento volumétrico [-]
$\eta_t$	Rendimiento térmico [-]
$\tau_{fl}$	Constante de aproximación [s]
Cd	Coeficiente de descarga [-]
$D_{mar}$	Diámetro de la mariposa de admisión [mm]
$f(\alpha)$	Coeficiente de sección [-]
$f(\emptyset)$	Factor de presión [-]
G	Consumo específico [g/KW.h]

---

$H_f$	Poder calorífico inferior del combustible [KJ/Kg]
$I_{mot}$	Inercia del motor [ Kg.m <sup>2</sup> ]
$K_{iny}$	Ganancia del inyector [mg/ms]
$\dot{m}_a$	Caudal de aire que sale entra al cilindro [Kg/h]
$m_{adm}$	Aire que ingresa al múltiple de admisión [Kg/ciclo]
$m_{aire}$	Masa de aire [Kg/ciclo]
$\dot{m}_{amar}$	Caudal de aire que atraviesa la mariposa [Kg/h]
$m_f$	Masa de combustible [Kg/ciclo]
$m_{fi}$	Masa de combustible inyectado al múltiple de admisión [Kg/ciclo]
$\dot{m}_{fi}$	Caudal de combustible inyectado [Kg/h]
$\dot{m}_{fl}$	Caudal de combustible depositado en forma líquida [Kg/h]
$\dot{m}_{fv}$	Caudal de combustible que se transforma en vapor [Kg/h]
M	Par [N.m]
$M_f$	Par de pérdidas del motor y la transmisión [N.m]
n	Régimen de revoluciones del motor por minuto [RPM]
N	Potencia [KW]
$P_{amb}$	Presión ambiente [KPa]
$P_{adm}$	Presión del múltiple de admisión [KPa]
$\dot{P}_{adm}$	Variación de la presión del múltiple de admisión [KPa/h]
R	Constante universal de los gases [J/Kg.K]
t	Retardo puro [s]
$T_{adm}$	Temperatura del múltiple de admisión [K]
$T_i$	Tiempo de apertura del inyector [ms]
$t_{oiny}$	Tiempo muerto del inyector [ms]

---

V	Volumen del cilindro del motor [l]
$V_{adm}$	Volumen del múltiple de admisión [l]
$V_{umbral}$	Relación entre revoluciones del motor y revoluciones esperadas [-]
X	Fracción de combustible inyectado que se deposita como líquido [-]
Xm	Fracción de combustible inyectado que se deposita sobre el múltiple [-]
Xv	Fracción de combustible inyectado que se deposita sobre la válvula de admisión [-]

---

# 1. Introducción

## 1.1. Origen de los sistemas de inyección

La aparición del motor de combustión interna revolucionó entre otras cosas, el transporte. Su objetivo es transformar energía química en energía mecánica. Para eso requiere tres factores preponderantes: combustible, aire y encendido (chispa), que deben estar controlados en tiempo y forma para lograr el correcto funcionamiento del motor.

Con el pasar de los años, las exigencias de rendimiento, consumo de combustible y contaminación, son cada vez mayores. Lo que era controlado por un carburador y un encendido a platino, se vuelve insuficiente frente a estas demandas, por lo que se precisa de un soporte mas exacto y riguroso como es la electrónica.

En un principio, el reemplazo de un encendido a platino por un encendido electrónico, deja obtener buenos resultados con respecto a un mayor rendimiento y una reducción en el consumo de combustible del motor, pero las medidas de contaminación no se satisfacen y son cada vez más estrictas. Entonces, se logra dar una respuesta al control de combustible y aire, cambiando el carburador por un sistema electrónico de inyección de combustible, que se encarga de regular la relación aire-combustible para todas las circunstancias del motor de la manera mas optima posible.

Paralelamente los motores, especialmente los de cuatro tiempos, evolucionan de una manera vertiginosa, con lo cual tener un sistema de inyección que trabaje independiente del sistema de encendido no sirve para lograr el máximo rendimiento de los vehículos. Por lo cual, se termina unificando ambos sistemas en uno solo que gobierna inyección y encendido, bajo la denominación de sistema de inyección electrónica o ECU (de las siglas en inglés, Electronic Central Unit).

## 1.2. Problemática planteada

Como cada vehículo cuenta con un sistema de inyección distinto a otros modelos de automóviles, incluso esto ocurre en vehículos de la misma marca automotriz, se han creado una gran diversidad de ECU's en donde no son compatibles unas con otras. Cuando ocurre que una central deja de funcionar correctamente se debe reemplazar por una idéntica, que no siempre es

---

posible, debido principalmente a la discontinuidad de productos existentes en el mercado. Generalmente en los automóviles mas populares no se presenta este problema, pero en modelos puntuales puede ocurrir. Otro factor a tener en cuenta mas allá de la disponibilidad es el costo del reemplazo, que muchas veces suele tener valores elevadísimos.

### **1.3. Objetivos**

La presente tesis propone exponer el marco teórico necesario para la implementación de una central de inyección realizada con componentes obtenibles en el mercado local.

Asimismo, se propone lograr la elaboración de un sistema de inyección, que sea capaz de hacer funcionar correctamente un motor de un vehículo.

Para lograr esto se deben cumplir una serie de requisitos:

- Entender el principio de funcionamiento de un motor.
- Analizar los fundamentos de los sistemas de inyección.
- Obtener una plataforma de prueba donde corroborar el controlador de inyección.
- Realizar distintos controladores de inyección.
- Seleccionar el controlador de mejores prestaciones.
- Realizar ensayos en un motor.

Por último se extraen las conclusiones correspondientes a los objetivos primarios.

### **1.4. Organización del proyecto**

Como es necesario saber que sucede dentro de un motor, en el *capítulo 2* se explica los fundamentos que gobiernan el comportamiento del mismo y se hace una reseña sobre las condiciones en las cuales se obtiene su mayor rendimiento.

---

En el *capítulo 3* se realiza una descripción de los sensores y actuadores que abundan en el motor, mostrando sus características mas importantes. También se destaca la importancia de la utilización de mapas de avances para la inyección de combustible y el sistema de encendido.

A lo largo del *capítulo 4* se obtiene el modelo del motor, detallando cada submodelo con sus características y ecuaciones mas sobresalientes, para luego poder esquematizarlo mediante un diagrama en bloques y así poder simularlo en Simulink.

En el *capítulo 5* se detalla en profundidad los controladores que se implementan, se enumeran los estados de carga y sus correspondientes estrategias, se muestran las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los mismos y por último se obtienen los diagramas en bloques representativos de cada uno.

A lo largo del *capítulo 6*, se especifican los parámetros mas relevantes para la elaboración de un sistema de encendido autónomo, incluso se detallan los ensayos necesarios para obtener los valores representativos de un vehículo a prueba.

Luego de la implementación de los controladores en el modelo del motor, durante el *capítulo 7* se muestra la evolución de los parámetros mas sobresalientes del motor mediante gráficos. También se explica los fundamentos de lo que está sucediendo y se realizan comparaciones entre ambos controladores.

En el *capítulo 8* se desarrolla el marco teórico necesario para la producción del sistema de inyección y se presentan las condiciones que debe cumplir. Luego se muestra el proceso de elaboración, detallado etapa por etapa. También, se hace mención del automóvil que se dispone para realizar ensayos y sus principales características.

La implementación del sistema de inyección en el vehículo, y los resultados obtenidos del ensayo, se muestran en el *capítulo 9*.

En el *capítulo 10* se extraen las conclusiones del trabajo y se plantea una serie de temas con vistas a trabajos futuros.

---

## **2. Principio de funcionamiento del motor**

### **2.1. Introducción**

El trabajo realizado se basa en un motor de combustión interna de cuatro tiempos a nafta, también conocido como motor de ciclo Otto, cuya denominación proviene de las cuatro fases de trabajo necesarias para la combustión que acontece en su interior. Ellas son: admisión, compresión, explosión y escape. La función que desempeña es la de transformar energía química, proveniente de la mezcla de aire y combustible, en energía mecánica o de movimiento.

Para encender la mezcla de aire y combustible, el motor necesita de un salto de chispa en los electrodos de la bujía, por lo tanto es necesario un sistema de encendido que trabaja de manera sincronizada con la rotación del cigüeñal del motor.

Los motores de combustión interna difieren entre sí, por la cantidad de cilindros que utilizan. En este trabajo se analizarán, los motores de cuatro cilindros por ser estos los más extendidos en la industria automotriz.

### **2.2. Ciclos de trabajo**

A continuación se realiza una descripción de los principales componentes del motor involucrados en la combustión y luego una descripción de los ciclos de funcionamiento del motor de combustión interna.

La transformación de energía química a mecánica dentro del motor se realiza en una cámara de combustión denominada cilindro, que tiene cierto volumen medido en litros. Por otro lado, el pistón es un elemento que se encuentra unido a uno de los extremos de la biela y su función es realizar movimientos ascendentes y descendentes para comprimir la mezcla presente en la cámara de combustión como también para expulsar los gases residuales. El otro extremo de la biela se encuentra montado sobre el cigüeñal, que a su vez está conectado a las bielas de los otros cilindros del motor. Entonces el movimiento del cigüeñal depende de lo que sucede en todos los cilindros, pero solo uno por vez recibe energía en un momento dado, producto del encendido de la mezcla en su cámara de combustión, haciendo que el cigüeñal se desplace angularmente. Esto sucede en

consecuencia de la detonación de la mezcla que genera una presión sobre el pistón y lo hace descender abruptamente. Por ultimo las válvulas de admisión y de escape, son las encargadas de permitir el ingreso de la mezcla al cilindro y de lograr la expulsión de los gases residuales productos de la combustión, respectivamente.

Entonces, utilizando como referencia la *figura 1.1*, se comienza con el ciclo de admisión, en donde la mezcla de aire y combustible ingresa a la cámara de combustión debido a la presión que ejerce la carrera descendente del pistón y la apertura de la válvula de admisión, que está en correcta sincronía con el cigüeñal.

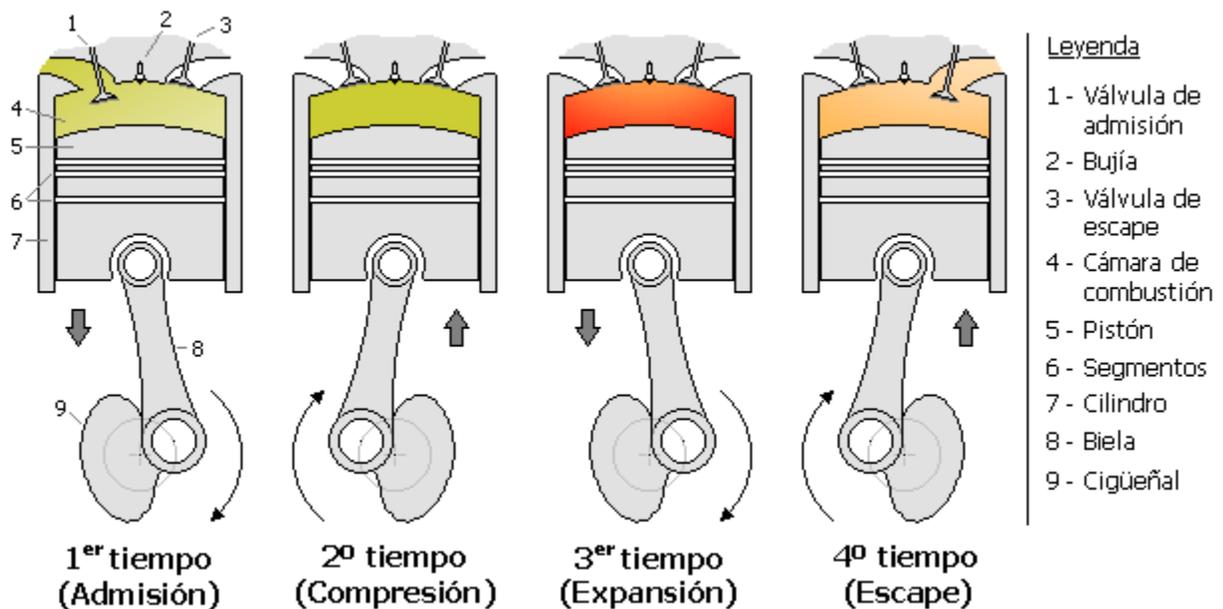


Figura 1.1: Las 4 fases del motor de combustión interna.

El segundo ciclo es el de compresión, en donde las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas y el pistón se encuentra en carrera ascendente, comprimiendo la mezcla presente en la cámara de combustión. Un instante antes que el pistón alcance su máxima carrera, mas conocido como punto muerto superior o PMS, ocurre un salto de chispa en el electrodo de la bujía, provocando la explosión de la mezcla y dando paso al siguiente ciclo.

El tercer ciclo es el de expansión, nuevamente con ambas válvulas cerradas, el pistón empieza a descender gracias a la presión de la explosión acontecida. Este es el único de los 4 ciclos en donde la mezcla le transfiere energía mecánica al cigüeñal, en los otros 3 ciclos el mismo se mueve por la energía obtenida de otro cilindro, en la *tabla 1.1* se puede apreciar la distribución de ciclos en un motor de 4 cilindros.

El cuarto ciclo es el de escape de los gases residuales, el pistón realiza una carrera ascendente expulsando los gases presentes en la cámara de combustión por la válvula de escape, que se encuentra abierta. Y así nuevamente se vuelve a comenzar desde el primer ciclo.

Para cada ciclo o carrera sucedida, se necesitan 180 grados de giro del cigüeñal, por lo tanto se requieren dos vueltas enteras (720 grados) del mismo para concluir un ciclo del motor, mientras que el árbol de levas solo realiza una vuelta o 360 grados. Asimismo el árbol de levas debe estar en sincronía con el cigüeñal, para realizar la apertura y cierre de las válvulas en el momento indicado.

Cilindro 1	Expansión	Escape	Admisión	Compresión
Cilindro 2	Escape	Admisión	Compresión	Expansión
Cilindro 3	Compresión	Expansión	Escape	Admisión
Cilindro 4	Admisión	Compresión	Expansión	Escape
Grados	0-180	180-360	360-540	540-720

Tabla 1.1: Distribución de los ciclos de trabajo en cada cilindro.

### 2.3. Características de la mezcla

Para que se produzca la combustión, la mezcla debe contar con dos componentes: aire y combustible, y además deben tener una proporción que los relacione, esto se denomina dosado y existe un valor ideal de proporción que se denomina dosado estequiométrico. Este depende del

---

motor en particular con el que se trabaje, pero sus valores son cercanos a 14,5 - 14,6, es decir que por cada parte de combustible se precisan 14,5 partes de aire. El dosado se puede expresar mediante la expresión  $\lambda$  y el dosado estequiométrico se logra cuando  $\lambda=1$ . Se expresa como:

$$\lambda = \frac{1}{14.57} \frac{m_{aire}}{m_f} \quad (2.1)$$

Siendo  $m_{aire}$  la cantidad de masa de aire y  $m_f$  la cantidad de masa de combustible.

Logrando un dosado estequiométrico durante el funcionamiento del motor se logran tres ventajas:

- Máximas prestaciones de par del motor.
- Menor emisión de hidrocarburos o gases contaminantes.
- Menor consumo de combustible.

En contrapartida, cuando la mezcla no cumple la estequiometria, ya sea por exceso o falta de combustible, el motor entrega una potencia menor y la emisión de gases contaminantes es mayor. Asimismo el consumo de combustible aumenta debido a que las prestaciones del motor no son las mismas.

En un principio, el dosado se realizaba en el carburador y el ajuste se hacía mediante tornillos y diafragmas. Esta dosificación no contaba con ningún tipo de realimentación, con lo cual pocas veces se lograba un dosado estequiométrico.

Con el transcurrir de los años, los entes reguladores de la contaminación se volvieron mas exigentes con las emisiones de hidrocarburos, por lo que las empresas automotrices no tuvieron mas alternativa que convertir sus vehículos abastecidos por carburador a vehículos con inyección electrónica, logrando no solo cumplir con los requisitos propuestos sino también logrando mayores prestaciones en los motores de dichos vehículos. En los vehículos que cuentan con inyección electrónica, la ECU es la encargada de controlar la dosificación del motor.

El hecho de tener un control electrónico sobre la dosificación de manera prácticamente instantánea también permitió utilizar catalizadores en los vehículos, este es un elemento que va montado sobre el caño de escape, posterior al múltiple de escape, y su función es recombinar los

---

gases residuales que circulan, con unas placas internas que posee, para eliminar los componentes químicos más tóxicos y entregar solo un producto de agua y dióxido de carbono. Como su vida útil depende principalmente de la dosificación del motor, ya que precisa oscilar entre valores de 0.9 y 1.1 de  $\lambda$ , y debido a su elevado costo, en motores abastecidos por carburador prácticamente no se utilizaban. Gracias a los sistemas de inyección electrónica se utilizan en el total de los vehículos del mercado, siendo fundamentales para las normativas de contaminación.

## 2.4. Consumo específico

El consumo específico es un parámetro que permite dar una noción sobre la relación entre el par entregado por el motor y el combustible necesario para producirlo. Se expresa como:

$$G[\text{g}/\text{kW.h}] = \frac{m_f[\text{g}/\text{h}]}{N[\text{kW}]} \quad (2.2)$$

Donde  $m_f$  es la masa de combustible que ingresa a la cámara de combustión y N es la potencia que entrega el motor.

Se busca que los valores sean lo más bajos posibles, esto es entregar un par igual pero con una menor cantidad de combustible, o para una misma cantidad de combustible entregar un par mayor. Entonces este parámetro se utiliza para comparar motores o, si se tratara de un mismo motor, sirve para comparar dos sistemas de inyección distintos.

---

## **3. Sensores, actuadores y funcionamiento de la ECU**

### **3.1. Introducción**

Se denomina sensor a todo dispositivo capaz de transformar una variable física en una variable eléctrica. Estas variables pueden ser: temperatura, presión, volumen, proximidad, movimiento, entre otras. Cada sensor cuenta con características propias que lo definen, como pueden ser: rango de medición, sensibilidad, resolución, tipo de señal provista, precisión, etc.

El vehículo con inyección electrónica está provisto de bastos sensores capaces de medir aquellas magnitudes que deben ser tenidas en cuenta para lograr un buen producto de inyección y encendido. A continuación se detallan aquellos de mayor importancia para la ECU, para luego dar paso al principio de funcionamiento de la misma y hacer referencia a sus mapas de avances.

### **3.2. Sensores**

#### **3.2.1. Sensor de rotación.**

La función de este sensor es dar información sobre la posición angular del motor a la central electrónica. De esta manera la ECU puede interpretar en que momento deben ejecutarse las órdenes de inyección y de encendido, como también interpreta el régimen de revoluciones del motor.

Hay tres posibles ubicaciones para este sensor, puede encontrarse dentro del distribuidor de encendido, sobre el volante del cigüeñal o próximo a la rueda dentada que se encuentra solidaria al eje del cigüeñal.

En cada caso la información del sensor de rotación es distinta, ya que para sensores ubicados dentro del distribuidor, la lectura es de una leva de cuatro puntas, por lo que cada vez que la punta de la leva queda enfrentada con el sensor, la central electrónica debe habilitar los disparos de inyección y encendido. Por el contrario, la rueda dentada se ha estandarizado en una rueda que

consta de sesenta dientes con dos dientes faltantes, como en la mayoría de las marcas del mercado, o en treinta y seis dientes con uno faltante, como en el caso de la marca Ford.

Estos sensores pueden ser de dos tipos: sensores de efecto hall, en donde los mismos requieren una tensión de alimentación que puede variar entre 5 y 12V, o sensores inductivos, los cuales generan una señal sin requerir ninguna alimentación. Cada tipo tiene sus características, los sensores de efecto hall tienen una sensibilidad mayor, por lo que no dependen de la rotación del motor para generar una señal; en cambio los sensores inductivos varían su amplitud en función de la frecuencia de rotación del motor, a mayor frecuencia mayor es la amplitud de la señal generada, pero estos últimos suelen ser mas sencillos y mas económicos que los primeros.

En este proyecto se considerará el caso de un sensor de rotación inductivo, ubicado sobre la rueda dentada, como se observa en la *figura 3.1*. Se debe tener en cuenta que una vuelta completa del árbol de levas se realiza cada dos vueltas completas del cigüeñal, o lo que es lo mismo, dos vueltas de la rueda dentada.

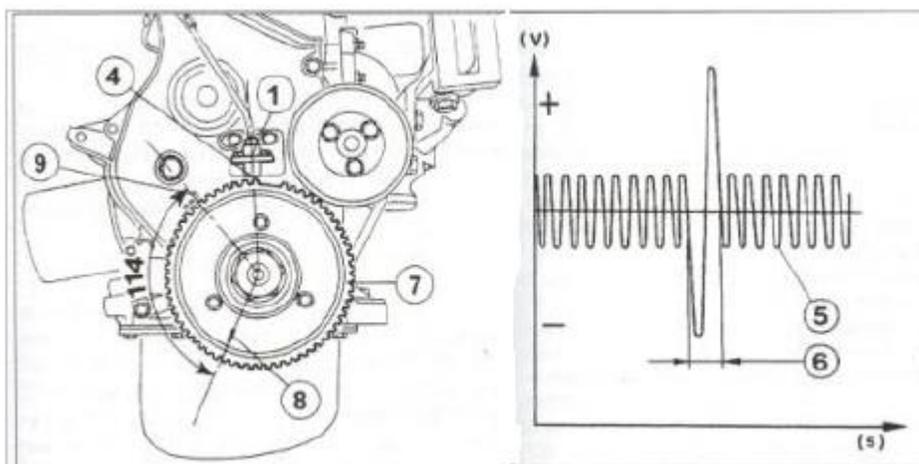


Figura 3.1: A la izquierda se observa la ubicación del captor (1) por encima de la rueda dentada, a la derecha la lectura obtenida del sensor.

### 3.2.2. Sensor de temperatura de agua

El objetivo de este sensor es indicarle a la central electrónica la temperatura a la que está trabajando el líquido refrigerante del motor, para poder lograr una relación de aire y combustible estequiométrica, ya que el rendimiento del combustible varía en función de la temperatura a la que

trabaja, cuanto mayor es la temperatura se necesita menos cantidad de combustible para cumplir el dosado estequiométrico. Estos sensores son de dos tipos: NTC (de sus siglas en inglés: coeficiente de temperatura negativo), esto indica que la resistencia que presenta el sensor disminuye a medida que la temperatura de agua aumenta; en cambio los de tipo PTC (de sus siglas en inglés: coeficiente de temperatura positivo) hacen lo contrario. La gran mayoría de los vehículos utilizan los sensores de agua NTC.

Para medir la temperatura de agua se alimenta al sensor con una fuente de corriente constante, entonces la tensión obtenida en el sensor varía en función de la temperatura medida, generalmente varía entre 0 y 5V.

El rango de amplitud de la resistencia varía según las marcas y modelos de vehículos, el sensor mas popularizado varía entre los 150 y 5000 ohms en el rango de 10º a 90º, como se observa en la *figura 3.2*.

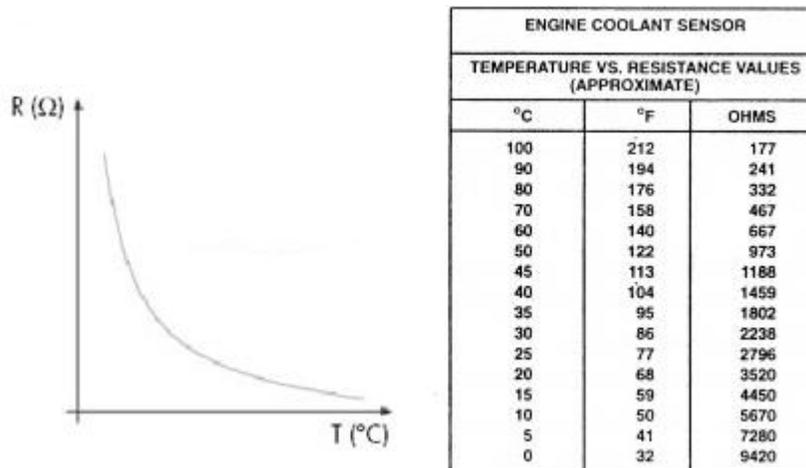


Figura 3.2: Curva característica del sensor de temperatura de agua, junto con una tabla aproximada del valor de resistencia en función de la temperatura medida.

Al medir la temperatura de trabajo, la computadora corrige el tiempo de apertura de los inyectores. Para temperaturas bajas se precisa mas cantidad de combustible en la mezcla, y para temperaturas elevadas el requerimiento es menor.

---

### 3.2.3. Sensor de presión de admisión o sensor de flujo de masa de aire

Si bien estos sensores otorgan lecturas de dos magnitudes distintas, dependiendo del sistema de inyección, la interpretación de las lecturas cumple el mismo objetivo. Entonces, la función de estos sensores es informar acerca de la cantidad de aire que está ingresando al motor, o sobre la presión existente del múltiple de admisión.

Esta información se puede lograr en ambos casos, de dos maneras: por variación de tensión, en donde suele variar entre 0 y 5V, o por variación de frecuencia, donde el sensor genera una señal de amplitud constante y de una frecuencia variable que depende del valor que este midiendo. En el caso de motores con sistemas de inyección de combustible nafteros, lo mas popularizados son los sensores con variación de tensión.

El sensor de presión de admisión o sensor MAP (por sus siglas en inglés, presión absoluta en el múltiple de admisión) se encarga de transformar la medición de la presión existente en el múltiple de admisión, en valores eléctricos. Para ello, el sensor debe ser alimentado con una fuente de tensión, que puede ser de 12 o 5V. En la *figura 3.3* se puede observar la curva característica de funcionamiento.

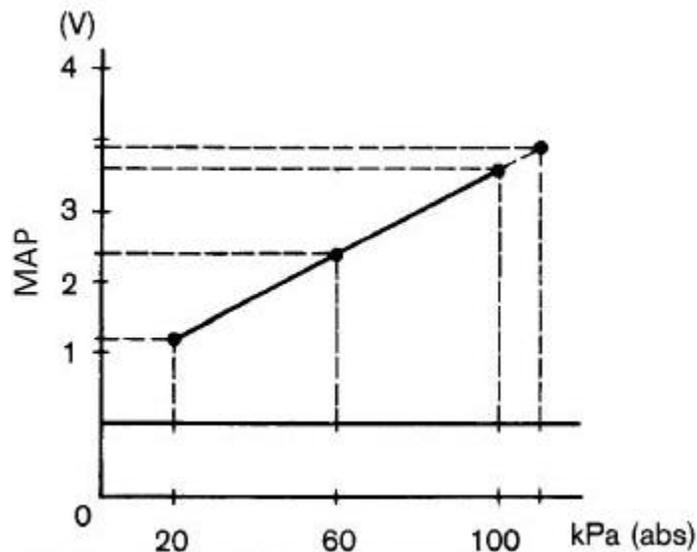


Figura 3.3: Curva característica de un sensor MAP.

El sensor de flujo de masa de aire o sensor MAF (de sus siglas en inglés, flujo de masa de aire) tiene como función transformar en valores eléctricos la medición del caudal de aire que ingresa al motor a través de la mariposa de admisión. Al igual que el sensor MAP, debe ser alimentado con una fuente de tensión, que puede variar entre los 12 y 5V, según el vehículo. Existen dos tipos de

sensores MAF, uno denominado caudalímetro “tipo L” que mide el caudal a partir de la apertura de una aleta de una mariposa, la cual tiene en la punta de su eje un potenciómetro que varía su tensión de salida en función del caudal que sensa. El otro es un sensor de hilo caliente, el cual se compone de una pequeña resistencia variable conectada a la tensión de alimentación, la cual levanta temperatura, y dependiendo del caudal de aire que pase por la resistencia ésta se enfría, modificando la corriente que circula por la misma, y por ende variando la tensión de salida. Este último sensor es el mas popular ya que es mas preciso y tiene menos desgaste mecánico. En la *figura 3.4* se pueden apreciar ambos estilos de sensores, y en la *figura 3.5* se observa su curva característica, que para ambos tipos es similar.

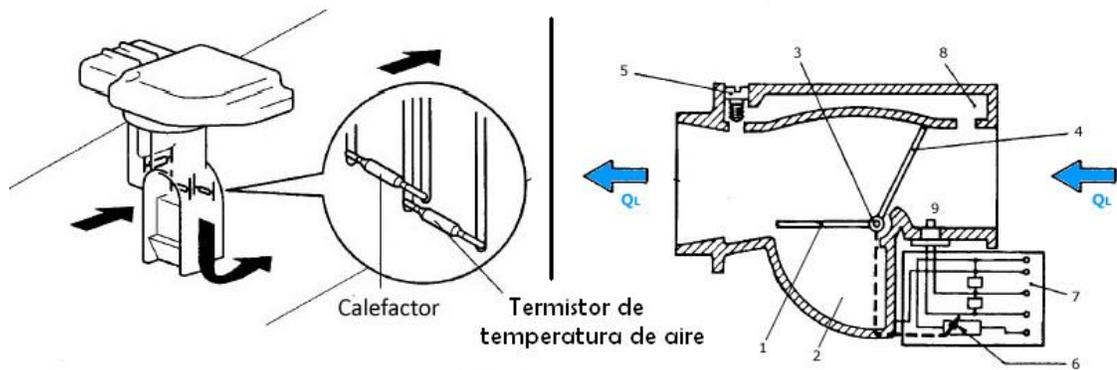


Figura 3.4: A la izquierda se observa un sensor MAF de hilo caliente, a la derecha un caudalímetro “tipo L”.

En los diversos sistemas de inyección existentes, solo se emplea uno de estos sensores, ya que se considera redundante la presencia de los dos.

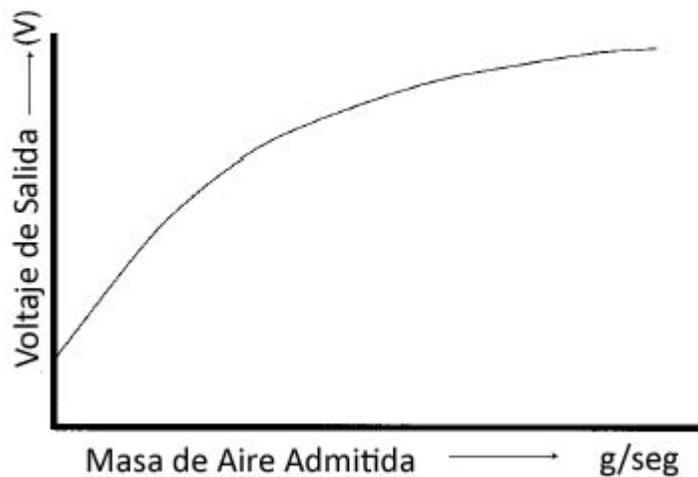


Figura 3.5: Curva característica del sensor MAF.

---

En la mayoría de los casos, estos sensores están acompañados por un sensor que mide la temperatura del aire, pero esta lectura tiene una menor incidencia en los factores a controlar por la central electrónica, en comparación con la información entregada por el MAF o MAP, la cual es un indicador del estado de carga del motor.

### 3.2.4. Sensor de posición de la mariposa

También denominado TPS (de sus siglas en inglés, sensor de posición de la mariposa), sirve para informarle a la central electrónica acerca de la apertura de la mariposa de admisión.

Este sensor convierte la medición del movimiento angular de la mariposa, en una señal eléctrica, actuando como si fuera un potenciómetro. Para eso debe ser alimentado con una tensión que puede ser 5 o 12V. En la *figura 3.6* se observa su curva característica.

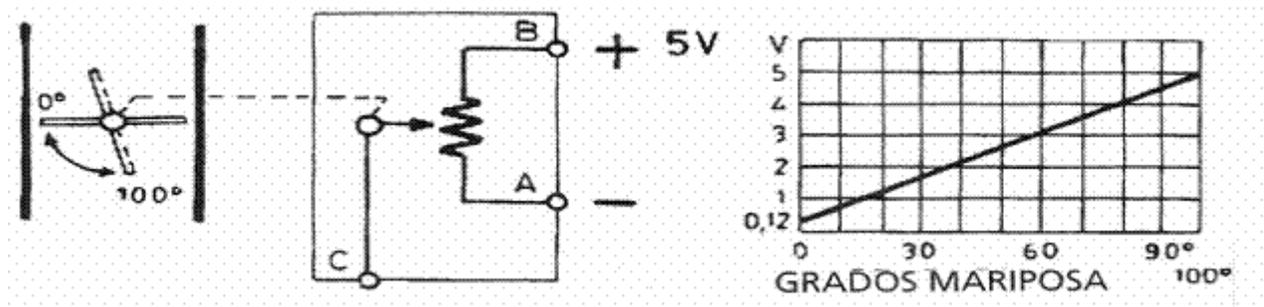


Figura 3.6: Curva característica de sensor TPS.

La lectura aportada por el TPS sirve para predecir el estado de carga que va a tener el motor dentro de un instante, entonces la ECU ejecuta la estrategia que considere necesaria en función de la variación de tensión de este sensor.

Existe una tecnología mas moderna en la cual la mariposa de admisión no se abre mediante el cable del acelerador, sino que se encuentra gobernada por un motor que es controlado por la ECU, con el objetivo de lograr una mejor dosificación para los momentos de mayor exigencia del motor. Estas mariposas electrónicas, cuentan con un TPS y sobre el pedal de acelerador existe otro TPS que le informa a la central electrónica sobre cuanto desea acelerar el conductor.

### 3.2.5. Sensor de oxígeno

Más comúnmente denominado sonda lambda, este sensor está ubicado sobre el caño de escape del vehículo, siendo el único sensor de realimentación para la central electrónica.

Se encarga de informar acerca de la relación existente entre oxígeno y monóxido de carbono, que es el residuo de las explosiones ocurridas en el motor, a la ECU, de modo que ésta haga las correcciones necesarias para optimizar el consumo y las emisiones contaminantes que produce el vehículo. Esto lo hace mediante la conversión de una magnitud química en una magnitud eléctrica.

La señal que entrega la sonda se encuentra estandarizada entre 0 y 1V. A valores pequeños de tensión corresponde una mayor concentración de oxígeno, por lo que la mezcla se considera pobre de combustible, acto seguido, la central electrónica corrige otorgando un mayor tiempo de apertura a los inyectores. Para valores cercanos a 1V corresponde una mayor concentración de dióxido de carbono, entonces la mezcla se considera rica de combustible, luego la ECU debe corregir de manera inversa. En la *figura 3.7* se observa su curva característica. La amplitud y frecuencia de la señal entregada por dicho sensor depende del control realizado por la central electrónica, no existe un criterio único al respecto.

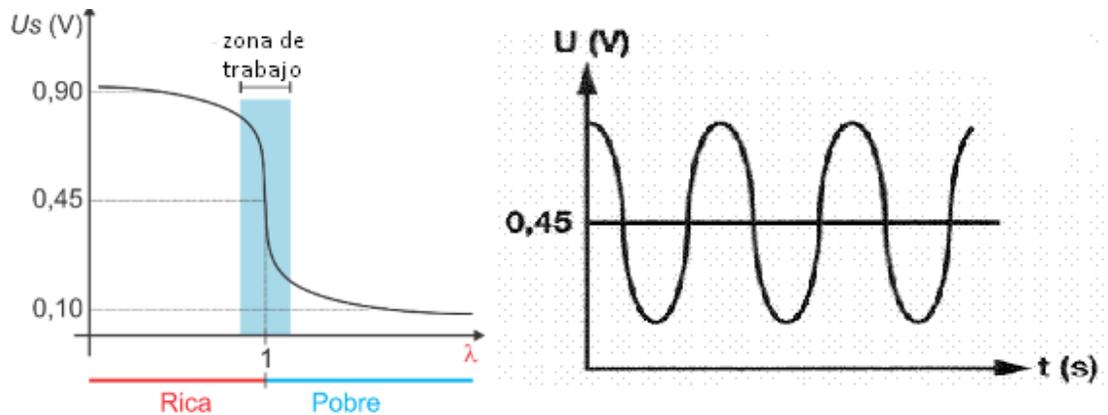


Figura 3.7: A la izquierda se observa la curva característica de la sonda  $\lambda$ , a la derecha la información entregada en un vehículo.

Como la información suministrada por este sensor no es instantánea, ya que los gases demoran un tiempo en llegar a la posición de la sonda, más el retraso de lectura propio del sensor,

no se puede lograr un control de inyección ideal, por lo que la información de este sensor se va a encontrar variando casi de manera senoidal entre valores cercanos a 0 y a un 1V. Por lo cual no se va a cumplir la dosificación estequiométrica en todo momento, sino que se va a cumplir con un pequeño margen de tolerancia.

La sonda lambda cuenta con la particularidad que para entregar una señal coherente debe contar con temperatura elevada. Como se encuentra situada en un lugar que levanta grandes temperaturas, en algunos vehículos no requiere de ninguna ayuda, pero en otros casos requiere de una calefacción adicional.

### 3.2.6. Sensor de detonación

El sensor de detonación se encuentra ubicado sobre el bloque del motor, y su función es la de informar sobre el exceso de avance del encendido a la ECU. Esto lo realiza interpretando los ruidos sucedidos en el motor y variando su información, de modo que la central electrónica corrija demorando unos grados el avance del encendido, que se explica en la *sección 3.5*.

Esta situación aparte de desfavorecer al rendimiento del motor, puede traer serias complicaciones mecánicas. El ruido escuchado en un motor con exceso de avance es similar a un cascabeleo. En la *figura 3.8* se muestra una lectura de dicho sensor, se puede observar que ocurre una explosión con demasiado ruido, en la explosión siguiente no ocurre lo mismo.

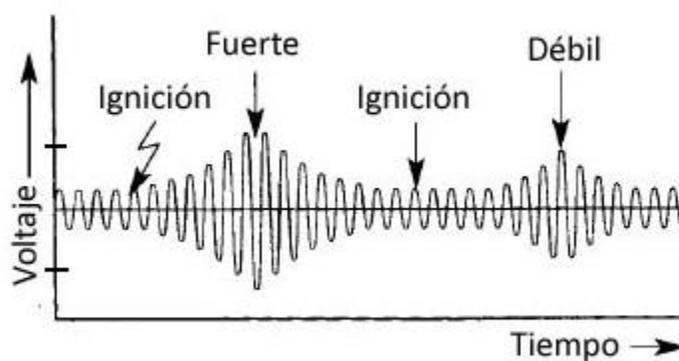


Figura 3.8: Lectura de un sensor de detonación.

La central electrónica puede ir modificando el valor umbral necesario para interpretar que el motor trabaja avanzado, especialmente en situaciones de máximas prestaciones.

---

### 3.3. Actuadores

Se denominan actuadores a todos aquellos componentes que requieren de la habilitación de la ECU, mediante una tensión de alimentación, para ejecutar una tarea específica, a continuación se detallan los de mayor relevancia en cuanto a la inyección y encendido electrónico.

#### 3.3.1. Inyector de combustible

El inyector o electroinyector, es un actuador que permite el paso de combustible de manera precisa y controlada, expulsándolo de manera pulverizada, para una mejor inserción en la cámara de combustión. Dicho control se realiza de forma eléctrica por la ECU.

En un vehículo naftero puede haber sistemas de inyección monopunto, es decir que el motor solo cuenta con un inyector, común a todos los cilindros, el cual se encuentra por encima del cuerpo de la mariposa de admisión. Como también hay sistemas de inyección multipunto, en donde el motor cuenta con 4 inyectores, uno por cilindro, y cada uno de estos se encuentra montado sobre una rampa, o riel, de inyección, en uno de sus extremos, y el otro extremo ingresa sobre el múltiple de admisión. Como varía sustancialmente la cantidad de combustible que penetra al cilindro, con respecto a la ubicación de los inyectores, en la actualidad los motores nafteros cuentan con los inyectores prácticamente por encima de la válvula de admisión. En la *figura 3.9* se puede ver como pulverizan diversos inyectores.

El funcionamiento del inyector radica en excitarlo con una tensión de 12V, de manera que la bobina que tiene en su interior al estar magnetizada, desplace una aguja y permita el paso de combustible por los orificios de salida del inyector. El caudal de combustible que entrega el inyector es mínimo, por lo que entonces se debe trabajar con cierta presión de combustible sobre el orificio de entrada del inyector. En un vehículo monopunto, dicha presión de combustible es cercana a 1 bar. En cambio en un vehículo multipunto, la presión ejercida sobre la rampa de inyección, es cercana a los 3 bares.



Figura 3.9: Inyectores montados sobre una rampa de inyección.

Debe tenerse en cuenta que la corriente que demanda el inyector es elevada, ya que la impedancia que presenta es pequeña, por eso los tiempos de apertura del mismo son cercanos a los pocos milisegundos.

### 3.3.2. Bobina de encendido

Este dispositivo tiene como función generar el arco voltaico que ocurre en el electrodo de la bujía, a partir de la orden de mando que envía la central electrónica.

Para lograr la explosión en el cilindro se tiene que contar con una chispa (arco voltaico) capaz de encender la mezcla entre aire y combustible que se encuentra en la cámara de combustión durante la finalización del ciclo de compresión. Para eso la bobina le transfiere su energía a la bujía, y ella logra romper el aislante que representa el aire, mediante una chispa, como se muestra en la *figura 3.10*. La distancia del aislante es levemente menor a 1 milímetro de longitud.



Figura 3.10: Chispa ocurrida en el electrodo de una bujía.

La bobina es un inductor que cuenta con dos bobinados, denominados primario y secundario. Hay una relación de 1000 veces entre ambos. Lo que se logra al conmutar una tensión sobre el bobinado primario, de 12V, es que en el bobinado secundario aparezca una tensión superior a los 10000V.

El consumo que presenta la bobina del primario es elevado, ya que se alimenta con 12V y la impedancia que tiene es mínima, requiriendo un gran gasto de corriente. Por todo esto, los tiempos de conmutación promedio de las bobinas de encendido son apenas unos pocos milisegundos. En promedio dicho tiempo de conmutación es de 3ms, en el caso de ser mucho mas chico que el promedio, ocurren dos situaciones: una, no se logra vencer el aislante que representa el aire en el electrodo de la bujía; segunda, se produce una chispa muy débil que no cuenta con el calor suficiente para encender por completo la mezcla presente en la cámara de combustión. Por el contrario, si el tiempo de conmutación es bastante mayor que el promedio, se corre el riesgo de la ruptura de la bobina de encendido.

Según el tipo de vehículo se pueden encontrar distintas topologías de conexión entre la bobina de encendido y las bujías. Tratándose de un motor de 4 cilindros, se cuenta con 4 bujías. Los vehículos con sistemas de inyección mas antiguos cuentan con un distribuidor que reparte la energía otorgada por una única bobina de encendido, entre los 4 cilindros, entonces el camino entre la bobina y la bujía para la energía es: bobina de encendido-cable de bobina-tapa de distribuidor-rotor-tapa de distribuidor-cable de bujía-bujía. Aquellos vehículos con sistemas de inyección mas modernos prescinden del distribuidor, otorgando una bobina individual por cilindro o una bobina de dos salidas cada dos cilindros, en estos casos las bobinas se unen mediante cables de bujías con las bujías. Cuando se trata de vehículos con bobinas de dos salidas, al conmutar la orden de encendido, ambos cilindros van a contar con un arco voltaico en sus bujías, pero solo uno se tiene en cuenta en el ciclo del motor, que es el cilindro que se encuentra en el ciclo de compresión, el otro cilindro se encuentra en escape y entonces se dice que el encendido es “de chispa perdida”.

---

En cuanto al funcionamiento del motor, todas las topologías de conexión resultan eficaces, pero se tiene un mayor control electrónico sobre aquellas topologías que no cuentan con distribuidor de encendido. Indistintamente, se elige entre los encendidos de bobinas individuales por cilindros y los encendidos de chispa perdida.

### **3.3.3. Relays de abastecimiento**

El relay es un componente que actúa como una llave electrónica, generalmente gobernado por la central electrónica. La función del mismo es alimentar distintos dispositivos que se encuentran en el vehículo, como pueden ser: la central electrónica, los inyectores, las bobinas, la sonda lambda, la bomba de combustible, entre otros.

Está compuesto por una inductancia y un platino. Cuando circula corriente por la bobina, esta hace que el platino conmute, logrando una unión eléctrica entre la tensión de alimentación del relay y alguno de los actuadores recién enumerados. De esta manera con una pequeña circulación de corriente, se pueden controlar grandes alimentaciones. Su característica de bajo consumo es ideal para la ECU.

### **3.3.4. Motor de ralentí o motor de paso a paso**

En cualquiera de los dos casos, la función de estos actuadores es la misma, donde permiten un paso de aire adicional al múltiple de admisión mediante un control electrónico, gobernado por la ECU. Esto es cuando la mariposa de aceleración se encuentra completamente cerrada (o estado de ralentí), la cantidad de aire que entra al motor es mínima, entonces mediante el control de este actuador, ingresa un adicional de masa de aire al motor. De esta manera la central electrónica puede gobernar la frecuencia de rotación del motor, entre otras cosas.

Su implementación se debe principalmente a los regímenes de temperatura en los que trabaja el motor de un vehículo, ya que a bajas temperaturas, de no existir ninguno de estos actuadores, el motor tiene una frecuencia de rotación baja y en algunos casos puede llegar a detener la marcha del mismo. Por el contrario, a elevadas temperaturas la frecuencia de rotación del motor es alta, trayendo inconvenientes para la comodidad del usuario del vehículo. Entonces, al medir la cantidad de revoluciones a las que gira el motor, mas la información que brinda el sensor de temperatura de agua, la central electrónica actúa sobre el motor de paso a paso, o de ralentí, subiendo o bajando la frecuencia de rotación del motor, según lo que se requiera.

---

El motor de ralentí consta de dos orificios, que están separados mediante una membrana que se encuentra unida a un embolo, que se desplaza por la imantación de una inductancia. Esto lo realiza mediante modulación de ancho de pulsos, siendo que cuando los pulsos son anchos el embolo empuja la membrana, logrando que haya una gran circulación de aire entre los orificios del motor de ralentí. En cambio cuando los pulsos son angostos, el embolo desplaza en menor medida a la membrana, logrando una circulación de aire menor entre dichos orificios. Cuando no hay modulación de pulsos, el motor de ralentí permite el mínimo, e incluso nulo, paso de aire.

El motor de paso a paso consta de dos bobinados, que se encuentran solidarios a un embolo que estrangula la circulación de aire entre dos orificios que se encuentran en el cuerpo de la mariposa de admisión y en el múltiple de admisión. La ECU envía pulsos al motor de paso a paso, y este hace ingresar o despedir al embolo, según sea el caso, haciendo aumentar o disminuir la frecuencia de rotación del motor. En el caso que no hubiera pulsos desde la central electrónica, el motor de paso a paso queda inmóvil en su última posición. Entonces si el motor se encontrara regulando a cierto régimen de revoluciones, no varía la marcha del motor al desconectarlo.

En un vehículo con inyección electrónica solo se observa uno de los dos actuadores, esto depende del sistema de inyección que emplea. No existe tendencia de utilizar un actuador en particular.

Cuando se emplea una mariposa electrónica, nombrada en la *sección 3.2.4*, no se utilizan ninguno de estos actuadores, ya que el control que realiza la ECU es suficiente para lograr un régimen de revoluciones preciso.

### **3.3.5. Válvula de recirculación de gases**

Más conocida como válvula EGR (de sus siglas en inglés, recirculación de gases de escape), es un actuador que cumple con la función de reingresar gases quemados que circulan por el caño de escape, en la mariposa de admisión o en el múltiple de admisión. Así de esta manera se logra un mejor aprovechamiento de aquellas combustiones parcialmente quemadas.

Esta válvula está muy asociada con el turbocompresor, tanto en vehículos nafteros como gasoleros, ya que el caudal de aire que comprime el turbo es aire proveniente de la EGR.

---

Como presenta una baja impedancia, el consumo que requiere la misma es considerable. En autos sin turbocompresor la central electrónica la habilita en ciertas condiciones, no de manera permanente. La misma requiere de una alimentación de 12V.

### **3.3.6. Otros actuadores**

Para el análisis presentado en este proyecto no se tienen en cuenta, pero en un automóvil real desempeñan funciones importantes.

El electroventilador es el responsable de que no haya una sobre elevación en la temperatura del refrigerante, cuando el sensor de temperatura de agua informa que la temperatura es mayor a 98°C, la central electrónica acciona el relay correspondiente para poner en marcha el electroventilador y así enfriar el circuito de agua. Comúnmente, cuando la temperatura medida desciende a 92°C, el electroventilador deja de funcionar.

El compresor de aire acondicionado también es accionado por la ECU, para eso se deben cumplir algunas condiciones como ser que la presión de A/C sea mayor a un valor límite y el auto no debe estar en un estado de carga excesivo. La central electrónica no solo activa el compresor, sino que también activa el electroventilador para mantener estabilizada la presión de A/C.

La electroválvula de purga del canister es un actuador que cumple la función de convertir los gases del tanque de nafta en vapor, que luego ingresan a la mariposa de admisión o en el múltiple de admisión. De esta manera, la relación de aire y combustible precisa de una menor cantidad de combustible. Es un actuador poco económico, y no tiene una gran efectividad, por lo que no todos los motores lo utilizan.

La lámpara de anomalías si bien no es un actuador, hay que tenerla presente porque es la única comunicación entre la ECU y el usuario del vehículo. La central electrónica cuenta con una memoria de fallas, cuando identifica que algún sensor y/o actuador no funciona correctamente, enciende dicha lámpara para indicarle al conductor de la existencia de una falla. Seguidamente el conductor debe hacer revisar el automóvil por un taller de la especialidad. Hasta que no se soluciona la falla encontrada, la luz quedara prendida.

---

### **3.4. Principio de funcionamiento de la ECU**

Los sistemas de inyección electrónica se basan en la lectura y procesamiento de los diversos sensores ubicados en el vehículo, para luego ejecutar las ordenes de encendido e inyección, y operar sobre distintas válvulas eléctricas.

Una vez que se procesa la información de estos sensores, la central recurre a los mapas de encendido e inyección y gobierna sobre los distintos actuadores, de manera de lograr la puesta en marcha y obtener las máximas prestaciones del motor.

Resumidamente, la ECU controla de manera precisa y exacta cuatro parámetros para lograr un buen funcionamiento del motor. Estos son:

- Avance de encendido: cantidad de grados que debe modificar en la conmutación del encendido, con respecto al PMS del cilindro.
- Avance de inyección: cantidad de grados que debe modificar al momento de apertura del inyector, con respecto al PMS del cilindro.
- Tiempo de conmutación del encendido: cantidad de tiempo que debe conmutar la bobina de encendido.
- Tiempo de apertura del inyector: cantidad de tiempo que debe pulverizar combustible el inyector hacia el múltiple de admisión.

Para lograr un control óptimo sobre dichos parámetros la central electrónica debe interpretar, manipular y procesar todos los datos obtenidos de los sensores del motor, realizando un continuo seguimiento de los mismos una vez que el motor se pone en marcha. Este control se realiza en un lazo cerrado, por lo que la central electrónica cuenta con una señal de realimentación  $\lambda$  proveniente del escape, que indica la relación entre aire y combustible de la mezcla.

### **3.5. Mapa de inyección y mapa de encendido**

También denominados curvas de avance de inyección y de encendido, estos mapas contienen información sobre el avance, o el momento de disparo, de los inyectores y las bobinas de encendido.

Si bien se explica que la orden de disparo tanto para la inyección como para el encendido, debe ser cuando el cilindro se encuentra en el PMS en el ciclo de compresión, con el pasar de los

---

años se descubre que otorgándole una orden de disparo de encendido adelantada respecto al PMS, se obtiene un mayor rendimiento del motor. Esto se conoce incluso antes de la aparición de los sistemas de inyección. Seguidamente, se demuestra que también se obtenían mejores prestaciones del motor modificando el momento de la orden de inyección con respecto al PMS, especialmente en la emisión de gases contaminantes.

Así, la información que brindan las curvas de avance, son los grados de avance que dan mayor rendimiento al motor para diversas situaciones. Entonces los grados de avance son sensibles a la temperatura de agua del motor, a la frecuencia de rotación del mismo, a la cantidad de masa de aire que ingresa, a la posición que se encuentra la mariposa e incluso, pero en menor medida, a la relación de aire y monóxido de carbono que se obtiene en los gases de escape.

Estas curvas son obtenidas por las empresas que fabrican vehículos, y cada modelo tiene las suyas particulares. Dependen de diversos factores, como son la cilindrada del motor, la relación estequiométrica entre aire y combustible que se desea, la compresión del motor, etc. Entonces, conociendo las lecturas aportadas por los sensores del vehículo, la central electrónica debe actuar sobre los inyectores y las bobinas, en consecuencia de lo que las tablas de avance demanden. En la mayoría de los sistemas de inyección, estas curvas se encuentran grabadas en una memoria ROM.

### **3.6. Tiempo de apertura del inyector y de conmutación del encendido**

En ambos casos, el tiempo de conmutación es un factor importante a tener en cuenta por la central electrónica. En el caso del inyector, cuanto mayor es el tiempo, mas cantidad de combustible ingresa al múltiple de admisión, pudiendo enriquecer la mezcla y quitándole rendimiento al motor, entre otros efectos posibles. Pero si el tiempo es menor al debido, la mezcla se empobrece y nuevamente baja el rendimiento del motor. Es esencial que el vehículo respete la presión de combustible que deben tener los inyectores, según impone el fabricante, ya que el caudal del inyector es totalmente proporcional al tiempo de apertura del mismo y a la presión que se le ejerce.

En el caso del encendido, al tratarse de una inductancia, el tiempo de conmutación hace que la bobina este alimentada con 12V entre sus bornes, gobernando la cantidad de energía con la que va a trabajar, ya que la energía es proporcional al tiempo que se conmuta la bobina. Un tiempo de conmutación mayor al estipulado, puede traer consecuencias no deseadas en la bobina, como su ruptura. Si el tiempo de conmutación fuera menor, puede pasar que no se produzca el arco voltaico o, de producirse, que no tenga la misma intensidad que lo estipulado, siendo su consecuencia una merma en el rendimiento del motor.

---

## 4. Modelo del motor

### 4.1. Introducción

Uno de los objetivos planteados en el presente trabajo es lograr exponer todo el marco teórico necesario para la implementación de una central electrónica de inyección. Lógicamente la manera mas completa de poner a prueba el controlador que se busca implementar es ensayarlo directamente sobre el motor de un vehículo y contar con una serie de instrumentos de medición que permitan relevar las variables de interés, por lo tanto el motor debe estar en un banco de pruebas de motores. Como no es posible contar con todos los componentes recién mencionados, incluyendo el motor, se plantea la necesidad de ubicar una plataforma en donde se puedan realizar las distintas pruebas. De lo anterior, surge la idea de encontrar un modelo matemático de un motor real sobre el cual realizar los ensayos.

De esta forma se puede ensayar el funcionamiento sobre el mismo de manera computacional utilizando programas de simulación, con la ventaja de no requerir sofisticados equipos de mediciones, ni precisar de un espacio físico para poder alojar mínimamente a dicho motor, y en el caso de operar de manera errónea, no se corre el riesgo de dañar alguna parte del motor.

Cuanto mas preciso es el modelo, mas fieles son los resultados obtenidos en las simulaciones. Por eso la exactitud del mismo viene dado principalmente por el tipo de acción que se quiere evaluar sobre el motor.

Como por el momento no existe un modelo de motor de combustión interna que simule todas las variables de interés en un motor y en diversas condiciones, lo que se realiza son modelos orientados sobre funciones mas específicas. A continuación se nombran los mas utilizados:

- Modelos orientados al control de inyección electrónico.
- Modelos orientados al control de encendido electrónico.
- Modelos orientados a la evolución termodinámica.
- Modelos orientados a la formación de gases contaminantes.
- Modelos orientados al diseño de motores.

---

Para poder obtener las ecuaciones que gobiernen el modelo, primeramente se debe contar con una base teórica del fenómeno a describir, seguidamente se formulan las ecuaciones que rigen el comportamiento y por último se debe constatar con lo que sucede en la realidad, para este último paso, en el caso de un motor, se debe contar con sensores capaces de medir variables físicas en condiciones poco favorables, como por ejemplo medir la temperatura en la cámara de combustión en un periodo de tiempo pequeño. Si las mediciones realizadas son similares a las enunciadas en el modelo, se puede validar este último.

## 4.2. Desarrollo del modelo

Anteriormente se menciona la necesidad de medir las variables analizadas en un motor de combustión interna, para poder acreditar el modelo que se realiza. Como no se dispone del material necesario para poder realizarlas, ya que es costoso y de difícil obtención, se utilizó la base de un modelo enunciado en por Nevot Cercós<sup>1</sup>. que fue corroborado en un banco de prueba de motores y con diversos sensores de precisión.

El modelo se desarrolló en base a un motor SEAT con las siguientes características:

- 1.6 litros de cilindrada.
- 74 KW de potencia máxima.
- Sistema de inyección SIMOS-4S2.
- Inyección multipunto: un inyector por cada cilindro.
- Inyección indirecta: los inyectores van montados sobre el múltiple de admisión.
- Inyección secuencial: cada inyector pulveriza en un momento determinado independiente de los demás.

Para la realización del modelo se tiene en cuenta el diagrama que se observa en la *figura 4.1*, donde el aire ingresa por la mariposa de admisión y se dirige hacia la válvula de admisión, mientras atraviesa el múltiple de admisión se combina con la pulverización de nafta que emite el inyector, por lo que se forma la mezcla de aire y combustible. Una vez que se abre la válvula de admisión, la mezcla ingresa a la cámara de combustión, y al finalizar el ciclo de compresión del motor en la bujía aparece una chispa que hace explotar la mezcla. Durante el ciclo de escape, los gases resultantes se liberan a través de la válvula de escape y recorren el múltiple de escape hasta la ubicación de la sonda Lambda.

---

<sup>1</sup> Javier Nevot Cercós, *Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales*, Cataluña, 1999, p. 3.1 – 3.37.

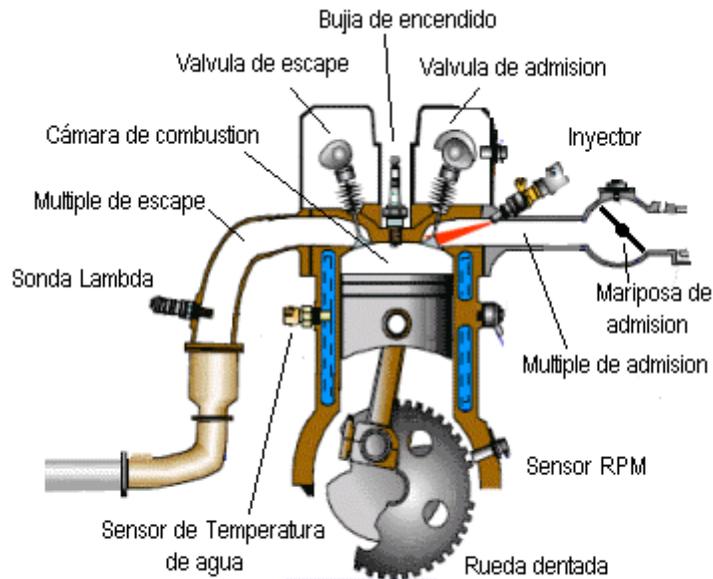


Figura 4.1: Diagrama de modelo del motor.

Por lo tanto se evaluarán los siguientes submodelos: evolución del aire a través de la mariposa de admisión, evolución del aire sobre la válvula de admisión, dinámica de la presión en el múltiple de admisión, pulverización de combustible, evolución del combustible sobre la válvula de admisión, potencia desarrollada por el motor, dinámica del motor, evolución de los gases sobre el múltiple de escape.

Como característica principal, dichos submodelos serán invariantes a la temperatura del motor, o mejor dicho a la temperatura de agua del motor, todo el proceso de comprobación del modelo se realizó con el motor a temperatura de trabajo, que es un valor cercano a los  $90^{\circ}\text{C}$ . Y en todo momento se considera que el sistema de encendido trabaja de una manera óptima, es decir que el instante en el que sucede la chispa es ideal, contribuyendo a lograr las mejores prestaciones del motor.

En el dominio angular, se va a tomar como punto de inicio el instante de inyección, esto sucede aproximadamente unos  $60^{\circ}$  de cigüeñal antes del PMS, que es cuando se abre la válvula de admisión. La combustión de la mezcla se considera instantánea y se completa  $60^{\circ}$  después del segundo PMS. Por último la válvula de escape comienza su apertura luego del segundo PMI, unos  $600^{\circ}$  después del inicio de la inyección.

Para la implementación del modelo y su posterior simulación se utiliza el programa MATLAB y la herramienta SIMULINK.

### 4.3. Modelo del aire

El modelo considera al múltiple de admisión como un depósito de volumen finito, en el mismo hay una presión menor a la presión atmosférica, debido al bombeo que realiza cada cilindro durante el ciclo de admisión, como se muestra en la *figura 4.2*. Entonces el aire ingresa por la mariposa de admisión a causa de la diferencia de presiones, y se dirige hacia la válvula de admisión que se encuentre abierta. Luego se puede aplicar la ecuación de continuidad de masa de aire sobre el múltiple de admisión, donde la variación de masa sucedida dentro del múltiple es igual al caudal másico entrante por la mariposa, expresado como  $\dot{m}_{amar}$ , menos el caudal másico saliente por las

válvulas de admisión, representado por  $\sum_1^4 \dot{m}_a$ , obteniéndose:

$$\frac{dm_{aadm}}{dt} [Kg/h] = \dot{m}_{amar} [Kg/h] - \sum_1^4 \dot{m}_a [Kg/h] \quad (4.1)$$

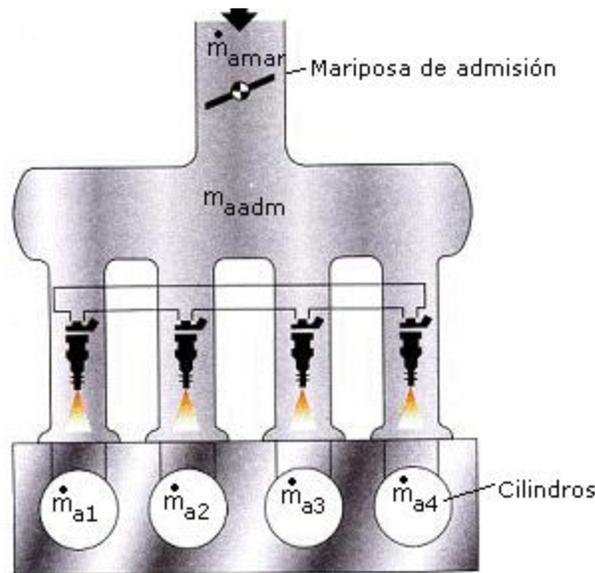


Figura 4.2: Paso de aire por el múltiple de admisión.

---

#### 4.4. Aire por la mariposa de admisión

El modelo se trata como el caso de un fluido compresible que atraviesa un conducto, impulsado por una diferencia de presiones, en el que se produce una reducción de sección, debido a la mariposa. Basándose en la ecuación sugerida por Taylor<sup>2</sup> se define:

$$\dot{m}_{amar}(\alpha, \phi) = \dot{m}_{amar}^{\max} \cdot C_d \cdot f(\alpha) \cdot f(\phi) \quad (4.2)$$

Donde  $\dot{m}_{amar}^{\max} [Kg/h]$  es el caudal de aire máximo en ,  $C_d$  es el coeficiente de descarga,  $D_{mar} [mm]$  es el diámetro de la mariposa de admisión,  $P_{adm}$  y  $T_{adm}$  son la presión y temperatura, en grados K, respectivas del múltiple de admisión ,  $P_{amb}$  es la presión del ambiente,  $f(\alpha)$  es el coeficiente de sección, siendo  $\alpha [^\circ]$  el ángulo de apertura de la mariposa,  $\phi$  es el cociente entre las presiones por encima y por debajo de la mariposa de admisión y  $R [J/Kg.K]$  es la constante universal de los gases. Entonces:

$$\phi = \frac{P_{adm} [kPa]}{P_{amb} [kPa]} \quad (4.3)$$

El factor de presión se calcula mediante la expresión de Saint Venant<sup>3</sup> , luego de haber tenido en cuenta la presión crítica de Laval. Entonces se define:

$$f(\phi) = \begin{cases} \sqrt{7(\phi^{1.4286} - \phi^{1.7143})} \rightarrow 0,528 \leq \phi \leq 1 \\ 0,9586 \rightarrow \phi < 0,528 \end{cases} \quad (4.4)$$

El factor de sección junto al coeficiente de descarga se obtuvo de manera experimental en el banco de pruebas del motor, se aproximó mediante un polinomio de quinto grado y se expresa:

---

<sup>2</sup> Taylor C.F., The internal-combustion engine in theory and practice, Vol 1, The M.I.T. Press, 1990, cap. 2-3.

<sup>3</sup> Javier Nevot Cercós, *Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales*, Cataluña, 1999, p. 3.18.

---


$$f(\alpha).C_d = 1,734.10^{-3}\alpha + 2,731.10^{-5}\alpha^2 - 4,685.10^{-6}\alpha^3 + 1,491.10^{-7}\alpha^4 - 9.894.10^{-10}\alpha^5 \quad (4.5)$$

En cuanto al factor de máximo caudal de aire se tuvo que modificar la expresión, ya que la misma no correspondía con los valores enunciados posteriormente en el desarrollo de Nevot Cercós<sup>4</sup>, se recurre entonces a la siguiente formula:

$$\dot{m}_{amar}^{\max} = \frac{\pi.D_{mar}^2.3600}{4} \sqrt{\frac{2(p_{amb} - p_{adm}^{\min})R.T_{adm}}{P_{amb}}} = 3056,46 \frac{Kg}{h} \quad (4.6)$$

Como la *ecuación 4.2* no se cumple para ángulos grandes y velocidades bajas, se considera una formula lineal dependiente únicamente de las revoluciones del motor, donde n[RPM] es la cantidad de revoluciones que gira el motor en un minuto y los coeficientes son obtenidos de manera experimental mediante las pruebas en el banco de motor, obteniéndose:

$$\dot{m}_{amar}(n) = a + b.n = -21.08 + 0.0549.n \quad (4.7)$$

Entonces se obtiene una ecuación definitiva del caudal de aire por la mariposa, la cual se cumple en todas las condiciones de funcionamiento, se define como:

$$\dot{m}_{amar} = \min(\dot{m}_{amar}(\alpha, \phi), \dot{m}_{amar}(n)) + \dot{m}_{amar}^0 \quad (4.8)$$

Donde  $\dot{m}_{amar}^0$  es el caudal de aire que circula cuando el motor se encuentra en la posición de ralenti, esto es cuando la mariposa se encuentra en su menor apertura angular. Su valor es

$$\dot{m}_{amar}^0 = 3 \frac{Kg}{h}.$$

---

4 Javier Nevot Cercós, *Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales*, Cataluña, 1999, p. 3.1 – 3.37.

En la *figura 4.3* y *figura 4.4* se aprecian los diagramas en bloques del submodelo de la mariposa de admisión.

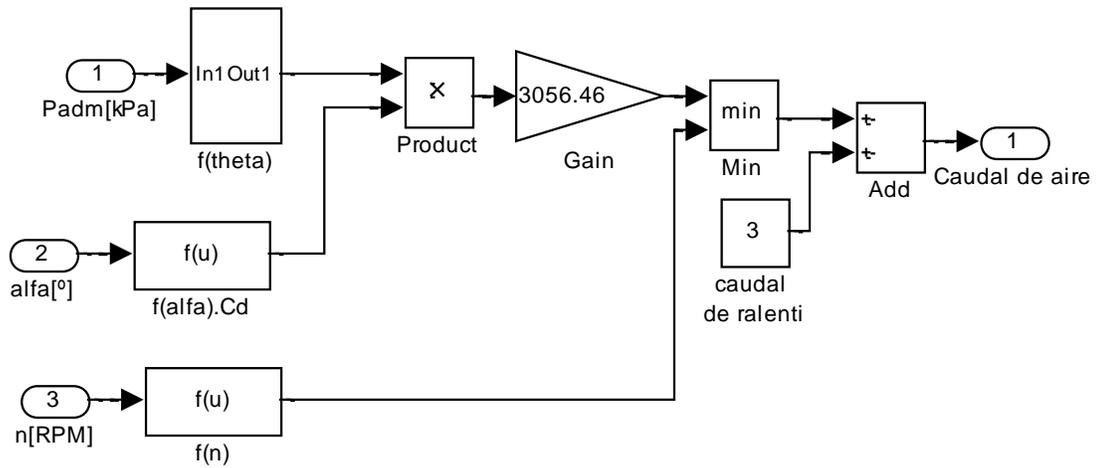


Figura 4.3: Submodelo de la mariposa de admisión.

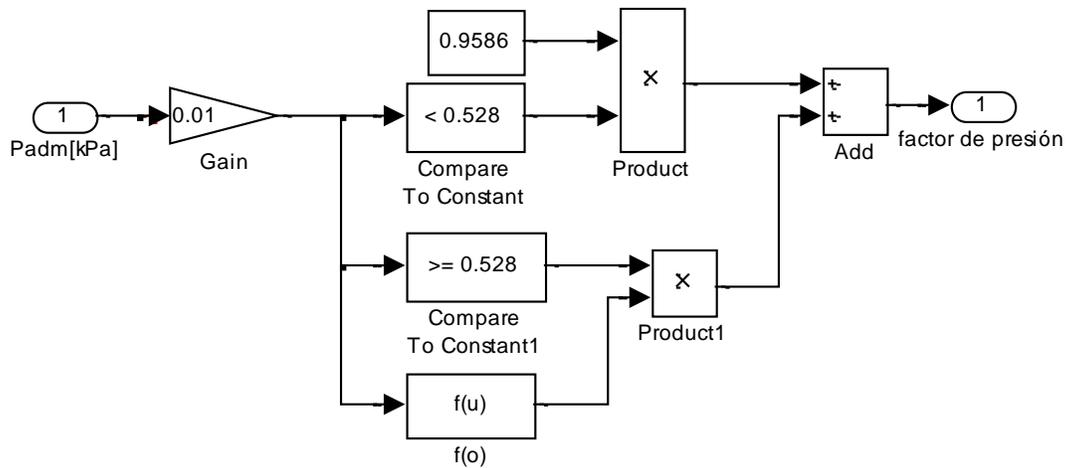


Figura 4.4: Factor de depresión.

---

## 4.5. Válvula de admisión

Para determinar este submodelo si bien es válido un análisis similar al descrito para el submodelo de la mariposa de admisión, se vuelve de mucha complejidad la obtención del área efectiva de la válvula y el coeficiente de descarga. Entonces se decide por trabajar con el rendimiento volumétrico  $\eta_{vol}$ , que es un valor promediado para todo el ciclo de trabajo. Se define como el cociente entre el volumen de aire admitido y el que cabría teóricamente en el cilindro para determinadas condiciones de presión y temperatura. Entonces la expresión es:

$$\dot{m}_a = \frac{1}{2} n.V \cdot \rho_{adm} \cdot \eta_{vol} = \frac{1}{2} n.V \cdot \frac{p_{adm}}{R.T_{adm}} \cdot \eta_{vol} \quad (4.9)$$

Donde  $V$  [l] es la cilindrada del motor, el factor de 0,5 proviene del hecho que el ciclo Otto requiere dos vueltas enteras del motor. Realizando las conversiones de unidades correspondientes, el caudal de aire es:

$$\dot{m}_a \left[ \frac{Kg}{h} \right] = 30 \cdot n.V \frac{p_{adm}}{R.T_{adm}} \eta_{vol} \quad (4.10)$$

La expresión que define el rendimiento volumétrico se obtiene de Hendricks<sup>5</sup>, que sostiene que tiene una dependencia tanto de las revoluciones del motor como con la presión del múltiple de admisión, esta es:

$$\eta_{vol}(n, p_{adm}) = \eta_{vol0} + \eta_{vol1n} \cdot n + \eta_{vol2n} \cdot n^2 + \eta_{vol1p} \cdot p_{adm} + \eta_{vol2p} \cdot p_{adm}^2 \quad (4.11)$$

---

<sup>5</sup> Elber Hendricks, *Mean value modelling of spark ignition engines*, SAE Paper 900616, 1990, Cap. 2-3.

Los valores de los coeficientes se obtienen mediante ensayos en el banco de pruebas de motor, y se ajustaron de manera de obtener el menor error posible, por lo que el rendimiento volumétrico para este motor queda definido como:

$$\eta_{vol}(n, p_{adm}) = 3,116 \cdot 10^{-1} + 1,305 \cdot 10^{-4} \cdot n - 1,322 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot p_{adm} - 2,584 \cdot 10^{-5} \cdot p_{adm}^2 \quad (4.12)$$

En la *figura 4.5* y *figura 4.6* se observan los modelos en bloque representativos del submodelo del caudal de aire por la válvula de admisión.

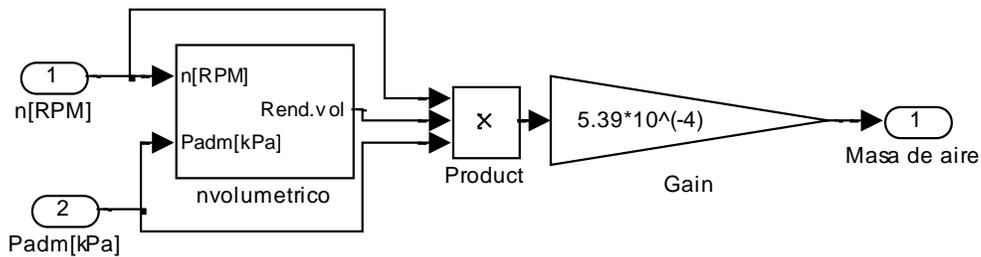


Figura 4.5: Submodelo de la válvula de admisión.

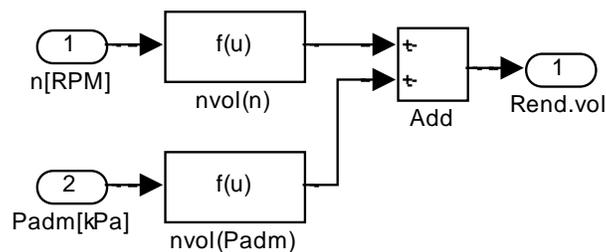


Figura 4.6: Rendimiento volumétrico

## 4.6. Presión del múltiple de admisión

Para obtener una ecuación de estado que rijan el comportamiento de la presión del múltiple de admisión hay que combinar la *ecuación 4.1* con la *ecuación 4.9*, considerando que la temperatura varía tan lento que se puede considerar constante y el volumen del múltiple es constante, entonces se define:

$$\dot{p}_{adm} [kPa/h] = \frac{R.T_{adm}}{V_{adm}} (\dot{m}_{amar} - \sum_1^4 \dot{m}_a) \quad (4.13)$$

Donde  $V_{adm} [l]$  es el volumen del múltiple de admisión. Entonces, sustituyendo la *ecuación 4.10* se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{p}_{adm} = \frac{R.T_{adm}}{V_{adm}} \dot{m}_{amar} - 30 \frac{V}{V_{adm}} n \cdot \eta_{vol} \cdot p_{adm} = 22171 (\dot{m}_{amar} - \dot{m}_a) \quad (4.14)$$

En la *figura 4.7* se muestra el diagrama en bloques que representa el submodelo de la presión en el múltiple de admisión.

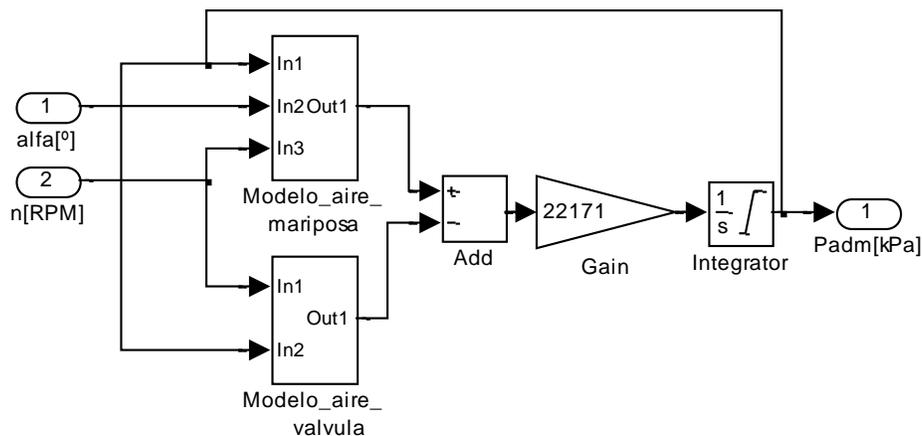


Figura 4.7: Submodelo de presión en el múltiple de escape.

---

## 4.7. Inyección de combustible

Como el inyector es el responsable de introducir combustible en la mezcla presente en el múltiple de admisión, tiene un submodelo representativo que determine las variables a considerar. Él mismo pulveriza luego de recibir la orden de habilitación de la ECU, mediante un pulso finito de tiempo denominado  $T_i$ [ms]. Como el inyector es un componente mecánico, precisa de un tiempo muerto para vencer la inercia antes de pulverizar el combustible, representado como  $t_{oiny}$ [ms]. Luego de superar dicho tiempo, se considera que inyecta una cantidad de combustible lineal con el tiempo de apertura que recibe, en otras palabras, lineal con  $T_i$ , entonces la ecuación que lo define es:

$$m_{fi} \left[ \frac{mg}{ciclo} \right] = K_{iny} \left[ \frac{mg}{ms} \right] (T_i [ms] - t_{oiny} [ms]) \quad (4.15)$$

En donde  $m_{fi}$  es la masa de combustible inyectado en el múltiple de admisión y  $K_{iny}$  es la ganancia del inyector. Las constantes son proporcionadas por el fabricante de los inyectores, donde:

$$K_{iny} = 2,5 \left[ \frac{mg}{ms} \right]$$

$$t_{oiny} = 0,6ms$$

Similar al proceso descrito para modelar el aire, con el combustible se decide trabajar con masa de combustible inyectado, ya que es un proceso continuo. Teniendo en cuenta que se realizan dos inyecciones cada vuelta del motor, y realizando los cambios de unidades se obtiene:

$$\dot{m}_{fi} \left[ \frac{kg}{h} \right] = m_{fi} \left[ \frac{mg}{ciclo} \right] n [RPM] \cdot 2.60 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-4} m_{fi} \left[ \frac{mg}{ciclo} \right] \cdot n [RPM] \quad (4.16)$$

Pudiendo obtenerse el diagrama en bloques del submodelo del inyector como se muestra en la *figura 4.8*.

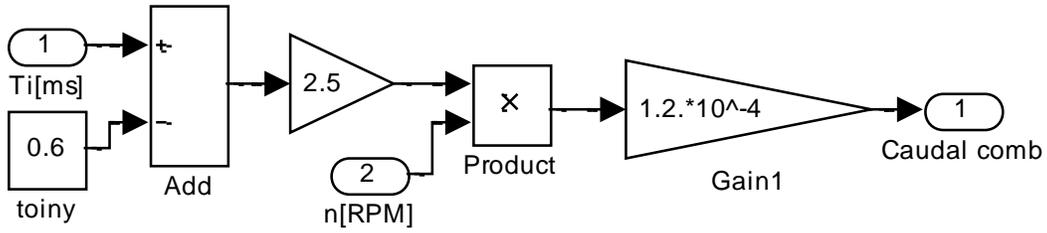


Figura 4.8: Submodelo del inyector.

#### 4.8. Inyección del combustible en el múltiple de admisión

Para modelizar el fenómeno que sucede se recurre a la *figura 4.9*, en donde el caudal de combustible que pulveriza el inyector se divide en dos fracciones, una denominada  $1-X$  que se vaporiza e ingresa directamente al interior del cilindro, y otra denominada  $X$  que se queda depositada sobre la superficie del múltiple como una película líquida. Esta película es el resultado del impacto del combustible pulverizado en parte contra la pared del múltiple de admisión, denominado  $X_m$ , y en parte contra la válvula de admisión, denominado  $X_v$ , si esta se encuentra cerrada en el momento que se produce la inyección. Considerando que  $\dot{m}_{fi} [Kg/h]$  es el caudal de combustible inyectado, entonces se obtiene:

$$\dot{m}_{fi} = (1-X)\dot{m}_{fi} + X\dot{m}_{fi} = (1-X)\dot{m}_{fi} + X_m\dot{m}_{fi} + X_v\dot{m}_{fi} \quad (4.17)$$

$$X = X_m + X_v \quad (4.18)$$

La fracción depositada en forma líquida tiene dos maneras de llegar al cilindro, por transporte lento del líquido o por vaporización del combustible. Entonces la variación de masa en cada una de las películas depositadas sobre el múltiple y la válvula, se pueden expresar como diferencia entre la cantidad que se deposita y la que sale. Llegando a obtenerse:

$$\text{Múltiple: } \frac{dm_{lm}}{dt} = X_m\dot{m}_{fi} - (\dot{m}_{fvm} + \dot{m}_{flm}) \quad (4.19)$$

$$\text{Válvula: } \frac{dm_{lv}}{dt} = X_v\dot{m}_{fi} - (\dot{m}_{fvv} + \dot{m}_{flv}) \quad (4.20)$$

Donde  $\frac{dm_l}{dt} [\frac{Kg}{h}]$  son las variaciones de masa de combustible,  $m_l [Kg]$  es la cantidad de combustible depositado en forma líquida,  $\dot{m}_{fv} [\frac{Kg}{h}]$  es el caudal de combustible que se convierte en vapor y  $\dot{m}_{fl} [\frac{Kg}{h}]$  es el caudal de combustible que ingresa al cilindro de forma líquida. Los subíndices m y v son referencias al múltiple de admisión y a la válvula de admisión respectivamente.

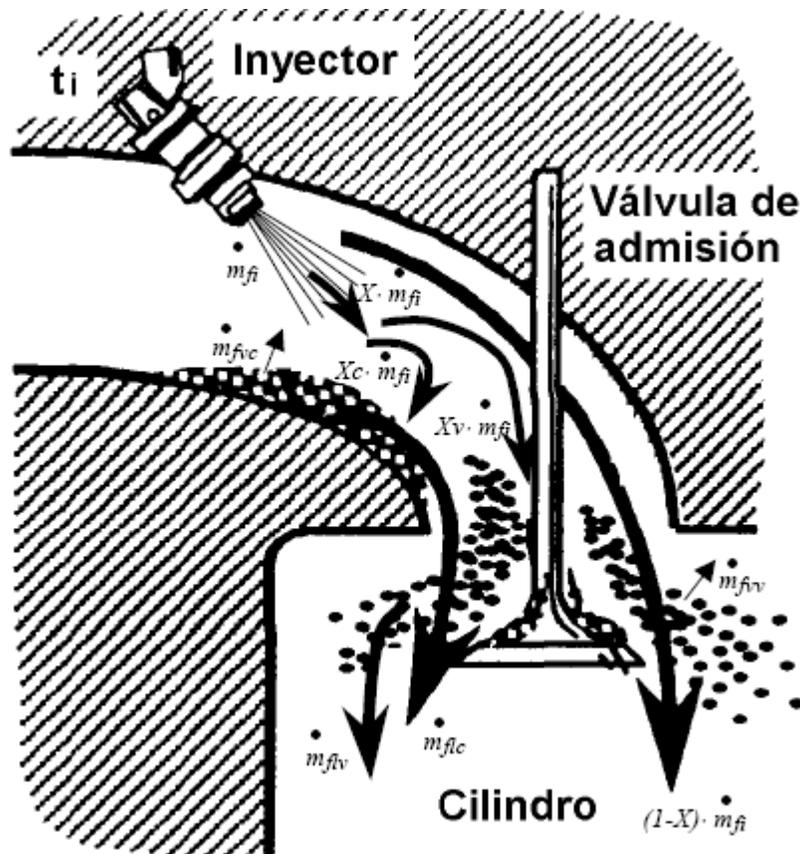


Figura 4.9: Inyección del combustible sobre el múltiple de admisión.

Unificando la ecuación 4.19 con la ecuación 4.20, se obtiene el caudal total del combustible inyectado que se convierte en líquido menos el que ingresa al cilindro:

$$\dot{m}_{fl} = \frac{dm_{lm} + dm_{lv}}{dt} = X_m \dot{m}_{fi} + X_v \dot{m}_{fi} - (\dot{m}_{fvm} + \dot{m}_{flm} + \dot{m}_{fvv} + \dot{m}_{flv}) \quad (4.21)$$

$$\dot{m}_{fl} = X \cdot \dot{m}_{fi} - (\dot{m}_{fvm} + \dot{m}_{flm} + \dot{m}_{fvv} + \dot{m}_{flv}) \quad (4.22)$$

Esta última ecuación se puede simplificar suponiendo que  $X_m \gg X_v$ , ya que el múltiple es mas frío que la válvula, y según la teoría de Aquino<sup>6</sup>, la cantidad de combustible que abandona la película puede aproximarse por un factor de la masa existente en la propia película, denominado  $\tau_{fl}[s]$ , resultando:

$$(\dot{m}_{fvm} + \dot{m}_{flm} + \dot{m}_{fvv} + \dot{m}_{flv}) = \frac{1}{\tau_{fl}} m_{fl} \quad (4.23)$$

$$\dot{m}_{fl} = X \cdot \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fl}} m_{fl} \quad (4.24)$$

Solo en régimen estacionario se cumple que la variación es nula y la masa del combustible que se convirtió en película líquida, constante. Entonces el caudal total de combustible que llega al cilindro, denominado  $\dot{m}_f [Kg]$ , es igual a la cantidad que llega en forma de vapor, más la aportada por la película líquida:

$$\dot{m}_f = (1 - X) \dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_{fl}} m_{fl} \quad (4.25)$$

Estas dos últimas ecuaciones son las que describen el modelo de la evolución del combustible en el múltiple de admisión, si se les realiza la transformada de Laplace se obtiene:

$$\begin{cases} \dot{m}_f(s) = (1 - X) \dot{m}_{fi}(s) + \frac{1}{s \cdot \tau_{fl}} m_{fl}(s) \\ \dot{m}_{fl}(s) = X \cdot \dot{m}_{fi}(s) - \frac{1}{s \cdot \tau_{fl}} m_{fl}(s) \rightarrow \dot{m}_{fl}(s) = \dot{m}_{fi}(s) \frac{1}{X} \frac{1 + s \cdot \tau_{fl}}{s \cdot \tau_{fl}} \end{cases} \quad (4.26)$$

<sup>6</sup> Aquino C.F., *Transient A/F control characteristics of the 5 liter central fuel injection engine*, SAE 810494, 1981, Cap. 3.

Trabajando con ambas expresiones, buscando suprimir  $\dot{m}_{fl}(s)$ , se llega a una función de transferencia general:

$$\frac{\dot{m}_f(s)}{\dot{m}_{fl}(s)} = \frac{1 + (1 - X)s\tau_{fl}}{1 + s\tau_{fl}} \quad (4.27)$$

Como resultado de esta transferencia se tiene un polo en  $\tau_{fl}$  y un cero en  $(1 - X)\tau_{fl}$ , como  $0 < X < 1$  el cero en frecuencia está por debajo del polo.

Los valores de los coeficientes se obtienen de manera experimental, siendo los mismos:  $\tau_{fl} = 0,08$  y  $X = 0,3$ . De esta forma se obtiene la ecuación 4.28 que representa el submodelo de la evolución del combustible en el múltiple y en la figura 4.10 se muestra el diagrama en bloques resultante del submodelo total del combustible inyectado.

$$\frac{\dot{m}_f(s)}{\dot{m}_{fl}(s)} = \frac{1 + (1 - 0,3)0,08.s}{1 + 0,08.s} \quad (4.28)$$

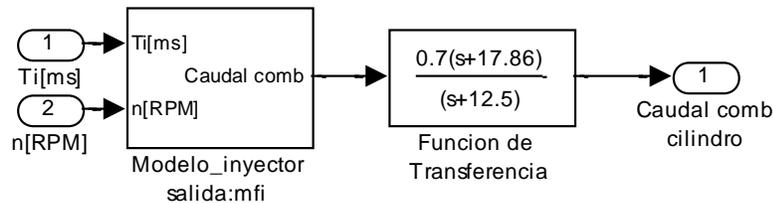


Figura 4.10: Submodelo de la inyección de combustible

---

## 4.9. Dinámica del motor

Si bien el modelo completo presentado por Nevot Cercós<sup>7</sup> contempla todas las cargas que tiene que soportar un motor, el objetivo del control a realizar en esta tesis, no requiere que el vehículo se encuentre en movimiento, entonces se van a considerar únicamente todas las resistencias internas que presenta el motor, como son los rozamientos de internos del tren mecánico, la correa de distribución, la bomba de agua, la bomba de aceite y la bomba de servo dirección; descartando todas las resistencias que conlleva un vehículo en movimiento.

### 4.10. Generación del par motor

Se define la potencia mecánica,  $N$ [kW], teóricamente disponible como:

$$N[kW] = \dot{m}_f H_f \eta_t (p_{adm}, \lambda, n) = \frac{\dot{m}_a}{14,57\lambda} H_f \eta_t (p_{adm}, \lambda, n) \quad (4.29)$$

Donde  $H_f$  [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ] es el poder calorífico inferior del combustible, siendo un dato que se obtiene de la gasolina utilizada, y  $\eta_t$  es el rendimiento térmico.

La entrega de potencia de la mezcla al motor se considera instantánea, ocurriendo aproximadamente  $60^\circ$  después del PMS, durante el ciclo de expansión. Como se explicó en *sección 4.2*, la inyección sucede  $60^\circ$  antes que el PMS anterior a este último que se hace referencia. Por lo que se tiene un retardo, denominado  $t_{comb}$  [s], cercano a  $480^\circ$  entre la inyección de combustible al motor y el aporte de potencia, que es el denominado  $\theta_{comb}$  [ $^\circ$ ]. Se puede expresar mediante:

$$t_{comb} [s] = \frac{\theta_{comb}}{360^\circ} \frac{1}{n[\frac{RPM}{60}]} = \frac{480^\circ}{60^\circ \cdot n[RPM]} = \frac{8}{n[RPM]} \quad (4.30)$$

---

<sup>7</sup> Javier Nevot Cercós, *Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales*, Cataluña, 1999, p. 3.1 – 3.37.

El rendimiento térmico es la fracción de la energía que se aprovecha del combustible para producir trabajo mecánico, respecto a la teóricamente disponible a partir de la reacción perfecta. El resto es energía que se pierde, transformándose en calor y en gases sin quemar, los cuales son altamente contaminantes. Si bien no se ha encontrado una modelo que represente con total fidelidad el proceso, se conoce su dependencia con respecto a distintas variables, como son  $p_{adm}$ ,  $\lambda$  y  $n$ . Entonces realizando ensayos experimentales se definen los coeficientes que acompañan a dichas variables, obteniéndose:

$$\eta_t = \eta_{to} \eta_t(p_{adm}) \eta_t(\lambda) \eta_t(n)$$

$$\begin{cases} \eta_t(p_{adm}) = \eta_{tP0} + \eta_{tP1} p_{adm} + \eta_{tP2} p_{adm}^2 = 0,474 + 1,664 \cdot 10^{-2} p_{adm} - 1,315 \cdot 10^{-4} p_{adm}^2 \\ \eta_t(\lambda) = \eta_{t\lambda0} + \eta_{t\lambda1} \lambda + \eta_{t\lambda2} \lambda^2 = -1,34 + 5,3906 \lambda - 3,1043 \lambda^2 \\ \eta_t(n) = \eta_{tn0} + \eta_{tn1} e^{\frac{n}{42740}} = -0,8243 + 1,577 e^{\frac{n}{42740}} \end{cases} \quad (4.31)$$

El valor de  $\eta_{to}$  obtenido si bien era 0,459, se modifica por 1, ya que sino el modelo total no representaba fielmente la curvatura de potencia descrita por el fabricante del automóvil. De esta forma se obtiene una buena aproximación entre el modelo y los datos reales del motor.

En la *figura 4.11* y *figura 4.12*, se puede apreciar el diagrama de bloques que representa a la generación de par del motor.

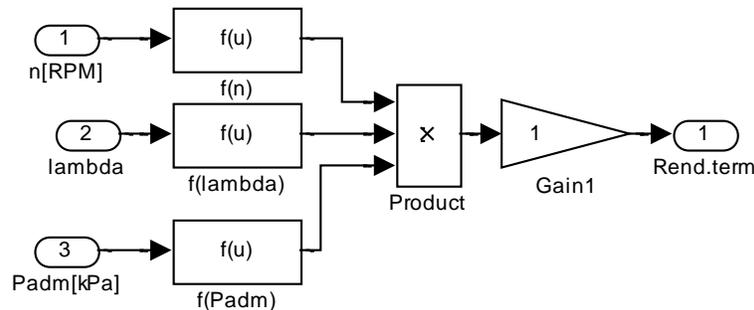


Figura 4.11: Rendimiento térmico.

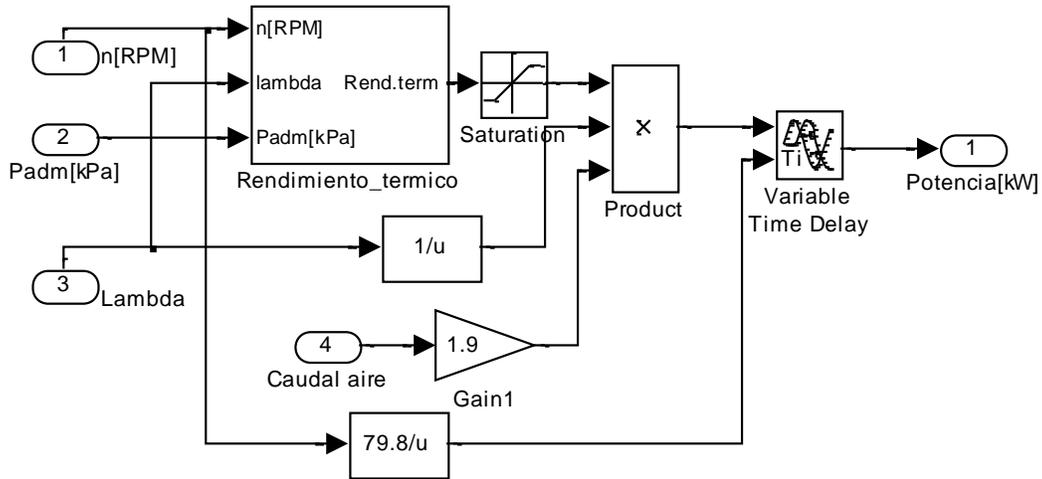


Figura 4.12: Submodelo de la generación de par.

#### 4.11. Dinámica de las revoluciones del motor

La ecuación que gobierna el comportamiento se obtiene a partir de aplicar la segunda ley de Newton sobre el volante del motor. La potencia obtenida de la combustión de la mezcla genera un par indicado, el cual permite vencer las distintas resistencias pasivas del motor. Entonces se parte de:

$$M_{neto} = \dot{n} \cdot I_{mot} = \frac{N[kW \cdot 10^3]}{n[RPM] \frac{2\pi}{60}} - M_f(n, p_{adm}) = \frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \frac{N}{n} - M_f(n, p_{adm}) \quad (4.32)$$

Donde  $M_{neto}[Nm]$  es el par neto,  $\dot{n}$  es la variación de revoluciones del motor,  $I_{mot}[Kg \cdot m^2]$  es la inercia del motor y  $M_f[Nm]$  es el par ocasionado por las pérdidas del motor y la transmisión.

Las resistencias pasivas se pueden agrupar en una sola ecuación que se define a continuación, la misma no es idéntica a la expresada por Nevot Cercós<sup>8</sup>, sino que se le realizaron modificaciones,

<sup>8</sup> Javier Nevot Cercós, *Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales*, Cataluña, 1999, p. 3.1 – 3.37.

e incluso se le agrega una dependencia con la presión en el múltiple de admisión, debido a que en muchos artículos relacionado con modelización de motores así lo hacen. Los coeficientes se obtuvieron de realizar ensayos sobre el modelo total del motor, con el fin de obtener curvas de aceleración y desaceleración aproximadas a la realidad. Todo esto se agrupa en:

$$M_f(n, p_{adm}) = M_{f0} + M_{f1}n + M_{f2}n^2 + p_{adm}(M_{fp0} + M_{fp1}n)$$

$$M_f(n, p_{adm}) = p_{adm}(1,1297 + 3,06 \cdot 10^{-4}n) + 50 + 4,72 \cdot 10^{-4}n + 1,35 \cdot 10^{-6}n^2 \quad (4.33)$$

Entonces se puede definir la dinámica de n como:

$$\dot{n} = \frac{1}{I_{mot}} \left( \frac{N}{n} - M_f(n, p_{adm}) \right) \quad (4.34)$$

En la *figura 4.13* y *figura 4.14* se puede apreciar el submodelo de la dinámica de las revoluciones del motor.

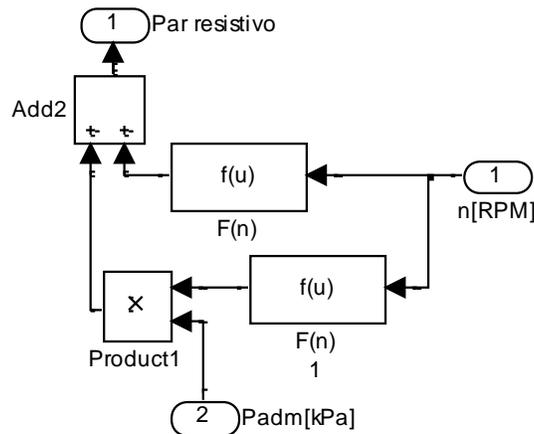


Figura 4.13: Resistencias pasivas del motor.

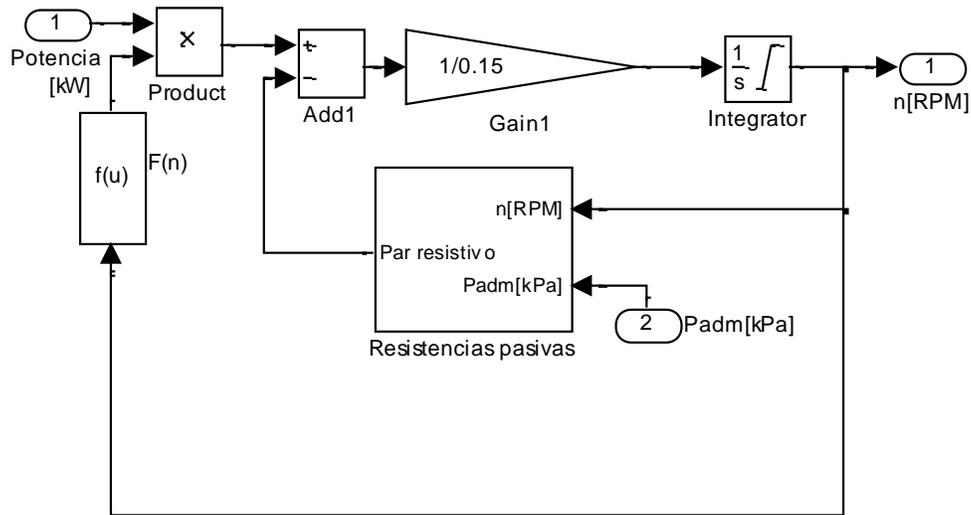


Figura 4.14: Submodelo de la dinámica de las revoluciones del motor.

## 4.12. Dinámica de los gases de escape

Luego de suceder la combustión de la mezcla, el cilindro completa la carrera de expansión y comienza el ciclo de escape, donde se abre la válvula de escape y deja escapar a los gases quemados resultantes de la combustión hacia el múltiple de escape. Este proceso requiere un tiempo que es función únicamente de las revoluciones del motor, entonces definiendo a  $\theta_{esc} [^\circ]$  como el ángulo comprendido entre el instante de inyección de combustible y el de la apertura de la válvula de escape en el mismo cilindro, que es cercano a  $60^\circ$ , se obtiene el retardo de ciclo:

$$t_{cic}(s) = \frac{\theta_{esc} [^\circ / 360]}{n [RPM / 60]} = \frac{\theta_{esc}}{60 \cdot n} = \frac{10}{n} \quad (4.35)$$

Si bien en el trabajo de Nevot Cercós<sup>9</sup>, se realiza un minucioso análisis similar al que se hace en la dinámica del aire sobre la válvula de admisión, la expresión que se obtiene es mediante experimentación con el motor y el vehículo sobre un banco de rodillos.

<sup>9</sup> Javier Nevot Cercós, *Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales*, Cataluña, 1999, p. 3.1 – 3.37.

La prueba consiste en trabajar con dos sondas lambdas, una ubicada en su lugar original y otra colocada lo mas cerca posible de la válvula de escape de algún cilindro. Luego se contempla el defasaje entre ambas mediante la respuesta a un cambio abrupto en el tiempo de inyección, en este caso un escalón. Si bien esta prueba tiene unos condicionamientos, como ser que la primera sonda va a medir los gases residuales provenientes de otro cilindro ya que es imposible ubicarla sobre la misma válvula de escape, y la consideración que ambas sondas presentan las mismas respuestas, especialmente en el retardo de medición, cuando eso no es del todo cierto; pero es una muy buena aproximación al proceso que se quiere describir.

Entonces mediante promediación se obtiene la siguiente curva que representa el valor del retardo de lambda:

$$t_{\lambda} = t_{cic} + t_{tr} = \frac{180,18}{n} + 0,319.e^{-0,175\alpha} \quad (4.36)$$

Donde se observa que depende fuertemente de las revoluciones del motor, pero también tiene una dependencia según el ángulo de apertura de la mariposa, sobre todo en valores pequeños.

En la *figura 4.15* se puede observar el submodelo del retardo de lambda.

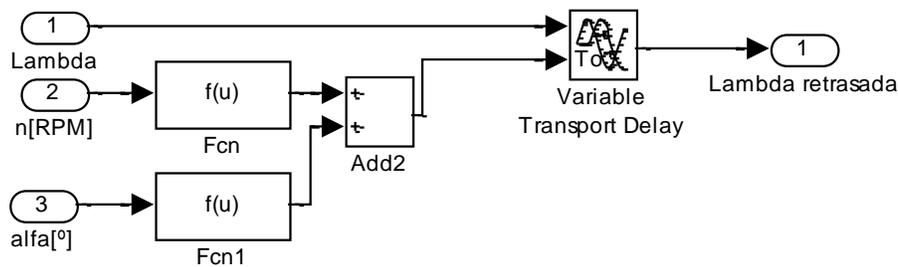


Figura 4.15: Submodelo del retraso de Lambda.

### 4.13. Sonda lambda

Como se explica en *sección 2.3*, la ecuación que representa a la sonda lambda es:

$$\lambda = \frac{1}{14.57} \frac{m_{\text{aire}}}{m_f} \quad (4.37)$$

Hay que añadirle que el fabricante de la sonda con la que cuenta el motor en evaluación especifica que la misma tiene un retardo de medición propio de unos 40ms aproximadamente, el cual ya se tiene en cuenta en el bloque Fcn de la *figura 4.15*. Entonces en la *figura 4.16* se obtiene el submodelo de la sonda, donde se observa que se le añade una constante al valor final, esto se debe a que en la evaluación del modelo completo del motor, el punto de estequiometria no se daba en  $\lambda=1$ , sino que en  $\lambda=0,794$ .

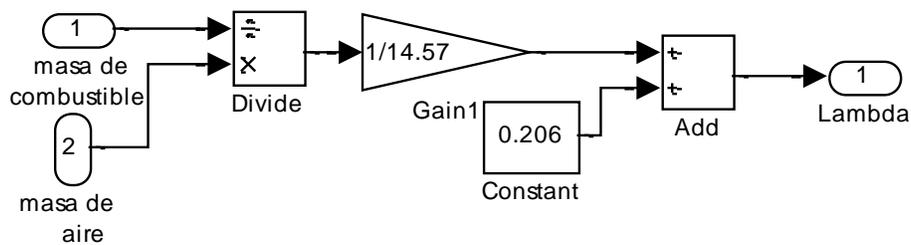


Figura 4.16: Submodelo de la sonda Lambda.

---

## 5. Controlador de inyección

### 5.1. Introducción

Como se menciona en los capítulos anteriores, el motor necesita un control electrónico preciso en el sistema de inyección de combustible y el sistema de encendido. En este capítulo se detalla todo lo que se refiere al primero de estos sistemas.

Se recuerda que hay dos factores principales que se deben controlar para lograr el mejor rendimiento en el motor, estos son el tiempo de apertura de los inyectores, denominado  $T_i$ , y el momento de disparo de los mismos, o también llamado avance de inyección. Como se mencionó en la *sección 3.5*, el avance de inyección afecta directamente sobre la emisión de gases contaminantes, pero no modifica las prestaciones del motor en términos de potencia o consumo de combustible, siempre que se respete que el inyector pulverice previo a la apertura de la válvula de admisión. Como el modelo de motor que se implementa para realizar las simulaciones no contempla la formación de gases contaminantes producto de combustiones incompletas, no se tiene en cuenta una variación del momento de apertura del inyector. Por el contrario el factor  $T_i$ , junto al ángulo de apertura de la mariposa  $\alpha$ , son las únicas variables que dominan el comportamiento del modelo, como se observa en la *figura 5.1*.

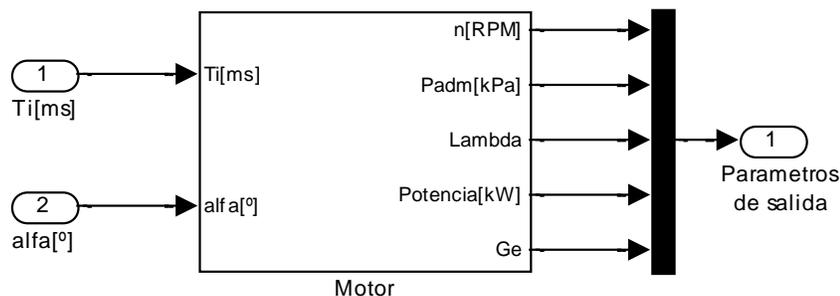


Figura 5.1: Parámetros de entrada y salida del motor.

---

Entonces, el objetivo del controlador de inyección es interpretar todas las lecturas que se obtienen de los sensores ubicados en el motor y realizar la apertura de los inyectores de manera correcta, con el fin de cumplir los requisitos de exigencia que pretende el usuario del vehículo y lograr un dosado lo mas estequiométrico posible.

## **5.2. Estados de carga del motor y estrategias**

Al momento de la conducción de un vehículo, el usuario del mismo realiza distintos tipos de exigencias al motor, mas precisamente son tres tipos: estabilidad de la marcha, aceleración del motor o desaceleración del motor. Para cada caso, las acciones que realiza el controlador son distintas, entonces se pueden definir tres estados para analizar: estado estacionario, transitorio positivo y transitorio negativo del motor.

Cuando las revoluciones del motor se mantienen estables se logra el estado estacionario, para esta condición todas las lecturas de los sensores son constantes, o tienen una mínima variación, salvo la información que emite la sonda lambda. En estos casos, el controlador debe ser capaz de variar el tiempo de apertura de los inyectores para lograr que la información de dicha sonda oscile sobre el valor unitario, dentro de un rango de tolerancia permitido. De esta manera se asegura que el motor logra el menor consumo de combustible y emite la menor cantidad de gases contaminantes.

Cuando se quiere incrementar las revoluciones del motor, sucede el estado transitorio positivo. Esto se logra al realizar una apertura mayor en la mariposa de admisión, permitiendo un pasaje mayor de aire hacia el motor. Durante este transitorio, algunos parámetros del motor se encuentran variando, estos son: la presión del múltiple de admisión, que aumenta en función de las revoluciones del motor que se quiere incrementar; la apertura angular  $\alpha$  de la mariposa de admisión, las revoluciones del motor, y como en todo momento, la información de la sonda lambda. Este transitorio es el mas difícil de controlar y no existe un criterio único a implementar en el mismo, debido a que existe una relación de compromiso que influye en todo momento: si se quiere lograr el incremento de revoluciones en un pequeño lapso de tiempo o si se prioriza el consumo de combustible y se quiere respetar el dosado estequiométrico. En el primero de los casos se busca una rápida aceleración, para lo cual se le inyecta una gran cantidad de combustible al motor, pero se aleja del dosado estequiométrico y el consumo de combustible aumenta como también la generación de gases contaminantes. En el segundo caso, la aceleración del motor va a suceder en un tiempo mayor. Una vez que el motor alcanza las revoluciones que exige el usuario, se procede al estado estacionario nuevamente.

---

El tercer estado, el transitorio negativo, sucede cuando el motor se encuentra en un rango de revoluciones elevado y se quiere lograr que disminuya su velocidad. Esto se logra estrangulando el paso de aire hacia el motor, mediante el cierre angular  $\alpha$  de la mariposa de admisión. Si bien durante este estado los parámetros del motor varían, como en el caso de la presión del múltiple de admisión que disminuye, la estrategia que se utiliza desde el punto de vista de la inyección, depende únicamente de un parámetro, que es  $n$ , las revoluciones del motor. El controlador sensa que se produjo un decremento abrupto de  $\alpha$  e inmediatamente deja de abrir los inyectores, haciendo  $T_i = 0ms$ , entonces las revoluciones del motor disminuyen. Dependiendo del valor de  $\alpha$  y las revoluciones del motor asociadas para ese grado de apertura, un instante antes que  $n$  llegue hasta ese valor, aparecen nuevamente los pulsos de inyección, entonces el motor vuelve a recibir combustible en la mezcla y se llega al estado estacionario. Este tipo de estrategia es utilizada por todos los sistemas de inyección existentes, debido a que si se inyecta combustible en el momento que decrecen las revoluciones del motor, se produce una combustión incompleta, aumentando la formación de gases contaminantes y elevando el consumo de combustible.

Hay que destacar que los cambios que ocurren en el motor cuando se encuentra en estado estacionario y se pasa a un estado transitorio, suceden cuando se desea una aceleración o desaceleración grande, no para pequeños cambios en las revoluciones del motor. Para estos últimos, con variar levemente el tiempo de apertura de los inyectores, sumado a la variación del paso de aire por la mariposa de admisión, es suficiente para modificar el ritmo de vueltas del motor.

En el análisis que se realiza en este trabajo no se tendrá en cuenta el estado de transitorio negativo, ya que el modelo del motor no informa sobre la generación de gases contaminantes y no se desprenden grandes conclusiones durante la ocurrencia de este.

### 5.3. Topología del controlador de inyección

Tomando como referencia la *figura 5.2*, se muestra la topología que abunda en prácticamente todos los sistemas de inyección existentes en el mercado, donde se puede observar un bloque que trabaja a lazo abierto, el cual procesa la información de los sensores enumerados en la figura, y ejecuta un tiempo de inyección base que se denomina  $Ti_{base}$ . Por otro lado el bloque de realimentación solo recibe la información proveniente de la sonda lambda, y ejecuta una corrección sobre el tiempo de inyección de control denominado  $Ti_{control}$ . De esta manera se obtiene:

$$Ti[ms] = Ti_{base} [ms] \pm Ti_{control} [ms] \quad (5.1)$$

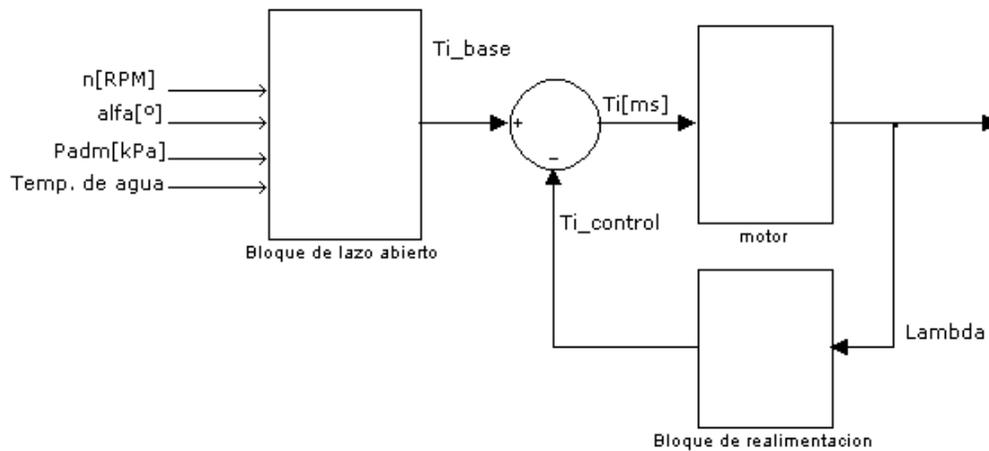


Figura 5.2: Topología del controlador de inyección.

Como no existe un criterio definido para el diseño de cada uno de los bloques de control, se propone el desarrollo de dos controladores distintos: el primero es un controlador proporcional, y el segundo es un controlador proporcional y derivativo. Las acciones realizadas tanto en lazo abierto como en lazo cerrado para ambos controladores son distintas, con el objeto de poder observar el comportamiento de cada uno y decidir cuál responde con mejores prestaciones en relación al consumo de combustible y al tiempo de respuesta al momento de aumentar el régimen de vueltas del motor.

## 5.4. Controlador proporcional

Este controlador se puede dividir en dos partes, dependiendo si trabaja en estado estacionario o transitorio. Primero se define el funcionamiento del controlador para el estado transitorio positivo, para ello se debe definir una tabla de valores, en donde se asocia las revoluciones del motor  $n$ , con el grado de apertura angular  $\alpha$  de la mariposa de admisión, entonces se expresa la *tabla 5.1*. Esta tabla se realizó teniendo en cuenta que  $n$  se obtiene en función de  $\alpha$  a partir de una evaluación a lazo abierto sobre el modelo del motor: dejando un ángulo fijo para la apertura de la mariposa y calibrando  $T_i$  en función de la información proveniente de  $\lambda$ , de manera de lograr un dosado estequiométrico, se evalúa en régimen permanente a cuantas revoluciones llega el motor.

Angulo de apertura $\alpha$ [°]	Revoluciones del motor n[RPM]
0,4	840
1	1320
2	2035
3	2685
4	3255
5	3740
6	4270
7	4605

Tabla 5.1: n en función de  $\alpha$ .

Para representar esta última tabla en una función continua, se realiza una aproximación mediante la interpolación por polinomios de Newton, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$n(\alpha) = 0,059\alpha^6 - 0,1876\alpha^5 - 5,0274\alpha^4 + 39,3179\alpha^3 - 113,59738\alpha^2 + 948,07644\alpha + 481,35904 \quad (5.2)$$

La anterior ecuación es de suma importancia para los transitorios, debido a que expresa el valor final de revoluciones a las que se espera que gire el motor, y como la aceleración del motor no es instantánea una vez abierta la mariposa de admisión, se realiza una comparación entre lo que sucede realmente y lo que se espera como resultado final, como muestra la *ecuación 5.3*. Este nuevo parámetro,  $V_{umbral}$  que toma valores comprendidos entre 0 y 1, sirve para determinar la finalización del estado transitorio positivo y el comienzo del estado estacionario, al compararlo con un valor estipulado el controlador determina la estrategia a utilizar: cuando el cociente entre ambos coeficientes supera el valor estipulado, finaliza el estado transitorio; caso contrario cuando el cociente es menor al valor estipulado, permanece en estado transitorio.

$$V_{umbral} = \frac{n_{real}[RPM]}{n_{teorica}[RPM]} = \frac{n[RPM]}{n(\alpha)[RPM]} \quad (5.3)$$

Durante la duración del estado transitorio, el controlador entrega un tiempo  $Ti_{base}$  constante, el cual debe ser capaz de acelerar al motor de la manera mas rápida posible. Para este estado la corrección en el tiempo de apertura de los inyectores por parte de  $Ti_{control}$  es nula.

Para poder determinar los valores de  $Ti_{base}$  se realizan simulaciones en el modelo del motor a lazo abierto, se toma como parámetro de entrada el valor de apertura angular de la mariposa de admisión, y se evalúan distintos valores de  $Ti_{base}$  con el fin de obtener aquellos que logren el máximo valor para  $V_{umbral}$ , y por ende un mayor aumento en las revoluciones del motor. Entonces se obtiene la siguiente *tabla 5.2*, y su correspondiente ecuación continua, que se obtiene nuevamente realizando interpolación polinómica de Newton:

$\Delta n$ [RPM]	$\Delta\alpha$ [°]	$Ti_{base}$ [ms]	$V_{umbral(max)}$
850→1320	0,6 (0,4→1)	3,4	0,93
850→2035	1,6 (0,4→2)	3,8	0,92
850→2685	2,6 (0,4→3)	3,9	0,9
850→3255	3,6 (0,4→4)	4,39	0,9
850→3740	4,6 (0,4→5)	4,66	0,88
850→4270	5,6 (0,4→6)	4,8	0,87

Tabla 5.2:  $Ti_{base}$  en función de  $\Delta\alpha$ .

$$Ti_{base}(\Delta\alpha) = 0,017\alpha^6 + 0,4252\alpha^5 - 7,39448\alpha^4 + 38,73\alpha^3 - 88,242\alpha^2 + 87,046\alpha - 24,503 \quad (5.4)$$

Donde  $\Delta n$  es la variación de las revoluciones del motor, siempre con n inicial en 850 RPM y subiendo a distintos valores de revoluciones, en función de  $\Delta\alpha$ , que es la variación de apertura angular de la mariposa de admisión que se impone para las pruebas realizadas sobre el modelo del motor.

Como el valor estipulado, para decidir la finalización de la estrategia de transitorio y dar paso a la estrategia de estacionario, es algo que permanece fijo se tiene que tomar como el menor

$V_{umbral(max)}$  obtenido de los ensayos, debido a que si el usuario del vehículo exigiera un aumento en las revoluciones del motor, por ejemplo que pase de 850RPM a 3740RPM, el máximo  $V_{umbral}$  que logra el controlador proporcional es 0,88, en otras palabras no se le puede exigir a  $V_{umbral}$  que llegue a 0,93 como en el primer caso de los ensayos, porque no se puede llegar a ese valor. De todo esto, el valor estipulado para el controlador proporcional es 0,87. Esto significa que cada vez que ocurra un aumento considerable en las revoluciones del motor, sucede el estado transitorio hasta que  $V_{umbral} = 0,87$  y el controlador cambia a la estrategia de régimen estacionario.

Para el estado estacionario del motor, el controlador va a determinar una acción de control a partir de la información emitida por la sonda lambda, esto es para valores por encima de 1 se detecta falta de combustible en la mezcla, entonces se incrementa la duración de los pulsos de inyección; por el contrario, si el valor que se obtiene es menor a 1 se detecta un exceso de combustible en la mezcla entonces se achica el tiempo de apertura de los inyectores. En la *figura 5.3* se puede observar como actúa el controlador frente a la variación de la sonda lambda.

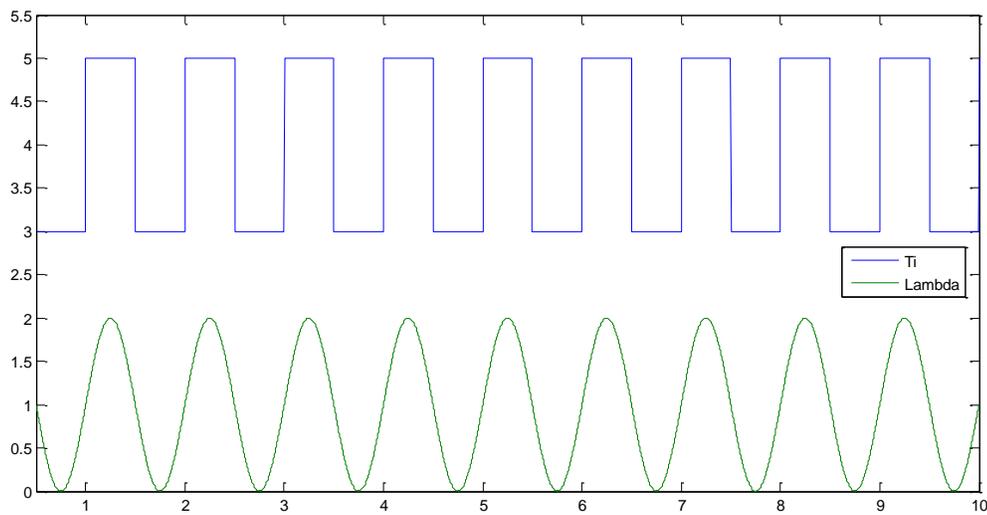


Figura 5.3: Acción de control proporcional.

En la última figura se puede observar que demostrativamente los valores de  $Ti$  son 3 o 5 ms, donde se desprende que  $Ti_{base} = 3ms$  y  $Ti_{control} = 2ms$ , para valores de lambda menores a 1 se cumple que  $Ti = Ti_{base}$  y para valores mayores a 1 es  $Ti = Ti_{base} + Ti_{control}$ . Para la obtención de los dos componentes se realiza un ensayo sobre el modelo del motor con el fin de obtener los valores representativos, esto se hace para distintos regímenes de  $n$ , analizando la información proveniente de la sonda lambda se van calibrando distintos valores para  $Ti_{control}$  y  $Ti_{base}$  en régimen permanente

con el fin de lograr que  $\lambda$  oscile sobre  $\lambda=1$ . En la *tabla 5.3* se define  $Ti_{base}$  en función de las revoluciones del motor.

n[RPM]	Tibase[ms]
850	2,24
1320	2,28
2035	2,34
2685	2,42
3255	2,5
3740	2,6
4270	2,7

Tabla 5.3:  $Ti_{base}$  en función de n.

Luego se obtiene la ecuación que representa a esta última tabla, mediante interpolación por polinomios de Newton:

$$Ti_{base} [ms] = -7,446 \cdot 10^{-21} n^6 + 1,119 \cdot 10^{-16} n^5 - 6,71192 \cdot 10^{-13} n^4 + 2,048 \cdot 10^{-9} n^3 - 3,311 \cdot 10^{-6} n^2 + 2,744 \cdot 10^{-3} n + 1,3433 \quad (5.5)$$

Cuanto mas grande son los valores de  $Ti_{control}$  mayor será el ajuste sobre la cantidad de combustible que se pulveriza en la mezcla, y por ende la variación que sucede en la información de la sonda lambda también será mayor, por eso se deben buscar valores para  $Ti_{control}$  que sean lo mas chicos posibles y así evitar cambios abruptos en la mezcla. Hay que recordar que la información que proporciona la sonda lambda al controlador se encuentra retrasada en el tiempo, con respecto a lo que está ocurriendo realmente en el motor, por lo tanto es conveniente evitar esas grandes variaciones. En la *tabla 5.4* se pueden observar los valores obtenidos:

n[RPM]	Ticontrol[ms]
850	0,14
1320	0,2
2035	0,3
2685	0,4
3255	0,5
3740	0,5
4270	0,5

Tabla 5.4:  $Ti_{control}$  en función de n.

Entonces se puede ver la representación del controlador proporcional mediante un diagrama en bloques, como se observa en la *figura 5.4* y *figura 5.5*, donde  $Ti_{control}$  no se representa mediante un bloque de función sino que se implementa una saturación dinámica con el fin de cumplir las especificaciones de la última tabla.

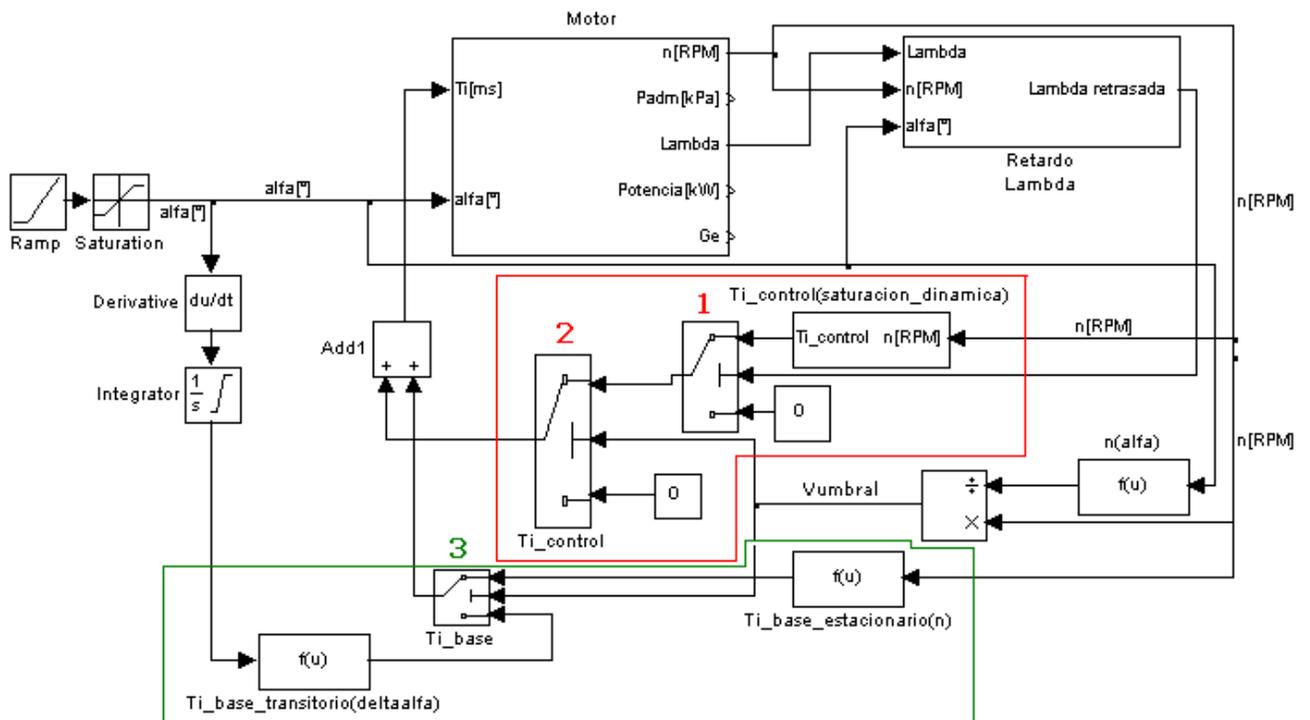


Figura 5.4: Diagrama en bloques del controlador proporcional.

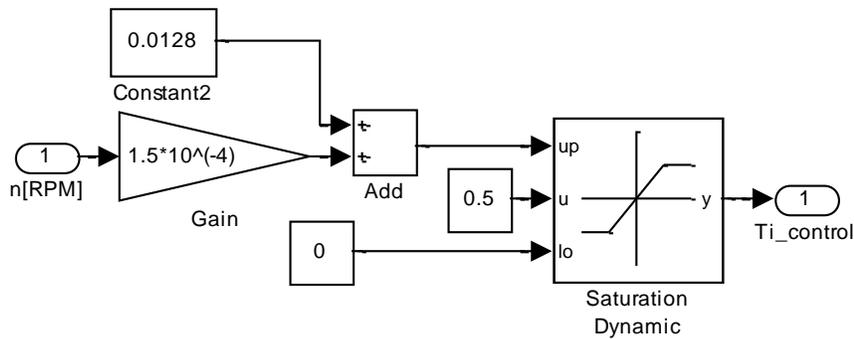


Figura 5.5: Bloque de donde se obtiene  $Ti_{control}$ .

En la figura, se puede observar que en el diagrama en bloques del controlador proporcional, se destacan dentro de la línea roja los componentes correspondientes a  $Ti_{control}$ , en donde el switch 1 hace que  $Ti_{control}$  tome un valor determinado, en función del bloque de saturación dinámica, o imponga  $Ti_{control} = 0ms$ , dependiendo del valor de  $\lambda$ . Por su parte el switch 2 toma la decisión de hacer nulo a  $Ti_{control}$  o le permite tomar los valores provenientes de la salida del switch 1, dependiendo del valor de  $V_{umbral}$ . Por otro lado, dentro de la línea verde se pueden ver los componentes que corresponden a  $Ti_{base}$  tanto para el régimen estacionario como para el transitorio, el switch 3 se encarga de decidir la estrategia a implementar por el controlador, en función del valor que presente en  $V_{umbral}$ . Se debe destacar que dentro de la configuración interna de cada switch existe un valor límite que se debe calibrar, en el caso del switch 1 este valor es 1, y para los otros dos switchs este valor es el valor estipulado 0,87.

## 5.5. Controlador derivativo

Se emplea este tipo de controlador con el fin de obtener distintos resultados con respecto al controlador proporcional, y así poder extraer conclusiones sobre las características de cada uno.

Nuevamente, para este control se diferencian dos estados de carga, uno el transitorio y otro el estacionario, con la diferencia que en este caso tanto  $Ti_{control}$  como  $Ti_{base}$  van a tener un componente que se desprende de la derivada de dos parámetros del motor, que son  $\lambda$  y la presión del múltiple de admisión. En ambos casos, se busca tener una desviación menor del valor ideal  $\lambda=1$

para todos los momentos. Esto viene de la suposición de que si se realizan correcciones menos abruptas sobre  $T_i$ , como en el caso del estado estacionario, la respuesta de la sonda lambda es mas amortiguada y cercana al valor unitario.

En el caso del estado estacionario del motor, la acción de control a implementar debe ser similar a la que se muestra en la *figura 5.6*, donde se desprende que  $T_i$  tiene una componente proporcional, que depende de la información de  $\lambda$ , y otro derivativo de la señal de la sonda lambda.

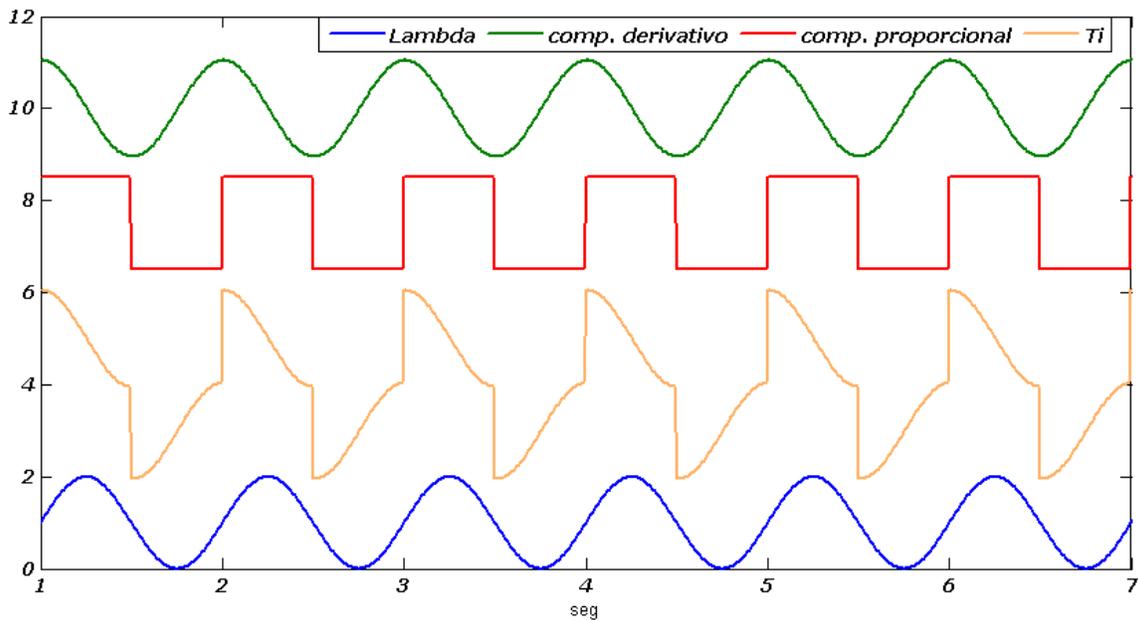


Figura 5.6: Acción de control derivativo.

El parámetro que determina los componentes de la acción de control a implementar, es la información de la sonda lambda, durante el semiciclo en el cual es mayor que 1 se tienen en cuenta las siguientes consideraciones: el componente proporcional si bien se obtiene de la misma *tabla 5.4* y su correspondiente *figura 5.5*, en este control se emplea junto a un factor que es menor a 1 y que además varía en función de la apertura angular de la mariposa de admisión, denominado  $K$ -. Por otro lado, se trabaja con la derivada de la información  $\lambda$ , que corresponde a la componente derivativa de la acción de control. Como dicha componente puede tomar valores elevados y variar de manera vertiginosa, tanto en tiempo como en amplitud, debe ser filtrada por un filtro pasabajos, con el fin de lograr una señal que tenga una variación mas acorde al control implementado, por eso lo que se hace primeramente es saturar la derivada de  $\lambda$  en un valor de amplitud máximo, y luego se la filtra con un filtro de un solo polo. La frecuencia del polo va a determinar la velocidad con que varíe la señal, cuanto mas baja sea la frecuencia, menor será la velocidad. Luego esta señal se multiplica por un factor que es función de la apertura angular de la mariposa de admisión, denominado  $K$ .

Durante el semiciclo que  $\lambda < 1$ , se cumple que el componente proporcional es nulo, solo se considera el componente derivativo (luego de ser saturado y pasado por el filtro pasabajos) y se le suma un pequeño valor constante de 0,075, para que  $Ti$  no fuera mucho menor que  $Ti_{base}$ . Después, se lo multiplica por el mismo factor K del otro semiciclo. En la figura 5.7 se observa el diagrama en bloques representativo de  $Ti_{control}$ , que luego se suma a  $Ti_{base}$  para formar  $Ti$ .

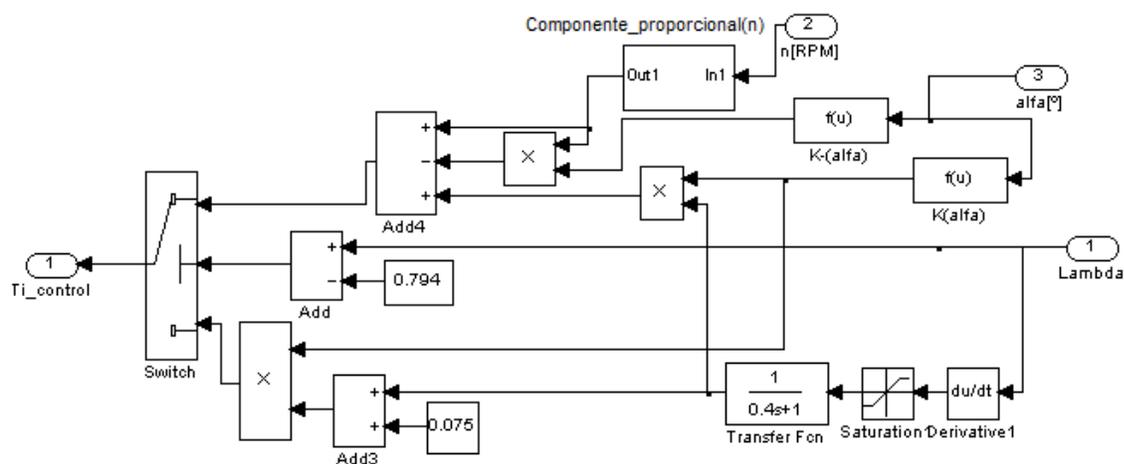


Figura 5.7: Diagrama en bloques de  $Ti_{control}$  para estado estacionario.

Tanto los factores K, K- y la frecuencia del polo del filtro pasabajos se obtienen de manera experimental sobre el modelo del motor. De la misma manera que se hizo para el controlador proporcional, con el fin de conseguir que  $\lambda$  oscile sobre el valor unitario y de la manera mas amortiguada posible, se van calibrando distintos valores para K y K-. El componente proporcional es igual a  $Ti_{control}$  del controlador proporcional, con la misma saturación dinámica. La función del switch es hacer el cambio entre la componente con factor proporcional nulo y el que no lo es, dependiendo del valor de  $\lambda$ . Por su parte el filtro posterior al bloque de saturación de la derivada de  $\lambda$ , tiene una frecuencia de corte baja con el fin de minimizar los cambios abruptos, de alta frecuencia, entonces se ensaya con un polo ubicado a distintas frecuencias, luego de analizar la señal obtenida se decide utilizar el siguiente filtro:

$$FPB(s) = \frac{1}{0,4s + 1} \quad (5.6)$$

A continuación se detallan las tablas de valores para K y K-, luego su ecuación continua, que se obtiene mediante interpolación por polinomios de Newton. En el caso de  $Ti_{base}$  para el régimen estacionario, se utilizan los mismos valores utilizados en la *tabla 5.5* del control proporcional.

$\alpha[^\circ]$	K	K-
0,4	1	0,3
1	1	0,4
2	1,2	0,4
3	1,4	0,4
4	1,5	0,39
5	1,9	0,45
6	2,1	0,41

Tabla 5.5: Valores de K y K- en función de  $\alpha$ .

$$\begin{aligned}
 K(\alpha) = & 1 + 0,125(\alpha - 0,4)(\alpha - 1) - 0,0481(\alpha - 0,4)(\alpha - 1)(\alpha - 2) + 8,722 \cdot 10^{-3}(\alpha - 0,4)(\alpha - 1)(\alpha - 2)(\alpha - 3) \\
 & + 2,6474 \cdot 10^{-3}(\alpha - 0,4)(\alpha - 1)(\alpha - 2)(\alpha - 3)(\alpha - 4) - 2,5588 \cdot 10^{-3}(\alpha - 0,4)(\alpha - 1)(\alpha - 2)(\alpha - 3)(\alpha - 4)(\alpha - 5)
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

$$\begin{aligned}
 K - (\alpha) = & 0,3 + 0,1667(\alpha - 0,4) - 0,1042(\alpha - 0,4)(\alpha - 1) - 0,0401(\alpha - 0,4)(\alpha - 1)(\alpha - 2) \\
 & - 0,0116(\alpha - 0,4)(\alpha - 1)(\alpha - 2)(\alpha - 3) + 3,335 \cdot 10^{-3}(\alpha - 0,4)(\alpha - 1)(\alpha - 2)(\alpha - 3)(\alpha - 4) \\
 & - 1,101 \cdot 10^{-3}(\alpha - 0,4)(\alpha - 1)(\alpha - 2)(\alpha - 3)(\alpha - 4)(\alpha - 5)
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Para el estado transitorio nuevamente se hace nulo a  $Ti_{control}$ , y en este caso  $Ti_{base}$  se divide en dos factores, uno denominado  $Ti_{prom}[ms]$  que es idéntico a  $Ti_{base}$  del estado transitorio del control proporcional. El otro factor no es un valor constante, sino que comienza en un valor máximo, denominado  $Ti_{max}[ms]$ , para luego ir decreciendo hasta un valor mínimo, llamado  $Ti_{min}[ms]$ , para eso se requiere también un filtro pasabajos que permita una variación lenta de este factor en su decrecimiento. Se debe destacar que el pasaje de  $Ti_{max}$  a  $Ti_{min}$  depende de la derivada de la presión en el múltiple de admisión, luego de pasar por un bloque de saturación y un filtro

pasabajos, esto se debe a que dicho parámetro aumenta paulatinamente su valor cuando el motor comienza a aumentar las revoluciones, por ende su derivada es positiva, pero luego la presión empieza a bajar hasta llegar a un valor estable cuando el motor alcanza las revoluciones que exige el usuario, en este momento la derivada es negativa. Justamente cuando la derivada se vuelve negativa es que el tiempo de inyección comienza a bajar, para tratar de tener una mínima dispersión respecto al dosado estequiométrico.

Al igual que  $Ti_{prom}$ , los valores de  $Ti_{max}$ ,  $Ti_{min}$  y los polos de los filtros, se obtienen de manera experimental sobre el modelo del motor. Esto se hace observando la información de la sonda lambda, se calibran distintos valores para  $Ti_{max}$  y  $Ti_{min}$  con el fin de tener una menor dispersión de  $\lambda=1$  para todo el instante de aceleración del motor y también buscando tener un menor tiempo hasta llegar a las revoluciones deseadas. A continuación se detallan los datos importantes de los dos primeros parámetros en la *tabla 5.6*, y luego se realiza su ecuación continua mediante la interpolación por polinomios de Newton. Para la obtención de los filtros se ensaya de la misma forma que con la derivada de  $\lambda$ , buscando tener una señal de baja frecuencia en ambos casos.

$\Delta\alpha[^\circ]$	$Ti_{max}[ms]$	$Ti_{min}[ms]$
0,6	0,7	-0,79
1,6	1,15	-0,9
2,6	1,1	-0,7
3,6	1,8	-1,3
4,6	1,8	-1,3
5,6	1,7	-1,25

Tabla 5.6: Valores de  $Ti_{max}$  y  $Ti_{min}$  en función de  $\Delta\alpha$ .

$$\begin{aligned}
 Ti_{max} = & 0,7 + 0,45(\alpha - 0,6) - 0,25(\alpha - 0,6)(\alpha - 1,6) + 0,2083(\alpha - 0,6)(\alpha - 1,6)(\alpha - 2,6) \\
 & - 0,1125(\alpha - 0,6)(\alpha - 1,6)(\alpha - 2,6)(\alpha - 3,6) + 0,03958(\alpha - 0,6)(\alpha - 1,6)(\alpha - 2,6)(\alpha - 3,6)(\alpha - 4,6)
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

$$\begin{aligned}
 T_{i_{\min}} = & -0,79 - 0,11(\alpha - 0,6) + 0,155(\alpha - 0,6)(\alpha - 1,6) - 0,185(\alpha - 0,6)(\alpha - 1,6)(\alpha - 2,6) \\
 & + 0,1046(\alpha - 0,6)(\alpha - 1,6)(\alpha - 2,6)(\alpha - 3,6) - 0,03718(\alpha - 0,6)(\alpha - 1,6)(\alpha - 2,6)(\alpha - 3,6)(\alpha - 4,6)
 \end{aligned}
 \tag{5.10}$$

Al igual que en el controlador proporcional, existe un valor estipulado que difiere entre los dos estados del motor, solo que en este caso se emplea un valor de 0,98, obtenido experimentalmente de la misma forma que se realizó en el controlador proporcional. Entonces el cambio de estrategias se produce prácticamente cuando el motor alcanza las vueltas deseadas.

En la *figura 5.8* se observa el diagrama en bloques del controlador derivativo completo:

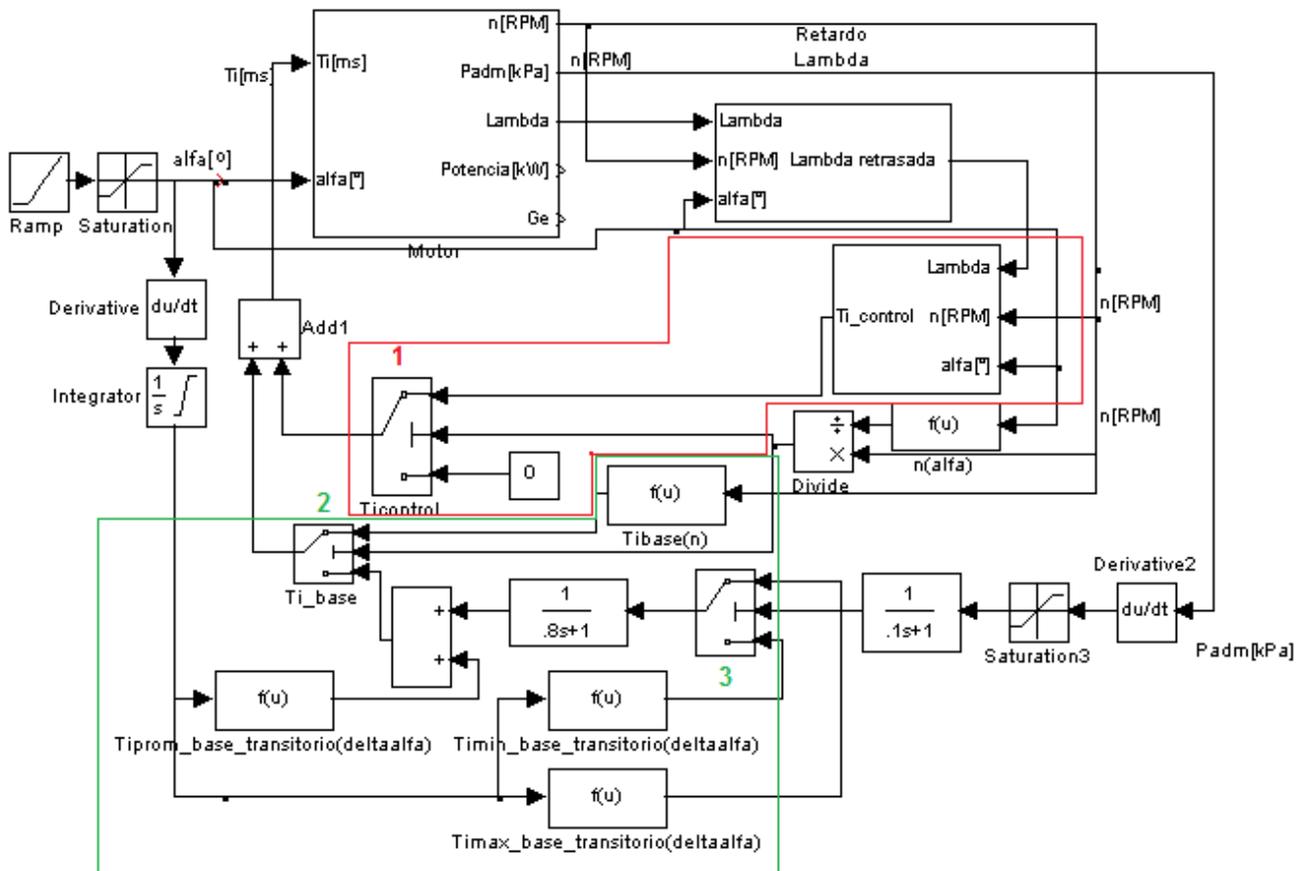


Figura 5.8: Diagrama en bloques del controlador derivativo.

En la figura se puede ver dentro de la línea roja los bloques correspondientes a  $Ti_{control}$ , el switch 1 vuelve nulo a  $Ti_{control}$  cuando sucede el estado transitorio, esa acción la lleva a cabo

---

cuando ocurre que  $V_{umbral}$  todavía es menor al valor estipulado en 0,98. Por otra parte, dentro de la línea verde pueden observarse los bloques correspondientes a  $Ti_{base}$  para ambos regímenes del motor. La función del switch 2 es hacer el cambio entre  $Ti_{base}$  del estado estacionario con el del estado transitorio, en función del valor de  $V_{umbral}$ . En cambio el switch 3 realiza el cambio entre lo que son los valores que luego se suman a  $Ti_{prom}$ , dependiendo del valor de la derivada de la presión del múltiple de admisión.

Para evaluar el comportamiento de ambas estrategias de control y poder sacar conclusiones respecto de su desempeño, en el *capítulo 7* se realizarán simulaciones sobre el modelo del motor.

---

## 6. Sistema de encendido

### 6.1. Introducción

En la actualidad, el sistema de encendido se encuentra dentro de lo que se denomina sistema de inyección electrónica, pero puede ser pensado como un sistema autónomo, que se ocupa de interpretar la posición angular del cigüeñal, para luego ubicar el momento justo de emitir los ordenes de disparo hacia las bobinas de encendido.

Este sistema debe ser capaz de manipular correctamente los dos parámetros que corresponden al encendido: la posición angular de disparo, más conocido como avance de encendido, y la duración de dicha orden, se habla del tiempo de conmutación que se envía al bobinado primario de la bobina.

### 6.2. Tiempo de conmutación

En la *sección 3.3.2* si bien se manifiesta brevemente, la duración de la orden de disparo incide directamente sobre las características de la chispa que, luego de que la bobina de encendido le transfiera su energía, ocurre en el electrodo de la bujía.

Luego de realizar ensayos sobre distintos vehículos, se llega a la conclusión que el tiempo de conmutación en promedio, es cercano a los 3ms. Los ensayos realizados se llevan a cabo en los vehículos, porque si bien se puede encontrar información al respecto, es tanta la diversidad de datos encontrados que se torna muy dificultoso saber cuáles verídicos, por eso se prueban distintos motores con distintos sistemas de inyección para poder sacar conclusiones al respecto.

Entonces los ensayos se realizaron con el osciloscopio digital OWON SDS5032E, utilizando un canal solo en el primario de la bobina de encendido. Los vehículos fueron puestos en marcha con su ECU original, y luego se le acelero a distintos regímenes de revoluciones. Después, se deja regulando al motor en regímenes cercanos a 1000RPM, y se emulan las informaciones de los diversos sensores con los que cuenta el auto, con el fin de ver como varia el tiempo de conmutación de la bobina de encendido. De todos estos ensayos realizados, se llega a la conclusión que el tiempo de conmutación varia tan poco que se puede considerar constante y cercano a 3ms.

---

Las consecuencias de no respetar ese tiempo promedio son expuestas en la *sección 3.3.2*.

### **6.3. Avance de encendido**

El avance de encendido de un motor, respecto del PMS, varía en función de la información aportada por los sensores, por eso a veces es mas conveniente denominarlo como mapa de avances. En este caso, los fabricantes de las ECU's no brindan ningún tipo de información acerca de estos mapas, y es muy complicado encontrar datos verídicos al respecto. A diferencia de la inyección electrónica, se vuelve realmente complejo lograr un modelado del motor que represente su funcionamiento frente a los parámetros del encendido. Entonces se toma la decisión de elaborar un mapa de encendido a partir de ensayos sobre un vehículo con su ECU original.

Para el desarrollo de este trabajo, se consiguió un vehículo de manera provisoria para realizar las pruebas que fueran necesarias. Se trata de un Fiat Palio modelo 1997, y sus características mas sobresalientes se exponen en la *sección 8.7*. Lo que se hace es utilizar los dos canales del osciloscopio, con uno se mide el sensor de revoluciones y con el otro canal se mide el primario de una de las bobinas de encendido, con el motor en marcha se buscan distintos regímenes de revoluciones del mismo mediante la apertura de la mariposa de admisión, y se evalúa en régimen permanente el momento que ocurre la orden de disparo en esa bobina, con respecto al diente mas cercano de la rueda dentada que informa el sensor de revoluciones. Entonces se puede elaborar la *tabla 6.1*, que es la tabla de avances del encendido en función del sensor de revoluciones. Se recuerda que la rueda dentada es de 60 dientes (y dos faltantes), por lo que la diferencia entre las ordenes de disparo de la bobina de encendido I y IV, respecto de la de II y III, es de 30 dientes.

Si bien el ensayo fue solo sobre un sensor del motor, en lo que respecta al sistema de encendido, se puede considerar como el de mayor importancia. Y de esta manera se puede elaborar un producto que no necesite depender del correcto funcionamiento de los demás sensores. Pero lo real es que el avance del encendido depende de todas las informaciones existentes en el motor, solo que realizan correcciones de menor inferencia.

n[RPM]	Diente de disparo Bobina I-IV	Diente de disparo Bobina II-III
<150	18	48
150-350	17	47
350-600	16	46
600-850	15	45
850-1100	14	44
1100-1350	13	43
1350-1600	12	42
1600-1750	11	41
1750-1900	10	40
1900-2100	9	39
2100-2200	8	38
2200-2300	7	37
2300-2400	6	36
2400-2600	5	35
2600-2700	4	34
2700-2800	3	33
2800-2900	2	32

Tabla 6.1: Avance de encendido de las bobinas.

## Elaboración de un sistema autónomo

Para la producción de un sistema de encendido autónomo se pueden enumerar los siguientes aspectos a tener en cuenta:

- La única referencia que existe sobre la posición angular del cigüeñal, es el diente de mayor duración en la rueda dentada, enumerado como diente 58. Por lo tanto el sistema debe poder ubicarlo, y una vez que lo hace, debe llevar el conteo de los dientes siguientes, con el fin de evitar interpretaciones erróneas, por ejemplo: durante la ocurrencia del diente 30 no se debe interpretar que es el diente de mayor duración. En caso de existir algún error en la lectura del sensor de revoluciones, no se debe emitir ninguna orden de disparo hacia las bobinas de encendido.
- Luego de interpretar correctamente el régimen de revoluciones del motor, el sistema de encendido debe consultar la tabla de avances, para que cuando suceda la lectura del diente que indica la tabla, se emita la orden de disparo hacia la bobina de encendido correspondiente.
- La orden de disparo debe tener una duración de 3ms para todo tipo de condiciones.

---

## 7. Evaluación de los controladores de inyección

### 7.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados que se obtienen de la aplicación de los controladores de inyección sobre el modelo del motor en el programa Simulink, junto a una explicación de los fenómenos observados, con el fin de obtener conclusiones sobre los distintos enfoques de cada controlador.

Primero se evalúan en estado estacionario, en distintos regímenes de revoluciones del motor. Y luego se prueban en una combinación de regímenes, esto es el motor se encuentra regulando, por ende en estado estacionario, y mediante un aumento en la apertura angular de la mariposa el motor comienza a aumentar las revoluciones, por lo que se pasa al estado transitorio positivo; luego se alcanzan las revoluciones deseadas y se llega nuevamente el estado estacionario.

Se debe destacar que las condiciones iniciales de algunos parámetros, como ser  $n$ ,  $p_{adm}$ ,  $\lambda$ , son muy difíciles de representar de una manera coherente desde el instante  $t = 0$ , debido a condiciones del modelo, ya que existen retardos que operan desde el momento que comienzan las simulaciones. Por todo esto, no se debe tener en cuenta los primeros instantes de las simulaciones que se muestran, hasta que el mismo controlador logre regularizar los parámetros.

### 7.2. Estado estacionario – Controlador proporcional

Las primeras figuras muestran los valores más destacables del motor cuando se encuentra en un régimen de revoluciones por debajo de 1000RPM, este grado de apertura angular de la mariposa se denomina posición de ralentí y corresponde a  $\alpha=0,4^\circ$ . Las condiciones iniciales son:  $n = 870RPM$  y  $p_{adm} = 100kPa$ .

En la *figura 7.1* se muestran dos parámetros del motor, la información  $\lambda$  que sensa el controlador luego de los retrasos correspondientes del modelo y el valor umbral que se mantiene prácticamente constante e igual a la unidad. Se observa que en  $\lambda$  los valores que se obtienen oscilan

alrededor de la unidad, mas precisamente entre 0,98 y 1,06, lo cual en promedio indica que la mezcla esta levemente escasa de combustible.

En la *figura 7.2* se pueden observar las revoluciones del motor. Luego en la *figura 7.3* se muestran los parámetros  $Ti$  y  $Ti_{base}$ , se recuerda que  $Ti = Ti_{base} + Ti_{control}$  por lo que fácilmente se desprende la acción de control que realiza el controlador que hace variar el tiempo de inyección de 2,24ms hasta 2,38ms.

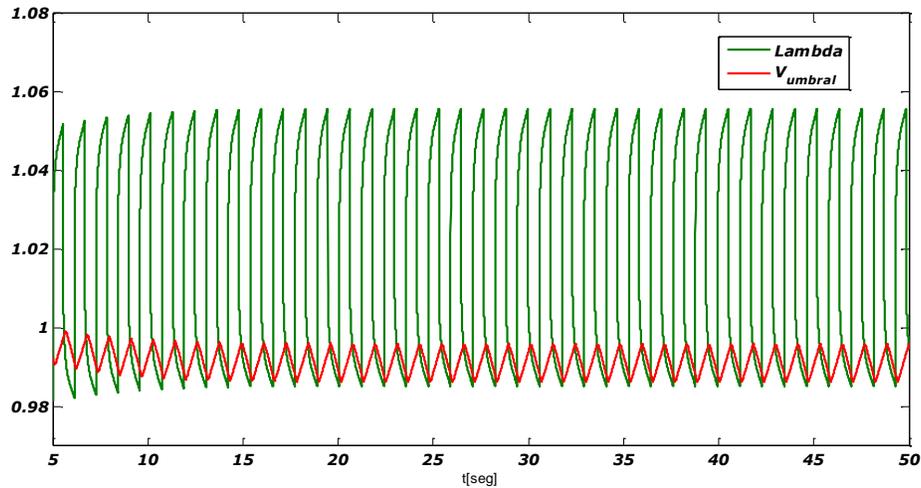


Figura 7.1: Parámetros  $\lambda$  y Vumbral.

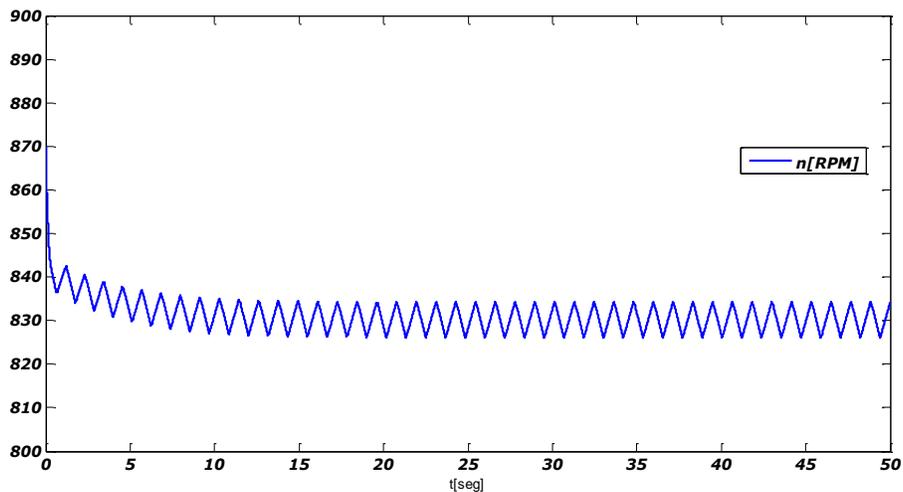


Figura 7.2: Parámetro n[RPM].

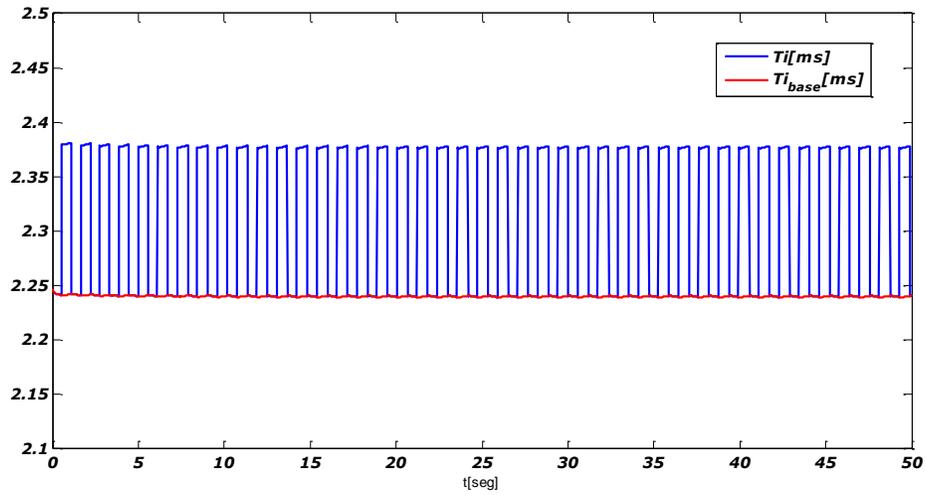


Figura 7.3: Parámetros  $T_i$  y  $T_{i_{base}}$ .

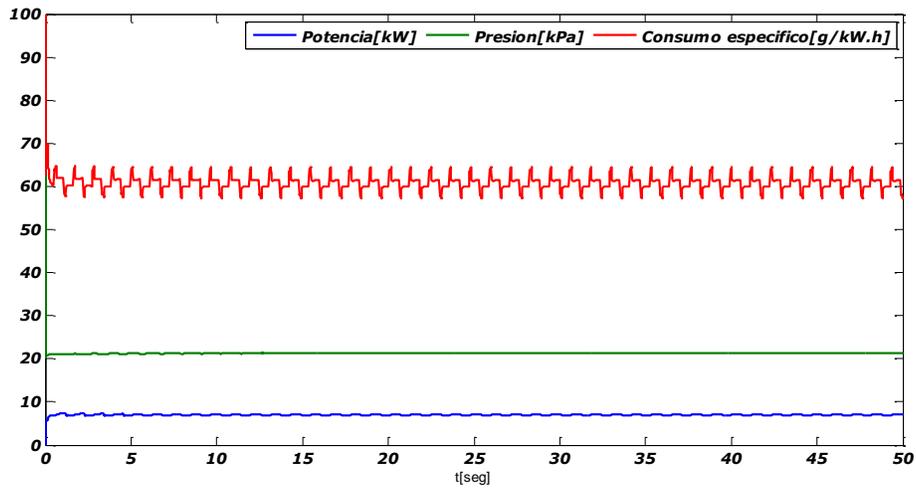


Figura 7.4: Parámetros de potencia, consumo especifico y presión en el múltiple de admisión.

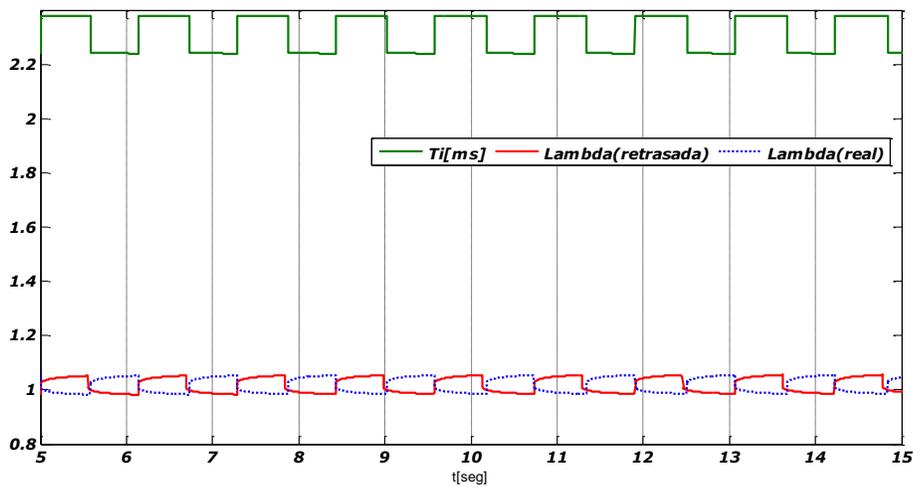


Figura 7.5: Acción de control en función de Lambda.

---

En la *figura 7.4* se aprecian tres parámetros, el consumo específico que promedia en 62 g/kW.h, la presión del múltiple de admisión que se mantiene en un valor constante de aproximadamente 21 kPa y la potencia que ofrece el motor que ronda un valor de 8kW, coincidente con las especificaciones de potencia del motor.

Por último, en la *figura 7.5*, se exhibe la determinación de la acción de control a implementar en función del valor  $\lambda$ , como se explicó en la *sección 5.4*. También se muestra lo que debería ser la información  $\lambda$  en tiempo real, esto es sin los retrasos ya mencionados, en donde se puede ver que para este caso particular cuando la sonda lambda está indicando que la mezcla se encuentra excedida de combustible en realidad la mezcla se encuentra falta de combustible, de aquí se desprende la importancia de tener una oscilación en  $\lambda$  con la menor dispersión posible del valor unitario y también que las variaciones de dicha información sean leves.

El siguiente conjunto de figuras, desde la *figura 7.6* hasta *figura 7.10*, nuevamente son para el motor en condición de estado estacionario, en el cual se encuentra en un régimen de revoluciones cercano a las 2700 RPM, ya que  $\alpha=3^\circ$ . Las condiciones iniciales para esta ocasión son:  $n = 2700RPM$  y  $p_{adm} = 100kPa$ .

Para este caso se notan algunas diferencias cualitativas con respecto al caso anterior, tanto  $T_i$  como  $T_{i_{base}}$  aumentaron, la presión del múltiple de admisión disminuyó levemente, la potencia entregada por el motor aumento, el consumo en promedio descendió y la amplitud de  $\lambda$  varía entre 0,91 y 1,07, promediando prácticamente en  $\lambda=1$ .

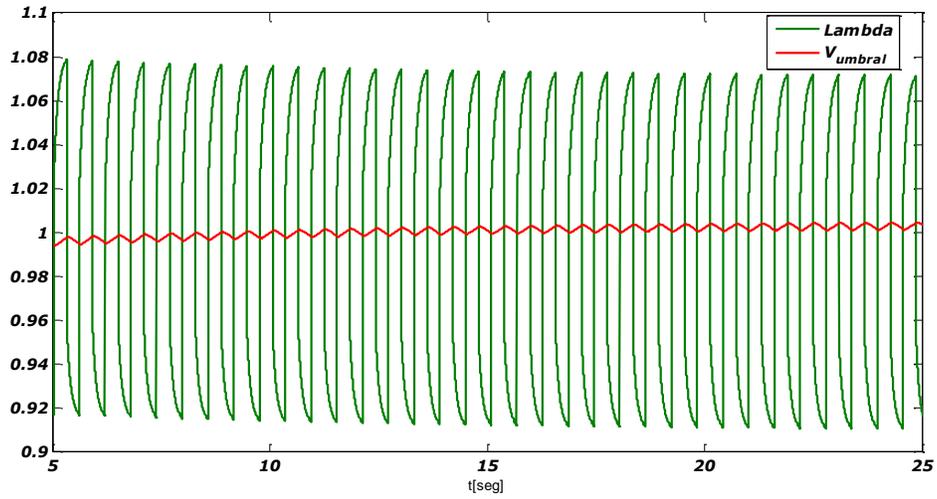


Figura 7.6: Parámetros  $\lambda$  y  $V_{umbral}$ .

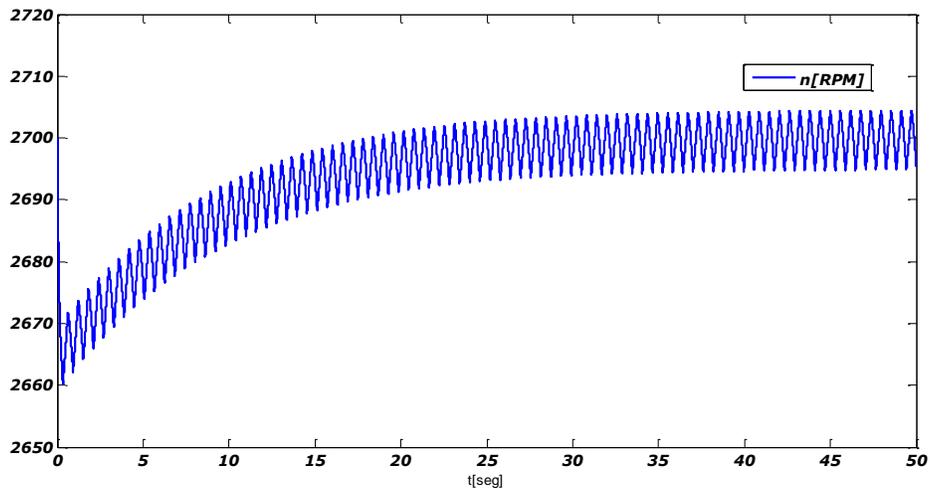


Figura 7.7: Parámetro  $n$ [RPM].

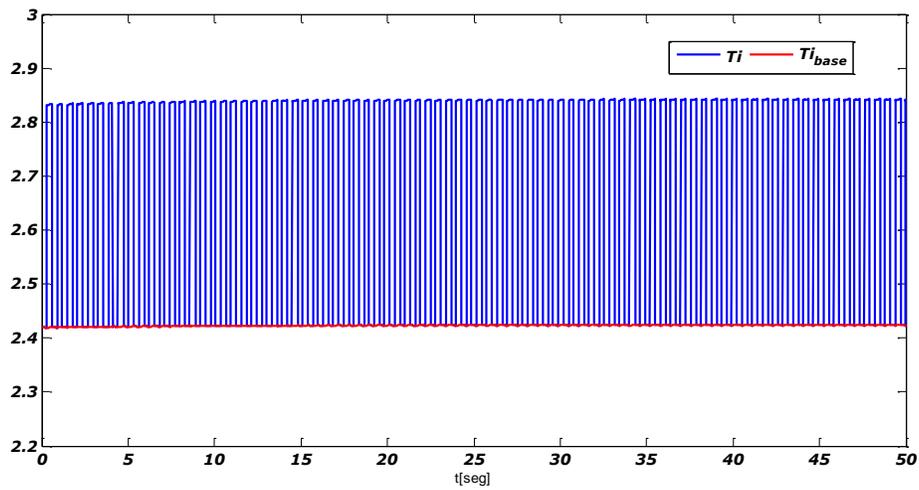


Figura 7.8: Parámetros  $Ti$  y  $Ti_{base}$ .

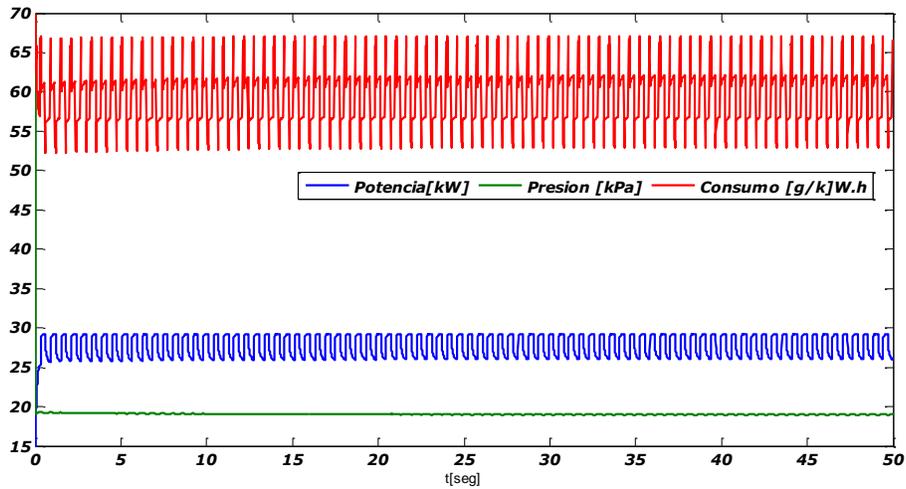


Figura 7.9: Parámetros de potencia, consumo específico y presión en el múltiple de admisión.

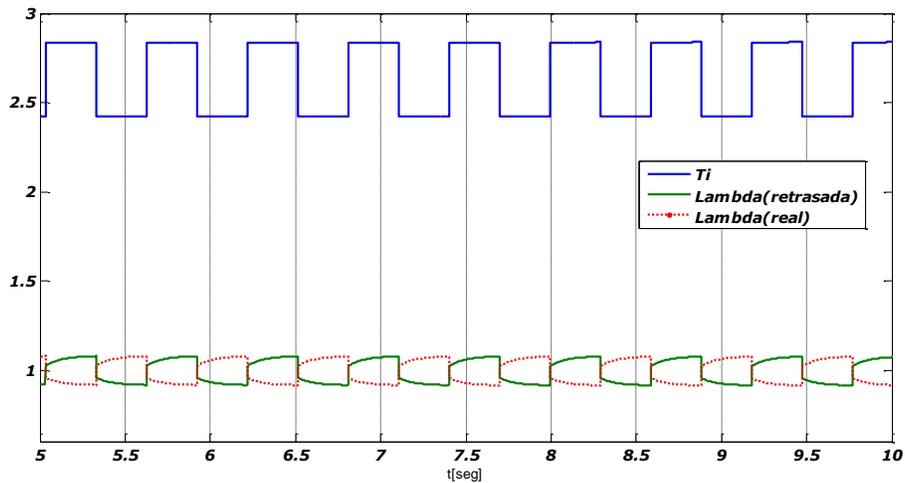


Figura 7.10: Acción de control en función de Lambda.

Por último se muestra otro grupo de figuras, desde *figura 7.11* hasta *figura 7.15*, para una mayor cantidad de revoluciones del motor, que son aproximadamente 3750 RPM, correspondientes a  $\alpha=5^\circ$ . En este caso las condiciones iniciales son:  $n = 3800RPM$  y  $p_{adm} = 100kPa$ .

En esta oportunidad los valores de presión del múltiple de admisión y la amplitud de  $\lambda$  prácticamente no varían con respecto al caso anterior, en cambio el consumo específico se redujo y como se espera la potencia aumento al igual que lo hacen  $Ti$  y  $Ti_{base}$ .

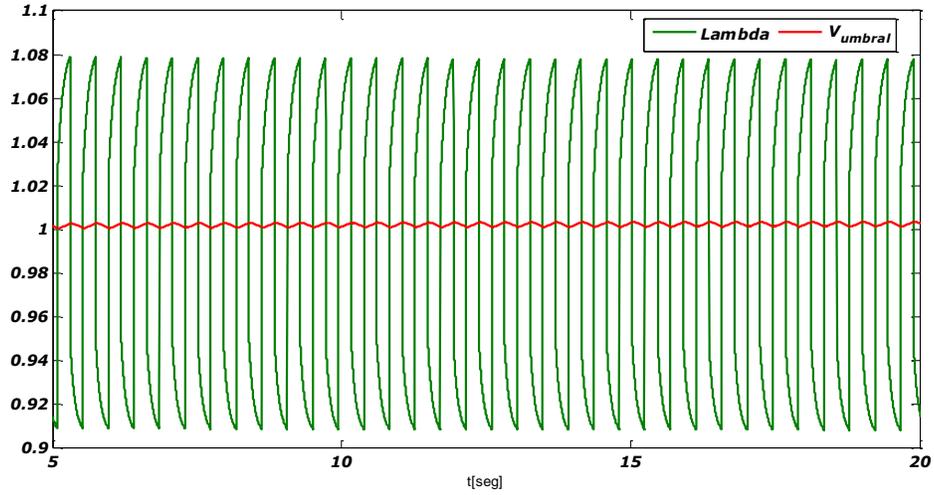


Figura 7.11: Parámetros  $\lambda$  y  $V_{umbral}$ .

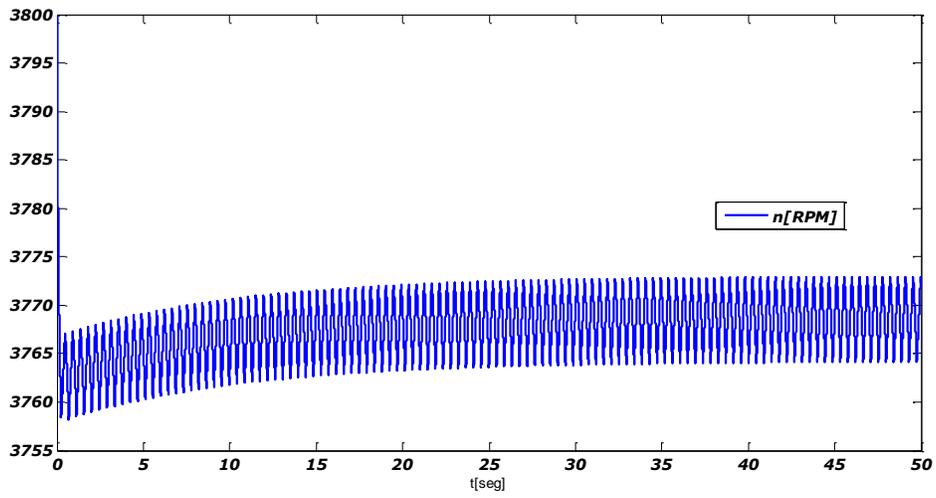


Figura 7.12: Parámetro  $n$ [RPM].

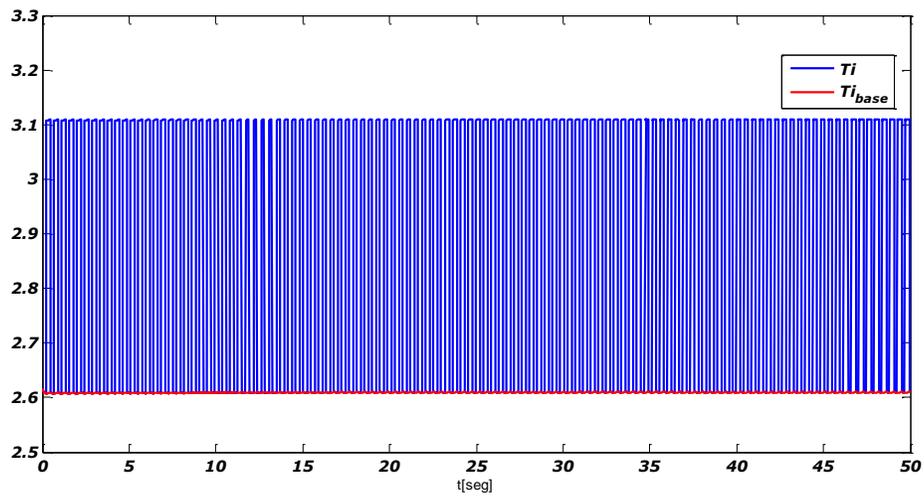


Figura 7.13: Parámetros  $T_i$  y  $T_{i_{base}}$ .

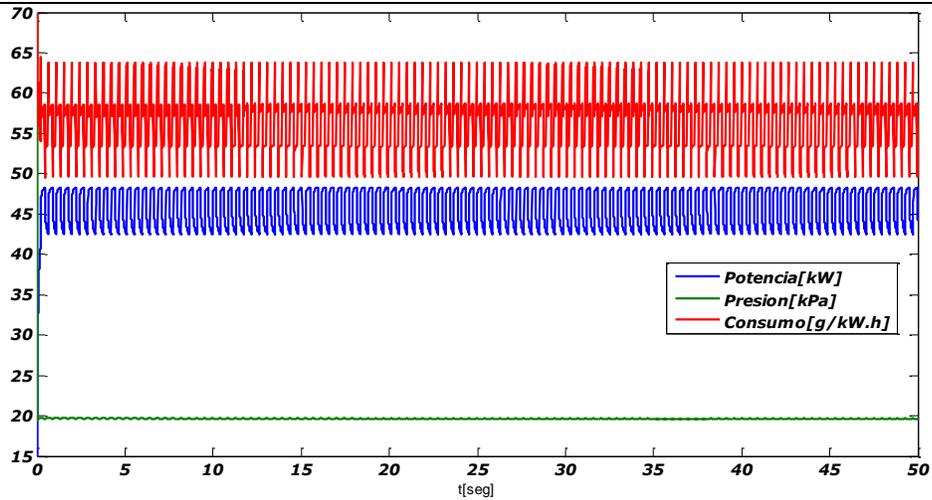


Figura 7.14: Parámetros de potencia, consumo específico y presión en el múltiple de admisión.

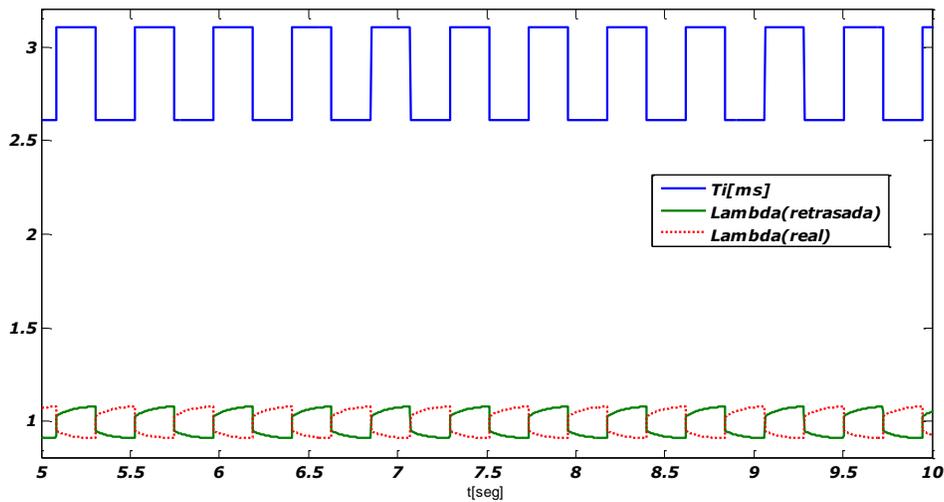


Figura 7.15: Acción de control en función de Lambda.

### 7.3. Estado estacionario – Controlador derivativo

En esta sección se evalúa la respuesta en los parámetros que produce el controlador derivativo, empleando las mismas tres condiciones utilizadas para el controlador proporcional, con el fin de poder constatar los resultados que se obtienen de cada uno y obtener conclusiones al respecto.

Entonces el primer grupo de figuras, desde *figura 7.16* hasta *figura 7.20*, muestran lo obtenido para el régimen de revoluciones del motor cercano a 850 RPM, siendo que  $\alpha=0,4^\circ$ . Las condiciones iniciales son:  $n = 870RPM$  y  $p_{adm} = 100kPa$ .

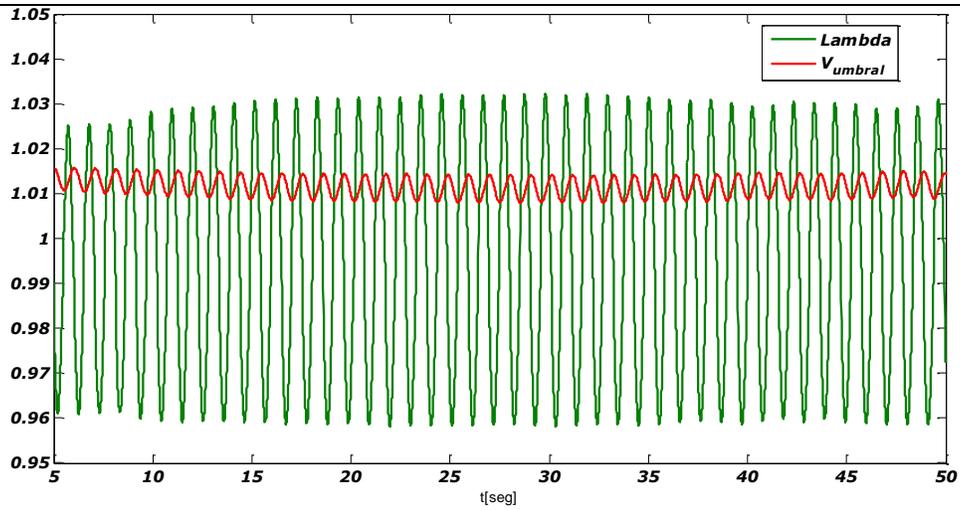


Figura 7.16: Parámetros  $\lambda$  y  $V_{umbral}$ .

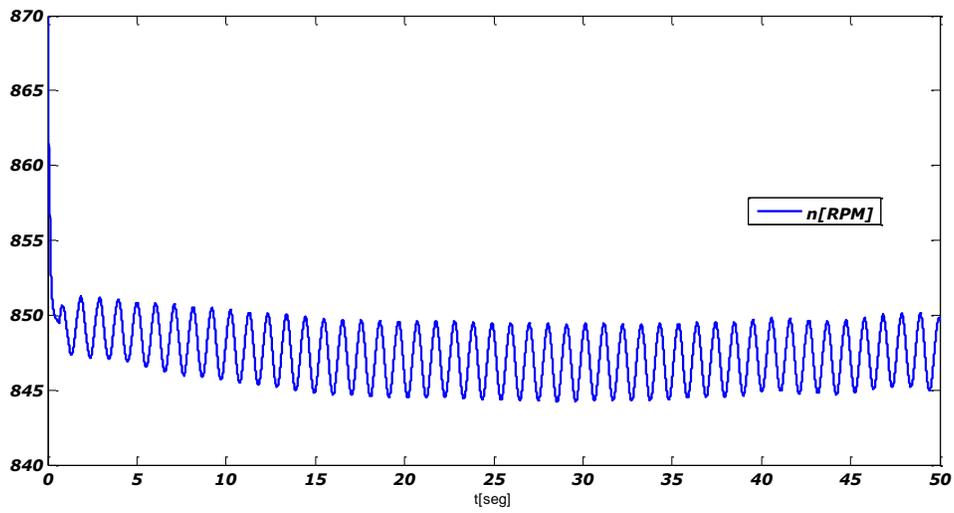


Figura 7.17: Parámetro  $n$ [RPM].

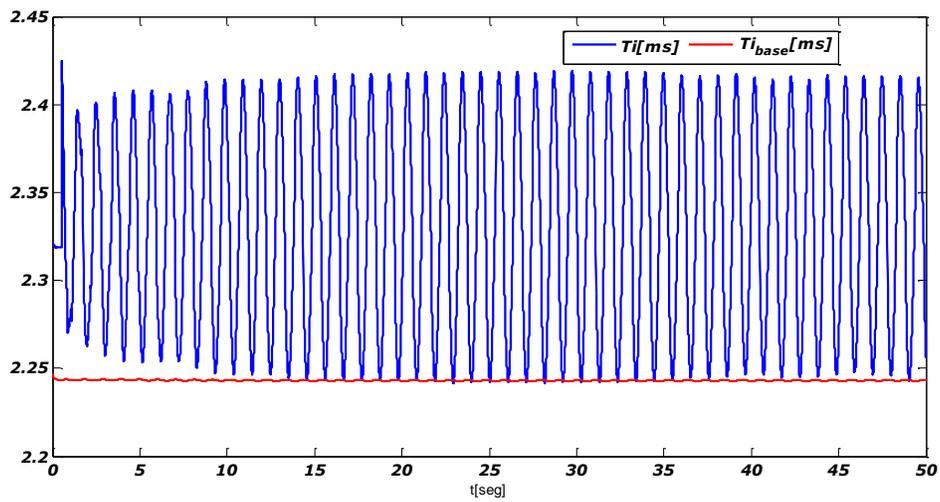


Figura 7.18: Parámetros  $T_i$  y  $T_{i_{base}}$ .

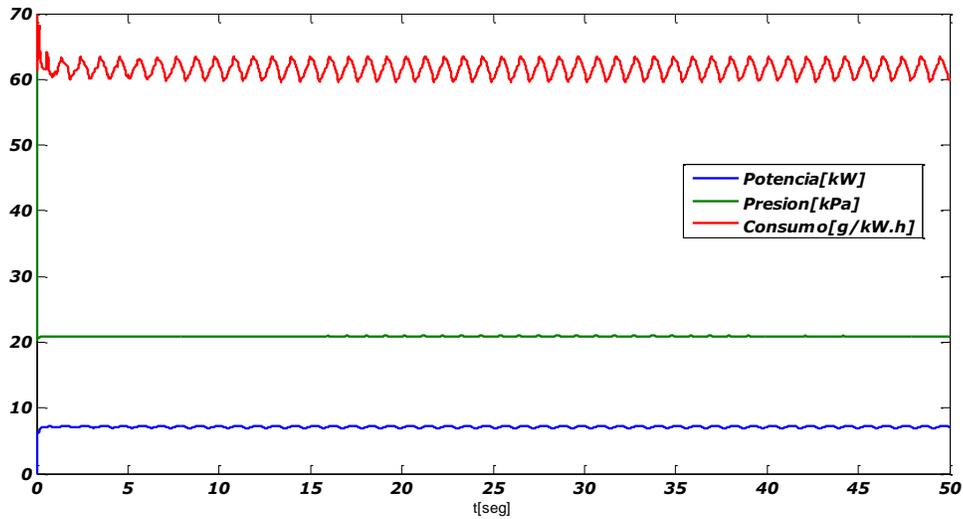


Figura 7.19: Parámetros de potencia, consumo específico y presión en el múltiple de admisión.

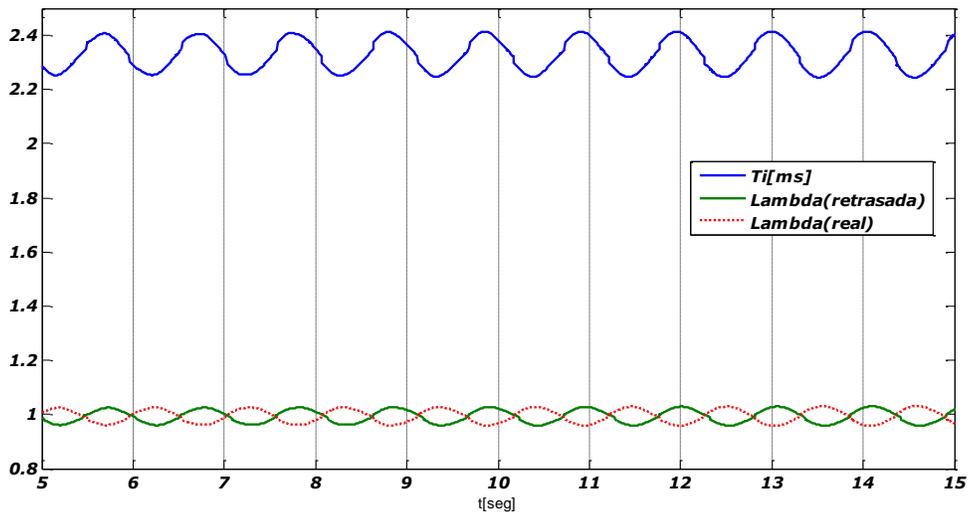


Figura 7.20: Acción de control en función de Lambda.

Como se puede observar en la *figura 7.16* la información  $\lambda$  es prácticamente una onda senoidal, que en este caso oscila entre las amplitudes 0,96 – 1,03, y se destaca un pequeño cambio brusco en dicha información, producto del factor proporcional que utiliza el controlador. Si bien no es un gran cambio, pero en la *figura 7.17* se muestra que el motor gira a un régimen mayor, en comparación al otro controlador para la misma situación. Por lo tanto en la *figura 7.18* se puede apreciar la forma de onda adoptada por  $T_i$ , la cual se explica en la *sección 5.5*, donde si bien tiene una mayor amplitud que la del controlador proporcional, se muestra en la *figura 7.19* que el consumo específico es prácticamente el mismo o incluso menor. Los valores de presión del múltiple de admisión y potencia del motor, son los mismos que para el otro controlador.

En el siguiente conjunto de figuras, que van desde la *figura 7.21* hasta la *figura 7.25*, se muestran los parámetros resultantes del motor que se encuentra en un régimen de revoluciones próximo a las 2700 RPM, correspondiente a  $\alpha=3^\circ$ . Al igual que el segundo caso del controlador proporcional, las condiciones iniciales son:  $n = 2700RPM$  y  $p_{adm} = 100kPa$ .

Como se observa en la *figura 7.21* la información  $\lambda$  varía entre 0,94 y 1,06, por lo que en promedio se obtiene  $\lambda=1$ . En la *figura 7.23* se muestra  $Ti$  y se nota que tiene una excursión menor que la que realiza el controlador proporcional para la misma situación, esto repercute directamente en el consumo específico, como se ve en la *figura 7.24*, que en su promedio es menor que el que se obtiene del otro controlador. La información  $\lambda$  se muestra con mayor detalle en la *figura 7.25*, en este caso la acción del factor proporcional en la corrección del controlador es mayor porcentualmente que en el caso de  $\alpha = 0,4^\circ$ , haciendo que se aleje levemente de la similitud con una señal senoidal.

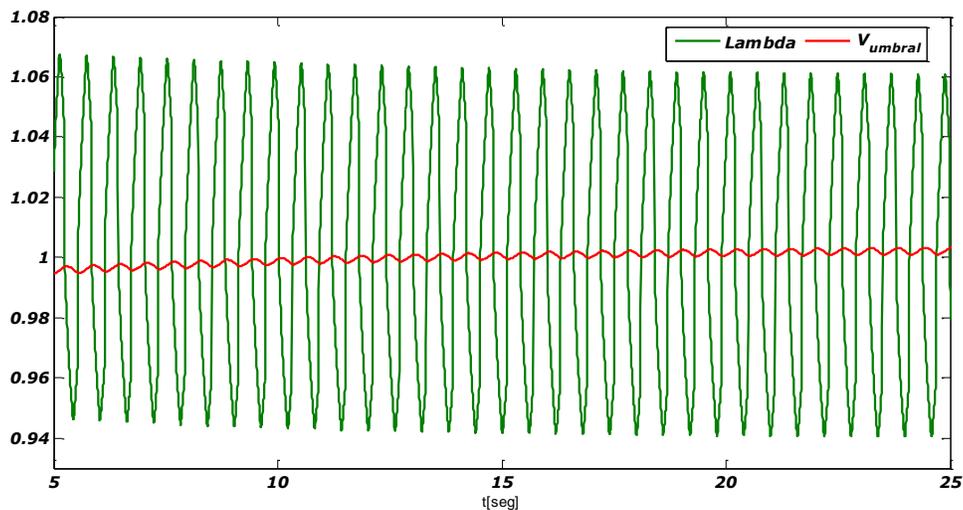


Figura 7.21: Parámetros  $\lambda$  y  $V_{umbral}$ .

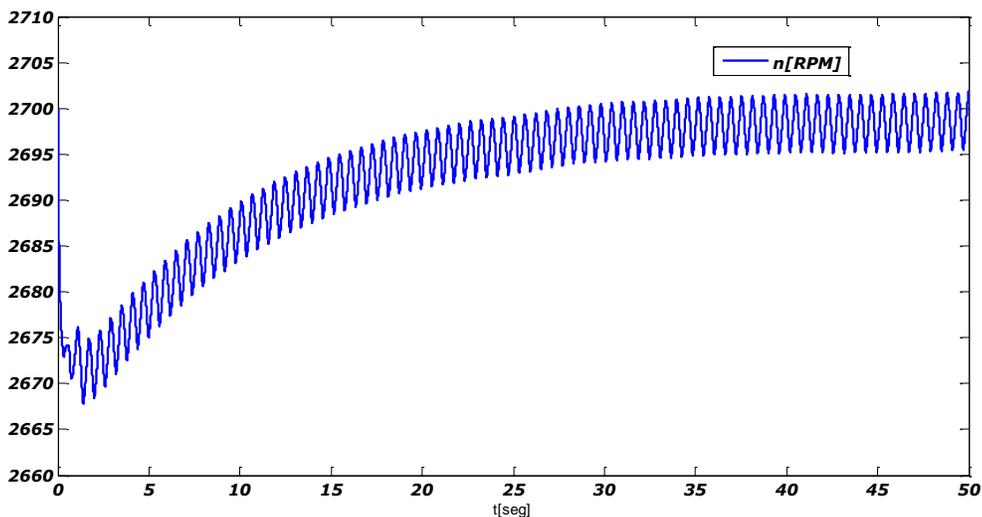


Figura 7.22: Parámetro  $n$ [RPM].

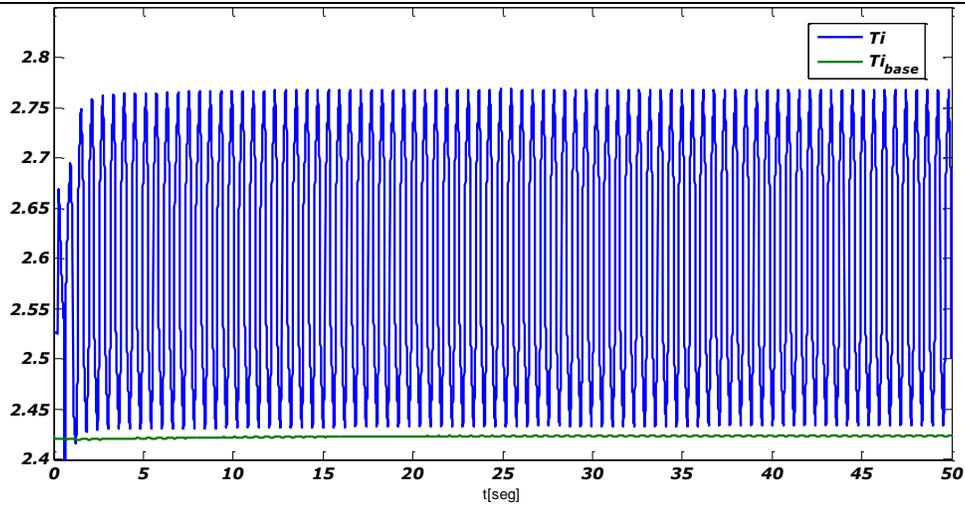


Figura 7.23: Parámetros  $T_i$  y  $T_{i\_base}$ .

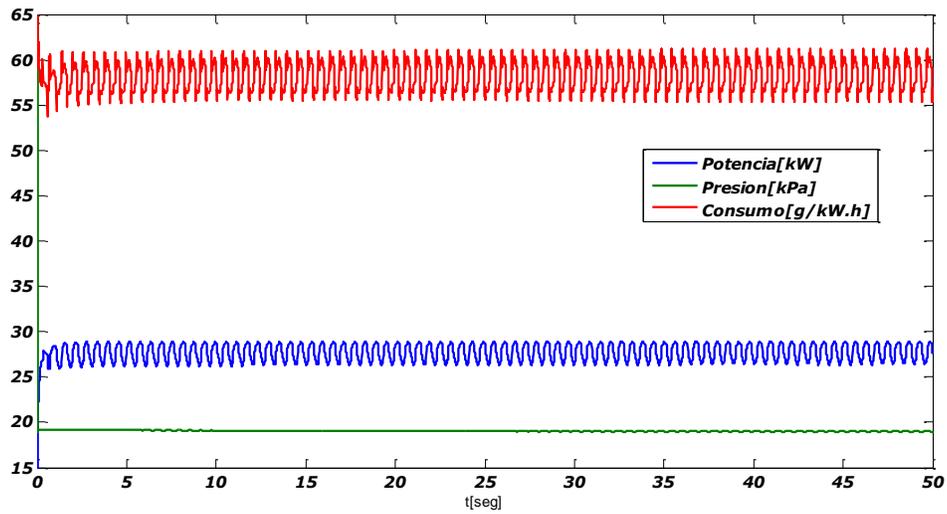


Figura 7.24: Parámetros de potencia, consumo específico y presión en el múltiple de admisión.

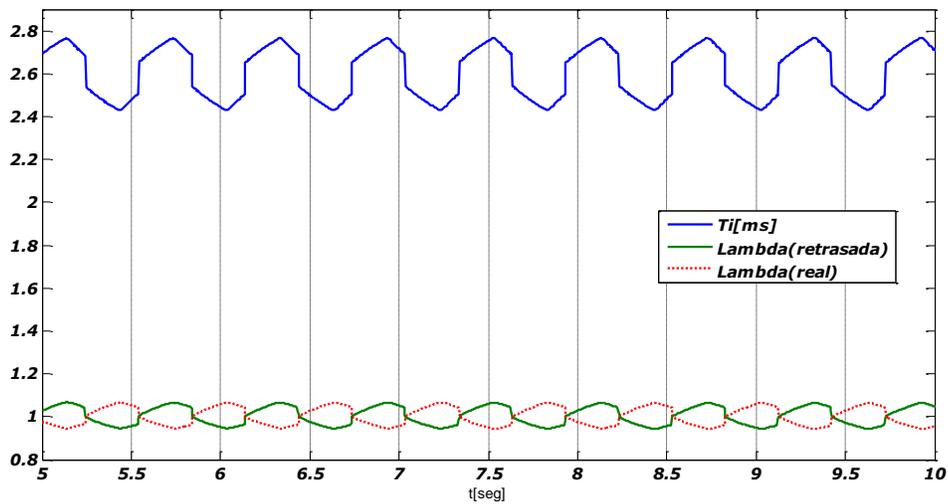


Figura 7.25: Acción de control en función de Lambda.

---

Por último se presenta el tercer juego de figuras, que van desde la *figura 7.26* hasta la *figura 7.30*, correspondientes a un régimen de revoluciones cercano a 3750 RPM, ya que  $\alpha=5^\circ$ . Al igual que para el otro controlador las condiciones iniciales son:  $n = 3800RPM$  y  $p_{adm} = 100kPa$ .

En la *figura 7.26* se puede ver que la información  $\lambda$  varía entre 0,95 y 1,05, logrando en promedio que  $\lambda=1$ . A su vez en la *figura 7.28* se observa que la excursión de  $Ti$  es bastante menor que la del otro controlador, y por consiguiente en la *figura 7.29* se nota que el consumo específico también es menor.

Para este caso al igual que en el anterior de  $\alpha = 3^\circ$ , se ve que el factor proporcional de la acción de control que realiza el controlador es mayor que el que efectúa en  $\alpha = 0,4^\circ$ , haciendo que la información  $\lambda$  no sea tan parecida a una señal senoidal, la *figura 7.30* muestra en detalle esta situación.

Con respecto a los parámetros de presión del múltiple de admisión, la potencia del motor, las revoluciones del motor, el valor umbral y  $Ti_{base}$ , no se le presta tanta atención porque para ambos controladores los valores obtenidos son similares y predecibles, según lo que se espera.

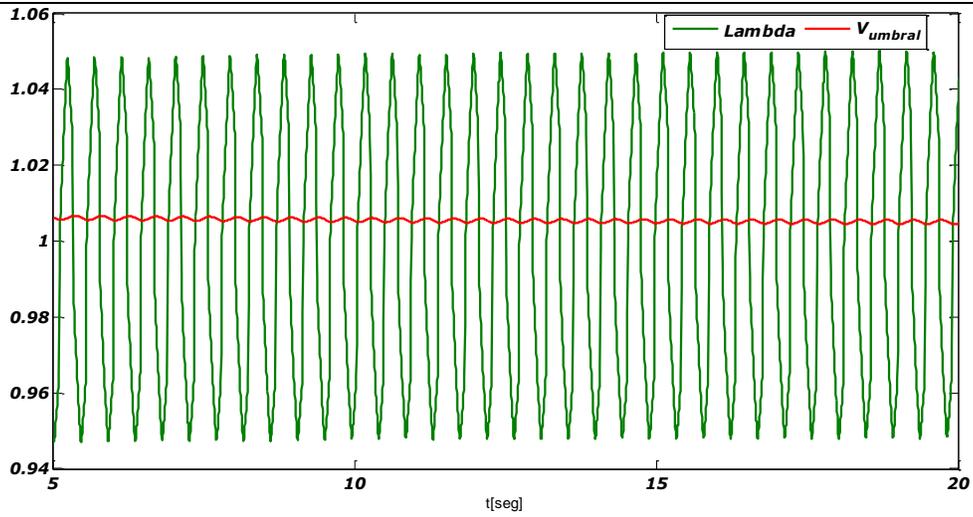


Figura 7.26: Parámetros  $\lambda$  y  $V_{umbral}$ .

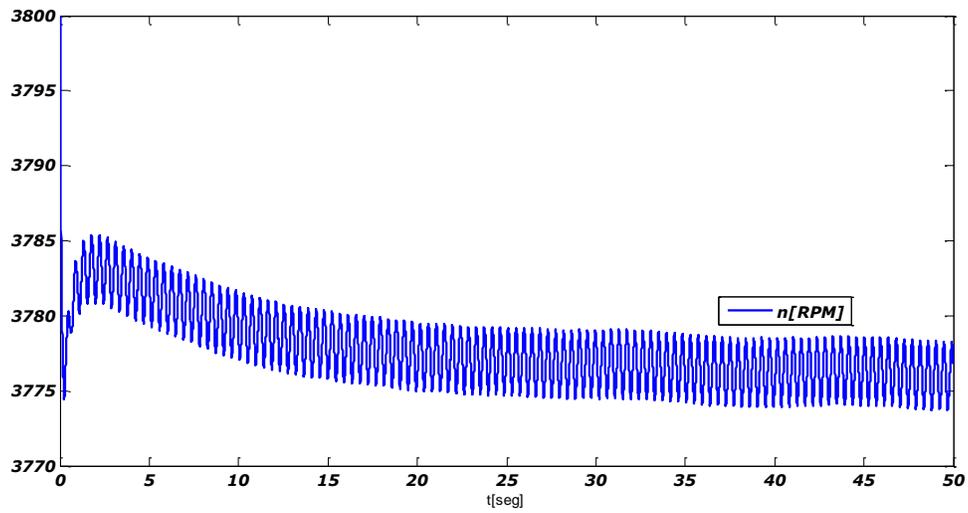


Figura 7.27: Parámetro  $n$ [RPM].

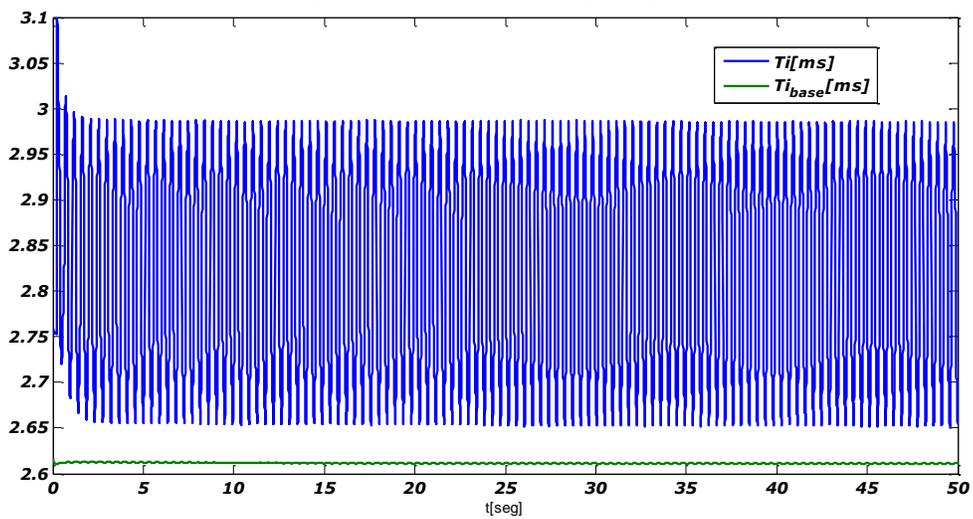


Figura 7.28: Parámetros  $T_i$  y  $T_{i_{base}}$ .

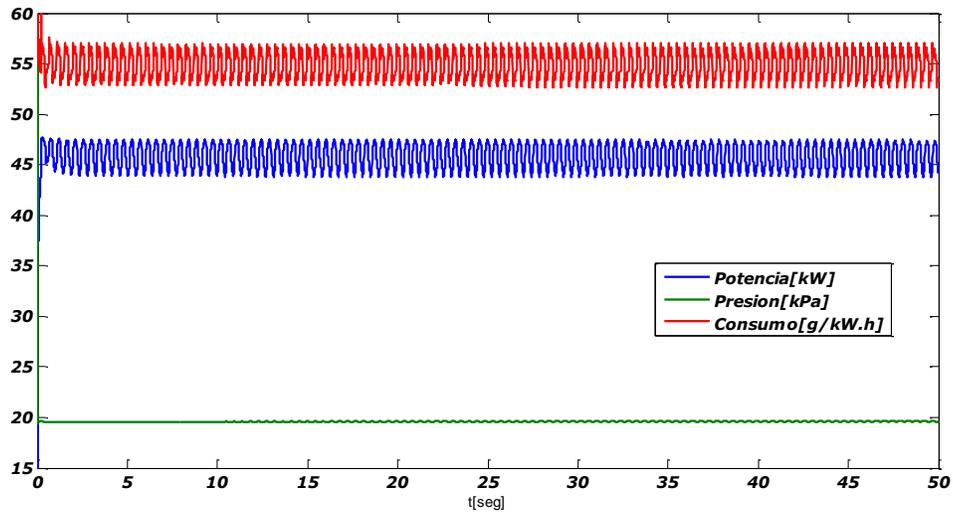


Figura 7.29: Parámetros de potencia, consumo específico y presión en el múltiple de admisión.

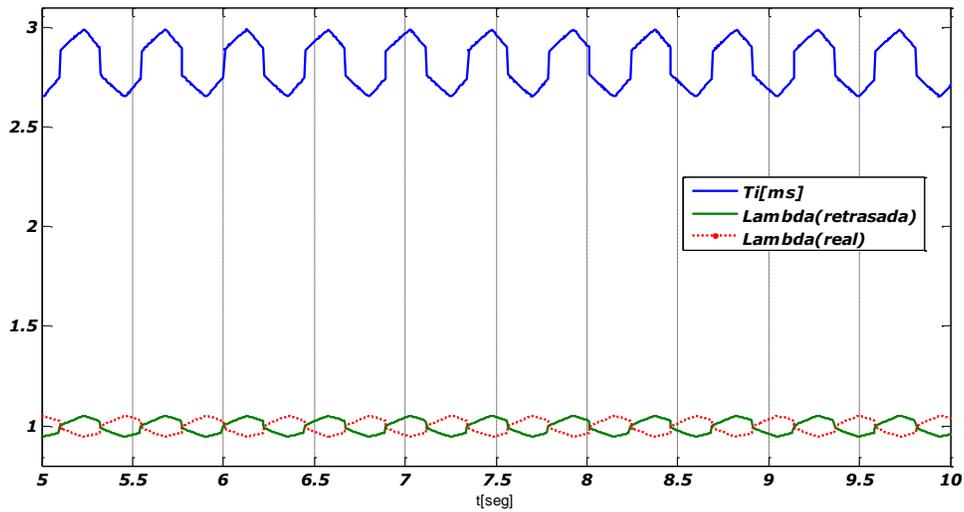


Figura 7.30: Acción de control en función de Lambda.

#### 7.4. Transitorio positivo – Controlador proporcional

Para determinar el comportamiento del controlador, se utilizan las siguientes secuencias de incremento en las revoluciones del motor: primero, se comienza con el motor en el régimen de revoluciones de ralentí a 850 RPM, luego se lo acelera hasta llegar aproximadamente a 2700 RPM y se lo mantiene a esas revoluciones; segundo, se comienza nuevamente con el motor en ralentí a 850 RPM, para luego acelerarlo hasta 3750 RPM y mantenerlo constante en esa cantidad de revoluciones.

---

Entonces para el primer caso, si bien no son de vital importancia, las condiciones iniciales son:  $n = 870RPM$  y  $p_{adm} = 100kPa$ . En el instante  $t = 10\text{seg}$  ocurre la apertura angular de la mariposa de admisión en un tiempo corto, pasando de  $0,4^\circ$  a  $3^\circ$ . Desde la *figura 7.31* hasta la *figura 7.36* se pueden observar los parámetros del motor y su respuesta al cambio.

En la *figura 7.31* se puede ver como se pasa del estado estacionario al transitorio positivo al aumentar  $\alpha$ , y una vez que se alcanza el valor umbral predefinido sucede nuevamente el estado estacionario. Como se comenta en la *sección 5.2* la amplitud de la información  $\lambda$  varía en cada estado estacionario, siendo mayor cuando  $\alpha = 3^\circ$ . En la *figura 7.32* se realiza un aumento, al reducir la base de tiempo del gráfico, en la zona donde sucede el estado transitorio positivo, esto es a partir del instante  $t = 10\text{seg}$  y se adhiere como referencia el valor estipulado en  $0,87$ , que es el momento donde se decide cambiar la estrategia del controlador del régimen transitorio al estacionario. Para este caso el tiempo que demora el motor en pasar al estado estacionario es de  $4,98\text{seg}$ .

En la *figura 7.33* se muestra como varían las revoluciones del motor, se observa que tiene una pendiente de subida hasta el instante que se cambia de estrategia, y la estrategia del estado estacionario tiene una pendiente mayor, lo cual hace que se llegue mas rápidamente a la cantidad de vueltas del motor deseadas.

Para la *figura 7.34*, donde se puede ver a  $Ti$ , hay que tener en cuenta que durante el estado transitorio se cumple  $Ti_{control} = 0ms$ , por lo tanto  $Ti_{base} = Ti$ . Luego en la *figura 7.35* se destacan los parámetros de consumo específico y la presión del múltiple de admisión, este último toma valores mayores en el primer instante de aceleración del motor, luego desciende hasta llegar a su valor mínimo que es cuando se llega a las revoluciones deseadas en el estado estacionario, si se compara con la información  $\lambda$  se puede ver que existe una similitud entre ambas señales, justamente esto se tiene en cuenta para el controlador derivativo.

Por último, la *figura 7.36* deja ver como varia el parámetro  $Ti$  en función de  $\lambda$ , e incluso se puede ver que una vez superado el valor estipulado, el valor de  $Ti$  disminuye tanto que las revoluciones bajan levemente y se pasa nuevamente a la estrategia del estado transitorio, pero solo por un breve momento, luego la acción de control ejercida por el controlador logra realizar una buena dosificación del motor.

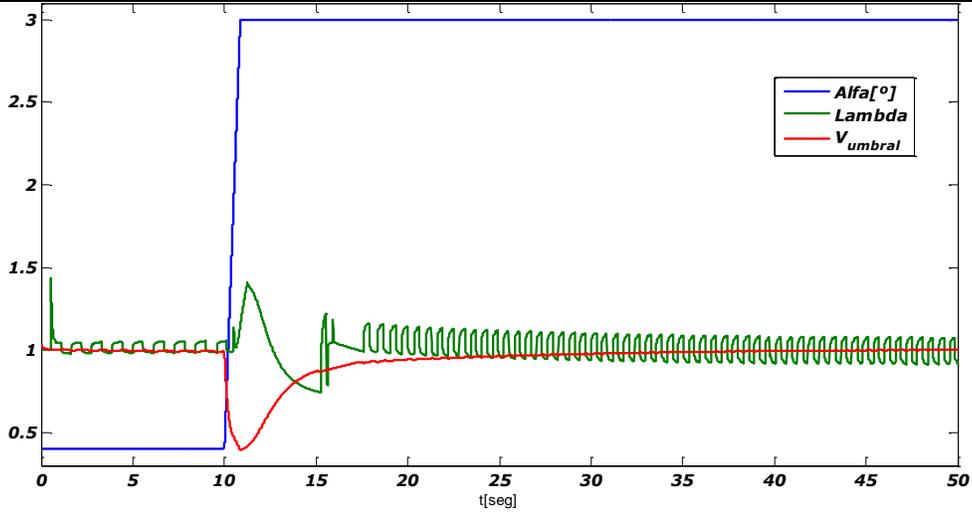


Figura 7.31: Parámetros  $\alpha$ ,  $\lambda$  y  $V_{umbal}$ .

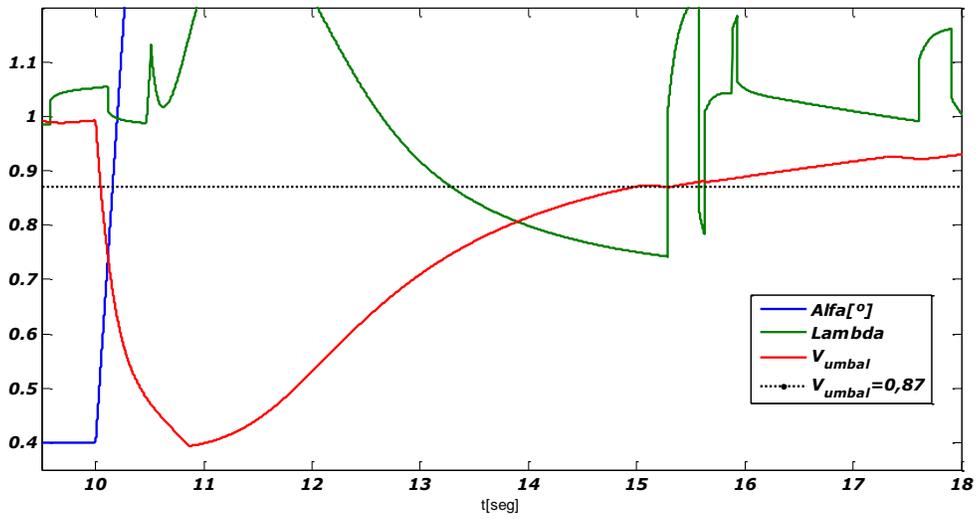


Figura 7.32: Parámetros  $\alpha$ ,  $\lambda$  y  $V_{umbal}$ .

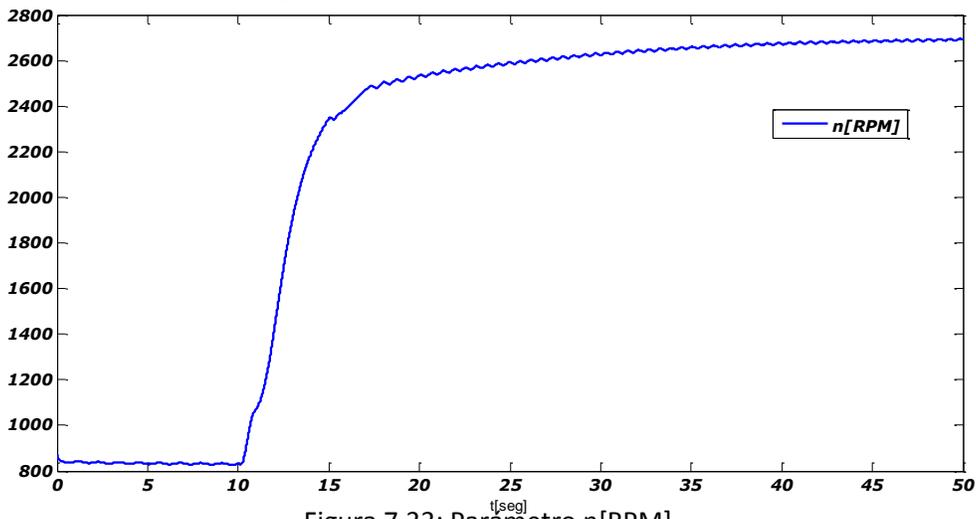


Figura 7.33: Parámetro  $n$  [RPM]

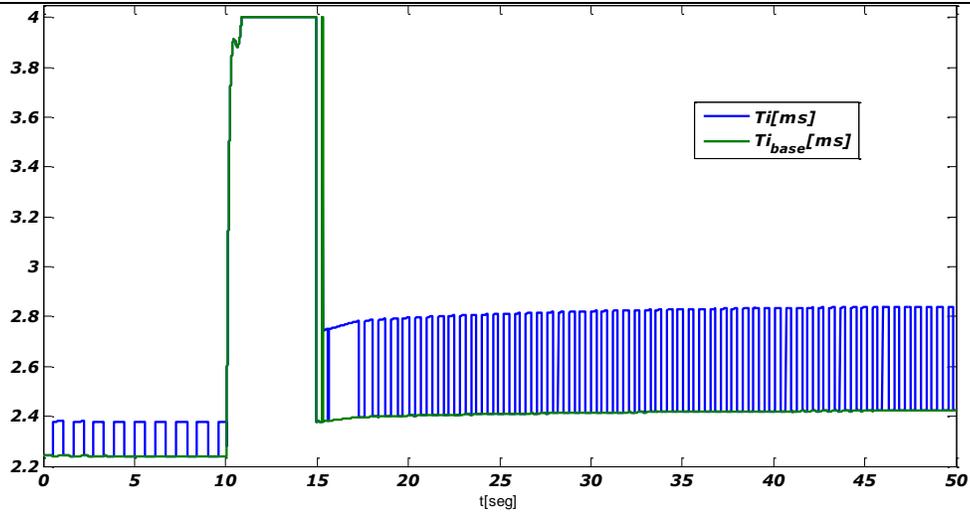


Figura 7.34: Parámetros  $T_i$  y  $T_{i\_base}$ .

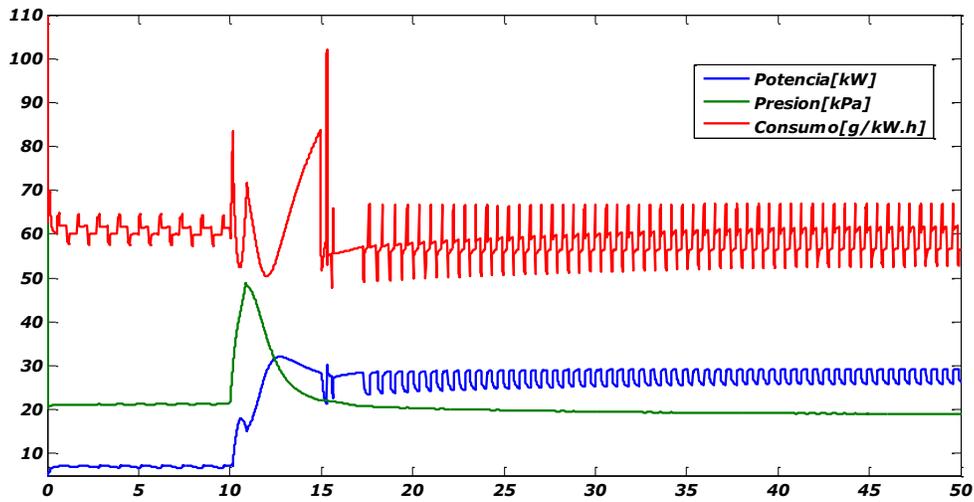


Figura 7.35: Parámetros de potencia, consumo específico y presión en el múltiple de admisión.

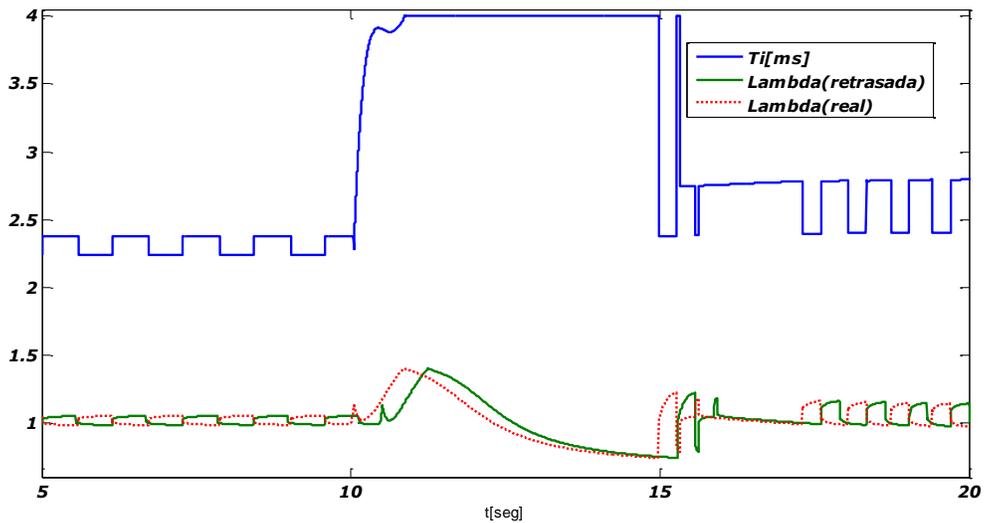


Figura 7.36: Acción de control en función de  $\lambda$ .

---

Para el segundo caso las condiciones iniciales son:  $n = 870RPM$  y  $p_{adm} = 100kPa$ . En el instante  $t = 10\text{seg}$  ocurre la apertura angular de la mariposa de admisión en un tiempo corto, pasando de  $0,4^\circ$  a  $5^\circ$ . Desde la *figura 7.37* hasta la *figura 7.42* se pueden observar los parámetros del motor y su respuesta al cambio.

En la *figura 7.38* se destaca el valor umbral, que demora  $7,8\text{seg}$  en llegar a  $0,87$  y pasar a la estrategia del estado estacionario.

Nuevamente en la *figura 7.39* se muestra la diferencia que existe en la pendiente de la curva de aceleración del régimen de vueltas del motor, como se enumera en la *sección 5.4* a mayor cantidad de vueltas le es mas dificultoso al controlador proporcional llegar a las revoluciones deseadas.

Al igual que en el primer caso de prueba del estado transitorio-estacionario, sucede en la *figura 7.40* que debido al bajo valor de  $Ti$  una vez alcanzado el valor estipulado, las revoluciones del motor descienden y se pasa nuevamente a la estrategia del estado transitorio, pero es solo un momento.

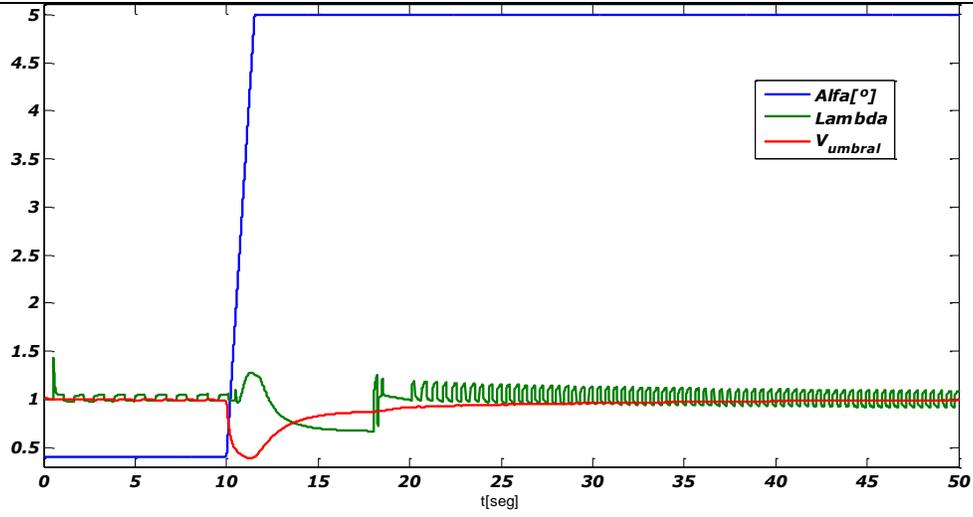


Figura 7.37: Parámetros  $\alpha$ ,  $\lambda$  y  $V_{umbra}$ .

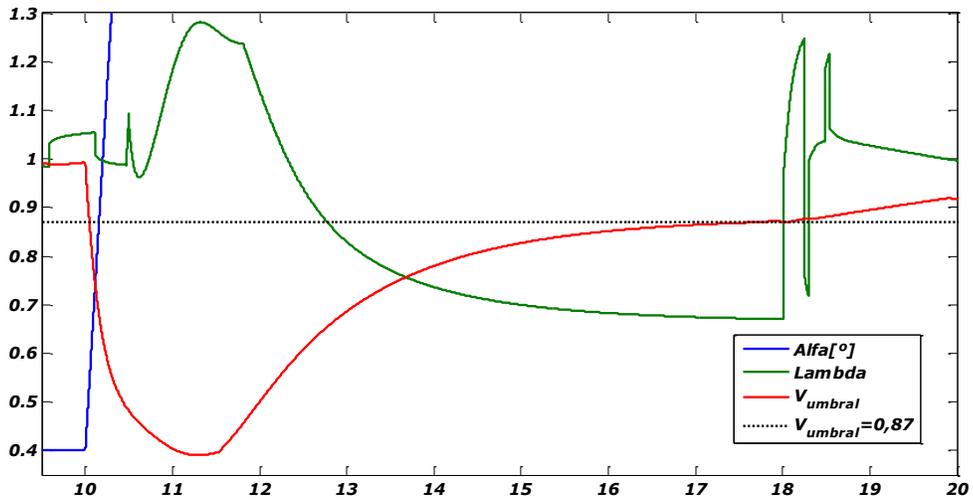


Figura 7.38: Parámetros  $\alpha$ ,  $\lambda$  y  $V_{umbra}$ .

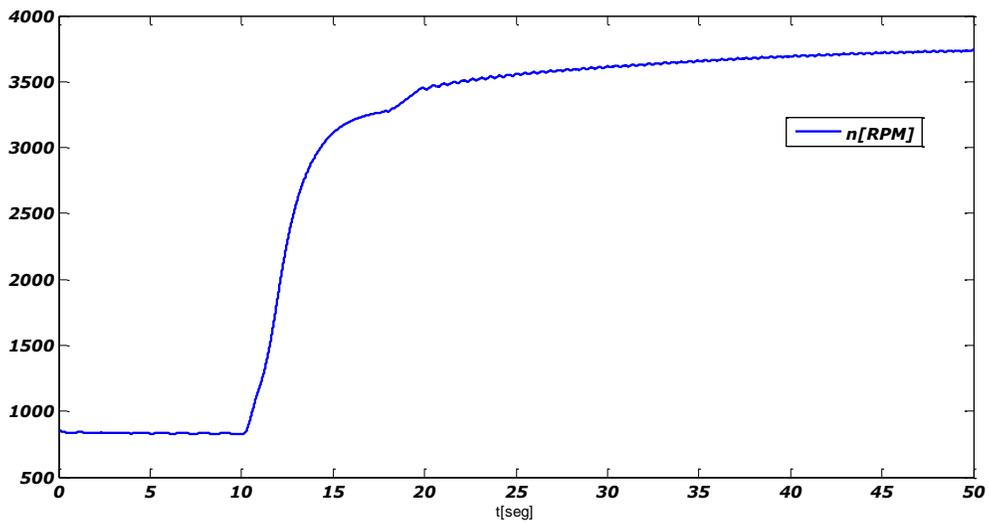


Figura 7.39: Parámetro  $n$ [RPM].

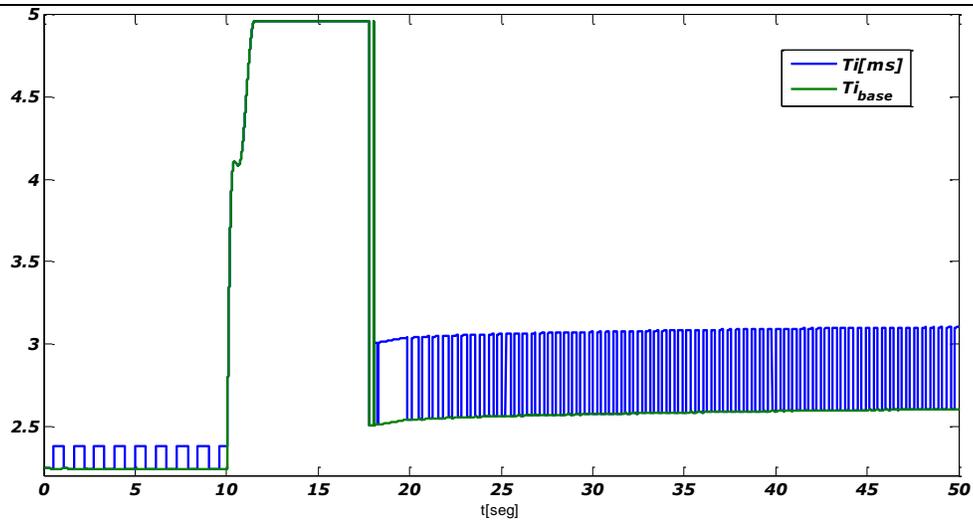


Figura 7.40: Parâmetros  $T_i$  e  $T_{i\_base}$ .

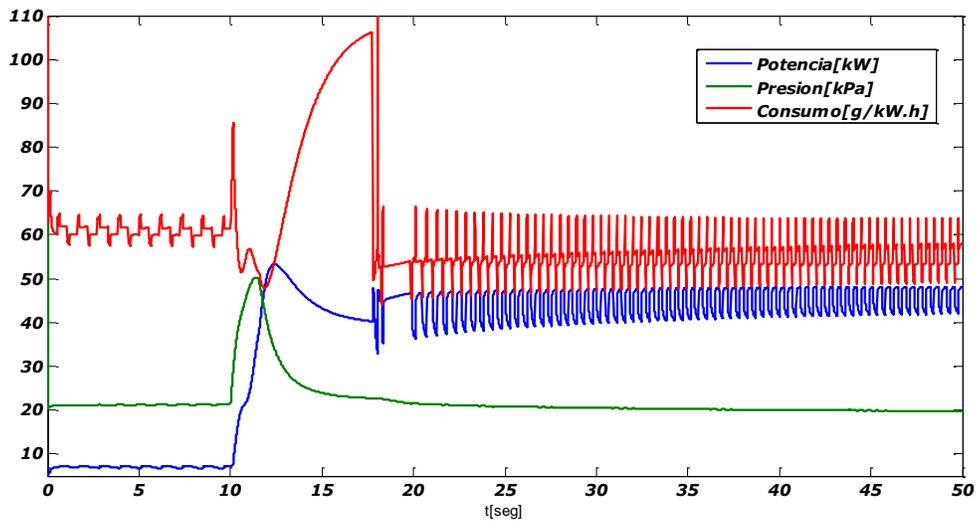


Figura 7.41: Parâmetros de potência, consumo específico e pressão em el múltiple de admisión.

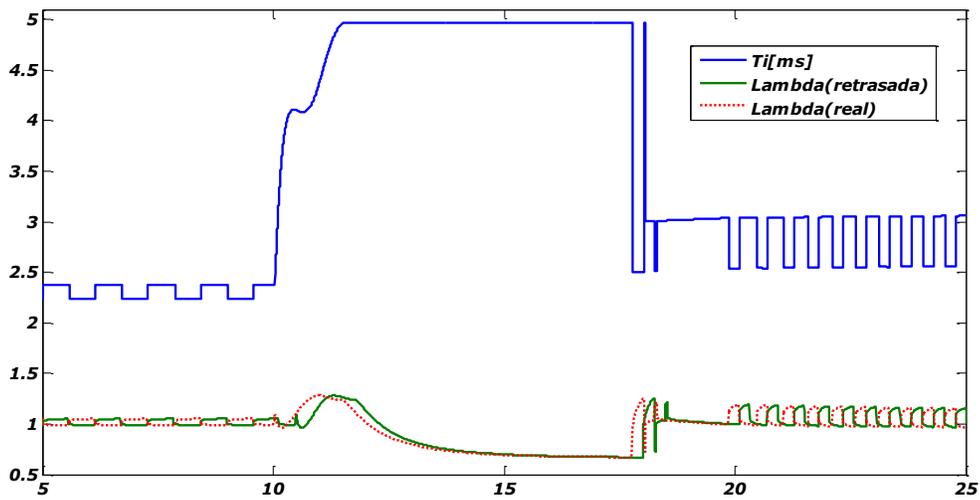


Figura 7.42: Acción de control en función de Lambda.

---

## 7.5. Transitorio positivo – Controlador derivativo

Como con el controlador proporcional se realizan las dos mismas pruebas. En ambos casos las condiciones iniciales son las mismas:  $n = 870RPM$  y  $p_{adm} = 100kPa$ . En el conjunto de figuras, que van desde la *figura 7.43* hasta la *figura 7.48*, se observan los comportamientos de los parámetros mas relevantes del motor.

En la *figura 7.43* se puede notar las diferencias de la información  $\lambda$  y el valor umbral, con respecto al otro controlador. En cuanto a la información  $\lambda$  se obtiene una gran diferencia en la amplitud del pico negativo durante el estado transitorio positivo, el del controlador derivativo es mas cercano a  $\lambda=1$  que el del controlador proporcional, sin embargo en el pico positivo los valores son similares. En cuanto al valor umbral la diferencia se observa mejor en la *figura 7.44*, en este caso el tiempo hasta alcanzar el valor estipulado en 0,87 demora mas tiempo, mas precisamente necesita 6,12seg, y para pasar a la estrategia del estado estacionario requiere 9,17seg, ya que el valor estipulado para este controlador es de 0,98. Sin embargo el controlador proporcional tarda 20,58seg en llegar al valor estipulado de 0,98, pero se aclara que utiliza la estrategia del estado estacionario.

En la *figura 7.45* se muestra la pendiente del crecimiento de las revoluciones del motor, a comparación de lo que se obtiene del otro controlador, en esta ocasión la pendiente es casi lineal con el tiempo, logrando llegar mas rápido al régimen de revoluciones deseado.

Por lo tanto en la *figura 7.46* se observa el tiempo de apertura del inyector, que en este caso depende de la presión del múltiple de admisión. Se destaca que al cambiar de la estrategia de transitorio a la de estado estacionario, el salto del valor de  $Ti$  no es tan grande como el del controlador proporcional.

En la *figura 7.47* se puede prestar mayor importancia al consumo especifico, que es menor durante la estrategia de transitorio positivo, que el obtenido en el controlador proporcional. Y en la *figura 7.48* se muestra que el controlador derivativo una vez que alcanza el valor estipulado de 0,98, es decir que pasa a la estrategia de régimen estacionario, no necesita volver ni por un instante a la del régimen transitorio.

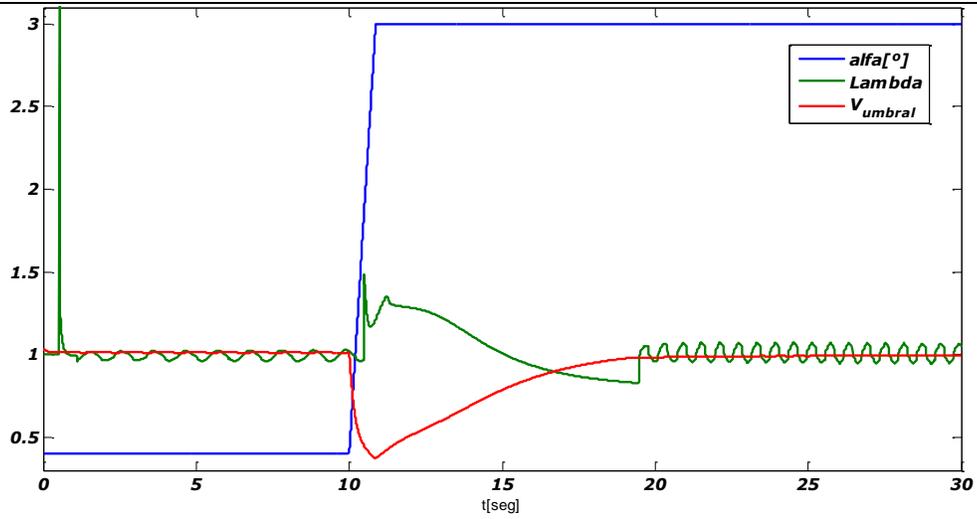


Figura 7.43: Parámetros  $\alpha$ ,  $\lambda$  y  $V_{umbra}$ .

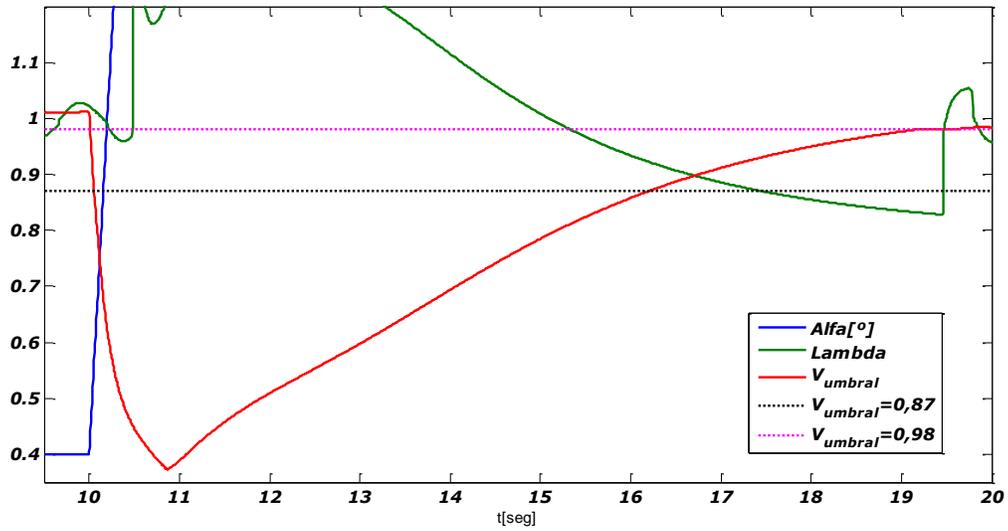


Figura 7.44: Parámetros  $\alpha$ ,  $\lambda$  y  $V_{umbra}$ .

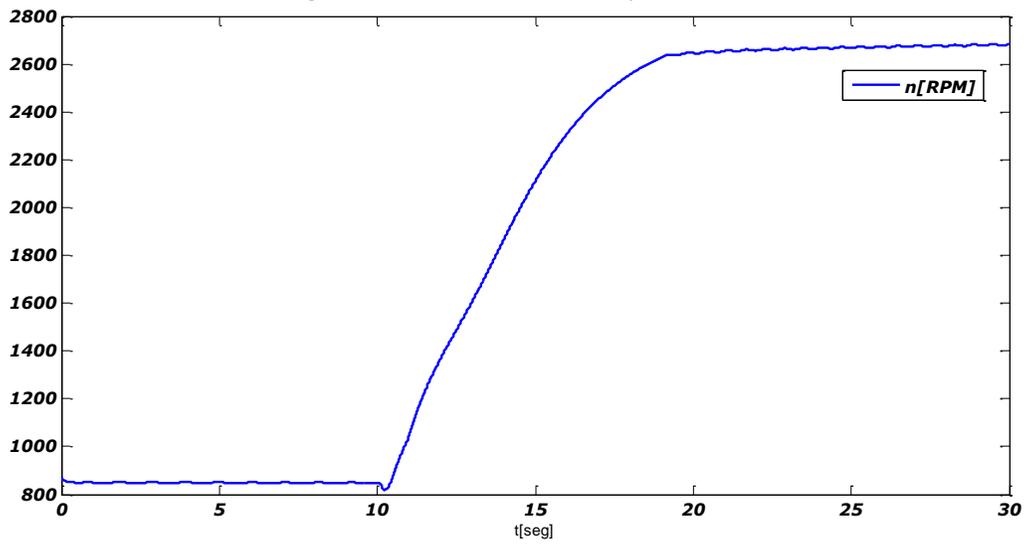


Figura 7.45: Parámetro  $n$  [RPM].

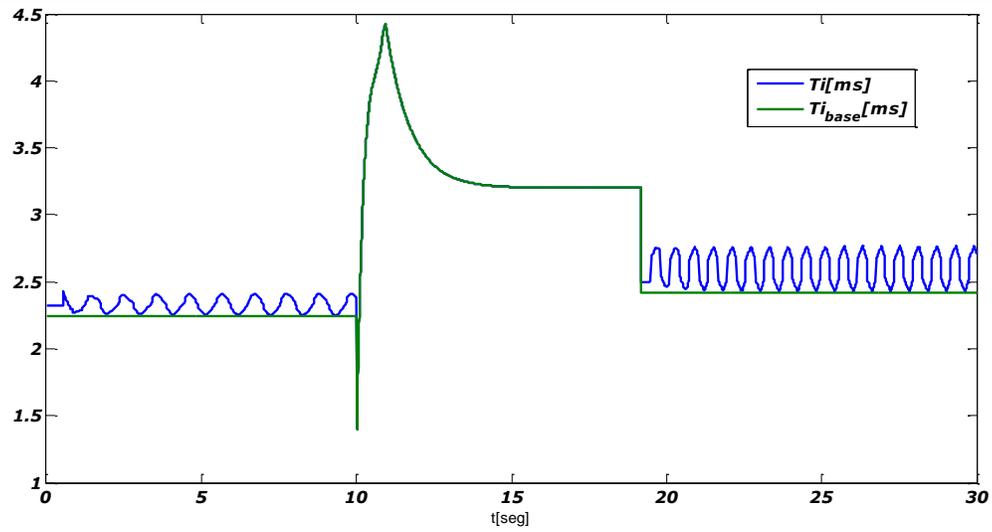


Figura 7.46: Parámetros  $Ti$  y  $Ti_{base}$ .

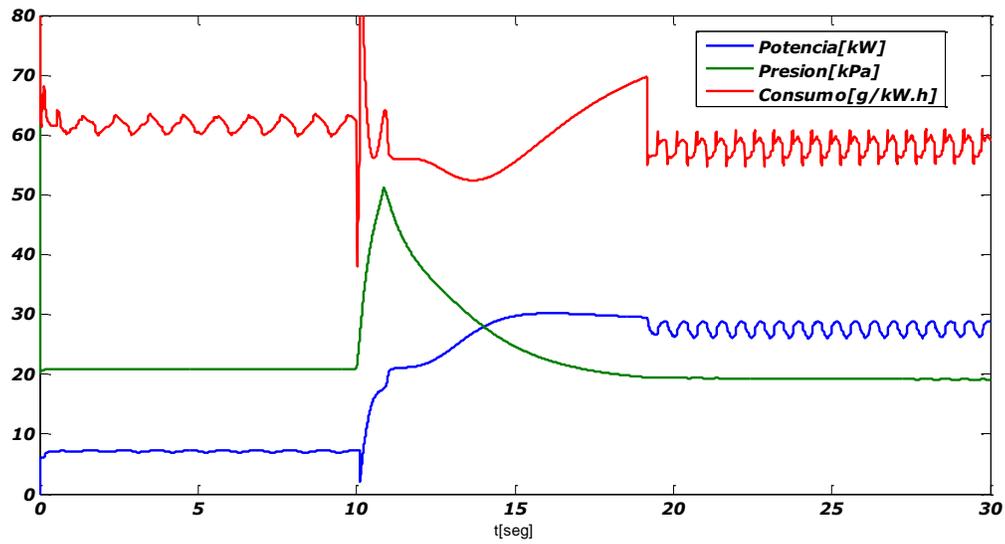


Figura 7.47: Parámetros de potencia, consumo específico y presión en el múltiple de admisión.

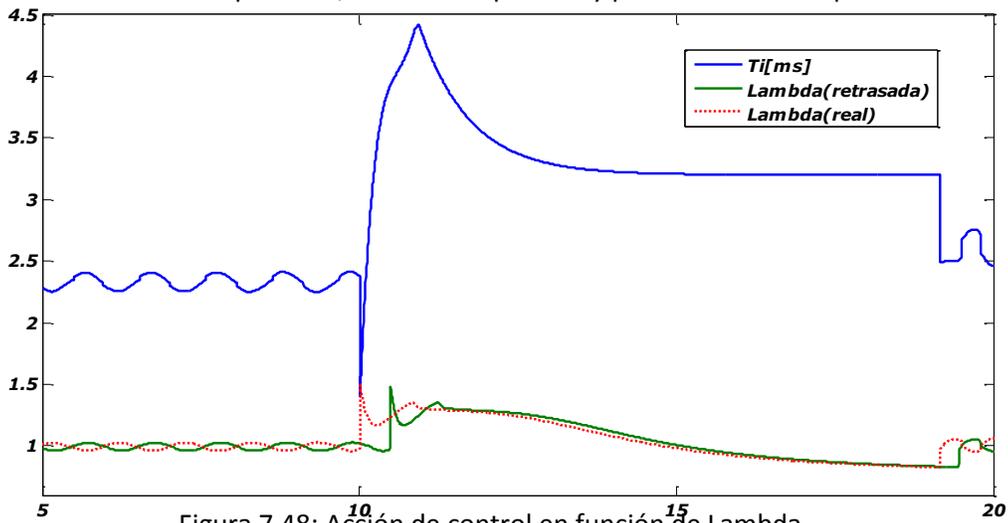


Figura 7.48: Acción de control en función de Lambda.

---

Concluyendo entonces que la diferencia principal entre ambos controladores es que el controlador proporcional ofrece una pendiente muy elevada en la aceleración del motor, pero solo en los primeros instantes, porque cuando la cantidad de revoluciones del motor son cercanas a las deseadas por el usuario esta pendiente crece con mucha lentitud. Por lo contrario para el caso del controlador derivativo, esta pendiente es constante prácticamente y se llega al régimen de vueltas deseado en menor tiempo. Y también es importante tener en cuenta el consumo específico, que es mas elevado para el caso del controlador proporcional.

Para el segundo criterio de prueba se obtiene el juego de figuras que van desde la *figura 7.49* hasta la *figura 7.54*. En la *figura 7.49* se puede destacar que los picos negativos y positivos de la información  $\lambda$  son menores que los del controlador proporcional, logrando estar mas cerca del valor unitario. Siguiendo, en la *figura 7.50* se observa el tiempo que demora el controlador en cambiar de estrategia, a partir del valor umbral, ya que necesita 6,7seg en alcanzar el valor estipulado de 0,87 y requiere 10,07seg en alcanzar el valor estipulado en 0,98. En cambio el controlador proporcional necesita 18.04seg para llegar al valor estipulado de 0,98.

En la *figura 7.51* que se muestra el aumento de revoluciones del motor, ya no es como en el caso anterior en donde la pendiente parece lineal al tiempo, ahora se observa una exponencial que a medida que aumenta el régimen de revoluciones del motor, va disminuyendo levemente.

En la *figura 7.53* se observa una de las mayores diferencias entre las respuestas de ambos controladores, se trata del consumo específico, que para el caso del controlador derivativo es considerablemente menor durante el estado transitorio.

El resto de los parámetros sin mencionar no presentan cambios significativos, no dejando extraer mayores conclusiones.

Entonces se desprende la afirmación que cuando mayor sea el cambio que se exige en el régimen de revoluciones del motor, el controlador derivativo va a desarrollar mejores prestaciones, tanto en el tiempo necesario para subir las revoluciones del motor, como en el consumo que presenta.

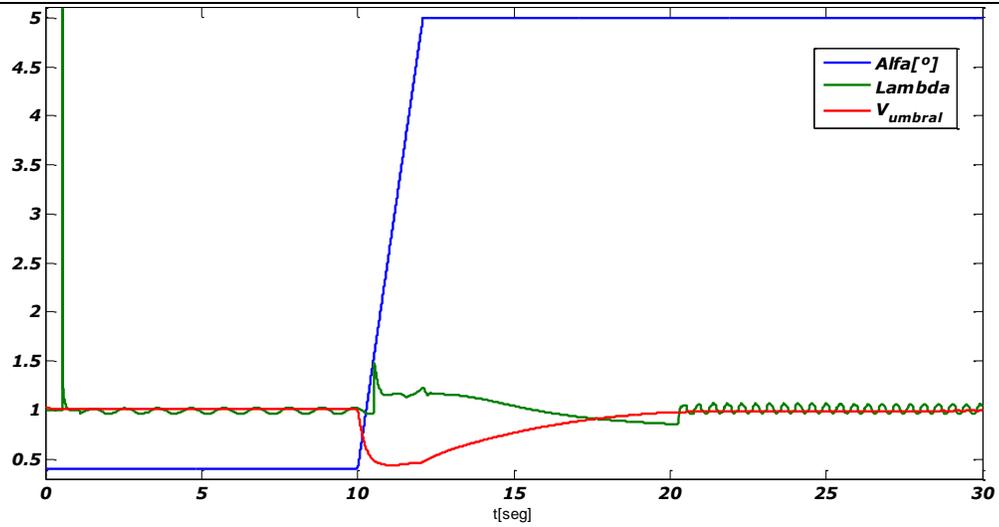


Figura 7.49: Parámetros  $\alpha$ ,  $\lambda$  y  $V_{umbra}$ .

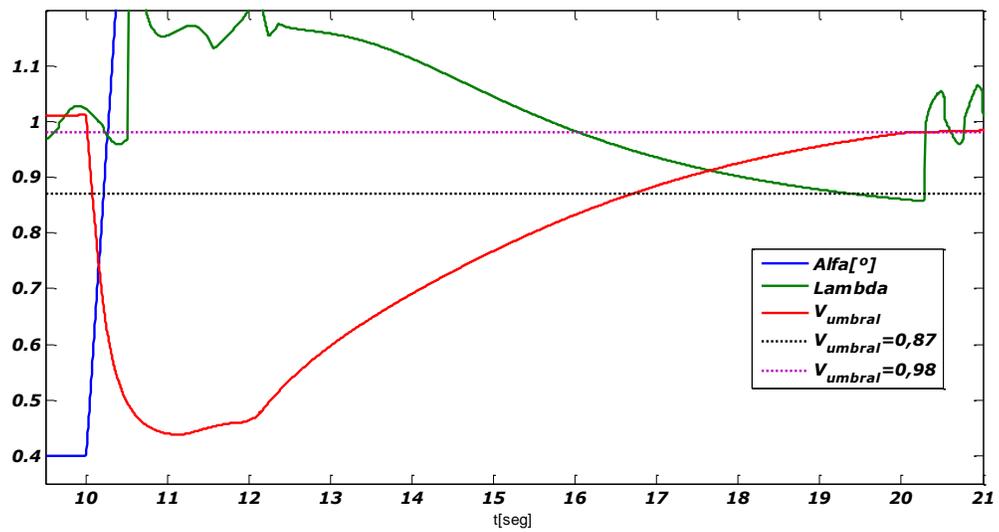


Figura 7.50: Parámetros  $\alpha$ ,  $\lambda$  y  $V_{umbra}$ .

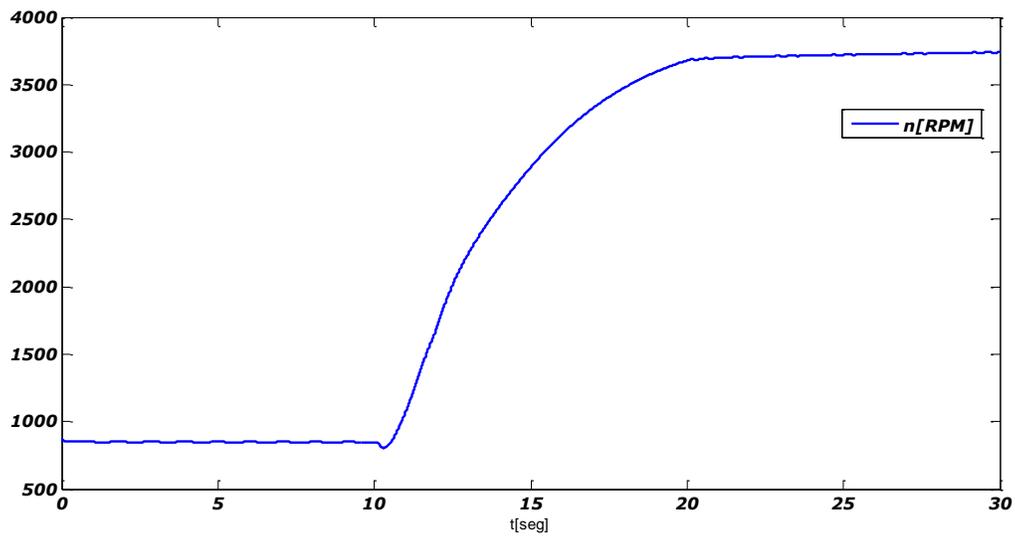


Figura 7.51: Parámetro  $n$ [RPM].

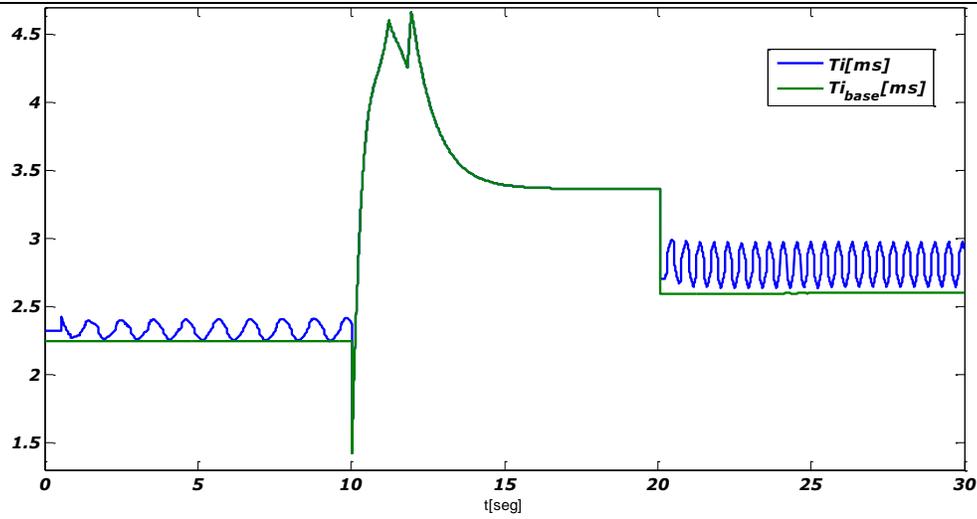


Figura 7.52: Parámetros  $T_i$  y  $T_{i_{base}}$ .

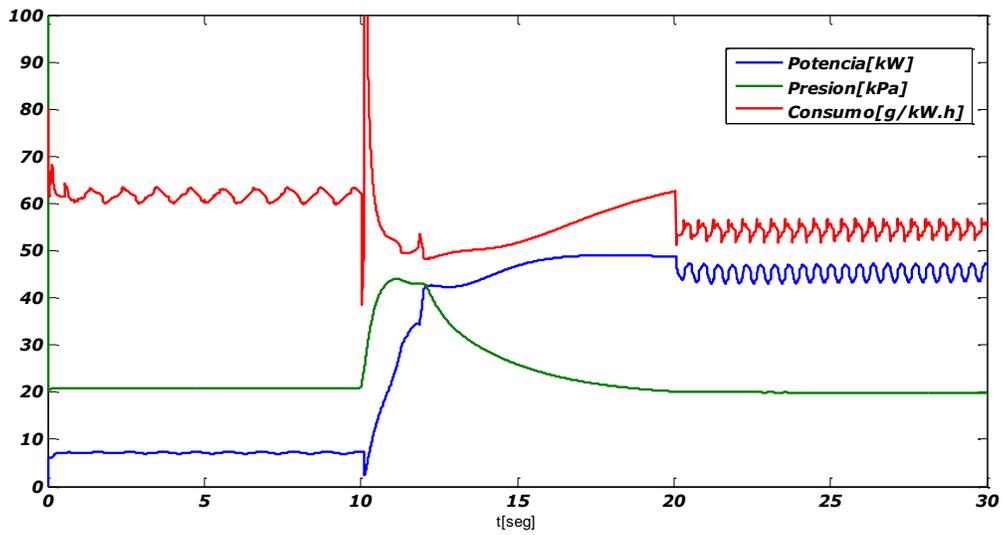


Figura 7.53: Parámetros de potencia, consumo específico y presión en el múltiple de admisión.

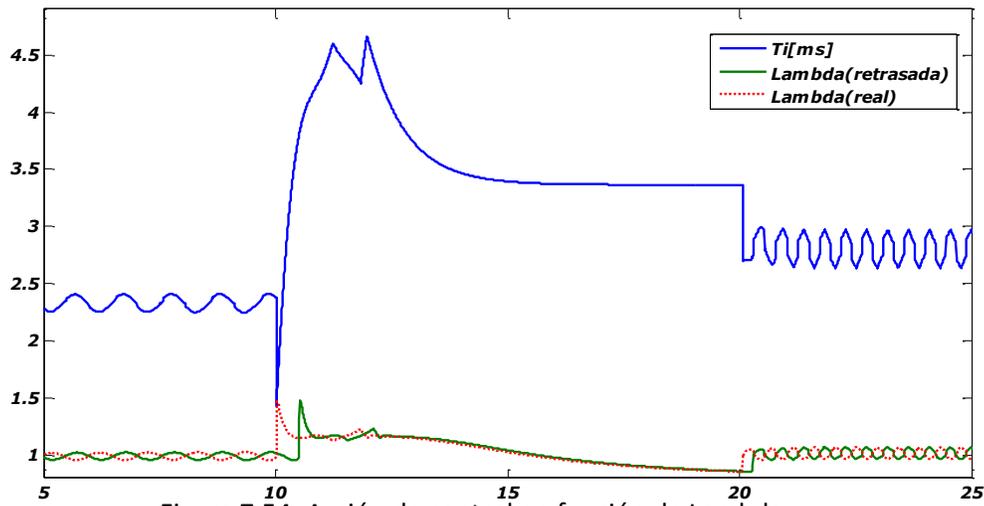


Figura 7.54: Acción de control en función de Lambda.

---

## 7.6. Resumen de la experiencia

En la simulación de los controladores se obtiene una gran cantidad de información del comportamiento del motor. Para poder llegar a una conclusión sobre que controlador ofrece mejores prestaciones se deben evaluar de manera crítica todas las lecturas obtenidas. A continuación se van a enumerar las conclusiones extraíbles de los parámetros mas destacables:

1. Señal Lambda " $\lambda$ ": esta información varia para distintos tipos de régimen de revoluciones del motor en estado estacionario, tanto en amplitud como en periodo, en la comparación de lo obtenido para cada controlador se puede observar que la respuesta del controlador derivativo es prácticamente una señal senoidal, mientras que la respuesta del controlador proporcional es mas parecida a una señal exponencial, siendo esta última una variación mas rápida y difícil de controlar. Para el estado transitorio esta información sirve de guía para definir el tiempo  $T_i$  durante los ensayos de los controladores, ya que cuando sucede el aumento del régimen de revoluciones del motor, el sistema no se realimenta. Desde este punto de vista, el controlador derivativo es mas eficiente.
2. Revoluciones por minuto del motor " $n$ ": de los gráficos de este parámetro se puede destacar para los estados transitorios, la manera en que aumenta  $n$ [RPM], para el controlador proporcional se asemeja a una exponencial ya que crece velozmente al principio, pero luego ese crecimiento se va atenuando, en cambio para el controlador derivativo la curva se parece a una función lineal con el tiempo. En la comparación de los controladores va a depender del objetivo buscado cual se comporte mejor, siendo si se busca una mayor aceleración en poco tiempo o si se busca aproximarse al dosado estequiométrico.
3. Valor estipulado: este parámetro está ligado únicamente al estado transitorio, cuanto mas grande es se necesita menos tiempo para llegar al régimen de revoluciones del motor deseado. Por lo tanto, se puede definir que el controlador derivativo es mas eficiente.
4. Consumo específico: siendo uno de los parámetros mas importantes, al interpretar los gráficos se observa claramente que el controlador derivativo obtiene valores mas chicos en todas las condiciones de ensayo, y se desprende que su comportamiento es mejor frente al controlador proporcional.
5. Potencia: este es el parámetro del que se extrajeron mayores coincidencias para la evaluación de ambos controladores, las diferencias existentes se observan en los estados transitorios y para el controlador proporcional se pueden ver valores mayores que los del controlador derivativo. Pero esto no indica si uno es mejor que otro, ya que el parámetro que utiliza la potencia y sirve de comparación es el consumo específico.

Al resto de los parámetros no se les hace un detalle ya que son consignados por el controlador, como el caso de  $T_i$ , porque son señales que el controlador no puede modificar, como sucede con  $\alpha$ , o porque su información no es relevante para los dos controladores, como el caso de la presión de admisión del múltiple que no se tiene en cuenta en el controlador proporcional.

---

Resumiendo, el controlador derivativo presenta mejores prestaciones al evaluar todos los parámetros de manera conjunta. Concluyendo entonces que para la implementación de un controlador de inyección se deben utilizar los principios del segundo controlador de inyección propuesto.

---

## 8. Implementación del sistema

### 8.1. Introducción

En base a lo desarrollado en capítulos anteriores, se tiene que la ECU es la responsable de emitir las ordenes de conmutación para las bobinas de encendido y para los inyectores del vehículo, esto lo hace luego de la correcta interpretación de la información que envían los sensores ubicados en el motor del vehículo.

Como primera medida la central electrónica debe ser capaz de reconocer la posición angular del cigüeñal, mediante la información emitida por el sensor de revoluciones. Luego tiene que procesar las lecturas del resto de los sensores para ejecutar la orden de apertura a los inyectores de manera de cumplir la dosificación estequiométrica. Paralelamente, también ejecuta la orden de conmutación hacia las bobinas de encendido en función del régimen de revoluciones al que se encuentra el motor.

En este capítulo se van a desarrollar todos los conceptos teóricos necesarios para luego dar paso al desarrollo práctico del sistema de inyección.

### 8.2. Condiciones a cumplir

Todos los automóviles trabajan con una batería de 12V, que es la encargada de alimentar todos los consumos eléctricos del vehículo. Cuando el motor se encuentra en marcha, el alternador de corriente se encarga de cargar la batería y lo hace con una tensión mayor, que varía entre 13,5V y 14,5V. Por el contrario, durante el momento de arranque, el motor comienza a levantar el régimen de revoluciones gracias al movimiento que le imprime el burro de arranque, el cual tiene un consumo elevado de corriente y hace que la tensión de batería en ese momento llegue a caer incluso hasta los 10V promedio.

Entonces, en principio el sistema de inyección debe funcionar dentro de un rango de tensión amplio, mas precisamente entre 10V y 15V.

Como se enumera en la *sección 3.2.1*, el sensor de revoluciones al ser inductivo varía la amplitud de la información que emite en función de las revoluciones del motor. Entonces, para saber con qué valor de amplitud trabaja, se ensaya sobre el motor de un vehículo en prueba, las dos siguientes condiciones de trabajo: la primera es el momento de menor amplitud, que ocurre durante el momento de arranque. Para realizar este testeo se desconectan las fichas que alimentan a las bobinas de encendido, así el motor no arranca, y se mide en los pines de la ficha del sensor de revoluciones con el osciloscopio digital, mientras se alimenta el burro de arranque desde la llave de contacto del vehículo. Los resultados obtenidos se muestran en la *figura 8.1*, la señal cuenta con una amplitud mínima de 2V pico a pico, y si bien la amplitud debería ser prácticamente constante, en el caso particular de este motor la rueda dentada se encuentra bastante dañada por algún golpe ocurrido e incluso puede contar con un leve movimiento axial. El periodo de esta señal es de 0,252 segundos, lo que es equivalente a un régimen de revoluciones de 238RPM.

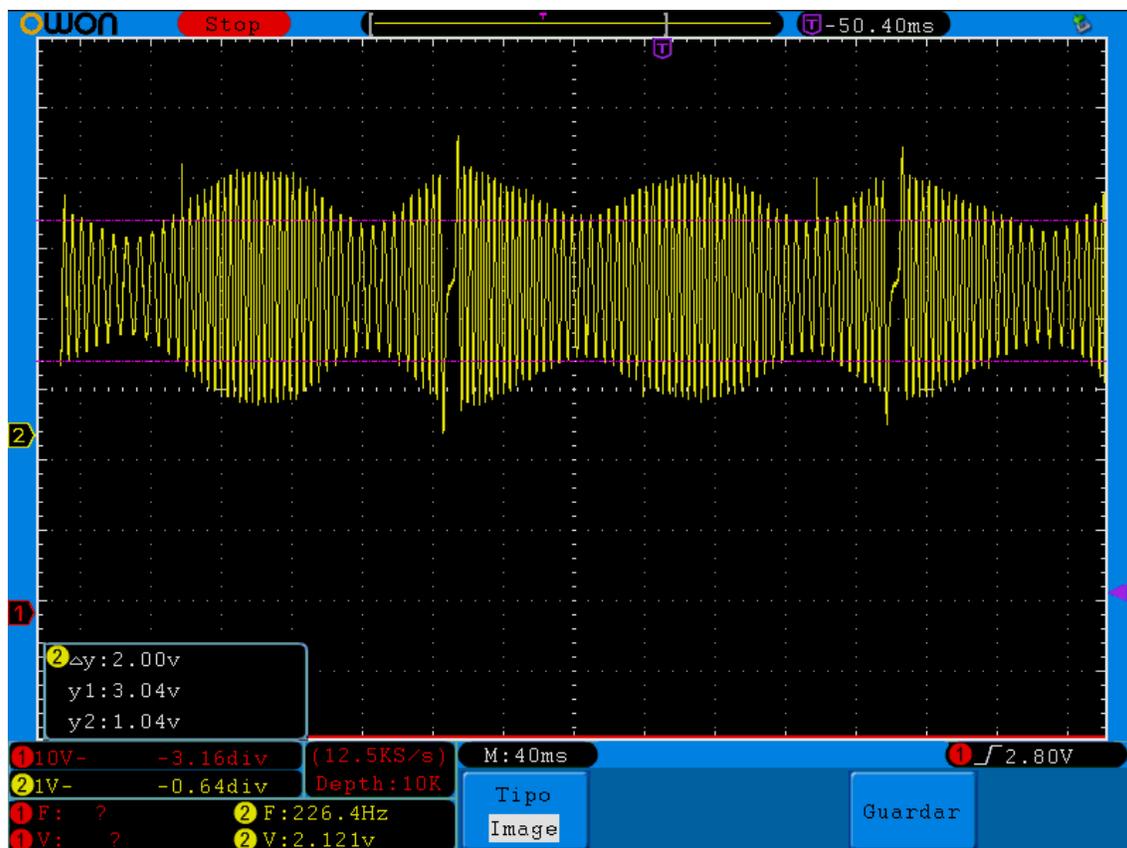


Figura 8.1: Señal del sensor de revoluciones durante el momento de arranque.

La segunda condición se obtiene en un régimen de revoluciones mayor. Para realizar el ensayo se pone en marcha el motor del vehículo con la ECU original, y se conecta el osciloscopio en paralelo a los cables que van desde el sensor de revoluciones hacia la ECU, luego se acelera el motor mediante la apertura de la mariposa de admisión y se obtiene lo que muestra la *figura 8.2*. En este

caso la amplitud máxima es de 10,5V aproximadamente y ocurre en un régimen de revoluciones cercano a 1200RPM.

Entonces, el sistema de inyección tiene que ser capaz de procesar una información que no solo varía en frecuencia, sino que tiene una gran variación de amplitud, cumpliendo con una sensibilidad para el orden de 1,5V pico a pico.



Figura 8.2: Señal del sensor de revoluciones durante marcha regular (traza amarilla).

### 8.3. Topología propuesta

La topología propuesta para el sistema de inyección a implementar, se puede dividir en tres grupos: etapa de entrada, procesamiento de señal y etapa de salida, como se muestra en la *figura 8.3*.



Figura 8.3: Topología del sistema de inyección.

La función de la etapa de entrada es acondicionar las señales provenientes de los sensores y convertirlas en señales digitales que puedan ser interpretadas por la segunda etapa. La segunda etapa consiste en su totalidad en un microcontrolador, que es el responsable de procesar toda la información entrante para emitir, en el momento y la manera correcta, las ordenes de disparo hacia la etapa de salida. La última etapa tiene la función de convertir la señal proveniente del microcontrolador, que es de baja amplitud, en una señal que sea capaz de alimentar las bobinas de encendido y los inyectores de combustible.

#### 8.4. Elección del microcontrolador

Uno de los objetivos propuestos en el presente trabajo es que los componentes utilizados para la elaboración de la central de inyección se puedan conseguir en el mercado local. A continuación se hace un análisis de los requisitos que debe satisfacer el microcontrolador seleccionado:

- Se requieren al menos 8 pines de salidas, que corresponden a 4 bobinas de encendido individuales y a 4 inyectores de combustible que trabajan de manera secuencial e independiente.
- Se necesita como mínimo, que cuente con la recepción de 4 canales analógicos, correspondientes a los sensores de mayor importancia para la ECU, menos el sensor de revoluciones que debe ser leído de manera permanente. En un proyecto mas ambicioso se necesitarían mas cantidad de canales, por la incorporación de nuevos sensores, como pueden ser: sensor de detonación, sensor de presión de atmosférica, etc.
- Al menos, debe contar con un canal de interrupciones externas de alta prioridad, que se le asignara a la información proveniente del sensor de revoluciones.
- Se necesita que tenga una alta frecuencia de trabajo, por encima de 10MHz.
- En concepto a trabajos futuros, es conveniente contar con la posibilidad de tener algún tipo de comunicación con los valores de los sensores, interpretados por el microcontrolador, mediante una interface, por ejemplo: comunicación USB.

De todas estas condiciones se realiza una comparación entre los microcontroladores que cumplen con los requisitos y que también son existentes en el mercado local, y satisfacen en mayor medida la relación de precio/calidad. En la *tabla 8.1* se pueden ver los microcontroladores preseleccionados.

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-Bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EUSART	Comparators	Timers 8/16-Bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I <sup>2</sup> C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

Tabla 8.1: Comparación de microcontroladores.

Entonces se decide por la utilización del PIC18F2550 de la familia Microchip, debido principalmente a que es más obtenible y tiene un costo menor que los otros microcontroladores. Por último, se debe destacar que presenta como característica la posibilidad de trabajar hasta con frecuencias de 48MHz y tiene comunicación USB V2.0.

## 8.5. Objetivo de las etapas pre y post microcontrolador

Como el microcontrolador PIC seleccionado trabaja con tensiones de 0 a 5V, la etapa de entrada va a tener que conformar las señales de los sensores, en el caso de aquellos que superen los 5V de amplitud en su información, para que tengan una excursión máxima de 5V. Para el caso del sensor de revoluciones tiene que transformar la señal analógica, en una señal binaria de 0V o 5V, ya que va a ser un bit de entrada de interrupción al microcontrolador.

Por otro lado, la etapa de salida va a tener que convertir la señal de 5V de salida del PIC, que es de baja potencia, en una señal de 12V y alta corriente, como es el caso de las bobinas de encendido y, en menor medida pero de misma forma, los inyectores de combustible.

## 8.6. Desarrollo práctico

A continuación se muestra la concepción del sistema de inyección, utilizando todo lo definido en los capítulos anteriores, con el fin de lograr un producto terminado e incluso tener la

---

posibilidad de ensayarlo en el motor de un vehículo y así obtener conclusiones respecto del funcionamiento del mismo.

## 8.7. Vehículo de ensayo

Es sumamente importante definir los tipos de sensores que van a tener que interpretar el sistema de inyección, sabiendo que cada automóvil cuenta con distintas tecnologías a la hora de realizar las mediciones de los parámetros más relevantes para la ECU. Si bien el sistema se propone que sea universal, solo se ensaya sobre un vehículo en particular, debido principalmente a la dificultosa tarea de conseguir automóviles que cuenten con un tiempo considerable para realizarle pruebas y mediciones, y sin mencionar la responsabilidad que conlleva.

El vehículo disponible para ensayos es un Fiat Palio modelo 1998, que cuenta con la central de inyección de la marca Magneti Marelli modelo IAW1G7.73. Las características más sobresalientes se enumeran a continuación:

- Inyección monopunto: cuenta con un inyector central que abastece de combustible pulverizado a la mezcla presente sobre la mariposa de admisión.
- Dos bobinas de encendido: que trabajan con las bujías de los cilindros 1/4 y 2/3 respetivamente.
- Sensor de revoluciones inductivo, ubicado sobre la rueda dentada que se encuentra solidaria al eje del cigüeñal.
- Sensor de posición de mariposa de 5V: la excursión de la información es desde 0V, como mínimo, hasta 5V como máximo.
- Sensor de presión de múltiple de admisión de 5V: al igual que el TPS, su excursión está limitada como máxima, hasta 5V.
- Sonda lambda con calefacción, la excursión de la información va desde 0V hasta 1V.
- Sensor de temperatura de agua: su información como máximo puede ser de 5V, pero se recuerda que debe ser alimentado con una fuente de corriente constante.

Entonces se puede ver que para este caso en particular, con la excepción del sensor de revoluciones, la información proveniente de los sensores puede ingresar directamente en los pines correspondientes del PIC, sin necesidad de un acondicionamiento en los niveles de amplitud. Pero esto no puede darse por válido para todos los motores existentes en el mercado, ya que algunos sensores, dependiendo de sus características de diseño, emiten informaciones superiores a 5V. Donde ocurran estas situaciones, la etapa de entrada debe ser capaz de dimensionar correctamente los niveles de amplitud sin que varíe la información de la magnitud que se mide.

---

Lógicamente, aquellos sensores que necesiten alimentación para poder medir, deben estar alimentados correctamente.

## 8.8. Etapa de entrada

Esta etapa debe ser capaz de convertir la señal entregada por el sensor de revoluciones, que varía en amplitud y frecuencia, en una señal que pueda ser admitida como entrada para el microcontrolador, mejor dicho una señal binaria con valores que sean de 0V o 5V y donde la frecuencia sea la misma que la del sensor.

Para lograr la conversión, lo que se hace es diseñar un circuito de comparación entre la señal del sensor de revoluciones y una tensión de referencia. Luego dependiendo de la tensión de salida se excita un circuito que trabaje con la saturación de un transistor y que esté unido al pin de entrada del microcontrolador.

El circuito de comparación se puede observar en la *figura 8.4*, donde se utiliza un LM311 para comparar la señal del sensor de RPM, que se encuentra montada sobre una señal continua de 5V, con respecto a una tensión de referencia de 5V. Se utiliza una realimentación positiva para lograr una pequeña histéresis asimétrica y evitar momentos de indecisión a la salida. A su vez, se debe colocar una resistencia a la tensión de alimentación positivo, se habla de R3, ya que la salida del amplificador operacional es de colector abierto. Entonces la salida puede variar entre 0V, este es el caso en donde el pin 2 tiene una tensión mayor que el pin 3, y 5V, que es cuando el pin 3 tiene una tensión mayor que el pin 2.

Para saber los valores del ciclo de histéresis se plantean dos circuitos: uno cuando el pin 7 tiene 0V y otro cuando tiene 5V.

Para el primero de los casos, se plantea el circuito de la *figura 8.5*, donde se puede deducir fácilmente que  $V_{rpm}$  debe ser mayor a 5,23V para que el comparador otorgue en su salida 5V. Para el segundo caso se utiliza el circuito de la *figura 8.6*, de donde se puede decir que cuando la tensión  $V_{rpm}$  es menor a 5V la salida del comparador pasa a ser 0V. Entonces se deduce que modificando los valores de R1 y/o R2, se puede variar la amplitud de la histéresis y con ello la sensibilidad del comparador ante la información que provee el sensor de revoluciones.

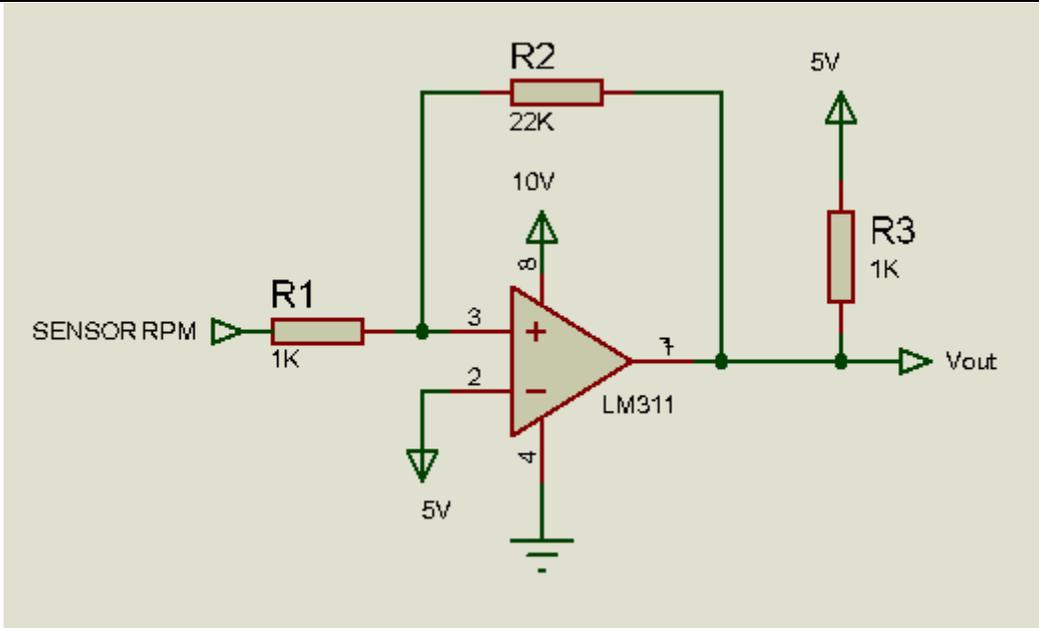


Figura 8.4: Circuito de comparación.

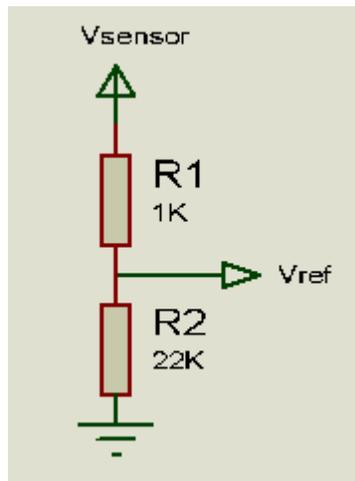


Figura 8.5: Primer caso de la histéresis del comparador.

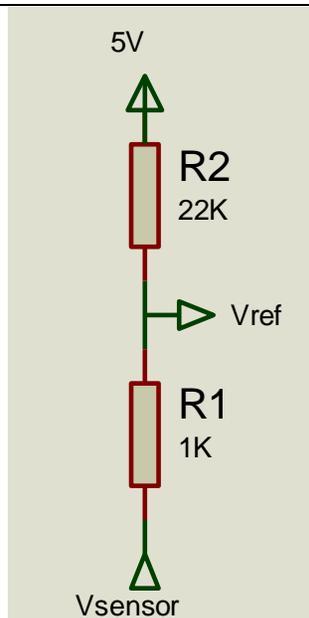


Figura 8.6: Segundo caso de la histéresis del comparador.

Entonces, se puede ver que la salida del comparador ya puede ser la señal que ingrese al microcontrolador, ya que cumple con las condiciones de amplitud requeridas. Pero por seguridad, se agrega una etapa más mediante la saturación del transistor, con el objetivo de que si llega a ocurrir algún posible defecto con la salida del operacional, como por ejemplo poner en su salida la tensión de 10V, dicha tensión no dañe al microcontrolador, que es un componente de costo elevado.

Entonces en la *figura 8.7* se muestra el circuito de protección del microcontrolador, donde se puede ver un circuito resistivo, compuesto por R3 y R4, que convierte la señal de 5V a 760mV, que es la tensión necesaria para saturar al transistor BC547. La entrada del microcontrolador se encuentra permanente en 5V salvo cuando ocurre que la señal del pin3 del LM311 es mayor que la del pin2, y luego dicha entrada pasa a ser 0V.

Se debe aclarar que las tensiones de alimentación de todos los circuitos que se realizan son entregadas por los reguladores de tensión 7810 y 7805, que entregan una tensión de salida de 10V y 5V respectivamente, y soportan tensiones de entrada ampliamente superiores a 15V.

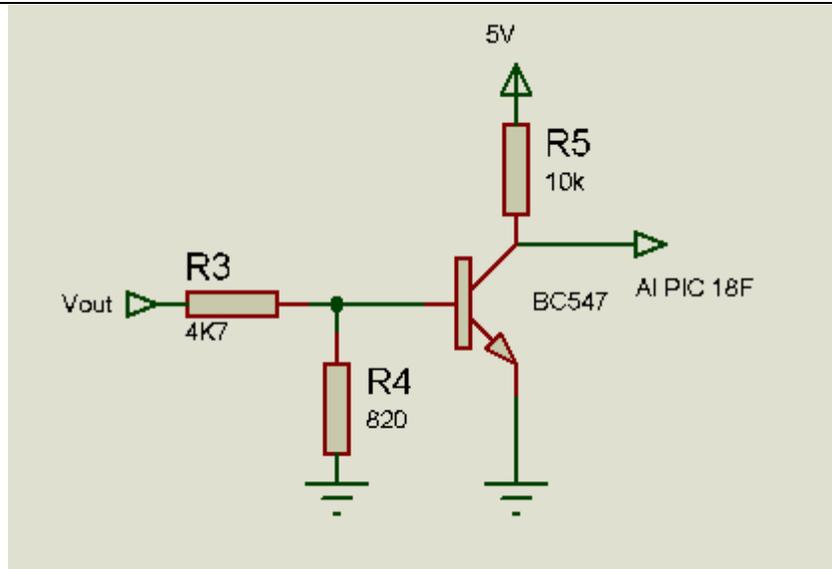


Figura 8.7: Circuito de protección de la señal de entrada al microcontrolador.

## 8.9. Etapa de salida

La etapa de salida recibe la señal de conmutación proveniente del PIC y tiene que transformarla en un pulso para alimentar por un lado el primario de la bobina de encendido, y por otro el inyector monopunto.

El pulso del primario de la bobina de encendido, tiene la característica de trabajar con la tensión de batería, que puede ser entre 12V y 14,5V, y una corriente del orden de 10A a 15A, ya que la bobina tiene una impedancia muy baja en el primario cercana a  $0,8\Omega$ . Como se dijo en la *sección* 3.3.2, en el secundario de la bobina ocurren tensiones de valores cercanos a 1000V, que justamente provocan la aparición de la chispa sobre el electrodo de la bujía, y esto imprime una señal ruidosa sobre el primario de bobina de varios voltios, por eso es necesario que existan etapas transistorizadas entre la señal proveniente del microcontrolador y el primario de la bobina, de manera de evitar el ingreso de una señal violenta al PIC; como también el componente encargado de darle corriente a la bobina de encendido debe ser capaz de soportar tensiones del orden de al menos 200V.

Para alimentar al bobinado primario de la bobina con las condiciones de tensión y corriente recién expuestas, se utiliza un transistor NPN fabricado exclusivamente para este uso, que es el BU941, en la *tabla* 8.2 se adjuntan sus características más importantes. Existen otros transistores, como ser el caso del BU931 que soporta una corriente menor entre colector y emisor cuando satura, y transistores tipo FET que presentan mejores condiciones para el rechazo de la señal ruidosa

producto del secundario de la bobina, pero todos ellos son de difícil obtención en el mercado y en el caso de los FET, su costo es elevado. Asimismo se puede encontrar una variante en el transistor a utilizar, que es el BU941ZP donde las últimas letras son la abreviación de “Protección Zener”, que significa que vienen provistos de unos diodos zener que se encargan de evitar sobrepicos de tensión elevados, generalmente no permiten que los mismos sean mayores de 300V.

El circuito propuesto para que se implemente en esta etapa se puede observar en la *figura 8.8*. Cuando el microcontrolador PIC emite un pulso de 5V de amplitud, produce la saturación de los 3 transistores, logrando que por la bobina circule la corriente necesaria para cargarla y que luego, el secundario le transfiera la energía a la bujía y genere una chispa capaz de romper el aislante que representa el aire. Las resistencias R6, R7 y R8, son elevadas para generar corrientes pequeñas y su función es polarizar los transistores BC337 y BC327. Pero la resistencia R9(10 $\Omega$ ) está calibrada para ofrecer en el peor de los casos, una corriente máxima de 0,5A, provista por el BC327 que maneja corrientes de hasta 0,8A; hacia la base del transistor BU941, que es una corriente menor a la que puede soportar el transistor, y también sirve para bajar la tensión sobre la base del BU941 haciendo que trabaje en 2,5V y 250mA aproximadamente, que según la hoja de datos es una zona de plena saturación. El transistor BC337 puede ser sustituido por otro transistor NPN de menor corriente, como puede ser el BC548, desde un punto de vista de costos, pero no sucede lo mismo con el BC327.

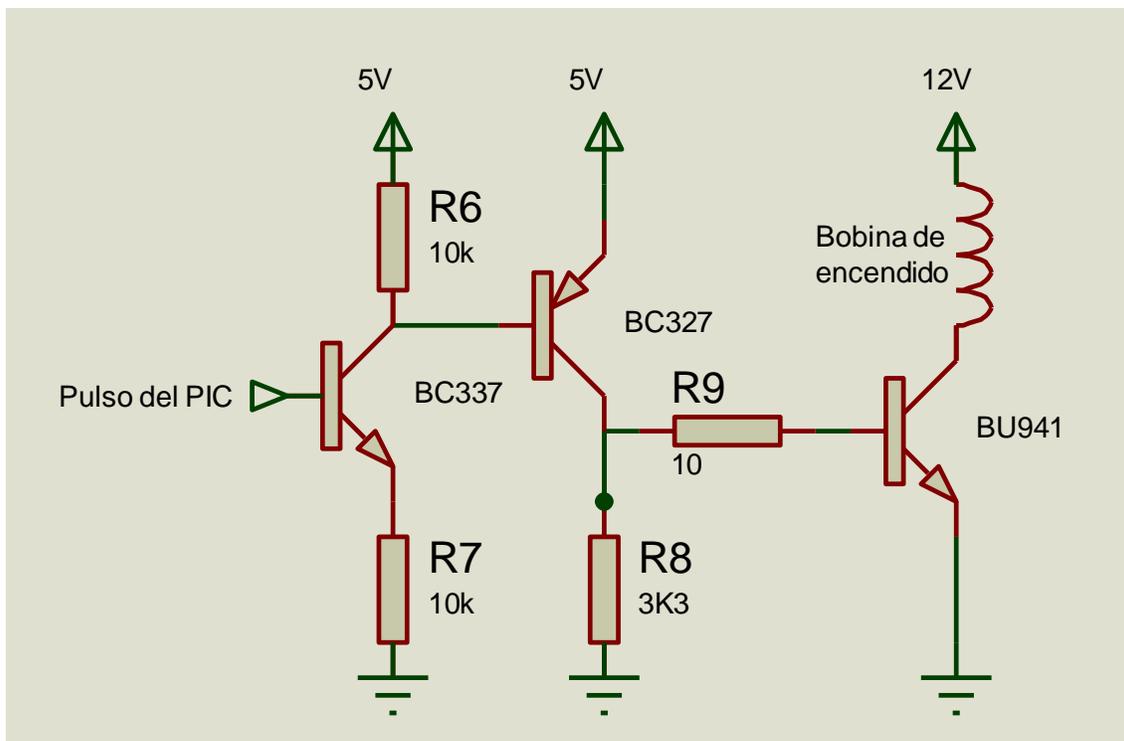


Figura 8.8: Circuito de la etapa de salida (bobina de encendido).

Symbol	Parameter	Value			Unit
		BU941	BU941P	BUB941PFI	
V <sub>CES</sub>	Collector-Emitter Voltage (V <sub>BE</sub> = 0)	500			V
V <sub>CEO</sub>	Collector-Emitter Voltage (I <sub>B</sub> = 0)	400			V
V <sub>EBO</sub>	Emitter-Base Voltage (I <sub>C</sub> = 0)	5			V
I <sub>C</sub>	Collector Current	15			A
I <sub>CM</sub>	Collector Peak Current	30			A
I <sub>B</sub>	Base Current	1			A
I <sub>BM</sub>	Base Peak Current	5			A
P <sub>tot</sub>	Total Dissipation at T <sub>c</sub> = 25 °C	180	155	65	W
T <sub>stg</sub>	Storage Temperature	-65 to 200	-65 to 175	-65 to 175	°C
T <sub>j</sub>	Max. Operating Junction Temperature	200	175	175	°C
I <sub>CES</sub>	Collector Cut-off Current (V <sub>BE</sub> = 0)	V <sub>CE</sub> = 500 V V <sub>CE</sub> = 500 V T <sub>j</sub> = 125 °C		100 0.5	μA mA
I <sub>CEO</sub>	Collector Cut-off Current (I <sub>B</sub> = 0)	V <sub>CE</sub> = 450 V V <sub>CE</sub> = 450 V T <sub>j</sub> = 125 °C		100 0.5	μA mA
I <sub>EBO</sub>	Emitter Cut-off Current (I <sub>C</sub> = 0)	V <sub>EB</sub> = 5 V		20	mA
V <sub>CEO(sus)*</sub>	Collector-Emitter Sustaining Voltage (I <sub>B</sub> = 0)	I <sub>C</sub> = 100 mA V <sub>Clamp</sub> = 400 V (See FIG.4)	L = 10 mH	400	V
V <sub>CE(sat)*</sub>	Collector-Emitter Saturation Voltage	I <sub>C</sub> = 8 A I <sub>C</sub> = 10 A I <sub>C</sub> = 12 A	I <sub>B</sub> = 100 mA I <sub>B</sub> = 250 mA I <sub>B</sub> = 300 mA	1.6 1.8 2	V V V
V <sub>BE(sat)*</sub>	Base-Emitter Saturation Voltage	I <sub>C</sub> = 8 A I <sub>C</sub> = 10 A I <sub>C</sub> = 12 A	I <sub>B</sub> = 100 mA I <sub>B</sub> = 250 mA I <sub>B</sub> = 300 mA	2.2 2.5 2.7	V V V
h <sub>FE*</sub>	DC Current Gain	I <sub>C</sub> = 5 A	V <sub>CE</sub> = 10 V	300	

Tabla 8.2: Características sobresalientes del BU941.

Lógicamente el circuito implementado debe repetirse dos veces, uno para bobina de encendido. Y se aclara, que la tensión de 5V es provista por el mismo 7805 que alimenta la etapa de entrada. Por otro lado la tensión de 12V, que se encuentra en uno de los bornes de la bobina de encendido, es la tensión de batería.

En el caso del pulso necesario para realizar la apertura del inyector, los requisitos de corriente son similares al de la bobina de encendido, cerca del orden de 10A hasta 15A, pero las condiciones de tensión son menos exigentes, debido a que el inyector si bien es una inductancia, lo que hace es deslizar una aguja y no genera un arco voltaico; entonces se pueden trabajar con componentes que soporten tensiones de 20V aproximadamente.

El circuito propuesto para lograr la transformación de dicho pulso, se puede ver en la *figura 8.9*, donde se aprecia su similitud con el circuito del disparo de bobina, solo que varían dos

transistores, mas precisamente los TIP's. En la *tabla 8.3* se muestran las características mas relevantes del TIP35, y en la *figura 8.10* las del TIP32.

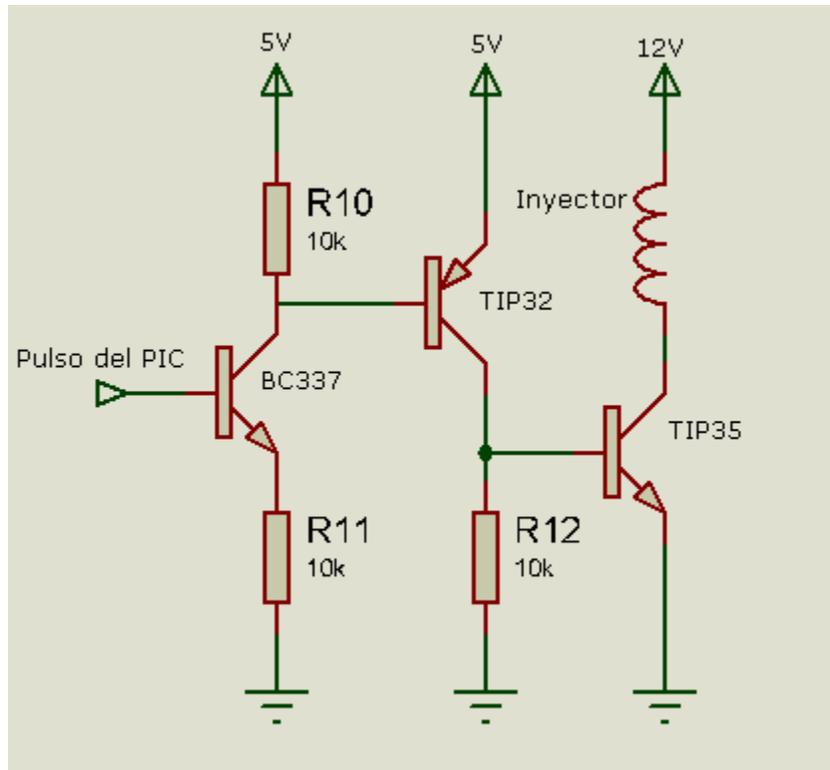


Figura 8.9: Circuito de la etapa de salida (inyector).

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_{(BR)CEO}$ Collector-emitter breakdown voltage	$I_C = 30 \text{ mA}$ (see Note 5)	$I_B = 0$	TIP35 40 TIP35A 60 TIP35B 80 TIP35C 100			V
$I_{CES}$ Collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = 80 \text{ V}$ $V_{CE} = 100 \text{ V}$ $V_{CE} = 120 \text{ V}$ $V_{CE} = 140 \text{ V}$	$V_{BE} = 0$ $V_{BE} = 0$ $V_{BE} = 0$ $V_{BE} = 0$	TIP35 TIP35A TIP35B TIP35C		0.7 0.7 0.7 0.7	mA
$I_{CEO}$ Collector cut-off current	$V_{CE} = 30 \text{ V}$ $V_{CE} = 60 \text{ V}$	$I_B = 0$ $I_B = 0$	TIP35/35A TIP35B/35C		1 1	mA
$I_{EBO}$ Emitter cut-off current	$V_{EB} = 5 \text{ V}$	$I_C = 0$			1	mA
$h_{FE}$ Forward current transfer ratio	$V_{CE} = 4 \text{ V}$ $V_{CE} = 4 \text{ V}$	$I_C = 1.5 \text{ A}$ $I_C = 15 \text{ A}$	(see Notes 5 and 6)	25 10	50	
$V_{CE(sat)}$ Collector-emitter saturation voltage	$I_B = 1.5 \text{ A}$ $I_B = 5 \text{ A}$	$I_C = 15 \text{ A}$ $I_C = 25 \text{ A}$	(see Notes 5 and 6)		1.8 4	V
$V_{BE}$ Base-emitter voltage	$V_{CE} = 4 \text{ V}$ $V_{CE} = 4 \text{ V}$	$I_C = 15 \text{ A}$ $I_C = 25 \text{ A}$	(see Notes 5 and 6)		2 4	V
$h_{fe}$ Small signal forward current transfer ratio	$V_{CE} = 10 \text{ V}$	$I_C = 1 \text{ A}$	$f = 1 \text{ kHz}$	25		
$ h_{fe} $ Small signal forward current transfer ratio	$V_{CE} = 10 \text{ V}$	$I_C = 1 \text{ A}$	$f = 1 \text{ MHz}$	3		

Tabla 8.3: Características del TIP35.

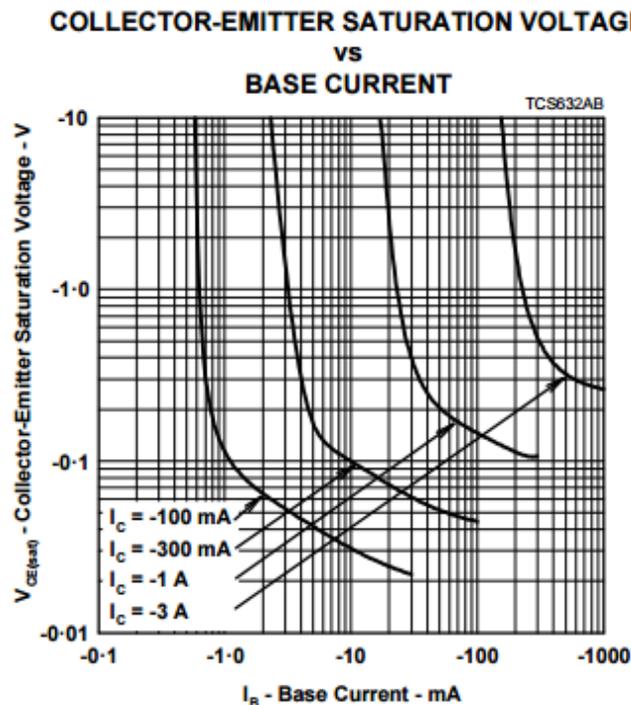


Figura 8.10: Curva característica del TIP32.

Como todos los transistores operan en estado de saturación, cuando el microcontrolador PIC envía el pulso de 5V, se tiene entonces que el TIP35 para una corriente  $I_C=15A$  requiere una corriente de base  $I_B=1,5A$  y una tensión  $V_{be}=1,5V$  aproximadamente. De esto último se desprende la necesidad de contar con un transistor PNP de mas corriente que el BC327, por eso se recurre al TIP32, que tiene los siguientes requisitos: para lograr una corriente  $I_C=1,5A$  necesita que la corriente de base sea cercana a 20mA y de esta manera  $V_{ce(sat)}=4V$  aproximadamente, asimismo  $V_{be}=1V$  para esas condiciones.

En este caso, la elección de los transistores TIP se hizo a partir de un análisis que contempla la relación de precio/disponibilidad, siendo que ambos son conseguibles en el mercado local y presentan costos medidos. Teniendo en cuenta ahora que la corriente que maneja el BC337 se puede tornar de valores cercanos a 100mA, no se aconseja realiza el cambio por transistores NPN mas económicos.

Al igual que para el circuito del primario de bobina, todas las resistencias son para polarizar los transistores y ajustar los niveles de tensión. Por otra parte, el inyector se encuentra conectado a la batería, mediante uno de sus bornes. Y la tensión de 5V es provista por el 7805 que alimenta la etapa de entrada y la de salida.

---

Este circuito debe repetirse la cantidad de veces que sean necesarias, según la cantidad de inyectores que tenga el auto. Únicamente en el caso de contar con 4 inyectores y donde se disparen de a pares o todos juntos, debe ser repetido 2 veces o solo 1 respectivamente.

Debe aclararse que todos los transistores que manejan corrientes mayores a 1A deben contar con la disipación necesaria, especialmente los transistores BU941 y TIP35.

## **8.10. Circuito completo**

En la *figura 8.11* se muestra el diagrama que representa toda la arquitectura del sistema de inyección que se quiere implementar, ajustado en este caso para dos bobinas y un solo inyector. Se puede apreciar que sobran 15 pines correspondientes a entradas o salidas del microcontrolador, que pueden ser configuradas por ejemplo para ejecutar las ordenes de 3 inyectores adicionales y dos bobinas de encendido mas. Dentro de esos 15 pines, existen 2 pines que pueden ser entradas analógicas para introducir nuevas informaciones de otros sensores y que luego sean tenidas en cuenta por el código fuente que gobierna el PIC. También, si se quisieran mas canales analógicos, se podría cambiar la configuración existente, por ejemplo moviendo las ordenes de disparo para el inyector y las bobinas de encendido, hacia las salidas del puerto C, logrando de esa manera liberar 3 canales analógicos.

Por otro lado se selecciona un cristal de 20MHz, para poder trabajar con una frecuencia elevada y así poder garantizar que el código fuente funcione correctamente.

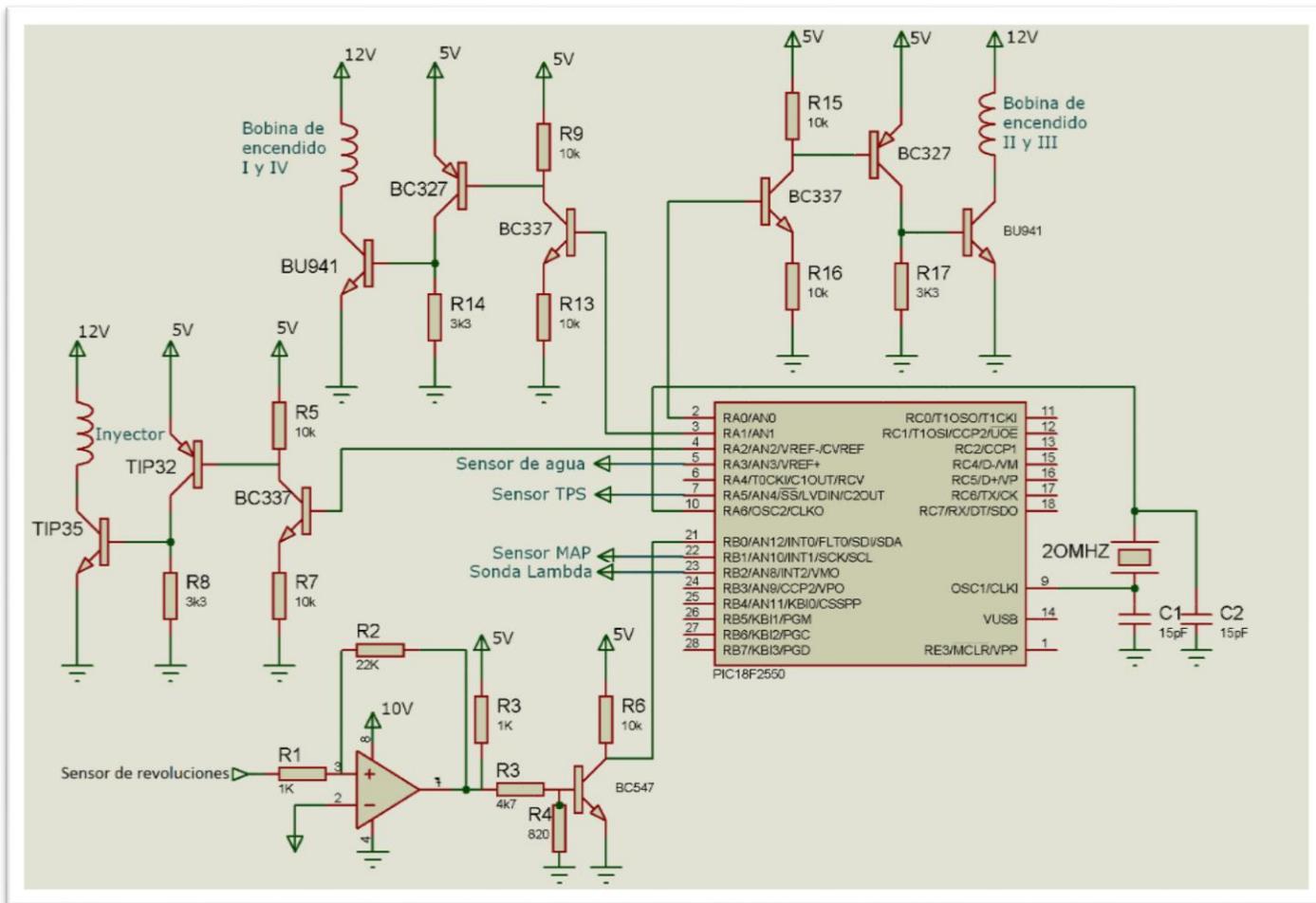


Figura 8.11: Arquitectura del sistema de inyección.

## 8.11. Problemática ocurrida

Paralelamente con la elaboración del sistema de inyección, ocurrió que al realizar mediciones sobre los sensores ubicados en el vehículo de prueba, se descubre que varios de ellos, mas precisamente la sonda lambda y el sensor MAP, no funcionaban de manera idónea, por lo que incluso el vehículo tampoco funcionaba (con su ECU original) con los principios de la dosificación estequiométrica, se llegó a comprobar que el motor del vehículo se encontraba excedido de combustible en su mezcla.

Como el cambio de esos sensores es de un costo sumamente elevado, se trató de buscar otra manera para poder ensayar el sistema de inyección en producción. Siendo que el vehículo contaba con alimentación de un combustible alternativo, denominado GNC (por las siglas de Gas Natural Comprimido), se pensó en prescindir de la inyección de combustible y utilizar solo el sistema

---

de encendido, ya que en este caso a diferencia del combustible líquido, no requiere de un control de inyección porque la regulación de combustible se realiza de forma manual. Pero de todas formas requiere contar con un sistema de encendido que asegure el correcto funcionamiento del motor, por lo tanto se plantea la posibilidad de tener un equipo capaz de realizar este control ante la alternativa de no contar con la ECU original del automóvil.

Se aclara que el sistema de inyección se podía probar de todas formas, pero principalmente por la falta de la sonda lambda en perfecto funcionamiento, nunca se podría llegar a ejercer ningún control sobre la dosificación del motor.

## **8.12. Procesamiento de señal - Sistema de encendido**

Esta etapa se encarga de interpretar la señal binaria proveniente de la etapa de entrada, para poder referenciar la ubicación angular del cigüeñal y luego de recurrir a la tabla de avances de encendido, ejecuta la orden de disparo a las bobinas de encendido.

Entonces, para lograr la obtención del código fuente que gobierne el comportamiento del microcontrolador, teniendo en cuenta que la lectura proveniente del sensor de revoluciones se convierte en una señal binaria para que luego ingrese al microcontrolador, se definen los siguientes pasos:

1. Se toma como referencia de la posición angular de la rueda dentada, el cambio de nivel (por flanco de ascendente o descendente) de la señal binaria entrante, que ocurre cuando existe un cruce por cero en la información del sensor de revoluciones.
2. El microcontrolador debe asignarle la máxima prioridad a dicho suceso, por eso debe ser ejecutado como una interrupción externa por Rb0, ya que es la de mayor prioridad. En otras palabras, cada vez que exista un cambio de nivel en Rb0, el código hace correr una subrutina de máxima prioridad, dejando apartado la parte del código que se estaba ejecutando, hasta su finalización.
3. El código, en primera medida, tiene que ubicar el diente 58 de la rueda dentada, que es el diente de mayor periodo en la rueda dentada y es la única referencia que tiene sobre la posición angular del cigüeñal del motor. Para lograrlo va a tener que utilizar un Timer que vaya evaluando el tiempo de duración de cada interrupción, hasta encontrar aquel tiempo que triplica en duración al resto de las interrupciones, se habla del diente 58.
4. Luego de haber ubicado el diente 58 se tiene que inicializar un contador en 1, y por cada interrupción que ocurra debe ir incrementándose en 1, hasta llegar a 58.
5. Cada vez que ocurre una interrupción, y ya se ubicó el diente 58, se consulta la tabla de avances del encendido, para ver si en la ocurrencia de ese diente se debe efectuar una orden de disparo hacia alguna de las bobinas de encendido, que se hace mediante la

---

subida de nivel del pin correspondiente y tiene una duración de aproximadamente 3 ms, que es controlada por el desbordamiento de un Timer.

6. De manera constante se tiene que llevar un control sobre el tiempo de ocurrencia entre interrupciones, de manera de hacer comparaciones y en caso de que existiera, poder interpretar un fallo en la lectura del sensor de revoluciones y dejar de emitir ordenes de disparo hacia las bobinas de encendido, para no ocasionar problemas en el motor del vehículo.

Se deben tener en cuenta las siguientes situaciones que pueden traer problemas de interpretación al código:

- La duración de tiempo entre interrupciones va a ir disminuyendo cada vez que aumenten las revoluciones del motor, por lo que el código debe ser capaz de interpretar esta diferencia sin tomarlo como un error.
- De la misma manera, cada vez que el motor baje el régimen de revoluciones, esta duración de tiempo va a ir aumentando, por lo que el código debe ser capaz de encontrar el diente 58 sin mayores dificultades, y no interpretar erróneamente que como cualquier otro diente tiene una duración levemente mayor que el anterior, se trata del diente 58.
- Puede ocurrir que la primera interrupción corresponda al diente 58, por lo que el código interpretara todos los siguientes periodos de duración como menores.

Entonces, se piensa de manera esquemática los pasos a seguir, como muestra la *figura 8.12*, para determinar el momento correcto de las ordenes de disparos las bobinas de encendido. Para lograr esto se utilizan dos timers y se generan 8 variables enumeradas a continuación:

1. Band\_rb0 [bit]: se pone en 'true' cada vez que ocurre una interrupción externa.
2. Contador [255]: es un número que puede variar entre 0 y 58, indica el número de diente de la rueda dentada que está leyendo el sensor de revoluciones.
3. Disparo1 [255]: un número que indica el número de diente en que tiene que ejecutarse la orden de disparo de la bobina correspondiente a los cilindros I y IV.
4. Disparo2 [255]: lo mismo que disparo1, solo que dispara la bobina correspondiente a los cilindros II y III.
5. T [65536]: es el tiempo medido con el timer0, indica la duración del último diente sensado.
6. Tmin [65536]: es el tiempo del penúltimo diente medido, siempre que no corresponda al diente 58.
7. Primeralectura [bit]: es un bit que indica si es la primera lectura de un diente, sirve para inicializar algunas variables.
8. Primerdiente [bit]: es un bit que indica si ya se ubicó el primer diente de la rueda dentada, una vez que este bit se pone en 1 se pueden ejecutar las órdenes de encendido, porque el sistema interpreto correctamente la posición angular del cigüeñal.

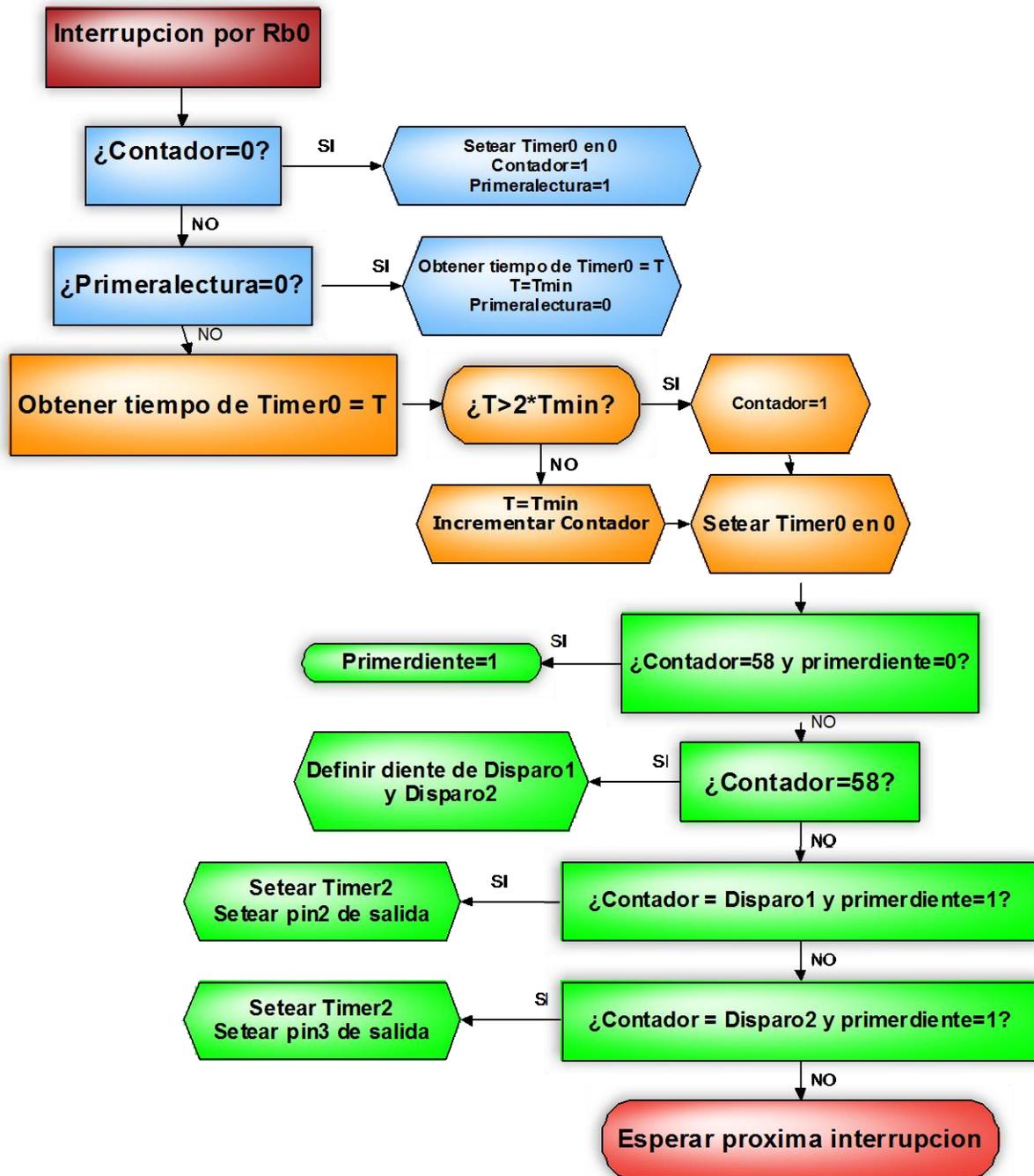


Figura 8.12: Esquema a seguir en el código del microcontrolador.

El esquema de la figura 8.12 se divide en 3 colores, los bloques correspondientes al color azul solo suceden durante la primera lectura del primer diente sentido, para el resto de las lecturas esos bloques no cumplen ninguna función. Por el contrario los bloques de color naranja se utilizan cada vez que ocurre una interrupción. Y los bloques de verde se encargan de ejecutar las ordenes de disparo para las bobinas de encendido.

---

En el *apéndice A* se muestra el código fuente, particionado en cuatro partes. En el mismo se pueden apreciar unos detalles: el Timer0 está preparado para desbordar y producir una interrupción luego de no ser reinicializado después de 100ms, esto significa que al producir el desbordamiento se vuelven todos los parámetros a sus valores iniciales; el Timer2 esta seteado para desbordar en 3,28ms que es el tiempo de conmutación del encendido, y por ultimo las interrupciones por Rb0 están preparadas para activarse en los flancos de subida, ya que por la configuración de la señal de entrada primero sube de nivel y luego baja.

El código se implementó en el compilador “PIC C Compiler” de PIC C y el grabado del mismo hacia el microcontrolador se llevó a cabo con “PICKit 2 v2.61” de Microchip.

---

## 9. Ensayo sobre el vehículo

### 9.1. Implementación en el vehículo

Como se explicó anteriormente en la *sección 8.11*, se cuenta con un vehículo alimentado con combustible alternativo (GNC), para el ensayo del sistema de encendido logrado, el cual tiene su ECU original funcionando en perfecta condición y gracias a eso se pueden obtener las curvas de avance del encendido. Al contar con ambas centrales electrónicas, se realizan las comparaciones pertinentes.

Las condiciones de prueba para ambos sistemas son las mismas: no se varia la apertura angular de la mariposa de admisión en la posición de ralentí, ni la calibración del equipo de GNC.

Primero se prueba con la ECU original con el motor a baja temperatura, se lo deja regulando con la mariposa de admisión en posición de ralentí, y luego se lo acelera reiteradas veces a distintos regímenes de revoluciones del motor, mediante la apertura angular de la mariposa de admisión. Sin dejar pasar demasiado tiempo, para que no suba rápidamente la temperatura del motor, se coloca el sistema de encendido elaborado y se repiten las mismas circunstancias. Como segundo ensayo, se deja calentar el motor con la ECU original y se repite lo comentado en el párrafo anterior.

### 9.2. Resultados obtenidos

En la comparación de los sistemas los resultados obtenidos fueron similares, esto es una buena experiencia ya que significa que no hay grandes diferencias entre el sistema de encendido original y el propuesto por este proyecto. Por lo que, en el caso de fallar una central electrónica de un vehículo que cuenta con GNC, ante la imposibilidad de poder sustituirla por un reemplazo original, al usuario del automóvil se le puede presentar esta nueva opción.

El hecho de que los comportamientos de ambos sistemas sean sumamente parecidos tiene dos grandes ventajas: una, que el sistema de encendido propuesto se logra con componentes obtenibles en el mercado, y segunda, que se puede variar el avance del encendido de una manera sencilla sin necesidad de tener que intervenir con los componentes del sistema de encendido, ya que se hace mediante programación. Esto último es sumamente versátil porque los motores van sufriendo modificaciones durante su vida útil, debido principalmente a reparaciones sobre ellos, y

muchas veces el avance del encendido pueden ser mas eficientes al adelantarlo o retrasarlo respecto del avance original de los vehículos.

En la *figura 9.1* se muestra el resultado de la experiencia para un régimen de revoluciones de aproximadamente 1200 RPM, en la traza amarilla se puede ver la señal del sensor de revoluciones y en la traza roja, la orden de disparo del primario de la bobina de encendido que corresponde a los cilindros II y III. Se aprecia que el disparo ocurre durante la lectura del diente 43, respetando lo dicho por la tabla de avance del sistema de encendido, y cumple con un tiempo de conmutación cercano a 3ms, siendo que la escala de tiempo del osciloscopio se encuentra en 10ms/div. También se destaca la señal inducida del secundario de la bobina de encendido, una vez que se produce la chispa, en la tercera orden de disparo se aprecia que la amplitud de la señal supera los 80V, que recaen sobre el transistor de salida BU941.

Se aclara que no hay mas figuras del funcionamiento del sistema de encendido, debido principalmente a la poca disponibilidad que se tuvo con el vehículo de ensayo.



Figura 9.1: Señales obtenidas del sistema de encendido.

---

## 10. Conclusiones

### 10.1. Conclusiones particulares

En primera instancia, en cuanto al principio de funcionamiento del motor no hay mucho que destacar, ya que es tan popularmente conocido. Solo se extrae que las mayores prestaciones del motor devienen de las particularidades de fabricación del mismo, es decir, de la longitud y volumen del múltiple de admisión, la compresión del motor, de la cantidad y ubicación de las válvulas, de los grados angulares de apertura de las válvulas, entre muchas otras características. Entonces la ECU debe ser capaz de actuar sobre el encendido y la inyección de combustible, de manera precisa y en el momento justo, pero no para permitir la mayor potencia obtenible o el menor consumo de combustible, sino para aproximar el funcionamiento del motor al funcionamiento ideal propuesto por su fabricante. Entonces puede pasar que dos sistemas de inyección de distintos productores logren las mismas prestaciones del motor, mediante distintas estrategias.

Por otro lado, el modelado del motor es algo tan complicado de lograr que se deben realizar los mismos según la aplicación que se quiera obtener. Asimismo, situándose en el caso expresado en este proyecto, se trata de un modelo completamente alineal y con retardos, por lo tanto se realizan aproximaciones de cada fenómeno sucedido. Cada autor previamente consultado lo aborda desde una perspectiva distinta, en el caso particular de la tesis seleccionada se realiza la modelización de una manera muy completa y argumentada. Aunque, nuevamente se repite, no es un modelo que pueda representar la totalidad de acontecimientos que ocurren en un motor, sirve de buena manera para la prueba de distintos controladores de inyección y las respuestas obtenidas del mismo son similares a las obtenidas en un motor real.

Desde un punto de vista de complejidad, el controlador proporcional resulta un controlador eficaz que sirve para manipular tanto los estados estacionarios como los transitorios positivos. Pero desde muchos otros aspectos en un controlador demasiado sencillo frente a las comparaciones contra el controlador derivativo. Por ejemplo, desde el punto de vista del consumo en los transitorios se observa una diferencia importante a favor del último controlador, la cual también se nota en el estado estacionario, pero en menor medida. Para el caso de los transitorios positivos, si se piensa en el tiempo que necesita el motor para llegar a la cantidad de revoluciones deseadas por el usuario, cuanto mayor sean las revoluciones el controlador derivativo se vuelve mas eficiente. Y situándose en los momentos de régimen estacionario del motor, a mayor cantidad de revoluciones de motor, la información  $\lambda$  tiene menos variación de amplitud en el caso del segundo controlador.

---

En resumen, el controlador derivativo es aquel que resulta mas eficiente para cumplir los principios de estequiometria en la dosificación del motor. Evidentemente es en este camino por el que se sitúan los sistemas de inyección actuales.

En cuanto a las mediciones obtenidas, mas allá de la comparación de ambos controladores, es de suma importancia el análisis minucioso de las mismas, se puede extraer una gran cantidad de información de los gráficos obtenidos. Se destaca este aspecto porque es una experiencia sumamente enriquecedora.

Por último, los resultados obtenidos en el sistema de encendido elaborado fueron buenos y eso es una motivación importante para poder elevarlo como un producto de competencia en el mercado de la inyección electrónica automotriz, siendo que fue logrado con componentes existentes en el mercado local. Si bien este modelo fue realizado para un vehículo en particular, si se realizan ensayos sobre otros motores se pueden obtener mas curvas de avances y de esa forma cubrir un mayor porcentaje de automóviles.

## **10.2. Trabajo a futuro**

Como se enumeró en repetidas ocasiones, nunca va a estar de sobra enriquecer el modelo del motor, esto es hacerlo mas preciso en los distintos submodelos, por ejemplo se nota que uno de los mas complejos es la entrada de aire por la mariposa de admisión; a su vez, la inclusión tanto de factores termodinámicos como de parámetros de encendido, lo harían mas completo. Cuanto mas preciso sea el modelo, mas exactas serán las simulaciones que se realicen.

En cuanto al controlador derivativo se puede tener en cuenta el valor de la presión en el múltiple de admisión sobre todo para los transitorios positivos y no solo su derivada, esto ayudaría a lograr que  $\lambda$  fuera mas próxima a la unidad en todo momento. También se podrían implementar observadores de estado para predecir comportamientos y sacar una ventaja con respecto a los retardos reales que existen en el motor. Por ejemplo, se evalúa la evolución de algunos parámetros en un transitorio positivo y utilizando esas informaciones obtenidas, se hacen correcciones para la siguiente oportunidad que se repita.

Para el sistema de encendido se propone en primera medida lograr un producto optimizado en lo que se refiere a costos, por ejemplo implementándolo con un microcontrolador mas chico. Y en segundo lugar, se insta a lograr la obtención del código fuente que controle también la inyección de combustible, unificando el controlador derivativo obtenido teóricamente con el sistema de encendido autónomo.

---

## Apéndice A: Código fuente

```
#include <18F2550.h>
#FUSES hs, nowdt,noprotect,nomclr,nobrownout,noput,nolvp
#use delay(clock=2000000)
#use fast_io(B)
#use fast_io(C)
#use fast_io(A)

#byte trisa=0xf92
#byte porta=0xf80
#byte trisb=0xf93
#byte portb=0xf81
#byte trisc=0xf94
#byte portc=0xf82
#byte option_reg=0xfd5

int band_rb0 = false;
int8 contador;
int8 disparo1;
int8 disparo2;

int16 T;
int16 Tmin;

int1 primeralectura;
int1 primerdiente;

#int_EXT
void EXT_isr(void)
{
    band_rb0 = true;
}

#int_TIMER0
void TIMER0_isr(void)
{
    primerdiente=0;
    contador=0;
    primeralectura=0;
    Tmin=0;
}

#int_TIMER2
void TIMER2_isr(void)
{
    bit_clear(porta,0);
    bit_clear(porta,1);
}
```

```

void main()
{
  setup_adc_ports(NO_ANALOGS|VSS_VDD);
  setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
  setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
  setup_adc_ports(NO_ANALOGS|VSS_VDD);
  setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);

  setup_timer_0(RTCC_INTERNAL | rtcc_div_8); //resolucion de 6,4 microseg
  bit_clear(option_reg,6); //el timer0 trabaja con 16 bits, desborda en 0,1 seg aprox
  setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,255,1); //interrupme cada 3,28 ms

  enable_interrupts(INT_TIMER0);
  enable_interrupts(INT_TIMER2);

  enable_interrupts(INT_EXT);

  ext_int_edge(L_TO_H); //la interrupcion ocurre por flanco de subida
  enable_interrupts(GLOBAL);

  trisa = 0b00000000;
  trisb = 0b01111111;
  trisc = 0b00110000;

  contador=0;
  primerdiente=0;
  primeralectura=0;
  Tmin=0;

  while (true)
  {
    while (band_rb0 == true)
    {band_rb0 = false;
    output_toggle(pin_b7);

    if (contador==0)
    {set_timer0(0);
    ++contador;
    primeralectura=1;
    }

    else if (primeralectura==1)
    {T=get_timer0();
    Tmin=T;
    primeralectura=0;
    }

    else
    {T=get_timer0();
    if (T>2*Tmin)
    contador=1;

    else
    {Tmin=T;
    ++contador;
    }
    }
  }
  set_timer0(0);

```

```
if (contador==58 && primerdiente==0)
    primerdiente=1;
```

```
if (contador==58)
    {if (Tmin<54)
        {disparo1=1;
        disparo2=31;
        }
    }
```

```
if (Tmin<56 && Tmin>=54)
    {disparo1=2;
    disparo2=32;
    }
```

```
if (Tmin<58 && Tmin>=56)
    {disparo1=3;
    disparo2=33;
    }
```

```
if (Tmin<60 && Tmin>=58)
    {disparo1=4;
    disparo2=34;
    }
```

```
if (Tmin<65 && Tmin>=60)
    {disparo1=5;
    disparo2=35;
    }
```

```
if (Tmin<68 && Tmin>=65)
    {disparo1=6;
    disparo2=36;
    }
```

```
if (Tmin<71 && Tmin>=68)
    {disparo1=7;
    disparo2=37;
    }
```

```
if (Tmin<74 && Tmin>=71)
    {disparo1=8;
    disparo2=38;
    }
```

```
if (Tmin<82 && Tmin>=74)
    {disparo1=9;
    disparo2=39;
    }
```

```
if (Tmin<89 && Tmin>=82)
    {disparo1=10;
    disparo2=40;
    }
```

```
if (Tmin<98 && Tmin>=89)
    {disparo1=11;
    disparo2=41;
    }
```

```

if (Tmin<116 && Tmin>=98)
{disparo1=12;
disparo2=42;
}

if (Tmin<142 && Tmin>=116)
{disparo1=13;
disparo2=43;
}

if (Tmin<184 && Tmin>=142)
{disparo1=14;
disparo2=44;
}

if (Tmin<260 && Tmin>=184)
{disparo1=15;
disparo2=45;
}

if (Tmin>=260)
{disparo1=16;
disparo2=46;
}
}

if (contador==disparo1 && primerdiente==1)
{ set_timer2(0);
bit_set(porta,0);
}

if (contador==disparo2 && primerdiente==1)
{ set_timer2(0);
bit_set(porta,1);
}

output_toggle(pin_b7);
};
}
}

```

---

## Apéndice B: Bibliografía consultada

Aquino C.F., *Transient A/F control characteristics of the 5 liter central fuel injection engine*, SAE 810494, 1981, Cap. 3.

Elber Hendricks, *Mean value modelling of spark ignition engines*, SAE Paper 900616, 1990, Cap. 2-3.

Javier Nevot Cercós, *Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales*, Cataluña, 1999, p. 3.1 – 3.37.