



UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICO PARA MOTORES DE BAJA CILINDRADA

Tesis de grado para la carrera de Ingeniería Electrónica

Universidad Nacional de Mar del Plata – Facultad de Ingeniería
Departamento de Electrónica

Autor: Marcos Ciro Palena – Director: Ing. Julio Doumecq
Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina - Año 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

El presente proyecto consta del estudio, diseño y desarrollo de una Unidad de control electrónico (ECU) dedicada a controlar el funcionamiento de motores de combustión interna de baja cilindrada. Su objetivo es, a partir de la adquisición y lectura de ciertos sensores colocados estratégicamente en el motor, realizar los cálculos necesarios y actuar sobre el inyector de combustible y la bobina de encendido, de modo de controlar, con la mayor precisión posible, la cantidad de nafta dosificada y el instante de chispa de la bujía.

La motivación de su realización surge del descubrimiento de una ausencia en el mercado de un producto similar de industria nacional y del difícil acceso y elevado costo de productos importados.

La inclusión de la electrónica en este proyecto garantiza la optimización de la energía que se genera en la explosión de la gasolina, por medio del ajuste preciso de la relación aire/combustible estequiométrica. Como consecuencia, se obtiene un mejor rendimiento que en los actuales sistemas de carburación, lo que conlleva a un menor gasto de combustible y un impacto ambiental considerablemente menor. En síntesis, este proyecto busca, por medio de un control electrónico, reducir el consumo, las emisiones y el desgaste de las partes mecánicas aumentando la potencia, fiabilidad y adaptabilidad a las condiciones externas del motor.

Si bien para el mismo proyecto podrían haberse utilizado distintas tecnologías existentes, se debió realizar un estudio que permita encontrar la mejor alternativa que se adapte, no solo a los objetivos propuestos, sino también a la realidad económica del país. Así, se optó por aquellas marcas y dispositivos que encuadren en nuestras necesidades de abastecimiento, costos y estándar de calidad.

Como resultado, se obtuvo un prototipo, basado en un microcontrolador de la marca microchip, capaz de procesar el estado de tres variables mínimas necesarias, como ser: posición de la mariposa del acelerador, temperatura del motor y revoluciones por minuto; y otras tres secundarias de fácil acceso y manipulación para mejorar la precisión: gases de escape, tensión de la batería y presión absoluta en admisión. Así,

actuar en consecuencia sobre el inyector de combustible y la bobina de encendido, de modo de obtener un funcionamiento óptimo y de la forma más eficiente posible.

Se implementó además, una interfaz USB para la visualización de las señales y diagnóstico del funcionamiento mediante una PC.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	1
INDICE DE TABLAS.....	7
INDICE DE FIGURAS.....	8
CAPÍTULO 1	
1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA	10
1.2 CICLOS OPERATIVOS	11
1.3 COMBUSTIÓN.....	12
1.4 RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA.....	15
1.5 LA INYECCIÓN ELECTRÓNICA	17
1.6 COMPARACIÓN CARBURADOR – INYECCIÓN ELECTRÓNICA.....	17
1.6.1 PRODUCCIÓN DE LA MEZCLA AIRE-COMBUSTIBLE	17
1.6.2 CONDICIONES DE MANEJO.....	18
1.6.2.1 ARRANQUE Y BAJAS TEMPERATURAS	18
1.6.2.2 ACELERACIÓN	19
1.6.2.3 ALTA POTENCIA DE SALIDA.....	20
1.6.3 VENTAJAS DE LA INYECCIÓN ELECTRONICA FRENTE AL CARBURADOR.....	20
1.7 COMPONENTES DE UNA INYECCIÓN ELECTRÓNICA	21
1.7.1 UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICO (ECU).....	21
1.7.2 POTENCIOMETRO DE LA MARIPOSA	22
1.7.3 SENSOR DE POSICIÓN DEL CIGÜEÑAL – VARIACIÓN RPM	22
1.7.4 SENSOR DE TEMPERATURA DEL MOTOR	23
1.7.5 SONDA LAMBDA.....	23
1.7.6 SENSOR DE PRESIÓN ABSOLUTA EN EL COLECTOR (MAP).....	23
1.7.7 BOMBA DE COMBUSTIBLE.....	24

1.7.8	FILTRO DE COMBUSTIBLE	24
1.7.9	INYECTOR.....	25
1.7.10	BUJÍA Y BOBINA DE ENCENDIDO	25
 CAPÍTULO 2		
2	DISEÑO DEL PROTOTIPO	27
2.1	ARQUITECTURA DEL SISTEMA.....	28
2.1.1	MICROCONTROLADOR	29
2.1.1.1	CARACTERÍSTICAS Y PRESTACIONES.....	30
2.1.1.2	PINES Y CONEXIÓN	30
2.1.1.3	FRECUENCIA DE TRABAJO.....	32
2.1.1.4	CONEXIONES AUXILIARES	32
2.1.1.5	FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	33
2.1.2	SENSOR DE POSICIÓN DE LA MARIPOSA DE ACELERADOR (TPS).....	34
2.1.2.1	ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL	34
2.1.2.2	EQUIVALENCIA POSICIÓN MARIPOSA – TENSIÓN	34
2.1.3	SENSOR DE REVOLUCIONES POR MINUTO DEL MOTOR.....	35
2.1.4	SENSOR DE TEMPERATURA	35
2.1.4.1	ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL	36
2.1.4.2	CURVA CARACTERÍSTICA DEL TERMISTOR.....	36
2.1.4.3	EQUIVALENCIA TEMPERATURA – TENSIÓN.....	38
2.1.5	SENSOR DE TENSIÓN DE LA BATERÍA	39
2.1.6	SENSOR PRESIÓN EN COLECTOR DE ADMISIÓN.....	39
2.1.6.1	ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL	40
2.1.6.2	EQUIVALENCIA PRESIÓN – TENSIÓN	40
2.1.7	SENSOR DE GASES DE ESCAPE	41
2.1.8	BOMBA DE COMBUSTIBLE.....	41

2.1.9	INYECTOR DE COMBUSTIBLE	42
2.1.10	BOBINA DE ENCENDIDO	43
2.1.11	LEDS INDICADORES.....	44
2.1.12	IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO	45
2.2	MAPA DE INYECCIÓN	47
2.2.1	OBTENCIÓN DE LA RELACIÓN ESTEQUIOMETRICA	47
2.2.2	EQUIVALENCIA ENTRE MASA DE GASOLINA Y TIEMPO	48
2.2.3	CÁLCULO DEL TIEMPO BASE DE INYECCIÓN	50
2.2.3.1	VOLUMEN DEL CILINDRO.....	51
2.2.3.2	CAUDAL DEL INYECTOR.....	51
2.2.3.3	VALOR TIEMPO BASE	51
2.2.4	CÁLCULO DEL MAPA DE INYECCIÓN.....	52
2.2.4.1	EQUIVALENCIA PRESIÓN EN COLECTOR Y TPS	52
2.2.4.2	EFICIENCIA VOLUMÉTRICA	53
2.2.4.3	TIEMPOS DE INYECCIÓN	56
2.3	TABLAS DE CORRECCIÓN.....	57
2.3.1	CORRECCIÓN POR ARRANQUE	57
2.3.2	CORRECCIÓN POR TEMPERATURA	58
2.3.3	CORRECCIÓN POR PRESIÓN ATMOSFÉRICA	59
2.3.4	CORRECCIÓN POR TENSIÓN DE LA BATERÍA	60
2.4	MAPA DE AVANCE DE ENCENDIDO	60
2.5	DESARROLLO DEL FIRMWARE.....	61
2.5.1	CONFIGURACIÓN DEL MICROCONTROLADOR	62
2.5.2	INICIALIZACIÓN.....	63
2.5.3	PROGRAMA PRINCIPAL	64
2.5.4	INTERRUPCIONES	67

2.5.4.1	INTERRUPCIÓN POR CONVERSIÓN A/D.....	67
2.5.4.3	INTERRUPCIÓN EXTERNA.....	70
2.5.4.4	INTERRUPCIÓN EXTERNA 2.....	71
2.6	INTERFAZ CON LA PC.....	72
CAPÍTULO 3		
3	SIMULACIONES Y RESULTADOS	76
3.1	CASO 1: ARRANQUE EN FRÍO	77
3.2	CASO 2: MOTOR ACELERADO	78
3.3	CASO 3: VELOCIDAD CRUCERO	79
3.4	RESULTADOS	80
CAPÍTULO 4		
4	PLAN DE NEGOCIOS	83
4.1	RESUMEN EJECUTIVO.....	83
4.2	ANÁLISIS DE MERCADO.....	84
4.3	IMPACTO EN LA EXPORTACIÓN	84
4.4	IMPACTO EN LA SUSTITUCIÓN DE IMPORTACIONES.....	85
4.5	MODELO DE NEGOCIOS	85
4.6	RETORNO DE INVERSIÓN	86
4.7	PLAN DE MARKETING Y COMERCIALIZACION	86
4.8	VALIDACIÓN DEL PLAN DE NEGOCIOS	87
CAPÍTULO 5		
5	CONCLUSIONES Y MEJORAS	88
5.1	CONCLUSIONES	88
5.2	MEJORAS Y RECOMENDACIONES.....	89
	BIBLIOGRAFÍA	91

INDICE DE TABLAS

Tabla 1- Valores límites de contaminantes en gases de escape	14
Tabla 2 - Valores de lambda según tipo de mezcla	15
Tabla 3 - Consecuencias según tipo de mezcla utilizada.....	16
Tabla 4 - Características PIC 18F4550.....	30
Tabla 5 - Resumen de conexiones del microcontrolador.....	32
Tabla 6 - Equivalencia entre posición del acelerador y tensión entregada	35
Tabla 7 - Valores prácticos de resistencia en función de temperatura.....	37
Tabla 8 - Equivalencia entre temperatura y tensión	38
Tabla 9 - Equivalencia Presión-Tensión.....	41
Tabla 10 - Especificaciones técnicas Motomel Eco 70.	50
Tabla 11 - Equivalencia entre Posición del acelerador y presión en el colector	53
Tabla 12 - Potencia en función de RPM para motor de Motomel ECO 70.....	54
Tabla 13 - Eficiencia volumétrica en función de las RPM.....	55
Tabla 14 - Valores escogidos de la tabla 13 para reducir discretización de la variable .	56
Tabla 15 - Mapa de inyección inicial	56
Tabla 16 - Tabla de tiempos de inyección para fase de arranque.....	58
Tabla 17 - Tabla de corrección por temperatura	59
Tabla 18 - Tabla de corrección por presión atmosférica.....	60
Tabla 19 - Tabla de corrección por tensión de batería.....	60
Tabla 20 - Mapa de avance de encendido.....	61
Tabla 21 - Parámetros de configuración de osciloscopio para realización de pruebas .	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Motor de combustión interna	10
Figura 2 - Fases del ciclo de 4 tiempos	12
Figura 3 - Lambda vs Contaminantes	16
Figura 4 - Lambda vs Potencia/Consumo	16
Figura 5 - Formación de mezcla - Venturi.....	18
Figura 6 – Izquierda: Carburador. Derecha: Sistema de inyección electrónica.	19
Figura 7 - Izquierda: Carburador. Derecha: Sistema de inyección electrónica.	19
Figura 8 - Izquierda: Carburador. Derecha: Sistema de inyección electrónica	20
Figura 9 - Sistema de inyección electrónica.	21
Figura 10 - Potenciómetro de la mariposa	22
Figura 11 - Señal de sensor de efecto Hall	22
Figura 12 - Sensor de temperatura.....	23
Figura 13 - Sonda Lambda	23
Figura 14 - Señal analógica sensor MAP.....	23
Figura 15 - Bomba de combustible. Izquierda: Externa.	24
Figura 16 - Filtro de combustible.....	24
Figura 17 - Inyector típico.....	25
Figura 18 - Bujía de encendido.	26
Figura 19 - Bobina de encendido.....	26
Figura 20 - Arquitectura del prototipo diseñado	29
Figura 21 - Diagrama de pines PIC 18F4550. Encapsulado 40-Pin PDIP.....	31
Figura 22 - Conexión cristal	32
Figura 23 - Conexiones auxiliares	33
Figura 24 - Fuente de alimentación.....	33
Figura 25 - Acondicionamiento de sensor TPS	34
Figura 26 - Acondicionamiento sensor de efecto hall.....	35
Figura 27 - Acondicionamiento Sensor de temperatura	36
Figura 28 - Grafica de la ecuación característica del termistor NTC	37
Figura 29 - Acondicionamiento señal tensión batería.....	39
Figura 30 - Acondicionamiento señal de sensor MAP	40

Figura 31 - Acondicionamiento sensor lambda.....	41
Figura 32 – Etapa de control de la Bomba de Combustible	42
Figura 33 - Etapa de control del inyector	43
Figura 34 - Etapa de control del encendido	44
Figura 35 - Conexión de leds indicadores.....	44
Figura 36 - Diseño en PCB del prototipo	46
Figura 37 - Representación 3D del diseño en PCB del prototipo	46
Figura 38 - Curva de potencia de Motor equipado en Motomel ECO 70.....	54
Figura 39 - Curva de eficiencia volumétrica para Motomel ECO 70	55
Figura 40 - Representación gráfica del mapa de inyección.....	57
Figura 41 - Diagrama de flujo de inicialización del firmware	64
Figura 42 - Diagrama de flujo de programa principal del firmware.....	66
Figura 43 - Diagrama en bloques de la interrupción por conversión A/D del firmware	68
Figura 44 - Diagrama en bloques de la interrupción por timer1 del firmware	69
Figura 45 - Diagrama en bloques de la interrupción externa del firmware.....	70
Figura 46 - Diagrama en bloques de la interrupción externa del firmware.....	71
Figura 47 - Diagrama de flujo interrupción externa 2 del firmware	72
Figura 48 - Vista previa de las pantallas de sensores en interfaz.....	73
Figura 49 - Vista previa de las pantallas de sensores en interfaz.....	74
Figura 50 - Vista previa de la pantalla de actuadores de la interfaz USB.....	74
Figura 51 - Vista previa de la pantalla del mapa de inyección de la interfaz USB.....	75
Figura 52 - Medición con osciloscopio caso 1	78
Figura 53 - Medición con osciloscopio ejemplo 2	79
Figura 54 - Medición con osciloscopio ejemplo 3	80

Capítulo 1

1 INTRODUCCIÓN

Resulta imprescindible para la comprensión del presente proyecto realizar una introducción en algunos conceptos teóricos fundamentales.

1.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Definimos como motor a un sistema mecánico capaz de transformar un tipo de energía en otro. Particularmente, un motor de combustión, es aquel capaz de obtener energía mecánica a partir de la energía química liberada en la combustión de determinadas sustancias. Si dicha combustión se produce en el interior del sistema, estamos frente a un motor de combustión interna, caso contrario, hablamos de un motor de combustión externa.

En la figura 1 observamos una representación esquemática de un motor de combustión interna. La asimilación del mismo, nos facilita los conocimientos mínimos necesarios para la comprensión del presente proyecto.

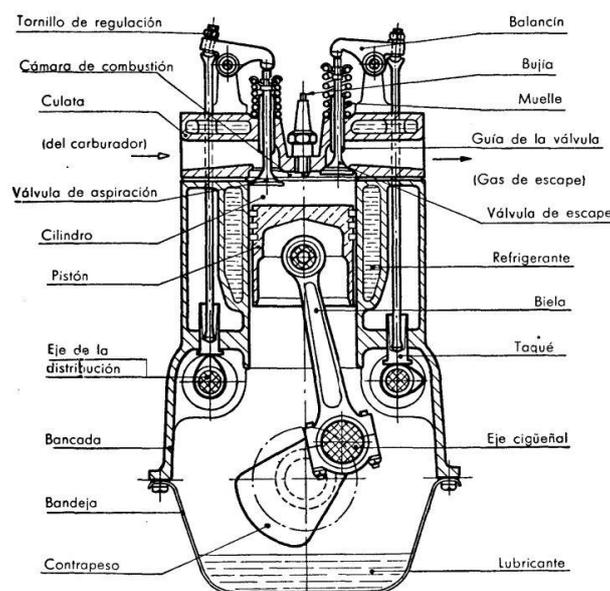


Figura 1 - Motor de combustión interna

El trabajo útil se obtiene a partir del movimiento rectilíneo del **pistón** dentro del contenedor o **cilindro**. La parte superior del cilindro se encuentra cerrada por la **culata**.

Se denomina **cámara de combustión**, al espacio comprendido en el cilindro, entre la culata y el pistón. En este recinto, se quema la mezcla de aire y combustible, es decir, el fluido activo.

Esta mezcla ingresará a la cámara a través de la **válvula de aspiración**.

La combustión iniciará al saltar la chispa entre los electrodos de la **bujía**.

El pistón o émbolo, dispone de **aros de compresión**, de modo de impedir la fuga de gas entre pistón y cilindro. Así, el empuje de dicho gas, es transmitido a través del **perno** a la **biela**, la cual, a su vez, lo transmite al **eje cigüeñal**. De esta manera, se transforma un movimiento lineal alternativo, en movimiento rotativo.

A través de la **válvula de escape** se descartan los productos resultantes de la combustión.

1.2 CICLOS OPERATIVOS

Una clasificación posible para motores de combustión interna, se basa en la cantidad de carreras de pistón que se requieren para el cumplimiento de un ciclo operativo. Denominándose, **ciclo operativo** a la sucesión de operaciones producidas en el cilindro con repetición periódica. Así, podemos encontrarnos con motores de 2 o 4 tiempos. Esto significa que los motores de 4 tiempos realizan un ciclo cada dos revoluciones del eje cigüeñal, y los motores de 2 tiempos, cada revolución.

En el presente proyecto, nos dedicamos únicamente a motores de 4 tiempos. El ciclo de 4 tiempos se divide en las siguientes fases, las cuales corresponden a una carrera de pistón cada una y cuya representación gráfica se ve en la figura 2:

1. Admisión.
2. Compresión.
3. Combustión y expansión.
4. Expulsión o escape.

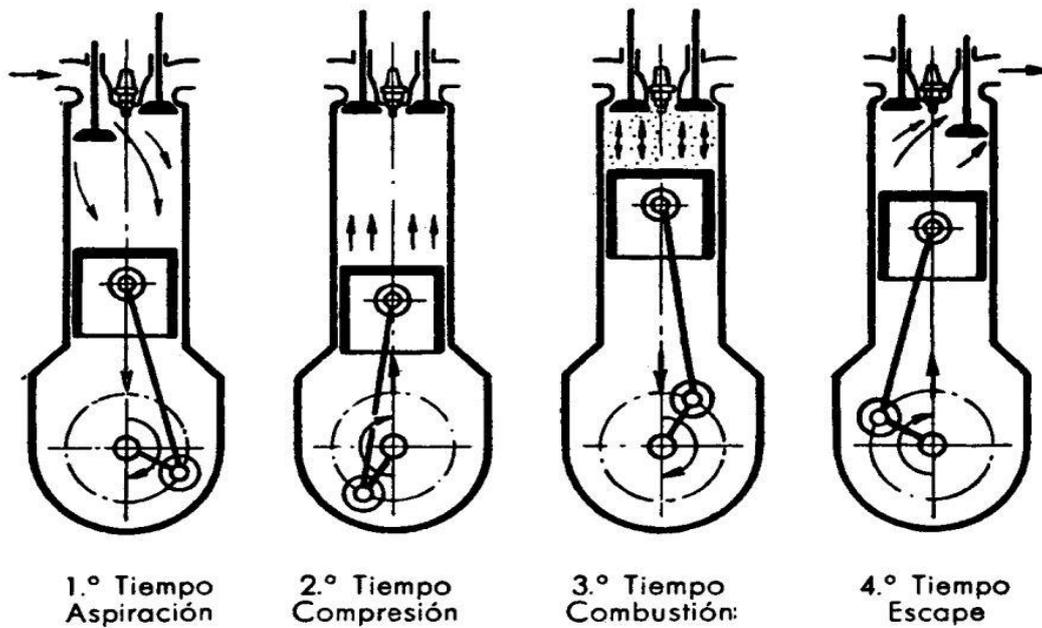


Figura 2 - Fases del ciclo de 4 tiempos

1. **Admisión:** El pistón desciende y aspira la mezcla de aire/combustible a través de la válvula de admisión que se encuentra abierta. La válvula de escape permanece cerrada.
2. **Compresión:** La mezcla es comprimida en la cámara de combustión. Ambas válvulas se encuentran cerradas.
3. **Explosión/Expansión:** La chispa en la bujía produce la inflamación de la mezcla. La expansión de los gases empuja el pistón. En esta etapa se realiza el trabajo del motor.
4. **Escape:** Con la válvula de escape abierta y la de admisión cerrada, el pistón realiza su segunda ascensión empujando los gases de escape a ser liberados.

1.3 COMBUSTIÓN

La combustión es una reacción química de oxidación entre un combustible y un comburente. En nuestro caso, gasolina y oxígeno respectivamente. Durante este proceso, una gran cantidad de energía es liberada.

La gasolina está compuesta por hidrocarburos (cadenas de átomos de Hidrogeno y Carbono). El oxígeno se obtiene del aire presente en el ambiente, compuesto por Oxígeno (23%), Nitrógeno (76%) y otros gases (1%).

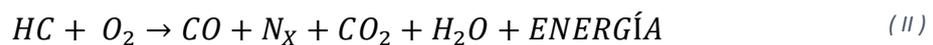
Como consecuencia de la combustión, se obtienen, en adición a la energía que se aprovechará para generar movimiento, gases residuales que serán vertidos al medio ambiente.

Así, diferenciamos dos casos:

Combustión completa. La totalidad del combustible se combina con el comburente. Oxidación total. Se obtendrá como producto, dióxido de carbono (CO₂) y Agua (H₂O).



Combustión incompleta. La cantidad de comburente no es suficiente para combinar con la totalidad del combustible. Oxidación parcial. Se obtendrá además del producto en una combustión completa, hidrocarburos no quemados, parafinas, oleofinas, aromáticos (C_nH_m), hidrocarburos parcialmente quemados, aldehídos (C_nH_m CHO), cetonas (C_nH_m CO), ácidos carboxílicos (C_n H_m COOH) y en mayor medida, monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x).



La regulación ambiental en nuestro país respecto a las emisiones de vehículos livianos equipados con motores de ciclo Otto, puede hallarse en la ley N°24.449 y es basada en el organismo estadounidense US FTP quien adopta para la realización de test el US EPA Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS). En la misma, solo se contempla la medición y control del monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos no quemados. Para ello, se establecieron valores límites permitidos progresivamente crecientes en exigencia a lo largo de los años. Estos valores pueden apreciarse en la tabla n°1.

Contaminante	Año de aplicación								
	1975	1977	1978/79	1983	1984	1987	1990/93	1994	1995
HC	0,93	0,93	0,93	0,25	0,25	0,25	0,25	0,156*	0,156*
CO	9,3	9,3	9,3	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12
NO_x	1,93	1,25	1,25	0,62	0,62	0,62	0,62	0,25	0,25

*Emisión de Hidrocarburos sin metano

Tabla 1- Valores límites de contaminantes en gases de escape

Conocer el efecto de estos productos contaminantes, nos permiten comprender la necesidad de la creación de sistemas que nos permitan obtener una combustión lo más completa posible.

Monóxido de Carbono (CO): Concentraciones en sangre mayores al 0,3% pueden causar muerte por envenenamiento. La exposición a este gas provoca la transformación irreversible de la Hemoglobina en Carboxihemoglobina, impidiendo a esta molécula cumplir con la función vital de transportar el oxígeno desde los pulmones a las células del organismo.

Se presentará como producto de la combustión cuando el oxígeno presente sea insuficiente y las moléculas no alcancen a formar dióxido de carbono (CO₂).

Hidrocarburos no quemados (HC): El grado de nocividad dependerá de la estructura molecular que presente. Una de las composiciones más frecuentes es el benceno. En casos extremos puede producir náuseas, mareos, depresiones y dolor de cabeza. En menores concentraciones, provocará irritaciones en la piel, ojos y vías respiratorias. Su cualidad como posible causante de cáncer ha sido comprobada. Junto con óxidos nitrosos y la estratificación atmosférica, conduce a la formación de smog.

La razón de su aparición como producto es la presencia en la mezcla de agentes 'no combustibles'.

Óxidos de Nitrógeno (NO_x): En adición a su efecto directo sobre las personas irritando conductos respiratorios, en combinación con los hidrocarburos, rayos ultravioletas y la humedad ambiental, producen ácidos nitrosos que posteriormente se convertirán en lluvia ácida contaminando grandes áreas que no necesariamente son las originarias de la contaminación.

1.4 RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA

Como se indicó en el apartado anterior, comprendiendo los efectos nocivos de una combustión incompleta, se plantea la creación de sistemas que nos permitan obtener combustiones completas. Con este objetivo, haciendo un análisis de las propiedades químicas de los elementos participantes de la combustión, se obtiene lo que se denomina **relación estequiométrica**.

Teniendo en cuenta la ecuación de la combustión completa y analizando los pesos atómicos de los elementos: C=12; O=16 y H=1, podemos deducir que cada 1 Kg de gasolina, son necesarios 14,7 Kg de aire.

$$RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA = \frac{1 \text{ Kg gasolina}}{14,7 \text{ Kg aire}} = \frac{1}{14,7} \quad (III)$$

Al lograr esta relación estequiométrica, una combustión producirá exclusivamente, dióxido de carbono y vapores de agua sin ningún tipo de gas contaminante adicional.

El modo de cuantificar en motores de combustión cuan apartado se está de dicha relación, es mediante el **coeficiente lambda λ** . Este coeficiente relaciona la cantidad de aire real consumida con la teórica necesaria y clasifica la mezcla según el valor obtenido.

$$\lambda = \frac{\text{Peso real de aire por Kg de gasolina}}{\text{Peso teórico de aire por Kg de gasolina}} = \frac{X}{14,7} \quad (IV)$$

En la tabla n°2 podemos observar según las características de la mezcla, cuales son los valores obtenidos de coeficiente lambda.

X	AIRE	MEZCLA	λ
< 14,7	En defecto	Rica	< 1
= 14,7	En equilibrio	Estequiométrica	= 1
> 14,7	En exceso	Pobre	> 1

Tabla 2 - Valores de lambda según tipo de mezcla

Si bien una mezcla que respete la relación estequiométrica es lo ideal en cuanto a contaminación respecta, en materia de automoción no siempre es suficiente para un correcto funcionamiento o un aprovechamiento máximo del motor. En este sentido,

podemos aplicar mezclas de distintas características según la necesidad al momento de utilización. Composiciones mas ricas nos permitirán obtener mayor potencia y composiciones pobres disminuir el consumo. En la tabla n°3 se presenta un resumen de las consecuencias obtenidas según el tipo de mezcla aplicada.

MEZCLA	λ	CONSECUENCIAS
RICA	< 0,75	La mezcla no inflama, el motor se ahoga y deja de funcionar.
	0,75 – 0,85	Mezcla demasiada rica, que en uso instantáneo, proporciona incrementos de potencia.
	0,85 – 0,95	Potencia máxima en régimen continuo (pendientes, adelantamientos, etc.)
NORMAL	0,95 – 1,05	Conducción normal. Velocidad crucero.
POBRE	1,05 – 1,15	Mínimo consumo con ligera pérdida de potencia.
	1,15 – 1,30	Disminución considerable de potencia con aumento de consumo por pérdida de rendimiento.
	> 1,30	La llama no se propaga y el motor deja de funcionar.

Tabla 3 - Consecuencias según tipo de mezcla utilizada

Habiendo caracterizado el coeficiente lambda, se presentan a continuación dos gráficos, figuras 3 y 4, que resumen la relación entre el tipo de mezcla y el consumo, potencia y gases contaminantes.

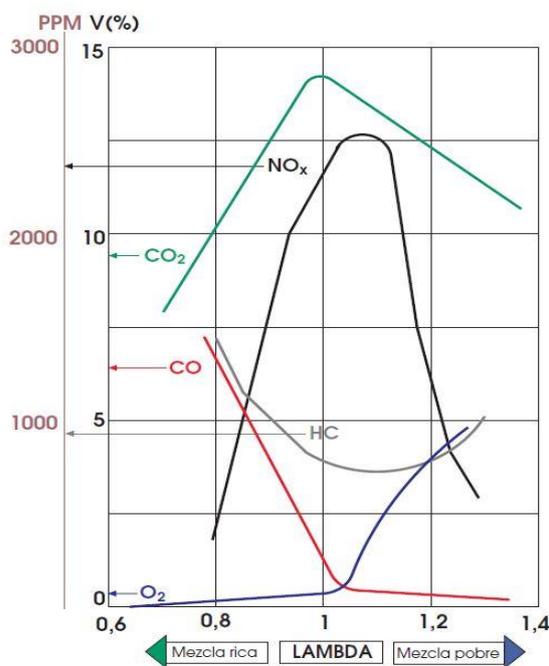


Figura 3 - Lambda vs Contaminantes

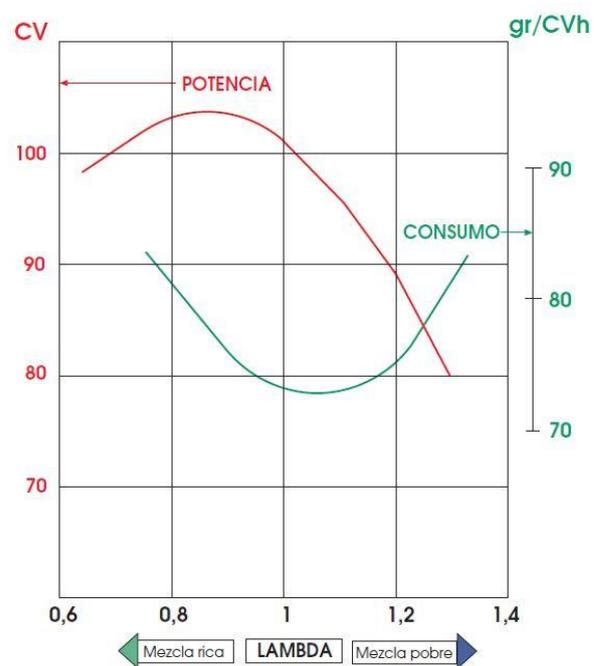


Figura 4 - Lambda vs Potencia/Consumo

1.5 LA INYECCIÓN ELECTRÓNICA

En todo motor de combustión, la mezcla aire-combustible será suministrada al cilindro por uno de los dos sistemas existentes: un carburador o inyección electrónica. Partiendo de una medida de las rpm del motor y del volumen de aire de admisión, dependiente de la apertura de la válvula de obturación, ambos sistemas suministran la relación adecuada de combustible y aire.

Con la ventaja de ser relativamente sencillo de construir, el carburador ha sido utilizado casi exclusivamente en todo motor de combustión a gasolina desde los comienzos. Sin embargo, las crecientes imposiciones y regulaciones en materia de contaminación de las emisiones de escape, obligaron a los fabricantes a reemplazar el carburador por sistemas más complejos y precisos, obteniendo además, beneficios adicionales respecto a consumo, maniobrabilidad, etc.

Así, surge un sistema capaz de proporcionar al motor una relación aire-combustible mas precisa relativa a las condiciones de manejo mediante un control electrónico.

1.6 COMPARACIÓN CARBURADOR – INYECCIÓN ELECTRÓNICA

El siguiente apartado proporciona un entendimiento de la forma en que el sistema de inyección electrónica ha sido capaz de reemplazar al carburador en su función de suministración de combustible.

1.6.1 PRODUCCIÓN DE LA MEZCLA AIRE-COMBUSTIBLE

El carburador realiza la mezcla mecánicamente mediante la aspiración de combustible en una cantidad proporcional al vacío generado por el volumen de aire que circula en el Venturi (Figura 5).

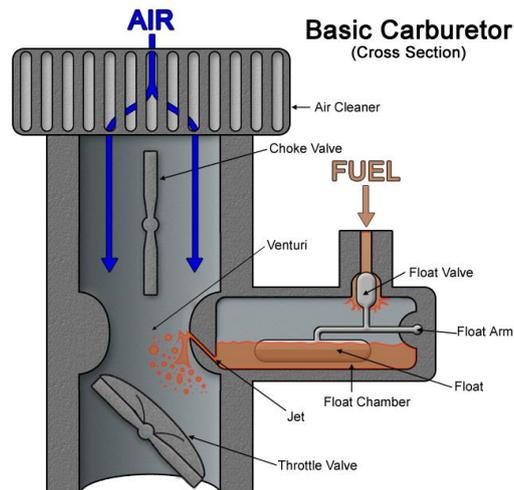


Figura 5 - Formación de mezcla - Venturi

Un sistema de inyección electrónica utiliza un sensor de flujo de aire colocado en la admisión. El mismo enviará una señal a la unidad de control electrónico quién controlará el inyector para entregar la cantidad adecuada de combustible.

1.6.2 CONDICIONES DE MANEJO

1.6.2.1 ARRANQUE Y BAJAS TEMPERATURAS

Durante el arranque, será necesario una mezcla rica de aire-combustible para un mejor rendimiento. Esta necesidad se ve incrementada en caso de que las temperaturas sean bajas. El modo que tiene el carburador de lidiar con esta situación, es una válvula de estrangulación que se cierra completamente a bajas temperaturas y se abre suavemente previniendo una mezcla sobre-enriquecida.

En cambio, los sistemas de inyección utilizan una señal analógica proveniente del arrancador para indicar a la ECU que debe proporcionar mezclas ricas por arranque. A su vez, dispone de un sensor de temperatura que envía una tensión proporcional a la temperatura del motor. Veremos en la figura 6 un esquemático de lo explicado.

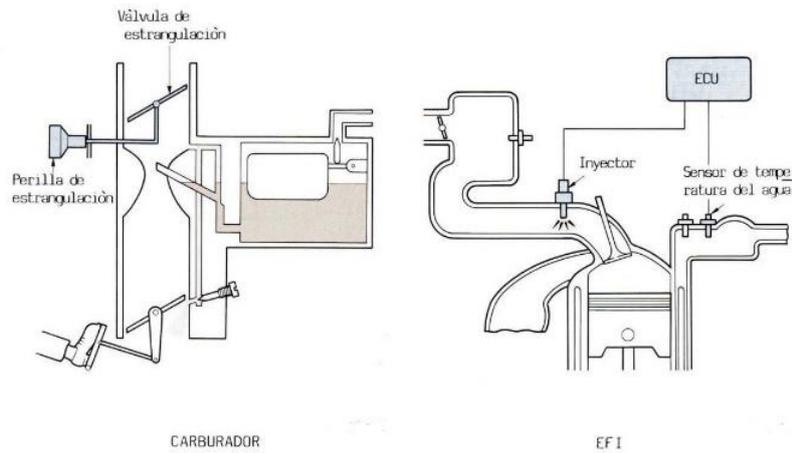


Figura 6 – Izquierda: Carburador. Derecha: Sistema de inyección electrónica.

1.6.2.2 ACELERACIÓN

En el momento de aceleración se produce un aumento repentino del volumen de aire. Debido a la naturaleza de mayor peso del combustible, se produce un retraso momentáneo de este respecto al aire.

Para prevenir un detenimiento del motor por pobreza de la mezcla, el carburador posee un pasaje especial que inyecta una cantidad de combustible adicional al momento de una apertura repentina de la válvula de obturación. En contraposición con el carburador, el sistema de inyección electrónica no precisa una corrección durante la aceleración. Esto es gracias a que el combustible es inyectado a alta presión en relación con los cambios del volumen de aire en admisión lo cual evita posibles retrasos en el suministro. Las partes participantes se muestran en la figura 7.

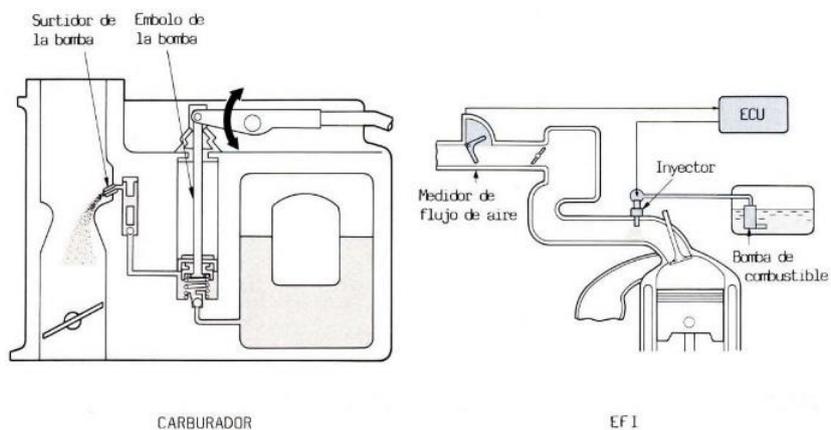


Figura 7 - Izquierda: Carburador. Derecha: Sistema de inyección electrónica.

1.6.2.3 ALTA POTENCIA DE SALIDA

Una mezcla rica de aire-combustible es requerida en situaciones en las que se espera del motor un rendimiento de potencia alto. Por ejemplo, en vehículos, estas situaciones serían al sobrepasar otros vehículos, circular ascendentemente por pendientes o carga extra debida a sobrepeso.

Motores con carburadores disponen de un sistema de alta potencia mecánico que detecta la extensión de la carga del motor mediante el vacío del múltiple. Una reducción del vacío produce la apertura de la válvula de potencia suministrando una mezcla rica de aire-combustible. En los sistemas de inyección, por el contrario, la extensión de la carga de motor es medida mediante un sensor que entrega una señal proporcional a la apertura de la válvula de obturación. De este modo, al aumentar la abertura, la unidad de control electrónico indicará un aumento del volumen de combustible a inyectar. Los mecanismos se muestran en la figura 8.

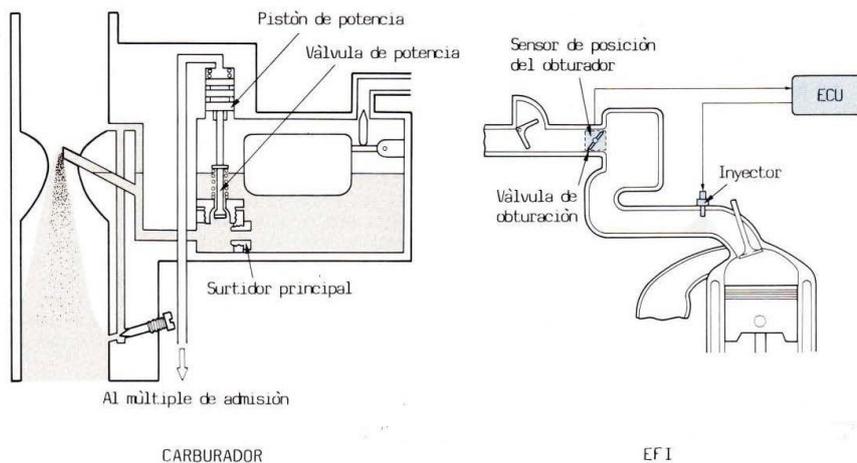


Figura 8 - Izquierda: Carburador. Derecha: Sistema de inyección electrónica

1.6.3 VENTAJAS DE LA INYECCIÓN ELECTRONICA FRENTE AL CARBURADOR

- Menor contaminación
- Mayor economía
- Mejor rendimiento del motor
- Arranques mas rápidos
- Mejor aprovechamiento del combustible
- Suministro uniforme de combustible a cada cilindro
- Relación precisa de aire-combustible en todo el rango de revoluciones

- Mejor respuesta a cambios de aceleración
- Corrección de la mezcla durante el funcionamiento

1.7 COMPONENTES DE UNA INYECCIÓN ELECTRÓNICA

En la figura 9 se presenta un esquema representativo de un sistema completo de inyección electrónica de combustible a partir del cual se podrá enumerar y realizar una breve reseña de los componentes involucrados. Si bien estos sistemas son complejos y abarcan una gran cantidad de sensores y actuadores, en el presente apartado solo se hará mención a los utilizados en la realización de este proyecto.

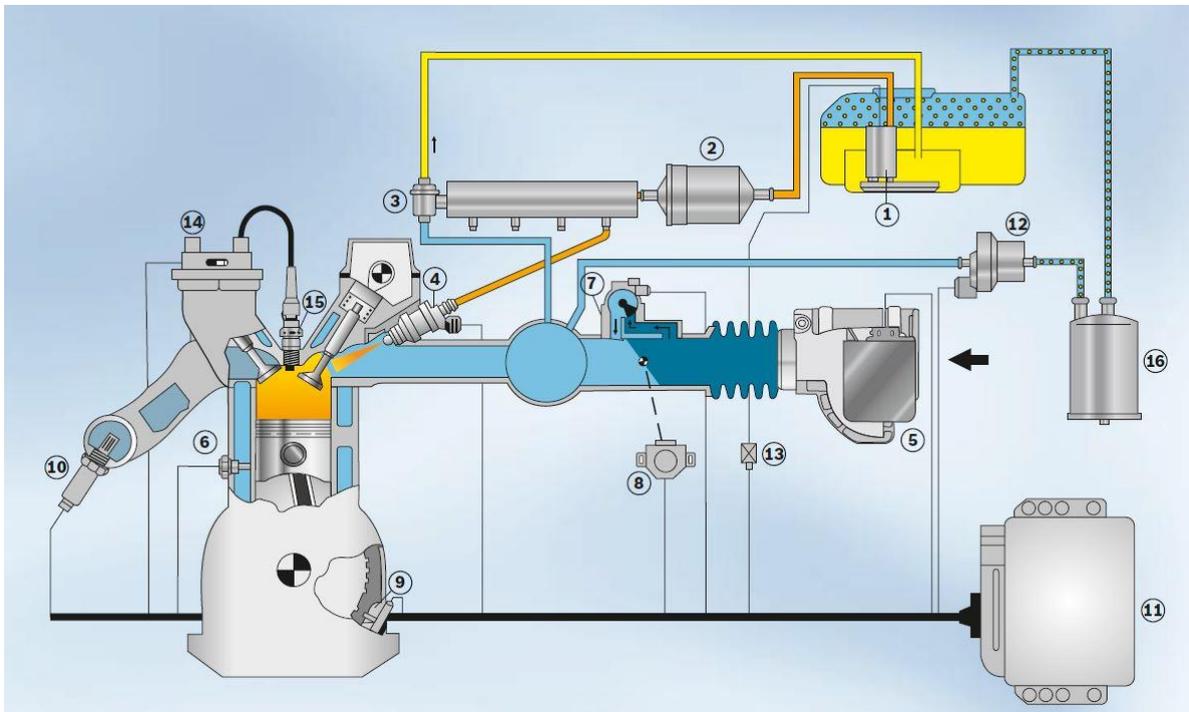


Figura 9 - Sistema de inyección electrónica. 1) Bomba de combustible. 2) Filtro de combustible. 3) Regulador de Presión. 4) Válvula de inyección. 5) Medidor de flujo de aire (caudalímetro). 6) Sensor de temperatura. 7) Actuador de ralentí. 8) Potenciómetro de la mariposa. 9) Sensor de revoluciones. 10) Sonda Lambda. 11) Unidad de comando electrónico. 12) Válvula de ventilación del tanque. 13) Relé de comando. 14) Bobina de encendido. 15) Bujía de encendido. 16) Cánister.

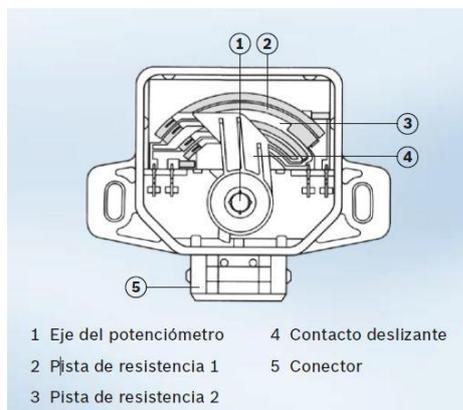
1.7.1 UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICO (ECU)

Es el componente principal del sistema. Un dispositivo electrónico encargado de leer y procesar las señales provenientes de los sensores estratégicamente ubicados en el motor, para controlar operaciones básicas del funcionamiento del mismo. Como ser, volumen de combustible pulverizado y momento de ejecución de la chispa, entre otras.

Compuesto por un hardware y un software (firmware). El hardware dispone de un microcontrolador quien se encargará de realizar los cálculos y tomar decisiones, un EPROM o un chip de memoria flash.

Una ECU deberá presentar: entradas y salidas analógicas y digitales de alta y baja potencia; dispositivos de control de potencia; al menos un protocolo de comunicación; matrices de conmutación para señales de alta y baja potencia; entre otros.

1.7.2 POTENCIOMETRO DE LA MARIPOSA



Este dispositivo es fijado a la mariposa de aceleración entregando una tensión proporcional a la posición de la misma. De esta manera, la ECU podrá actuar en consecuencia de acuerdo a la necesidad del usuario. En la figura 10 podemos apreciar un esquemático de un modelo marca Bosch.

Figura 10 - Potenciómetro de la mariposa

1.7.3 SENSOR DE POSICIÓN DEL CIGÜEÑAL – VARIACIÓN RPM

Existen con este fin sensores de efecto hall, magnéticos y ópticos. Los que a este proyecto conciernen, son los primeros. Estos, detectaran las variaciones de un campo magnético producidas por el giro del cigüeñal o la rotación de un eje del distribuidor. Su señal de salida, cuya representación puede verse en la figura 11, será una onda cuadrada de amplitud constante y frecuencia dependiente de las RPM.

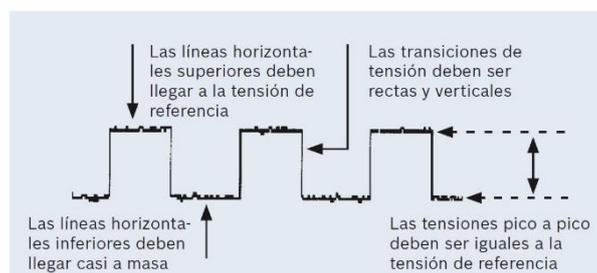


Figura 11 - Señal de sensor de efecto Hall

1.7.4 SENSOR DE TEMPERATURA DEL MOTOR

Mide la temperatura del motor por medio del líquido de enfriamiento o por contacto con el mismo. Consiste en una resistencia NTC cuyo valor de resistencia varía respecto de la temperatura a la cual se encuentra expuesta. De esta manera, la ECU recibirá una variación de la señal cuando varíe la resistencia. Es un sensor de vital importancia en la inyección electrónica y su diagrama simplificado puede observarse en la figura 12.

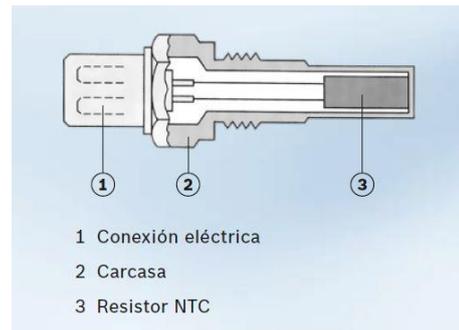


Figura 12 - Sensor de temperatura

1.7.5 SONDA LAMBDA

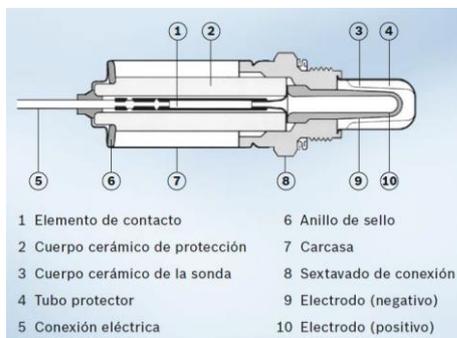


Figura 13 - Sonda Lambda

Esta sonda funcionará como señal de realimentación. Entrega una señal que nos indica si la mezcla utilizada es rica o pobre. Se instala en el tubo de escape de modo que pueda estar en contacto tanto con los gases productos de la combustión como con el aire exterior. Si la cantidad de oxígeno en ambos extremos no es igual, envía una señal a la ECU para ser procesada.

En la figura 13 se indican los elementos más relevantes de la sonda.

1.7.6 SENSOR DE PRESIÓN ABSOLUTA EN EL COLECTOR (MAP)

Pueden encontrarse tanto modelos analógicos como digitales. El primero entregará un nivel de tensión proporcional a la carga del motor. Una representación de esta señal puede observarse en la Figura 14. El digital, una señal cuadrada modulada en frecuencia. Esta información es enviada directamente a la ECU y utilizada para corregir el tipo de mezcla de combustible a inyectar. A mayor carga del motor, mayor será la presión absoluta en el colector. Su función es análoga a la válvula de potencia de un carburador.

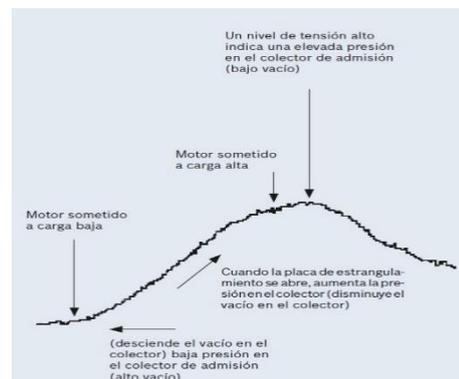


Figura 14 - Señal analógica sensor MAP

1.7.7 BOMBA DE COMBUSTIBLE

La única manera de tener un control absoluto en la cantidad de gasolina inyectada es manteniendo una presión constante en la dosificación. Con este objetivo, se implementa en todo sistema una bomba de combustible que garantiza igualdad de presión en todos los regímenes de funcionamiento. La bomba puede ser instalada tanto dentro como fuera del tanque de combustible, dependiendo el motor, pero su funcionamiento es el mismo. Pueden observarse ambos casos en la figura 15.

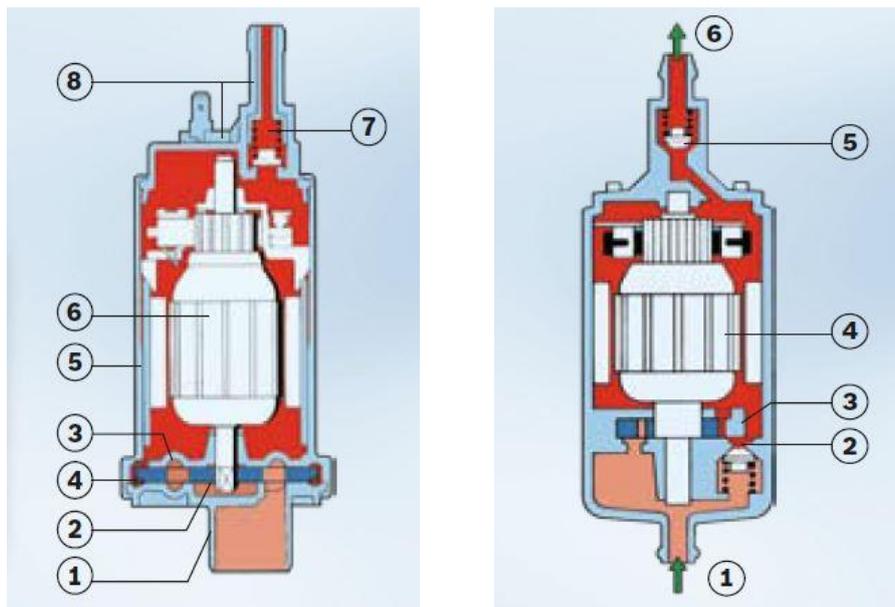


Figura 15 - Bomba de combustible. Izquierda: Externa. 1) Tapa lado de aspiración. 2) Disco de aspiración. 3) Galería primaria. 4) Galería principal. 5) Carcasa. 6) Inducido. 7) Válvula de retención. 8) Lado de presión y conexión de salida. Derecha: Interna. 1) Lado de aspiración. 2) Limitador de posición. 3) Bomba de rolos. 4) Inducido. 5) Válvula de retención. 6) Lado de presión.

1.7.8 FILTRO DE COMBUSTIBLE

Un elemento simple pero vital para prolongar la vida útil del sistema. Encargado de retener posibles impurezas en el combustible de modo de proteger los elementos subsiguientes. Se instala justo después de la bomba de combustible y contiene un elemento de papel responsable de la limpieza del combustible y a continuación una tela que retenga posibles partículas del papel anterior. En la figura 16 puede observarse el esquema de composición.

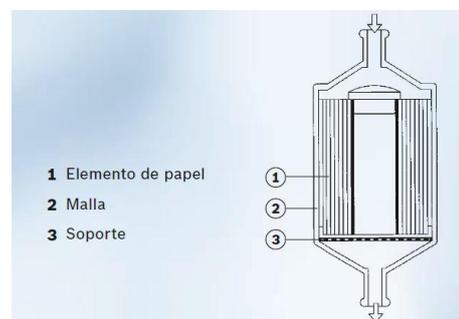


Figura 16 - Filtro de combustible

1.7.9 INYECTOR

También denominado válvula de inyección, se encargará de pulverizar el combustible

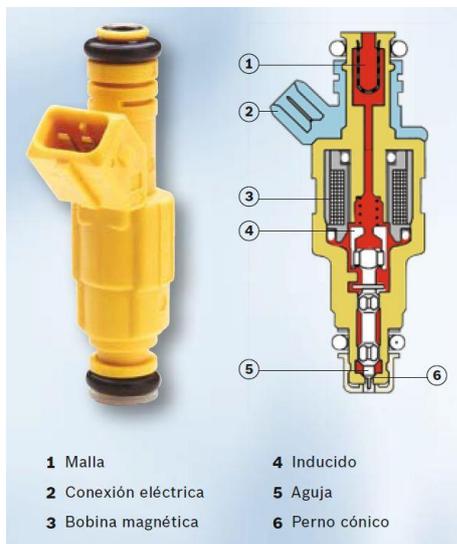


Figura 17 - Inyector típico

antes de la válvula de admisión de modo que sea mezclado con el aire y forme la mezcla que resultará en la combustión. Es comandada directamente por la ECU, recibiendo pulsos eléctricos que alimentaran la bobina magnética. Este proceso, genera un campo electromagnético que mueve la aguja permitiendo la apertura y cierre de la válvula de inyección.

En la figura 17 se presenta un modelo esquemático de un inyector típico, sin embargo, para cada motor existe un inyector específico de modo de adaptarse a las características físicas del mismo. Esto es debido a que se pretende obtener una perfecta distribución del combustible, sin pérdidas por condensación. Con este fin, el combustible inyectado no debe tocar las paredes internas de la admisión, para lo cual el ángulo de inyección y la cantidad de orificios de la válvula serán distintos según el motor.

1.7.10 BUJÍA Y BOBINA DE ENCENDIDO

Una vez que la mezcla es inyectada en el cilindro, debe generarse un evento que inicie la combustión. Con este fin, se coloca la bujía de encendido.

La bujía estará encargada de introducir la energía generada por el sistema de encendido en la cámara de combustión mediante una chispa eléctrica generada entre sus electrodos.

Una función secundaria de la bujía de encendido es la disipación del calor generado en la cámara de combustión. Un esquema de su composición puede observarse en la figura 18.

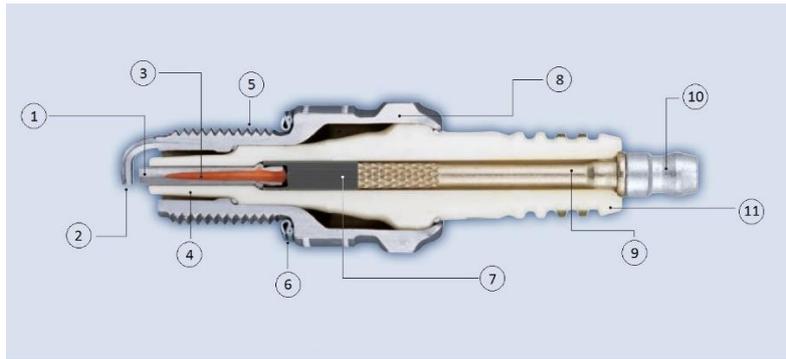


Figura 18 - Bujía de encendido. 1) Electrodo masa. 2) Electrodo central. 3) Núcleo de cobre en el electrodo central. 4) Pie del aislador. 5) Rosca niquelada. 6) Arandela de sellado (vedación). 7) Resistor de supresión. 8) Carcasa de acero, niquelada. 9) Perno de conexión. 10) Tuerca de conexión. 11) Aislador de piranite.

La tensión requerida por la bujía para producir la chispa será de entre 8000 y 15000 voltios y dependerá de distintos factores: desgaste de los electrodos; resistencia de los cables de encendido; punto de encendido; compresión de los cilindros; mezcla aire-combustible; temperatura del motor; etc.

Para obtener esta tensión se utiliza la bobina de encendido. Esta consiste simplemente en un “transformador” que elevará los 12 V entregados por la batería y los convertirá en alta tensión necesaria para la producción de la chispa.

Como puede observarse en la figura 19, la bobina consiste en una carcasa metálica que posee en su interior un núcleo de hierro laminado y dos bobinados, uno primario y otro secundario.

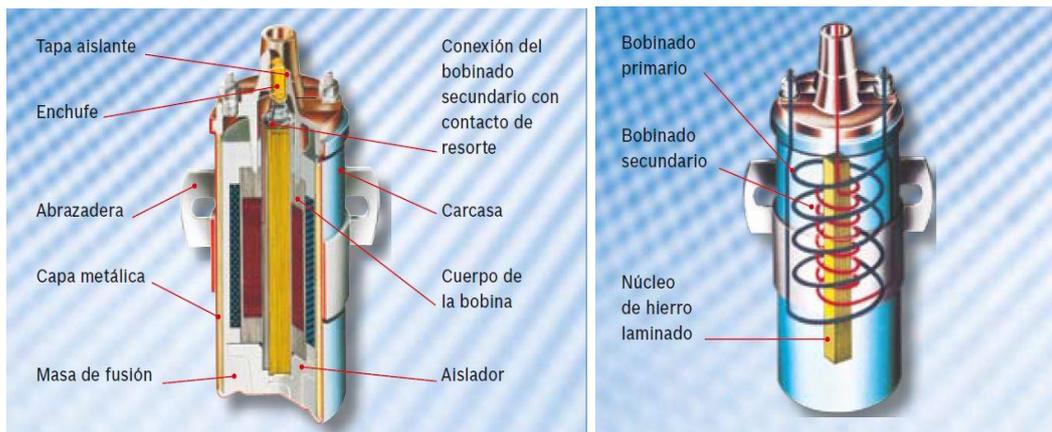


Figura 19 - Bobina de encendido

Capítulo 2

2 DISEÑO DEL PROTOTIPO

El prototipo a realizar en el presente proyecto consiste en una Unidad de control Electrónico (comúnmente denominada ECU por sus siglas en inglés) para un sistema de inyección de combustible a ser instalado en motores de combustión interna cuatro tiempos ciclo Otto de cilindradas menores a 125cc.

La ECU diseñada, deberá procesar las señales entregadas por sensores seleccionados y controlar la apertura y cierre de un inyector y el momento en que la bujía generará la chispa.

Debido a que la motivación de este proyecto es la fabricación de un producto capaz de ser introducido en el mercado y con posibilidades de generar un negocio rentable alrededor del mismo, se inició inevitablemente con una investigación de mercado que permitió justificar la viabilidad de la comercialización y de este modo, la del proyecto. Se debió tener en cuenta, no solo la situación actual, sino también la potencial aparición de competencia y evaluar la capacidad de enfrentar las diversas fluctuaciones del mercado.

A partir de la finalización de esta etapa, se planteó una estrategia en 4 pasos que permita completar el proyecto en los tiempos esperados y considerando un margen de imprevistos. De esta manera, se asegura un éxito y un orden que de otro modo sería difícil de lograr.

La estrategia consta de los siguientes pasos:

1. Realizar un estudio del comportamiento y funcionamiento de un motor de combustión interna a gasolina, de baja cilindrada y refrigerado por aire. Así también como de las normas ambientales del país respecto a la emisión de gases contaminantes. Los puntos fundamentales de este paso fueron descritos en el capítulo 1.

2. Identificar y analizar las variables necesarias para realizar el sistema de control (posición del acelerador, velocidad, temperatura del motor, inyección de combustible, etc.). Así también como las señales entregadas por los sensores encargados de adquirir esas variables.
3. Diseñar el hardware del sistema de control electrónico automático. Realización de los cálculos matemáticos necesarios, elaboración de mapas y tablas de corrección. Programar el software de control a introducir en el microcontrolador de la ECU. Programar un software de visualización para, mediante una interfaz USB, conectar el Sistema de control desarrollado a una PC y poder realizar diagnósticos y evaluaciones.
4. Pruebas de funcionamiento en laboratorio y construcción de carcasa y aislaciones. Implementación del sistema en un motor real reemplazando su sistema de carburación por el propio diseño. Pruebas del motor real.

Es importante remarcar que debido a que el funcionamiento de los sistemas de inyección electrónica depende directamente de las características mecánicas del motor donde será implementado, se debió tomar como modelo un motor específico para la realización de este proyecto. Con este fin, fue adquirida una motocicleta marca Motomel modelo ECO 70, originalmente con sistema de carburación, de donde surgen los datos específicos que posteriormente serán utilizados para cálculos fundamentales en el diseño del firmware y donde serán realizadas las pruebas de campo del prototipo creado.

2.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

De la gran variedad de variables posibles a sensor, se escogieron, en principio, tres de carácter fundamental, sin las cuales no se podría obtener un sistema válido de control:

- I. Posición de la mariposa de aceleración
- II. Revoluciones por minuto del motor
- III. Temperatura del motor

Y tres secundarias que aportan una corrección apreciable y de mucha utilidad:

- I. Presión en el colector de admisión
- II. Voltaje de la batería
- III. Gases de escape

Estas variables serán adquiridas mediante la colocación de sensores específicos en lugares estratégicos del motor.

Las señales obtenidas serán recibidas y procesadas por un Microcontrolador, quien estará encargado, a su vez, de controlar los actuadores correspondientes y de enviar datos escogidos a través de una interfaz de comunicación hacia un ordenador personal.

Los actuadores que se plantearon controlar son:

- I. Bomba de combustible
- II. Inyector de combustible
- III. Bobina y Bujía de encendido

A continuación, en la figura 20, se presenta un diagrama en bloques a modo de resumen del sistema obtenido.

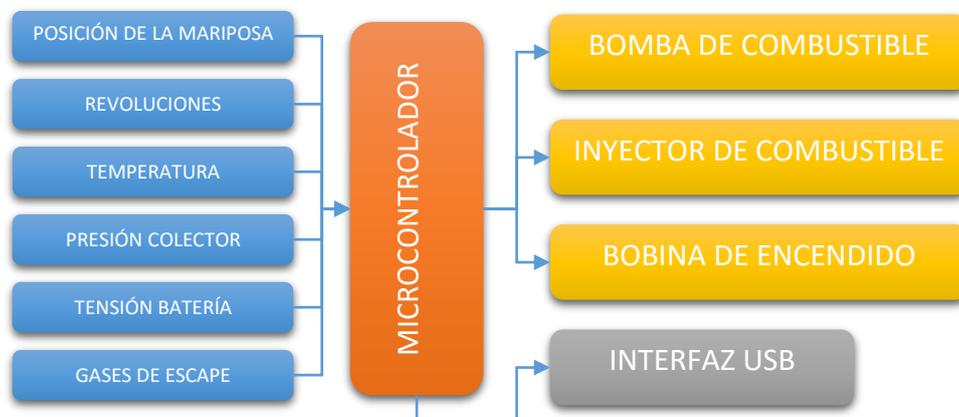


Figura 20 - Arquitectura del prototipo diseñado

2.1.1 MICROCONTROLADOR

Se optó por utilizar tecnología de la marca Microchip Technology Inc. El microcontrolador escogido fue el PIC18F4550. El mismo se adapta a las necesidades de velocidad y calidad requeridas. Los recursos integrados de los que dispone, como los conversores A/D y la interfaz integrada USB, facilitan el diseño reduciendo el tamaño físico del mismo y el tiempo dedicado. En adición, es una tecnología ampliamente

desarrollada por lo cual la cantidad de información al respecto es abundante y su disponibilidad en el mercado local está asegurada, evitando así contratiempos perjudiciales.

Si bien se podrían haber utilizado microcontroladores de la misma familia que resultan mas pequeños y económicos, la decisión final en la obtención de este modelo específico se basa en la facilidad de ampliación del prototipo en un futuro agregando mayor cantidad de variables a sensar y controlar.

2.1.1.1 CARACTERÍSTICAS Y PRESTACIONES

En la tabla 4 se indican las características y prestaciones principales de las cuales dispone el PIC18F4550 obtenida directamente de su hoja de datos.

CARACTERÍSTICAS	PIC18F4550
Frecuencia de operación	DC – 48 MHz
Memoria de programa (Bytes)	32768
Memoria de programa (Instrucciones)	16384
Memoria de datos (Bytes)	2048
Memoria de datos EEPROM (Bytes)	256
Fuentes de interrupción	20
Puertos de E/S	Puertos A, B, C, D, E
Timers	4
Captura/Comparación/Módulos PWM	1
Comunicación serial	MSSP, Enhanced USART
Universal Serial Bus (USB)	1
Straming Parallel Port (SPP)	Si
Módulo de conversión A/D 10 bits	13 canales de entrada
Comparadores	2
Set de instrucciones	75 instrucciones (83 extendida)
Encapsulados	40-PIN PDIP / 44-PIN QFN/TQFP

Tabla 4 - Características PIC 18F4550

2.1.1.2 PINES Y CONEXIÓN

Para mayor facilidad al realizar el prototipo se escogió el encapsulado de 40 pines PDIP. Una distribución de los mismos puede observarse en la figura 21.

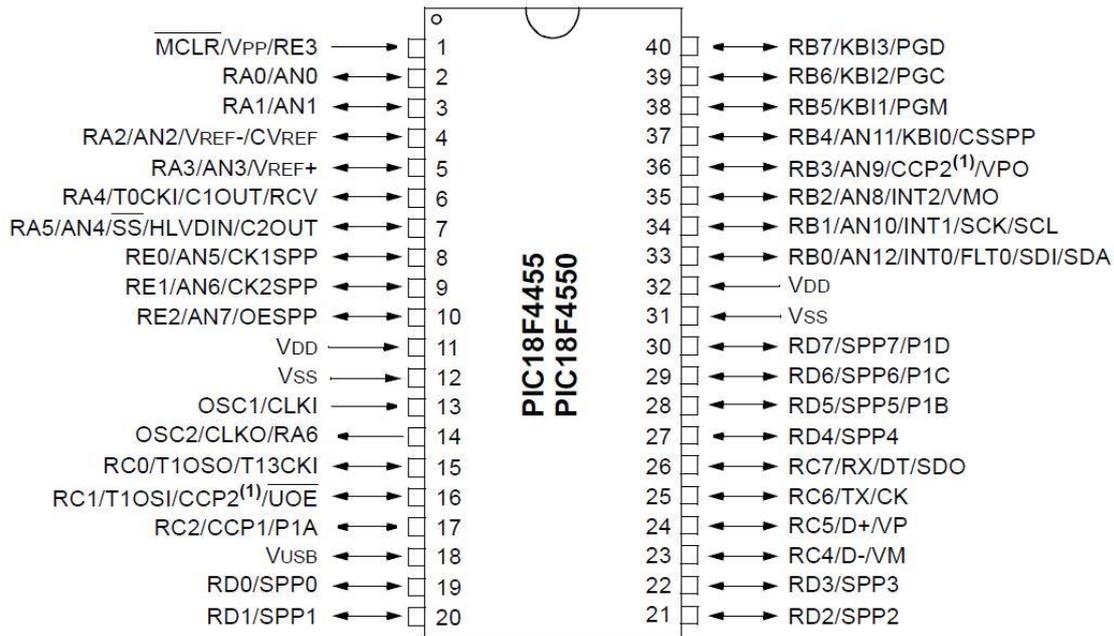


Figura 21 - Diagrama de pines PIC 18F4550. Encapsulado 40-Pin PDIP.

Conocida la distribución de los pines, se presenta en la tabla 5 un resumen de las conexiones concernientes al prototipo diseñado. Los pines no listados quedan sin conexión.

# PIN	NOMBRE PIN	DESCRIPCIÓN	IN/OUT	AN/DIG
1	MCLR	Master Reset	Entrada	Digital
2	AN0	Sensor TPS (posición de mariposa) {0V – 5V}	Entrada	Analógica
3	AN1	Sensor de temperatura (NTC) {0V – 5V}	Entrada	Analógica
4	AN2	Sensor Tensión batería {0V – 5V }	Entrada	Analógica
5	AN3	Sensor MAP (presión colector) {0,2 V – 4,8 V}	Entrada	Analógica
6	RA4	Sensor de gases de escape. Schmitt trigger	Entrada	Digital
11	VDD	Alimentación {5 V}	-	-
12	VSS	Tierra	-	-
13	OSC1 / CLK1	Conexión Cristal	-	-
14	OSC2 / CLK2	Conexión Cristal	-	-
18	VUSB	Capacitor para el reconocimiento del USB	-	-
19	RD0	Encendido	Salida	Digital
20	RD1	Led indicador de Inyección	Salida	Digital

21	RD2	Led indicador de Encendido	Salida	Digital
22	RD3	Bomba de combustible	Salida	Digital
23	D-	Conexión del USB		
24	D+	Conexión del USB		
28	RD5	Inyector de combustible	Salida	-
31	VSS	Tierra	-	-
32	VDD	Alimentación {5 V}	-	-
33	RB0	Sensor RPM (sensor hall switch) {1 – 0}	Entrada	Digital
34	RB1	Sensor Encendido (sensor hall switch) {1-0}	Entrada	Digital

Tabla 5 - Resumen de conexiones del microcontrolador

2.1.1.3 FRECUENCIA DE TRABAJO

Si bien el microcontrolador escogido tiene la posibilidad de trabajar con un oscilador interno, la aplicación práctica de este prototipo requiere de una velocidad de respuesta en tiempo real, por lo cual es necesario alcanzar la máxima velocidad ofrecida.

Para esto se colocó un oscilador externo conformado por un cristal de cuarzo de 20 MHz y dos capacitores cuyos valores se obtienen directamente del datasheet del PIC18F4550 y corresponden a 15 pF. El modo de conexión se detalla en la figura 22.

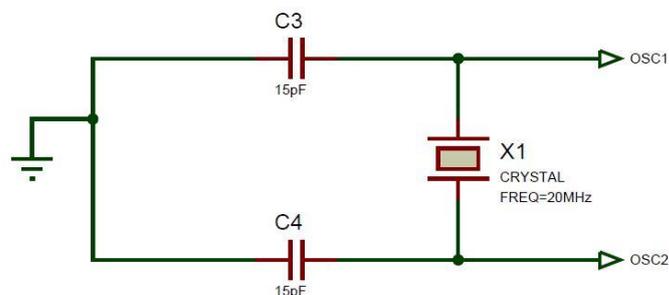


Figura 22 - Conexión cristal

2.1.1.4 CONEXIONES AUXILIARES

Son necesarias para el correcto funcionamiento del sistema dos conexiones auxiliares en el microcontrolador. La primera corresponde a la polarización del pin MCLR para evitar que se encuentre en constante modo reset y consiste simplemente en una resistencia pull-up. La segunda se coloca de modo de ser reconocido por el PC cuando se conecta mediante USB. Esta conexión también es indicación del datasheet del

microcontrolador y corresponde a un capacitor de 470 nF a masa desde el pin Vusb. Ambas conexiones pueden verse en la figura 23.

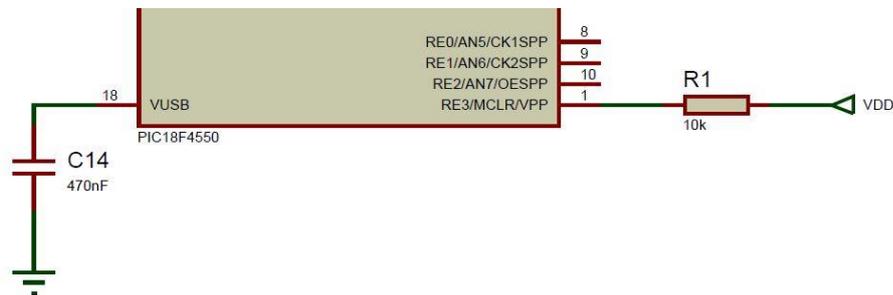


Figura 23 - Conexiones auxiliares

2.1.1.5 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

El prototipo diseñado obtiene su alimentación de la batería de la motocicleta. Sin embargo, estas baterías entregan, en general, una tensión entre 12 y 14,3 V y nuestro microcontrolador requiere para un correcto funcionamiento, como máximo, 5,5 V. Por este motivo, fue necesaria la implementación de una fuente de alimentación que entregue la tensión requerida.

Esta fuente se basa en un regulador de tensión LM7805, el cual entrega 5 V a su salida soportando un amplio rango de tensiones de entrada (hasta 35 V) y una demanda de corriente de hasta 1 A. Experimentalmente podemos determinar que el consumo de nuestro prototipo no superará los 400 mA por lo cual este regulador es mas que suficiente. En la figura 24 se muestra una representación circuital de la fuente de alimentación.

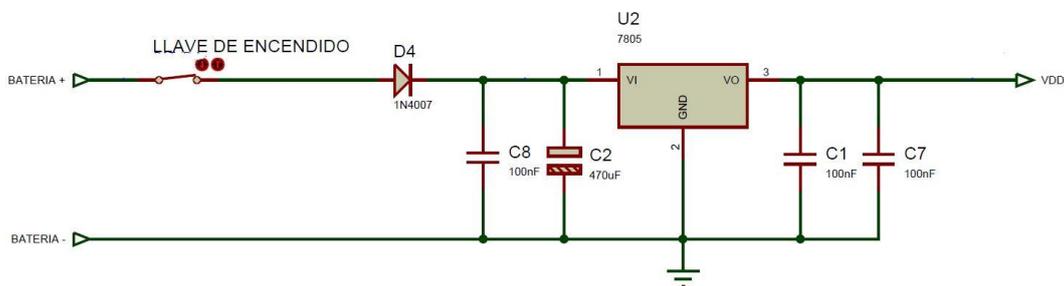


Figura 24 - Fuente de alimentación

El capacitor C2 electrolítico se coloca para estabilizar la tensión de entrada. Los capacitores C1, C7 y C8 filtran los ruidos de alta frecuencia. El diodo D4 se coloca como protección ante una equivocación en la conexión de los terminales de la batería.

2.1.2 SENSOR DE POSICIÓN DE LA MARIPOSA DE ACELERADOR (TPS)

El sensor de posición de la mariposa de aceleración, TPS por sus siglas en inglés, es básicamente un potenciómetro lineal cuya variación de resistencia es proporcional a la posición angular del acelerador. Se alimenta con 5 V para así entregar una tensión entre 0 y 5 V directamente relacionada a la variable a sensor.

2.1.2.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

Esta señal puede ser ingresada directamente a un canal del conversor analógico digital de nuestro microcontrolador, sin embargo, para una optimización en la lectura, se colocó una red RC a modo de filtro para limpiar la señal. En la figura 25 se muestra la conexión realizada donde el sensor TPS está representado por un potenciómetro.

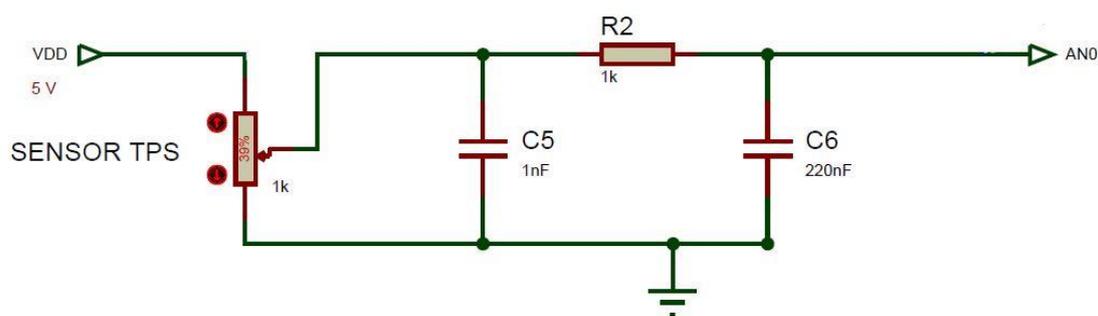


Figura 25 - Acondicionamiento de sensor TPS

2.1.2.2 EQUIVALENCIA POSICIÓN MARIPOSA – TENSIÓN

Al ser la relación entre la resistencia y la variable sensada directamente proporcional, es sencillo realizar una equivalencia entre los valores de posición de la mariposa de aceleración y la tensión que ingresará a nuestro microcontrolador. Se considera una tensión de 0 V para un ángulo de apertura de 0° y una tensión máxima de 5 V para una apertura de 90°. Así, se obtuvo la tabla 6 que presenta la equivalencia buscada.

Posición del Acelerador [°]	Tensión [V]
0	0,0
3	0,2
14	0,8
32	1,8
42	2,3
51	2,8

61	3,4
71	3,9
80	4,4
90	5,0

Tabla 6 - Equivalencia entre posición del acelerador y tensión entregada

2.1.3 SENSOR DE REVOLUCIONES POR MINUTO DEL MOTOR

Para sensor la velocidad con la que gira el motor, se optó por utilizar un sensor de efecto hall tipo switch, el HAL508 de la marca MICRONAS INYERMETALL. A diferencia de otros métodos como los de sensores inductivos, con este sensor obtenemos directamente una señal de tipo digital que puede ser ingresada directamente a nuestro microcontrolador sin necesidad de realizar ningún tipo de acondicionamiento. La salida del sensor se conecta directamente a una entrada de interrupción de nuestro microcontrolador, provocando una interrupción en cada flanco ascendente que se produzca. Su amplitud será 5 V y su frecuencia dependerá de las RPM.

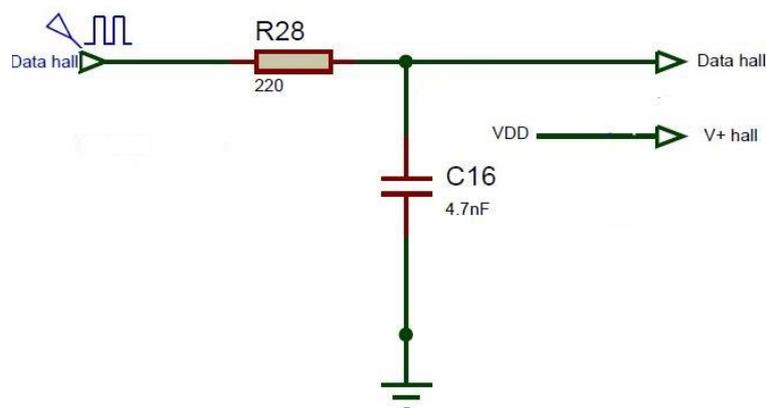


Figura 26 - Acondicionamiento sensor de efecto hall

Si bien la señal del sensor no precisa de acondicionamiento para ser ingresada al microcontrolador, como puede observarse en la figura 26, se coloca un filtro para evitar interrupciones por ruido.

Exactamente la misma configuración y sensor se utilizó para determinar el momento en que el motor comienza el ciclo de expansión y así tener una referencia para el momento de la generación de chispa.

2.1.4 SENSOR DE TEMPERATURA

El sensor escogido para la realización de este prototipo es un termistor NTC cuyo valor nominal es de 10 K Ω a 25°C. El mismo consiste en una resistencia eléctrica que

disminuirá su valor resistivo a medida que aumenta la temperatura y viceversa. La curva de relación resistencia/temperatura, si bien puede linealizarse por tramos según su aplicación y rangos de medida, responde de manera mas aproximada a la ecuación de Steinhart-Hart. Si bien no forma parte del objetivo del presente proyecto el tratamiento de los sensores utilizados, es necesario realizar un análisis pertinente del funcionamiento y características del termistor para poder realizar un prototipo adaptable a las condiciones reales de funcionamiento.

2.1.4.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

En una óptica circuital, el termistor tendrá el mismo comportamiento que un potenciómetro logarítmico, por lo tanto, para poder analizar sus variaciones en nuestro microcontrolador, bastó con plantear un divisor resistivo conectado en un extremo a la fuente de alimentación y en el otro a uno de los canales del conversor analógico – digital. En adición, se colocó una red RC a modo de filtro para una mejor lectura de la señal. Lo aquí descrito puede observarse en la figura 27.

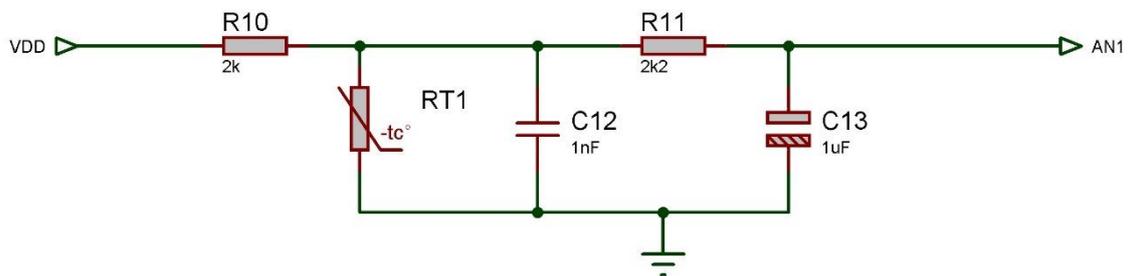


Figura 27 - Acondicionamiento Sensor de temperatura

2.1.4.2 CURVA CARACTERÍSTICA DEL TERMISTOR

Para una correcta interpretación de la variación de la resistencia en función de la temperatura, se debió obtener la curva característica del termistor utilizado. Para esto, se parte de la ecuación teórica de Steinhart-Hart:

Ecuación V

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln(R) + c \cdot (\ln(R))^3$$

Donde:

- T: Temperatura del termistor expresada en grados Kelvin
- a, b y c: coeficientes de Steinhart-Hart
- R: Resistencia expresada en Ω

Si bien según el termistor adquirido, las constantes de Steinhart-Hart pueden obtenerse del datasheet del fabricante, siempre es conveniente para una mayor precisión generar una curva específica propia. Para ello, se tomaron de forma práctica dos valores de resistencias a distintas temperaturas. Sumado al nominal, se obtuvieron tres pares de valores suficientes para resolver la ecuación de la curva buscada.

Temperatura [°C]	Resistencia [Ω]
1	44000
25	10000
90	1046

Tabla 7 - Valores prácticos de resistencia en función de temperatura

A partir de estos valores, se resolvió el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas planteado del cual surge la curva característica del termistor NTC comprado:

Ecuación VI

$$\frac{1}{T} = 0,2067e^{-3} + 3,9894e^{-4} \ln(R) - 6,746e^{-7} (\ln(R))^3$$

Cuya representación gráfica se muestra en la figura 28.

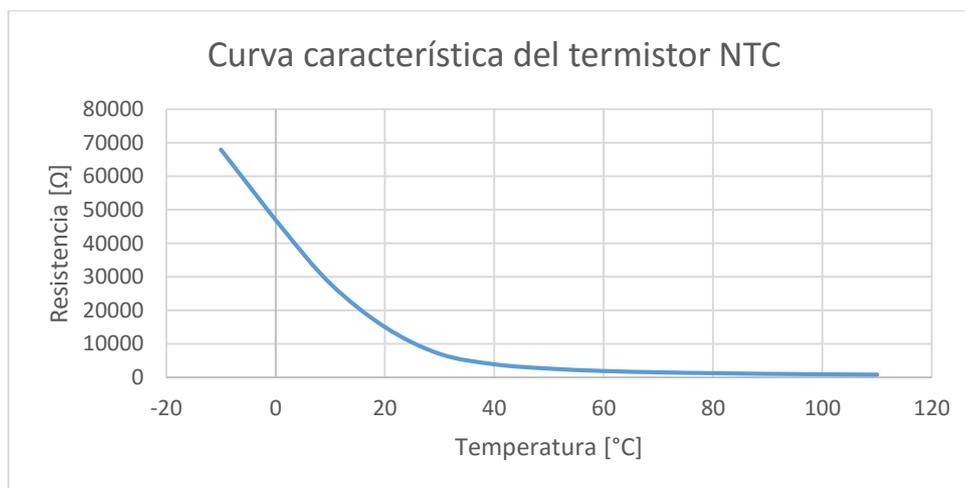


Figura 28 - Gráfica de la ecuación característica del termistor NTC

2.1.4.3 EQUIVALENCIA TEMPERATURA – TENSIÓN

A partir del acondicionamiento planteado para esta señal en el apartado anterior, se realizó una interpretación previa que traduzca en valores de tensión las temperaturas sensadas.

Así, considerando el divisor resistivo formado por la resistencia R10 y el termistor, obtendremos la siguiente ecuación de donde podemos obtener las tensiones correspondientes a cada variación del termistor:

$$V_{NTC} = VDD * \frac{R_{NTC}}{R_{10} + R_{NTC}} \quad (VII)$$

Donde:

- V_{NTC} : Tensión a la salida del divisor
- VDD: Tensión de alimentación = 5V
- R_{NTC} : Valor de resistencia del termistor NTC
- R10: Resistencia del divisor = 2 K Ω

Se consideró una temperatura de funcionamiento del motor mínima de -10°C y máxima de 110°C y se discretizó en variaciones de 10°C. Así, se obtuvo la tabla 8 donde se presenta la equivalencia de temperatura y tensión.

Temperatura [°C]	Resistencia NTC [Ω]	Tensión [V]
-10	68000	4,86
0	45000	4,79
10	28000	4,67
20	15000	4,41
30	7000	3,89
40	3900	3,31
50	2600	2,83
60	1900	2,44
70	1500	2,14
80	1240	1,91
90	1050	1,72
100	910	1,56
110	800	1,43

Tabla 8 - Equivalencia entre temperatura y tensión

2.1.5 SENSOR DE TENSIÓN DE LA BATERÍA

Si bien podría obtenerse un prototipo funcional descartando la medición de la variación de la tensión de la batería, las imprecisiones causadas por la omisión pueden llegar a ser considerables.

El tiempo de apertura de los inyectores de combustible está directamente relacionado con la alimentación a la cual se conecta. Por este motivo, una variación en la alimentación provocará una variación en el tiempo final de inyección de combustible.

Como se mencionó en el apartado de la fuente de alimentación, la tensión de la batería de una motocicleta puede variar entre 12 y 14,3 V. La máxima tensión de entrada a un canal analógico de nuestro microcontrolador es de 5 V. Tomando a consideración estas tensiones, se optó por acondicionar la señal de batería mediante un divisor resistivo por de relación 6:1. La conexión se muestra en la figura 29. En esta puede observarse que el positivo de la batería se conecta a uno de los canales del conversor analógico-digital previo paso por el divisor resistivo. También se colocó un capacitor cerámico de bajo valor a modo de filtro.

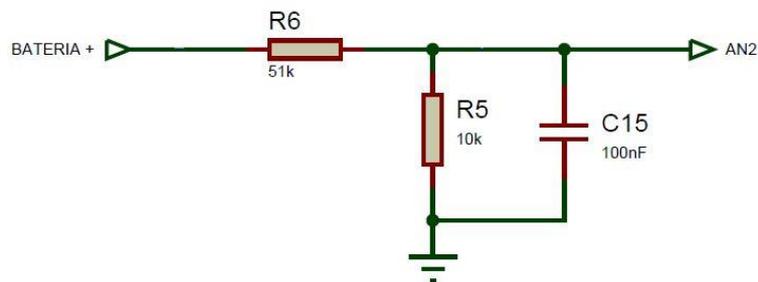


Figura 29 - Acondicionamiento señal tensión batería

2.1.6 SENSOR PRESIÓN EN COLECTOR DE ADMISIÓN

Puede encontrarse en el mercado una gran variedad de sensores MAP de distintas características y marcas. Para la realización de este prototipo, se buscó en el mercado local cualquiera que cumpla con los requerimientos mínimos de presión absoluta a medir, tensión de alimentación y tensión de salida. De entre los que cumplían los requisitos, se eligió el de menor costo. Así, el sensor utilizado fue el MPX4115 de la

marca Motorola. El mismo es alimentado con una tensión de 5 V y su salida proporcional a la presión sensada será de 0,2 a 4,8 V.

2.1.6.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

El acondicionamiento de la señal entregada por este sensor puede verse en la figura 30 y es obtenido directamente de la hoja de datos del fabricante.

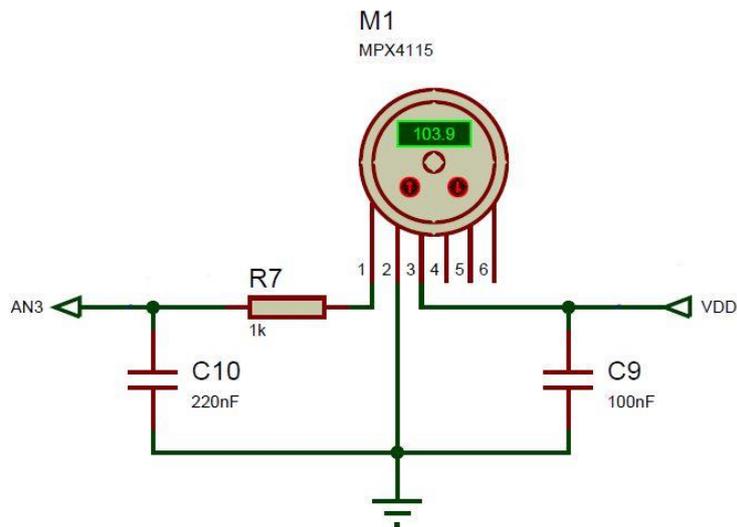


Figura 30 - Acondicionamiento señal de sensor MAP

2.1.6.2 EQUIVALENCIA PRESIÓN – TENSIÓN

De la hoja de datos del fabricante del sensor escogido, pueden extraerse las equivalencias de un valor mínimo y máximo de presión y la tensión entregada en cada caso. Para la realización de este prototipo se escogió una discretización de la presión en 10 niveles. Así, mediante una interpolación lineal se obtiene la tabla 9, en la que se muestran los niveles de presión sensados y la salida en tensión que leerá el microcontrolador.

Presión [Kpa]	Tensión [V]
15	0,2
40	1,35
47	1,67
54	1,99
61	2,32
68	2,64
75	2,96
82	3,28

89	3,60
96	3,93
101	4,16
115	4,8

Tabla 9 - Equivalencia Presión-Tensión. Los valores correspondientes a 15Kpa y 115Kpa son entregados por el fabricante. Los valores intermedios se obtienen mediante interpolación lineal.

2.1.7 SENSOR DE GASES DE ESCAPE

La señal entregada por las sondas lambda comerciales será de una tensión entre 0,8 - 0,9 V para mezclas ricas y 0,1 - 0,2 V para mezclas pobres, siendo el umbral de mezclas equilibradas en los 0,45 V. La señal no es proporcional a la cantidad de oxígeno sensada, por lo cual no es posible conocer cuan rica o pobre es la mezcla.

Utilizando un sensor de buena calidad, el acondicionamiento de la señal para ser ingresada a nuestro microcontrolador, consiste únicamente en un filtro que estabilice y elimine posibles ruidos. El mismo es recomendado por los fabricantes. Esta conexión se muestra en la figura 31.

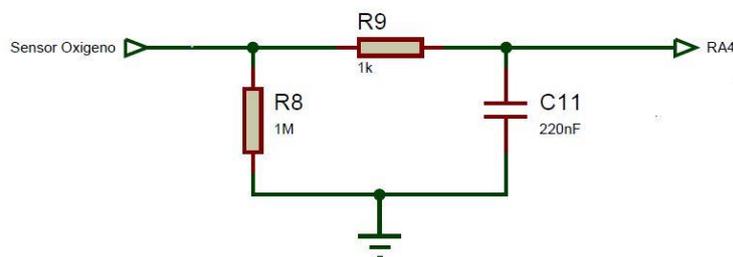


Figura 31 - Acondicionamiento sensor lambda

El sensor lambda requiere de una temperatura elevada para funcionar, por lo cual, los modelos comerciales incluyen una resistencia calefactora que obtendrá su alimentación directamente de la batería del vehículo donde sea instalada. Esta conexión no se muestra en el diagrama circuital de nuestro prototipo ya que es irrelevante a los objetivos de este proyecto.

2.1.8 BOMBA DE COMBUSTIBLE

La bomba de combustible es uno de los tres dispositivos a controlar por nuestro prototipo. Como modelo, se plantea la utilización de una bomba genérica para

automóvil marca Fiat, edición Uno Fire. La misma funciona con una alimentación de 12 V proveniente de la batería y posee un consumo medio de 6 A.

Este dispositivo debe encenderse al iniciar el sistema y apagarse junto con el mismo. Para que el microcontrolador pueda controlar el encendido de la bomba se utilizó un Mosfet IRFZ44N a modo de amplificador de corriente. El mismo es protegido mediante la conexión de un diodo. Por último, al trabajar la bomba directamente con la tensión de batería, fue necesario proteger nuestro microcontrolador mediante un optoacoplador que lo separe de la etapa de potencia. En la figura 32 se muestra el control final del actuador.

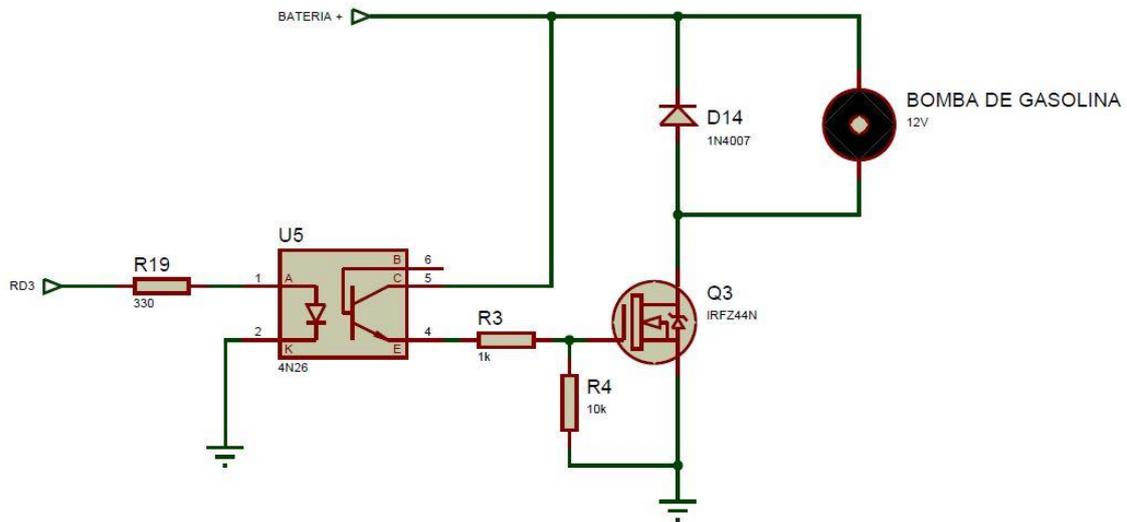


Figura 32 – Etapa de control de la Bomba de Combustible

2.1.9 INYECTOR DE COMBUSTIBLE

Del mismo modo que con la bomba de combustible, se diseñó una etapa de adaptación para poder controlar, mediante la salida TTL de nuestro microcontrolador, un elemento que requiere una corriente mas elevada para funcionar.

El inyector escogido como modelo para la realización de este prototipo, requiere para su funcionamiento una corriente máxima de 0,9 A.

Con este fin, se escogió también un mosfet IRFZ44N, el cual cumple con las características necesarias y es de fácil obtención en el mercado local. En adición, a modo de mejora de la velocidad de respuesta en nuestro control, se incluyeron dos transistores en una etapa previa al mosfet, que generan un encendido y apagado del

mismo mas veloz. Para completar esta etapa, se agregaron los elementos de protección, un diodo en paralelo al inyector para evitar picos de voltaje y corriente y un optoacoplador para separar la etapa de potencia de la de control. En la figura 33 puede observarse la etapa de control del inyector completa.

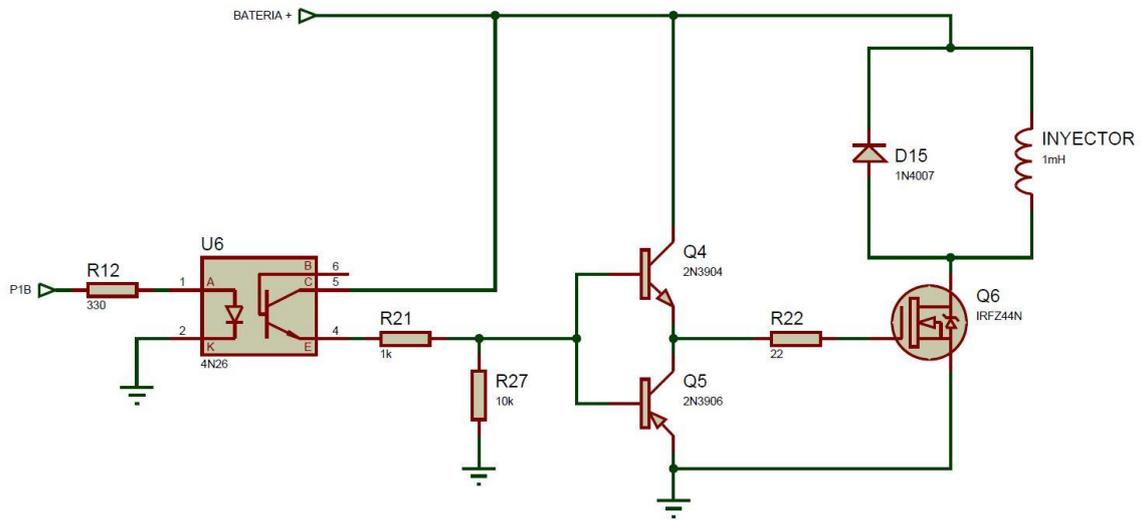


Figura 33 - Etapa de control del inyector

2.1.10 BOBINA DE ENCENDIDO

La bobina de encendido es el tercer elemento a controlar. Al igual que para los anteriores dos, fue necesario diseñar una etapa de adaptación para poder controlar alta potencia mediante la salida TTL de nuestro microcontrolador.

Para generar la chispa en la bujía se utiliza una bobina de encendido, la cual, básicamente es un transformador de relación 100:1. Se carga el primario de ese transformador y al interrumpir la corriente provoca la sobretensión necesaria entre los bornes de la bujía que produce el resultado esperado.

El circuito de adaptación es similar a los anteriores descritos con la salvedad que para este control se escogió un IGBT que soporte las altas tensiones generadas y ampliamente utilizado en automoción, el IRG4BC10U. Esta etapa también es aislada mediante un optoacoplador. El circuito completo de gestión de esta etapa se muestra en la figura 34.

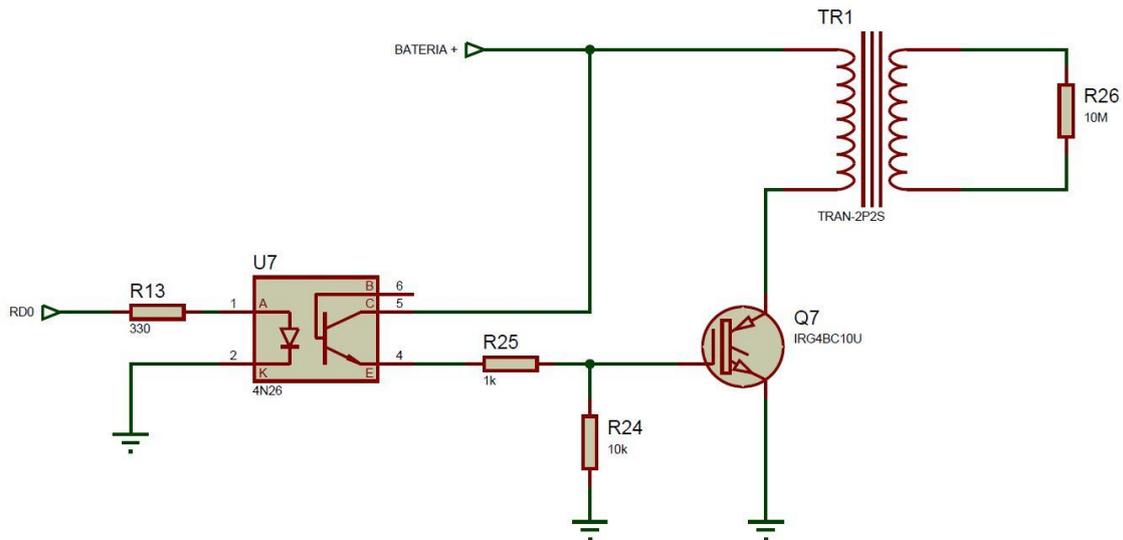


Figura 34 - Etapa de control del encendido

2.1.1.11 LEDS INDICADORES

Por último se integra al sistema tres leds a modo de indicadores visuales. Uno que indique que el sistema está encendido y en funcionamiento. Otro que se encienda en el momento en que la chispa es generada. Un tercero que se mantenga encendido el mismo tiempo que el inyector abierto. Una representación de las conexiones y polarización se presenta en la figura 35.

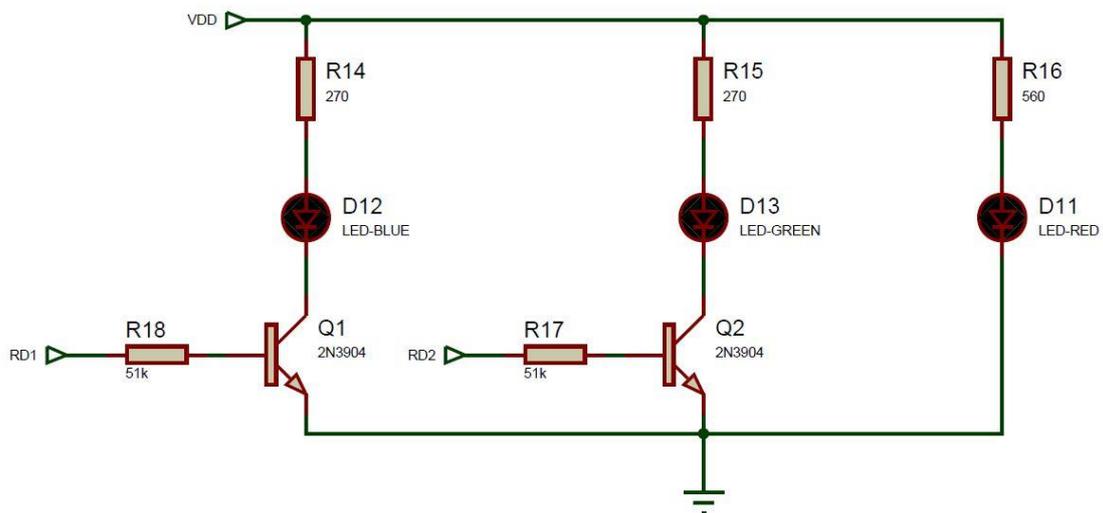


Figura 35 - Conexión de leds indicadores

2.1.12 IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO

Se diseñó mediante el software ARES Proteus de la marca Labcenter una placa que contenga lo detallado en los apartados anteriores. La misma, contiene conectores de entrada directos para las señales de los sensores y de salida para los actuadores.

Cabe destacar dos consideraciones de diseño importantes que se tuvieron en cuenta:

- I. La distancia entre pads y entre pad y track es de 12th debido a que será un dispositivo a utilizar en el exterior. Mediante esta distancia mínima se pretende evitar problemas de condensación producida por humedad y obtener mayor asilamiento entre ellas.
- II. El ancho de las pistas de alimentación es de por lo menos 0,5 mm, ya que el consumo esperado de la placa es de 400 mA.

El tamaño final del diseño es de 100 x 70 mm y fue realizado en un PCB de una sola capa. En caso de producción en grandes cantidades, podría cambiarse el diseño a un PCB de doble capa, lo que reduciría el tamaño y la complejidad del trazado de pistas considerablemente.

En las figuras 36 y 37 se muestran el diseño y la visualización en 3D respectivamente del diseño finalizado.

Al momento de la instalación en la motocicleta, la placa debe estar contenida por una carcasa metálica a modo de aislación de ruido. El ambiente del motor es muy ruidoso y el sistema maneja variables muy sensibles, por lo cual, este punto es muy importante.

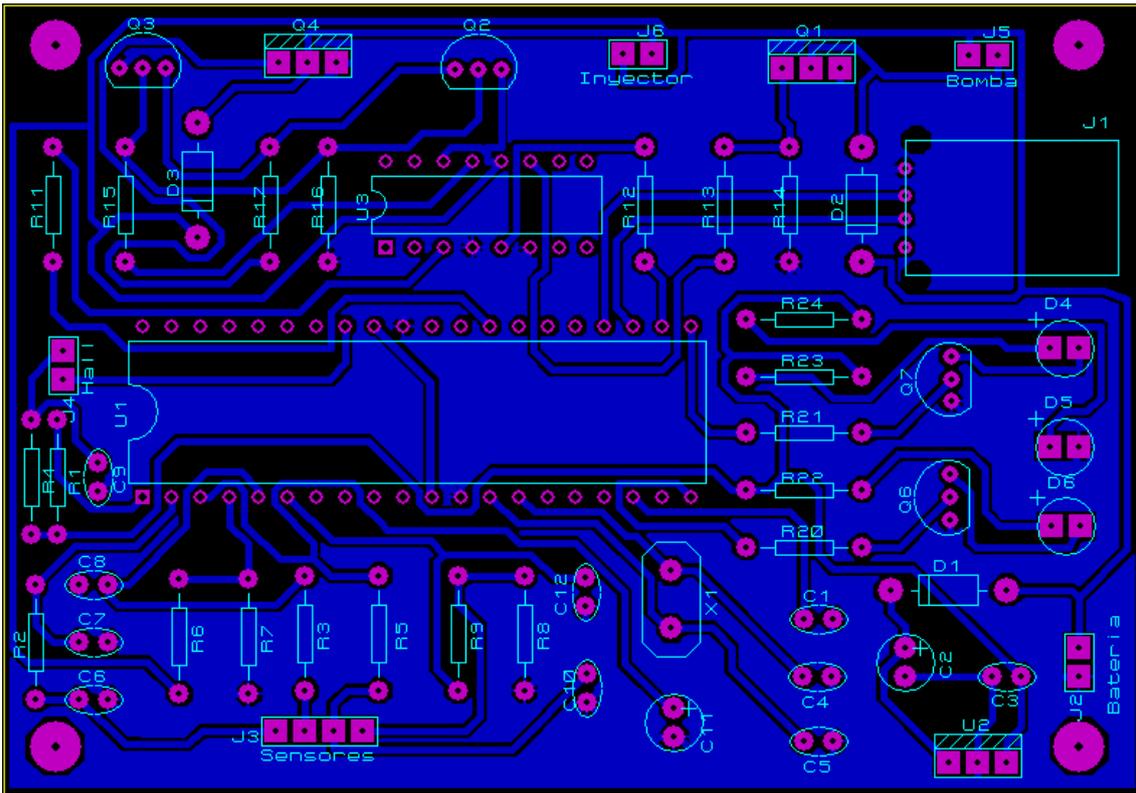


Figura 36 - Diseño en PCB del prototipo

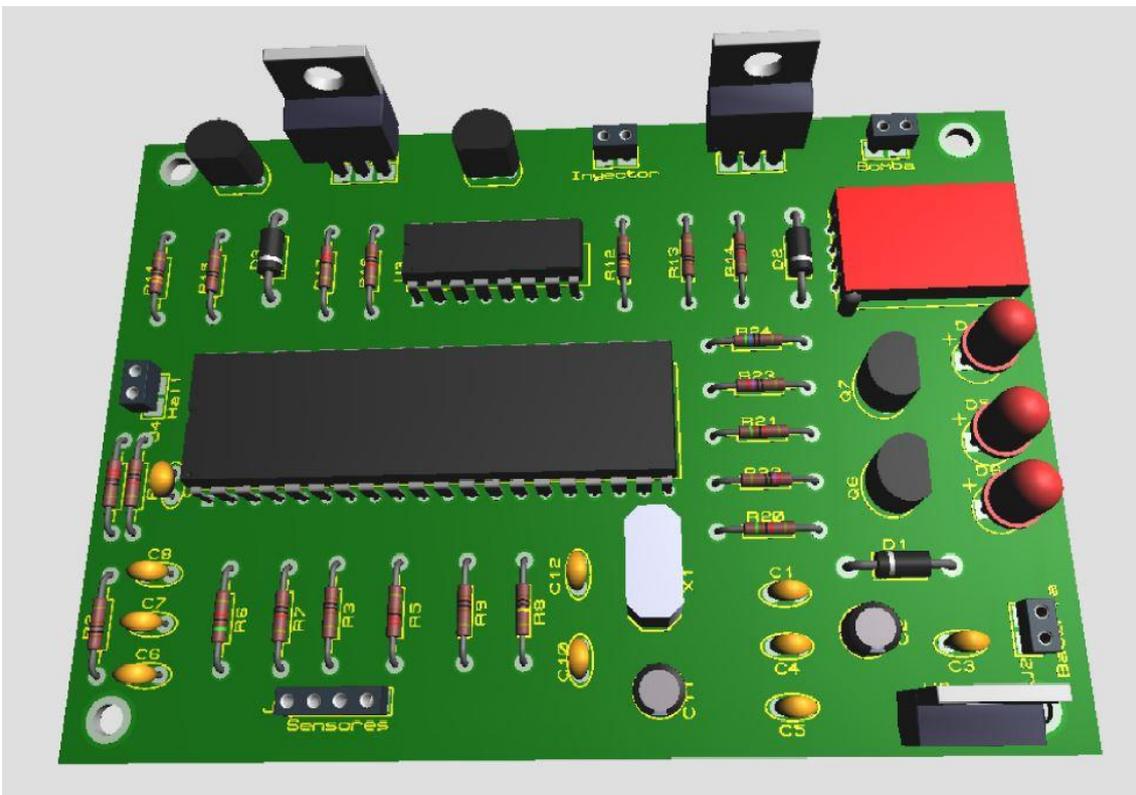


Figura 37 - Representación 3D del diseño en PCB del prototipo

2.2 MAPA DE INYECCIÓN

El mapa de inyección es el punto fundamental del presente proyecto. Consiste en una tabla de doble entrada, por un lado Revoluciones por minuto del motor y por el otro posición del acelerador, de la cual se obtiene el tiempo que el inyector deberá permanecer abierto en cada ciclo.

Esta tabla es única para cada motor y depende directamente de las características mecánicas del mismo. Se calculan teóricamente los tiempos bases correspondientes y luego la ECU se encargará de corregir este tiempo según las condiciones sensadas durante el funcionamiento. El sistema de inyección debe tenerla precargada en la memoria de su microcontrolador y utilizarla a modo de tabla de consulta.

En los apartados siguientes se detalla el proceso mediante el cual se arribó al mapa de inyección correspondiente a la motocicleta escogida para la aplicación de este sistema.

2.2.1 OBTENCIÓN DE LA RELACIÓN ESTEQUIOMETRICA

La relación estequiométrica consiste en contribuir con la cantidad de aire y combustible adecuada. Para esto, es necesario comprender matemáticamente el comportamiento de ambos elementos y la forma de medirlos y manipularlos.

Partiendo de la premisa de que el aire tiene un comportamiento que se considera ideal, podemos calcular la masa utilizada mediante la Ley de los Gases ideales que se muestra a continuación:

$$P * V = n * R * T \quad (VIII)$$

Donde:

- P: presión [atm]
- V: volumen [l]
- n: número de moles [mol]
- R: constante universal de los gases ideales [atm*l/°K*mol]
- T: temperatura [°K]

Además, el número de moles puede expresarse como la relación entre la masa y la masa molar:

$$n = \frac{m_{aire}}{mm_{aire}} \quad (IX)$$

Si reemplazamos en la ecuación VIII el número de moles con su equivalente de la ecuación IX, obtenemos una manera de calcular la masa de aire:

$$m_{aire} = mm_{aire} * \frac{P * V}{R * T} \quad (X)$$

Por último, incluimos los valores constantes en la ecuación X.

- Masa molar del aire: 28,97 [g/mol]
- Constante universal de los gases: 0,08205746 [l*atm/°K*mol]

Se arriba a la siguiente expresión para la masa de aire dependiente de la presión, volumen y temperatura:

$$m_{aire} = 353,04 * \frac{P * V}{T} [gr] \quad (XI)$$

A partir de la expresión obtenida y de la relación estequiométrica buscada, podemos obtener una expresión para la masa de gasolina necesaria.

Según lo expresado en el capítulo 1, la relación entre la masa de aire y de combustible debe ser, teóricamente, 14,7. Es decir, cada 14,7 gr de aire, se precisa 1 gr de gasolina. Podemos así escribir la siguiente ecuación:

$$m_{aire} = 14,7 * m_{gasolina} \quad (XII)$$

Igualando las ecuaciones XII y XI y despejando la masa de la gasolina:

$$m_{gasolina} = 24,016 * \frac{P * V}{T} [gr] \quad (XIII)$$

2.2.2 EQUIVALENCIA ENTRE MASA DE GASOLINA Y TIEMPO

Para entregar la cantidad de gasolina calculada mediante la ecuación XIII, debemos mantener abierto el inyector por determinada cantidad de tiempo. La variable que nos relaciona masa y tiempo es el caudal, que se define de la siguiente manera:

$$Q_{inyector} = \frac{m_{gasolina}}{t} [gr/s] \quad (XIV)$$

Donde:

- $Q_{inyector}$: caudal del inyector seleccionado que depende directamente de las características de fabricación.
- t : tiempo
- $m_{gasolina}$: masa de gasolina

Reemplazando la masa de gasolina por su equivalente presentado en la ecuación XIII y despejando el tiempo, obtenemos el tiempo necesario expresado en función de la presión, volumen, temperatura y caudal del inyector:

$$t_{inyección} = \frac{24,016 * P * V}{Q_{inyector} * T} \text{ [s]} \quad (XV)$$

Sin embargo, la expresión obtenida en la ecuación XV es teórica. En la práctica, la apertura del inyector tiene asociado un retardo inherente a su condición electromagnética y depende directamente de la tensión de alimentación a la que esté conectada. Es decir, al tiempo obtenido en la ecuación XV, se debe sumar un retardo variable que dependerá de la tensión de batería. El resultado sería el siguiente:

$$t_{inyección} = t_{apertura}(V_{bat}) + \frac{24,016 * P * V}{Q_{inyector} * T} \text{ [s]} \quad (XVI)$$

Se arribó así, a la ecuación de la duración un pulso de inyección en condiciones ideales dependiente de la presión en el colector de admisión, el volumen, la temperatura y el caudal del inyector.

Por último, la fórmula obtenida será modificada según las correcciones que puedan hacerse mediante los sensores conectados. Se obtiene así un factor de corrección constante C que estará compuesto de la siguiente manera:

$$C = C_{lambda} * C_{presión} * C_{EV} * C_{temperatura} * C_{AFR} \quad (XVII)$$

Donde:

- C_{lambda} : Factor de corrección por sensor lambda
- $C_{presión}$: Factor de corrección por sensor de presión
- C_{EV} : Factor de corrección por eficiencia volumétrica del motor

- $C_{\text{temperatura}}$: Factor de corrección por temperatura del motor
- C_{AFR} : Factor de corrección por relación aire-combustible necesaria.

Finalmente, se determina la ecuación que incluye todas las variables en estudio:

$$t_{\text{inyección}} = t_{\text{apertura}}(V_{\text{bat}}) + \frac{24,016 * P * V}{Q_{\text{inyector}} * T} * C \quad [\text{s}] \quad (\text{XVIII})$$

2.2.3 CÁLCULO DEL TIEMPO BASE DE INYECCIÓN

Denominamos tiempo base de inyección al tiempo que, en condiciones ideales, deberá permanecer abierto el inyector. A partir de este se gesta el mapa de inyección, escalonando este valor según las necesidades del motor y las correcciones a realizar.

Las condiciones ideales planteadas para el cálculo de este tiempo son las siguientes:

- El retardo de apertura del inyector es despreciable
- La presión barométrica igual a 1 atm, es decir, a nivel del mar.
- Temperatura ambiente de 20°C, equivalente a 293°K
- El cilindro es llenado completamente, es decir que la eficiencia volumétrica es del 100%
- La presión en el colector de admisión es de 1 atm

Bajo estas condiciones, obtenemos un tiempo base dependiente únicamente de la cilindrada del motor y del caudal del inyector. Ambos datos, están estrictamente relacionados con las especificaciones técnicas del motor a utilizar, las cuales se muestran en la tabla 10 y son entregadas directamente por el fabricante.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
MOTOR	Monocilíndrico horizontal de 4 tiempos
CILINDRADA	70 cc
DIAMETRO X CARRERA	47mm x 41,4mm
POTENCIA	4,8 HP / 8000 RPM
REFRIGERACIÓN	Por aire
ENCENDIDO	Electrónico por CDI
ARRANQUE	Eléctrico y a patada
TRANSMISIÓN	Caja de cambios de 4 marchas Variador automático de velocidad
BATERÍA	12 V / 5 Amp./H

Tabla 10 - Especificaciones técnicas Motomel Eco 70.

2.2.3.1 VOLUMEN DEL CILINDRO

Es importante aclarar que si bien, para la realización de este prototipo se escogió el modelo de motocicleta especificado anteriormente, el proyecto se considera válido para motores de menor cilindrada y de mayor hasta 125 cc. Para motores mas grandes, deberían considerarse mas variables con el fin de conseguir una performance aceptable.

Es así, que el volumen que se utilizara es 70 cc.

2.2.3.2 CAUDAL DEL INYECTOR

El caudal del inyector necesario, está, como se aclaró anteriormente, directamente relacionado con el motor en el que funcionará. La relación está dada por la siguiente fórmula:

$$Q_{inyector} = \frac{BSFC * HP}{Duty Cycle * n^{\circ}_{inyectores}} \quad [lb/hr] \quad (XIX)$$

Donde:

- BSFC: Brake Specific Fuel Consumption. Medida de eficiencia del motor en consumo de combustible. En este motor, por ser naturalmente aspirado, se asume un valor de 0,5.
- Duty Cycle: Ciclo de trabajo del inyector. Para evitar averías por desgaste prematuro, se utilizará un valor de 0,75.

Reemplazando estos valores y las características del motor, se obtiene:

$$Q_{inyector} = \frac{0,5 * 4,8}{0,75 * 1} = 3,2 \left[\frac{lb}{h} \right] = 0,4 \quad [gr/seg] \quad (XX)$$

2.2.3.3 VALOR TIEMPO BASE

Reemplazando entonces en la ecuación XVI los valores obtenidos y los supuestos, arribamos al valor del tiempo base para nuestro prototipo:

$$t_{base} = 0 + \frac{24,016 * 1 * 0,07 * 1}{0,4 * 293} = 0,0143 \quad [s] = 14,34 \quad [ms] \quad (XXI)$$

2.2.4 CÁLCULO DEL MAPA DE INYECCIÓN

El cálculo del mapa de inyección parte de la ecuación XVIII bajo dos consideraciones:

- I. En lugar de la presión en el colector, se utiliza el valor del sensor TPS (posición de la mariposa de aceleración) ya que la variación de la presión, está directamente relacionada con apertura de la mariposa.
- II. De las correcciones, se tiene en cuenta en principio, para la generación del mapa, la eficiencia volumétrica, que, como se aclaró previamente, su valor varía de acuerdo a las revoluciones por minuto del motor. El resto de las correcciones se harán posteriormente durante el funcionamiento del motor.

Así, obtenemos una ecuación de tiempo de inyección dependiente de la posición del acelerador y de las revoluciones por minuto:

$$t_{inyección} = t_{base} * P(TPS) * EV(RPM) \quad (XXII)$$

Donde:

- t_{base} : tiempo base calculado en el apartado anterior
- $P(TPS)$: presión en función de la posición del acelerador
- $EV(RPM)$: eficiencia volumétrica dependiente de las revoluciones por minuto

2.2.4.1 EQUIVALENCIA PRESIÓN EN COLECTOR Y TPS

Para obtener la equivalencia entre presión y posición de acelerador, se consideran los casos extremos conocidos medidos experimentalmente y se interpretan los valores intermedios mediante una interpolación lineal. Así, se obtiene la tabla 11 donde se discretizó en 10 niveles el paso de la presión desde su mínimo posible hasta igualar la presión atmosférica y sus equivalentes posiciones de la mariposa de aceleración.

TPS [°]	Presión [%]
0	20
3	26
14	35
32	50
42	59
51	67
61	75

71	83
80	92
90	100

Tabla 11 - Equivalencia entre Posición del acelerador y presión en el colector de admisión

2.2.4.2 EFICIENCIA VOLUMÉTRICA

La eficiencia volumétrica se calcula según la siguiente fórmula dependiente de los parámetros físicos del motor y el ambiente:

$$EV = \frac{\text{Potencia} * 792001,6}{AP * CR * CID * RPM} \quad (XXIII)$$

Donde:

- Potencia: valor que se obtiene de la curva de potencia del motor expresado en HP
- 7920001,6: Constante
- AP: presión atmosférica a nivel del mar expresada en psi, que equivale a 14,7
- CR: relación de compresión del cilindro. Para nuestro motor el valor es 9,7
- CID: cilindrada del motor expresada en pulgadas cúbicas. En nuestro prototipo 4.27

Para completar el cálculo entonces, nos falta determinar la curva de potencia del motor de prueba. Para motores de grandes cilindradas, las curvas de potencia son de fácil acceso y el fabricante las pone a disposición del comprador. Sin embargo, para los motores objetivos de este proyecto, la curva es de mayor dificultad de acceso ya que, por el momento, no es de gran utilidad en el mercado. De todos modos, la curva puede ser obtenida mediante un ensayo práctico de taller.

La curva de potencia de nuestro motor ECO 70 puede observarse en la figura 38.

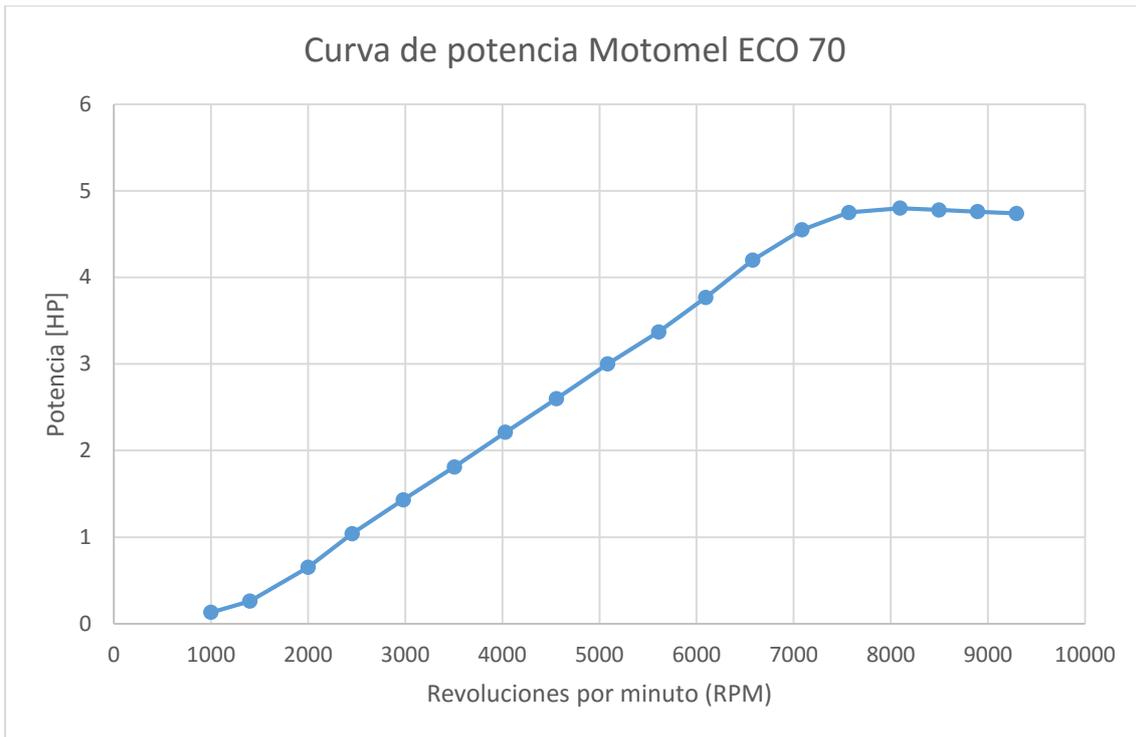


Figura 38 - Curva de potencia de Motor equipado en Motomel ECO 70

Y los valores puntuales se muestran en la tabla 12.

RPM	Potencia [HP]
1000	0,13
1400	0,26
2000	0,65
2454	1,04
2980	1,43
3506	1,81
4032	2,21
4558	2,6
5084	3
5610	3,37
6095	3,77
6579	4,2
7084	4,55
7568	4,75
8095	4,8
8495	4,78
8895	4,76
9295	4,74

Tabla 12 - Potencia en función de RPM para motor de Motomel ECO 70

A partir de estos datos y reemplazando en la ecuación XXIII, obtenemos los valores de eficiencia volumétrica según las revoluciones a las cuales gira el motor. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 13.

RPM	E.V.
1000	0,169
1400	0,242
2000	0,423
2454	0,551
2980	0,624
3506	0,672
4032	0,713
4558	0,742
5084	0,768
5610	0,781
6095	0,805
6579	0,830
7084	0,835
7568	0,816
8095	0,771
8495	0,732
8895	0,696
9295	0,663

Tabla 13 - Eficiencia volumétrica en función de las RPM

La curva que se obtiene a partir de la tabla 13 se muestra en la figura 39.

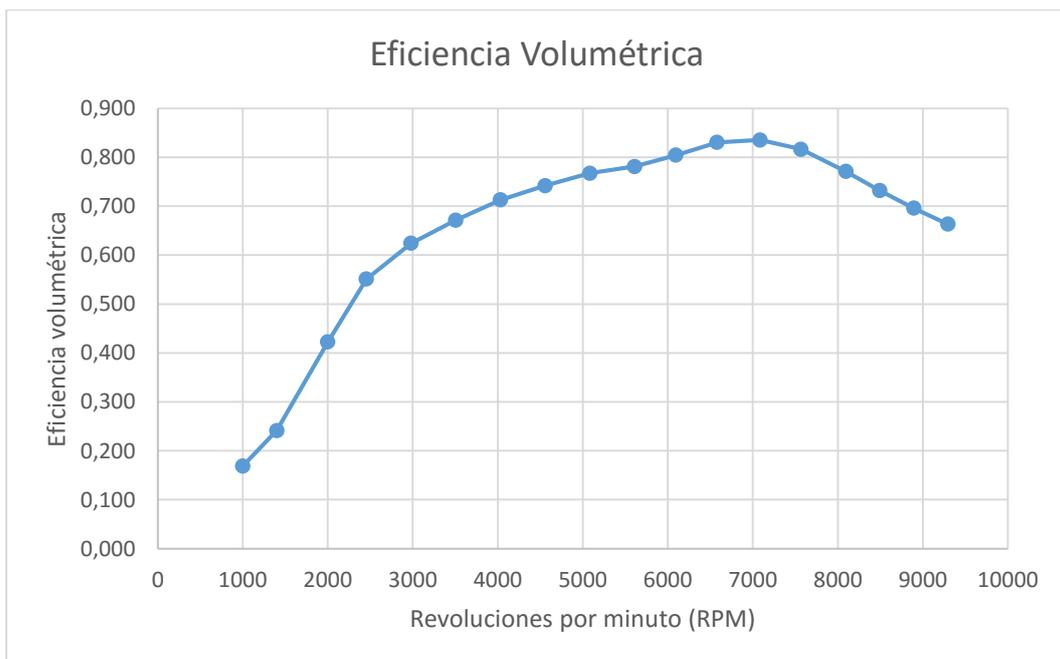


Figura 39 - Curva de eficiencia volumétrica en función de RPM para Motomel ECO 70

A fin de simplificar la discretización del prototipo aquí diseñado, se optó por reducir la cantidad de niveles obtenidos en la tabla antes generada. Los valores escogidos se muestran en la tabla 14.

RPM	E.V.
1000	0,169
2000	0,423
2980	0,624
4032	0,713
5084	0,768
6095	0,805
7084	0,835
8095	0,771
9295	0,663

Tabla 14 - Valores escogidos de la tabla 13 para reducir discretización de la variable

2.2.4.3 TIEMPOS DE INYECCIÓN

Finalmente, aplicando la ecuación XXII con los valores obtenidos en los apartados anteriores, obtenemos los tiempos iniciales de inyección en función de las revoluciones por minuto del motor y de la posición del acelerador. Estos tiempos, expresados en microsegundos, se muestran en la tabla 15, la cual es denominada Mapa de inyección.

Si bien los valores obtenidos, resultaran en un correcto funcionamiento del sistema, los mismos fueron obtenidos teóricamente a partir de pruebas prácticas y valores provistos por el fabricante. A partir de las pruebas físicas del motor en funcionamiento, este mapa puede ser modificado para una mejor performance.

		POSICIÓN DEL ACCELERADOR									
		0	3	14	32	42	51	61	71	80	90
RPM	1000	484	630	848	1211	1429	1622	1816	2010	2228	2422
	2000	1211	1574	2119	3027	3572	4056	4540	5025	5570	6054
	3000	1788	2324	3129	4469	5274	5989	6704	7419	8224	8939
	4000	2042	2655	3573	5105	6024	6841	7657	8474	9393	10210
	5000	2198	2858	3847	5496	6485	7364	8244	9123	10112	10992
	6000	2304	2996	4033	5761	6798	7720	8641	9563	10600	11522
	7000	2393	3111	4187	5982	7059	8016	8973	9930	11007	11964
	8000	2209	2872	3866	5523	6517	7400	8284	9168	10162	11045
	9000	1900	2470	3325	4750	5604	6364	7124	7884	8739	9499

Tabla 15 - Mapa de inyección inicial

Normalmente, los mapas de inyección se muestran, para una rápida lectura, en un gráfico de tres dimensiones. Esta representación puede verse en la figura 40.

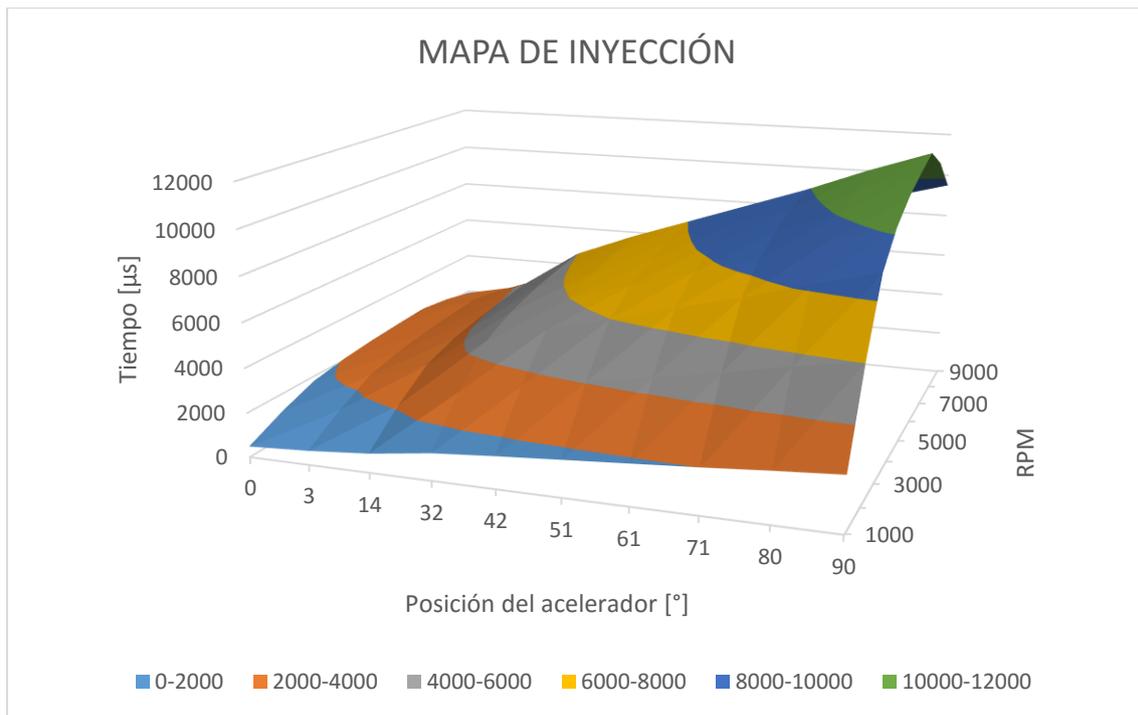


Figura 40 - Representación gráfica del mapa de inyección

2.3 TABLAS DE CORRECCIÓN

Si bien solo con el mapa de inyección, podemos obtener un sistema funcional, se puede incrementar la performance del sistema de forma sustancial al incluir correcciones de esos tiempos mediante el sensado de ciertas variables y consideraciones de etapa de funcionamiento. A continuación se muestran las correcciones utilizadas en el diseño del presente prototipo.

2.3.1 CORRECCIÓN POR ARRANQUE

Una salvedad importante que puede hacerse en los sistemas de inyección, es la confección de una base de tiempos de inyección para la fase de arranque del motor. Un motor está en fase de arranque cuando gira a menos de 1000 revoluciones por minuto. Las rpm de arranque de los motores objetivo de este proyecto suelen ser entre 700 y 800.

En esta fase, los tiempos dependen en mayor medida de la temperatura del motor. Pudiendo aplicarse, según la temperatura del motor, un porcentaje del tiempo base de inyección. Teóricamente, para una temperatura de -40°C , se utilizará un 80% del tiempo

base de inyección, y por sobre los 70°C, un 20%. Con estos valores extremos y aplicando una interpolación lineal, se obtuvo la tabla 16, que muestra valores de tiempos según temperatura para la fase de arranque.

Temperatura [°C]	Pulso de inyección [us]
-40	12602
-27	11558
-14	10515
-1	9472
12	8429
25	7386
38	6343
51	5300
64	4256
76	3294

Tabla 16 - Tabla de tiempos de inyección para fase de arranque

2.3.2 CORRECCIÓN POR TEMPERATURA

El funcionamiento óptimo de los motores de combustión interna se produce cuando su temperatura es del orden de los 80°C ± 5°C. Su temperatura aumenta por el calor desprendido en la combustión y disminuye según el sistema de refrigerado que utilice.

A temperaturas bajas, la gasolina que ingresa en la cámara de combustión, no se vaporiza totalmente, se condensa y se adhiere a las paredes del cilindro. Esto genera una insuficiencia en la cantidad necesaria para la combustión produciendo el mismo efecto de una mezcla pobre y deteniendo el motor. Para contrarrestar este efecto, debe inyectarse mayor cantidad de gasolina de la necesaria, aumentando la relación aire-combustible.

A medida que la temperatura se eleva y se acerca a la de funcionamiento óptimo, el incremento de la relación aire-combustible debe ser cada vez menor.

Para la confección de esta tabla de corrección, se utilizaron los valores extremos de corrección y temperatura según los sistemas de inyección comerciales y, mediante interpolación lineal, se obtuvieron los valores intermedios deseados. En promedio, los valores utilizados por las ECU comerciales son:

- Para una temperatura de -40°C, el valor del tiempo de inyección se incrementa en un 160%.

- Para una temperatura de 76°C, el valor del tiempo de inyección se utiliza sin corrección.

A partir de esto se obtiene la tabla 17 donde se presentan los valores corrección.

Temperatura [°C]	Corrección [%]	Multiplicador
-40	160	1,6
-27	150	1,5
-14	150	1,5
-1	140	1,4
12	130	1,3
25	130	1,3
38	120	1,2
51	110	1,1
64	110	1,1
76	100	1

Tabla 17 - Tabla de corrección por temperatura

2.3.3 CORRECCIÓN POR PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La corrección por presión atmosférica se vuelve necesaria debido a la disminución de oxígeno en el aire en relación a la altura geográfica. Esto, es producto de la variación de la densidad del aire como consecuencia de la variación de presión atmosférica.

Simplificando, la variación de presión atmosférica varía la cantidad de masa de aire necesaria para cumplir con la relación estequiométrica.

Debido a que los tiempos de inyección son calculados a partir de la presión a nivel del mar, es que se vuelve útil la generación de una corrección según esta variable. Así, se aumenta la versatilidad del sistema, pudiendo usarse en distintos tipos de terrenos geográficos indistintamente.

La tabla de corrección por presión atmosférica se confeccionó de igual manera que la de corrección por temperatura. A partir de valores de corrección para presiones extremas, mediante interpolación lineal, se obtuvieron los valores intermedios deseados. Los valores extremos de corrección utilizados por ECU comerciales son:

- Para una presión de 40 kPa, el tiempo de inyección será el 40% del tiempo base.
- Para una presión de 101 kPa, no habrá corrección.

El resultado se puede ver en la tabla 18.

Presión [Kpa]	Corrección [%]	Multiplicador
40	40	0,4
47	50	0,5
54	50	0,5
61	60	0,6
68	70	0,7
75	70	0,7
82	80	0,8
89	90	0,9
96	100	1,0
101	100	1,0

Tabla 18 - Tabla de corrección por presión atmosférica

2.3.4 CORRECCIÓN POR TENSION DE LA BATERÍA

Como se aclaró en el apartado del cálculo del tiempo de inyección, el inyector agrega un tiempo de apertura que no puede ser despreciado. Este tiempo variará en función de la alimentación a la cual esté conectado, es decir, en función de la tensión de la batería. La forma en la que varía depende de las características de fabricación y se conoce a través de la hoja de datos del inyector adquirido. Para el inyector utilizado en esta práctica, los tiempos de apertura según la tensión de la batería se muestran en la tabla 19.

Tensión [V]	Tiempo [μ s]
8	1875
10	1125
12	1000
14	875
16	750

Tabla 19 - Tabla de corrección por tensión de batería

2.4 MAPA DE AVANCE DE ENCENDIDO

Existe un retardo implícito desde el momento en que se produce la chispa en la bujía hasta la llegada del frente de llama al pistón. Este retardo es variable, ya que, a medida que aumentan las revoluciones por minuto del motor, el pistón se moverá con mayor velocidad pero el frente de llama no varía.

A fin de hacer coincidir el frente de llama con el momento en el que el pistón se encuentra en el punto muerto superior (PMS), se debe adelantar el momento en que se genera la chispa.

El adelanto debe hacerse con sumo cuidado. Si se avanza demasiado, se corre el riesgo de iniciar la combustión antes de que el pistón pase el punto muerto superior, produciendo un giro en sentido contrario con sus correspondientes consecuencias negativas.

La confección del mapa de avance es mas simple y completamente independiente del control de inyección de combustible. Se deben tener dos consideraciones importantes:

- I. Para este tipo de motores, el avance no supera los 20° a 10.000 revoluciones por minuto
- II. El tiempo entre momentos de chispa no debe ser menor al tiempo necesario para cargar el primario de la bobina de encendido. Menor tiempo significa una chispa mala o ausencia de la misma lo que no produciría la combustión. Demasiado tiempo implica una sobre carga del bobinado produciendo desgaste prematuro y roturas indeseadas.

Según el fabricante Motomel, el motor utilizado en este proyecto alcanza el máximo avance necesario a las 3500 rpm. Debido a la baja discretización en revoluciones por minuto utilizadas en este prototipo, el mapa de avance tendrá tan solo tres niveles. En la tabla 20 se presentan los avances correspondientes.

RPM	AVANCE [°]
1000	8
2000	10
3000	15

Tabla 20 - Mapa de avance de encendido

2.5 DESARROLLO DEL FIRMWARE

Se presenta a continuación el desarrollo del software de control que si introduce en el microcontrolador.

Para su realización se utilizó el compilador CCS compiler junto con su IDE de programación. Fue escrito en lenguaje C con una estructura RTOS (Real Time Operating System). Esto significa que, en lugar de realizar un gran programa que contenga todo, se estructuró en tareas individuales, gestionando los tiempos de uso del procesador para cada tarea. Este tipo de estructuración genera una sensación de simultaneidad, sin embargo, las tareas se ejecutan secuencialmente por orden de prioridad.

La premisa de programación fue crear un firmware que genere una respuesta en tiempo real. Por lo cual, se evitó la realización de cuentas por parte del microcontrolador realizándolas previamente en una hoja de cálculos e ingresando los valores al PIC como constantes y tablas de consulta.

La adquisición de datos mediante el conversor analógico-digital se realizó haciendo uso de su recurso de interrupción al finalizar la lectura. De este modo, se optimizan los tiempos considerablemente.

Es importante aclarar también que, debido a que los mapas de inyección dependen de las características físicas de cada motor, se implementó en el microcontrolador un bootloader, que facilita la actualización del programa mediante la conexión USB, sin necesidad de volver a utilizar un programador externo. Así, luego de instalar el sistema en un motor, puede corregirse el mapa o actualizarse según la motocicleta en la cual esté instalado mediante el uso de cualquier PC con conexión USB.

2.5.1 CONFIGURACIÓN DEL MICROCONTROLADOR

La primer parte del programa corresponde a las directivas de configuración. Esto corresponde a:

- I. Llamada a librería del PIC18F4550
- II. Configuración de cantidad de bits a utilizar por el conversor analógico-digital: 8
- III. Inclusión de FUSES de configuración
- IV. Configuración de frecuencia de trabajo: 20 Mhz
- V. Directivas de optimización
- VI. Configuración USB
- VII. Declaración de constantes y variables

En la etapa VII de declaración de constantes y variables, se carga, entre otros, el mapa de inyección y las tablas de corrección pre calculadas realizando algunas modificaciones necesarias para una optimización en la programación.

Los valores del mapa de inyección no se ingresan directamente igual a los calculados, sino que se reemplazan por su equivalente múltiplo de 50 μ s. Esto se debe a que para contabilizar el tiempo de inyección, se utiliza la interrupción por desborde del timer1, el cual está configurado en ese tiempo.

Las tablas de corrección de temperatura y presión, se pre multiplicaron para obtener una sola tabla de doble entrada. Así, se ahorra una multiplicación innecesaria a realizar por el microcontrolador, generando una mejora en la performance.

Además, con el fin de evitar el uso de variables de punto flotante, todas las tablas fueron normalizadas a números enteros.

2.5.2 INICIALIZACIÓN

Durante la inicialización del microcontrolador, se configuran y habilitan los recursos a utilizar y se deshabilitan los no utilizados a modo de ahorro de consumo.

- I. Configuración de puertos B y D como entradas y salidas según corresponda
- II. Configuración del conversor analógico-digital
 - a. Configuración de canales analógicos
 - b. Configuración de reloj de conversión
- III. Habilitación de interrupciones: externas, ADC, timer1, conversor A/D, globales
- IV. Configuración de timers
 - a. Configuración de timer1: Reloj interno y preescaler 2. Incrementa cada 0,4 μ s y genera una interrupción cada 50 μ s.
 - b. Configuración timer3: Reloj interno y preescaler 8. Inicializa en 0.
- V. Tiempo de espera para asegurar una correcta lectura de los sensores inicial

En la figura 41 se presenta un diagrama en bloques del proceso de inicialización.

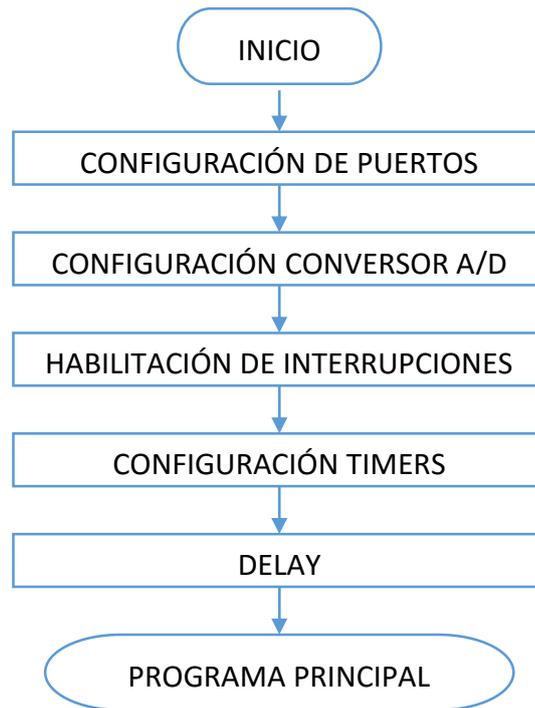


Figura 41 - Diagrama de flujo de inicialización del firmware

2.5.3 PROGRAMA PRINCIPAL

El programa principal será el encargado de, encender la bomba de combustible, inicializar la comunicación USB, interpretar los valores adquiridos mediante el convertor analógico digital, determinar el tiempo de inyección necesario y enviar los datos vía USB.

Entradas: valor timer3 (tmr3); lecturas canales analógicos (lecturasSensores[]).

Salidas: tiempo de inyección (tiempo_inyección); valores de las variables sensadas (datos[]);

En la figura 42 se puede observar un diagrama en bloques del funcionamiento del programa principal descrito en los siguientes pasos:

- 1) Se llama a la función inicialización
- 2) Se enciende la bomba de combustible
- 3) Se inicializa la comunicación USB
- 4) Se determinan las RPM según el valor del timer3 almacenado

- 5) Se interpretan los valores leídos de los canales analógicos: Temperatura, TPS, tensión batería, presión, sonda lambda. Y se almacena el valor correspondiente.
- 6) Se determina el tiempo de inyección según:
 - a. Si las RPM son menores a 1000: el tiempo de inyección se obtiene de la tabla de corrección por arranque.
 - b. Si las RPM son mayores o iguales a 1000:
 - i. Si la mariposa de aceleración está cerrada:
 - Si $RPM > 2000$: El usuario quiere desacelerar. Corte de inyección.
 - Si $RPM < 2000$: La moto se encuentra en regulación. El tiempo de inyección es el correspondiente al estado de Ralentí.
 - ii. Si la mariposa de aceleración está abierta:
 1. Cargo en la variable tiempo_inyección el valor correspondiente al mapa de inyección.
 2. Corrijo el tiempo del mapa base según presión y temperatura multiplicando por el factor correspondiente.
 3. Corrijo el tiempo anterior sumándole el tiempo de apertura del inyector según la tensión de la batería.
 4. Corrijo según tipo de mezcla: Rica/Pobre.
- 7) Si está conectado el USB, envió los datos.

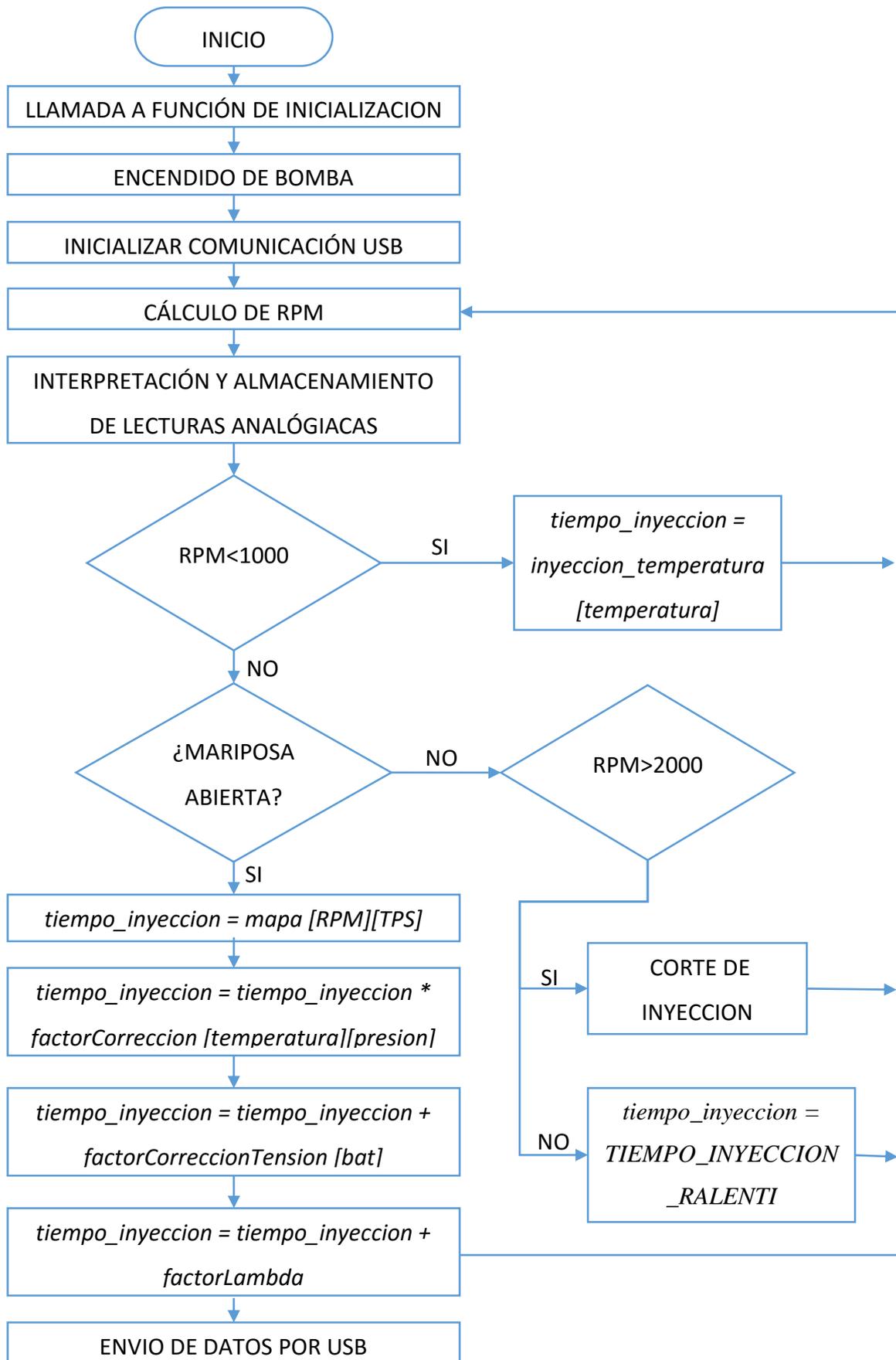


Figura 42 - Diagrama de flujo de programa principal del firmware

2.5.4 INTERRUPCIONES

El firmware programado hace uso de las siguientes fuentes de interrupción:

- Interrupción por conversión A/D
- Interrupción por desborde de timer1
- Interrupción externa generada por flanco ascendente en pin RB0
- Interrupción externa generada por flanco ascendente en pin RB1

2.5.4.1 INTERRUPCIÓN POR CONVERSIÓN A/D

Durante esta interrupción, se lee la entrada del sensor analógico y se traduce a un valor digital. El valor obtenido será interpretado luego en el programa principal.

La lectura de los distintos sensores se realiza de forma secuencial, siendo el proceso, el mismo para cada uno. Para poder realizar esto, a cada canal se le asignó un índice de 0 a 4. De este modo, manipulando el valor del índice, seleccionamos el canal que se desea leer.

Entradas: Externa Sensor temperatura; externa sensor presión; externa tensión de la batería; externa sensor lambda.

Salidas: lecturasSensores []

A continuación se detallan los pasos realizados, pudiéndose ver, también, representado en la figura 43 a modo de diagrama en bloques.

- 1) Lectura y conversión del canal analógico seteado
- 2) Incrementa el índice de canal en 1
- 3) Si se leyeron todos los canales, inicializa el índice de canal a 0
- 4) Setea el canal indicado por el índice para la próxima lectura
- 5) Delay necesario para el seteo

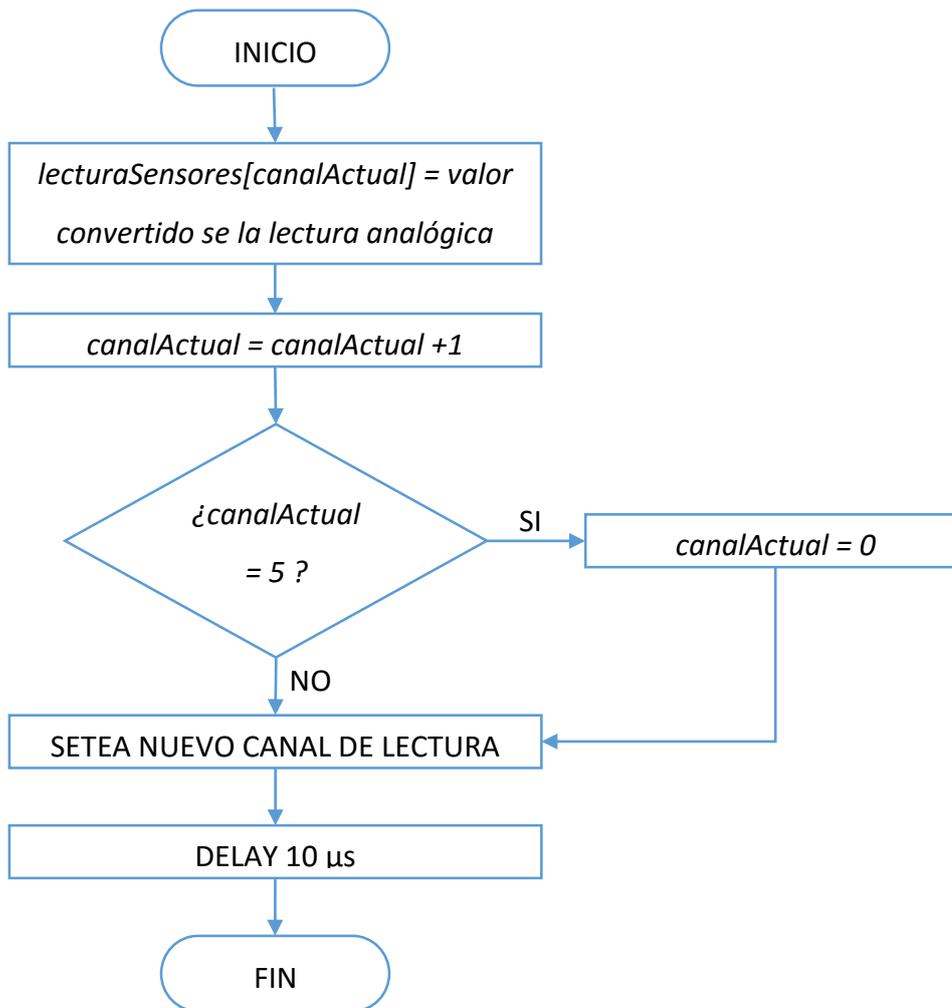


Figura 43 - Diagrama en bloques de la interrupción por conversión A/D del firmware

2.5.4.2 INTERRUPCIÓN POR TIMER1

En la interrupción por timer1 se realiza la apertura y cierre del inyector. Así también como el control de los leds indicadores. Fue configurada para producirse cada 50 μ s. Esto quiere decir que el pulso mínimo de inyección será de ese tiempo.

El conjunto de instrucciones responden a la lógica mostrada en el diagrama en bloques de la figura 44 descripto a continuación:

Entradas: bandera de habilitación de inyección (habilita_iny); tiempo de inyección total (tiempo_inyeccion)

Salidas: Externa

- 1) Se resetea el Timer1 al valor inicial

- 2) Se verifica si la inyección está habilitada, es decir, si estamos en la etapa de admisión y si el tiempo de inyección aún no se cumplió.
- a. Caso afirmativo: Se enciende el inyector, se enciende el led indicador de inyección y se incrementa el contador de pulsos de inyección en 1.
 - b. Caso negativo: Se apaga el inyector y se apaga el led indicador de inyección.

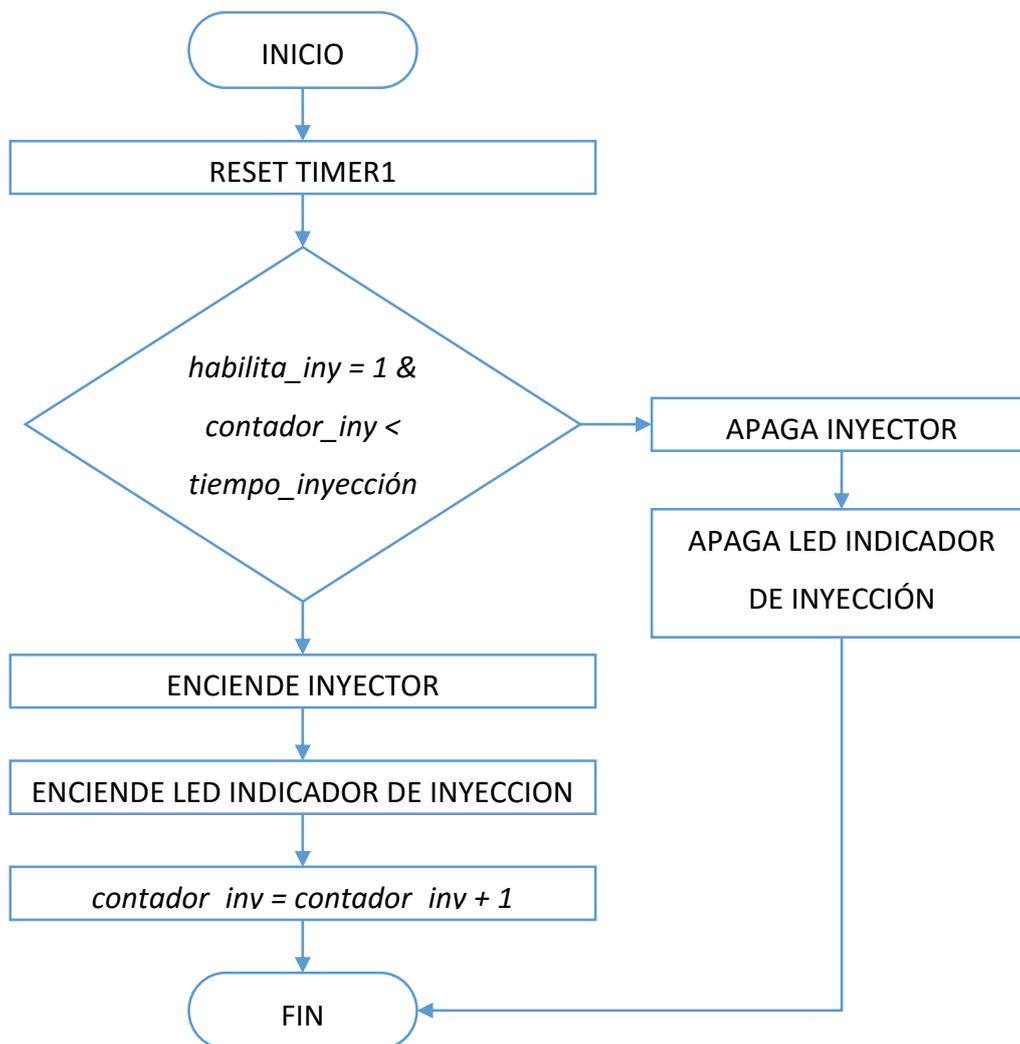


Figura 44 - Diagrama en bloques de la interrupción por timer1 del firmware

2.5.4.3 INTERRUPCIÓN EXTERNA

La interrupción externa se genera por la presencia de un flanco ascendente en el pin RB0 del microcontrolador. Este flanco proviene de la señal entregada por el sensor de efecto hall.

Cumple dos funciones cuyos diagramas se presentan en las figuras 45 y 46. La primera, como herramienta para el cálculo de las RPM a las que gira el motor. La segunda, determinar el ciclo en el que se encuentra el motor, habilitando o no la inyección de combustible. El desarrollo de las instrucciones sería el siguiente:

- 1) Almacenar valor de timer3
- 2) Resetear a 0 el timer3
- 3) Comprobar si en el pulso anterior hubo inyección
 - a. Si la hubo: deshabilito la inyección
 - b. Si no la hubo: Reseteo el contador de inyección y habilito la inyección

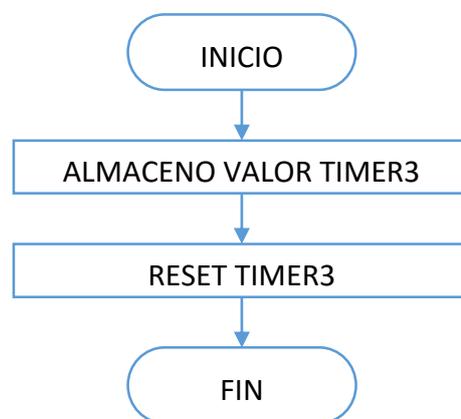


Figura 45 - Diagrama en bloques de la interrupción externa del firmware.

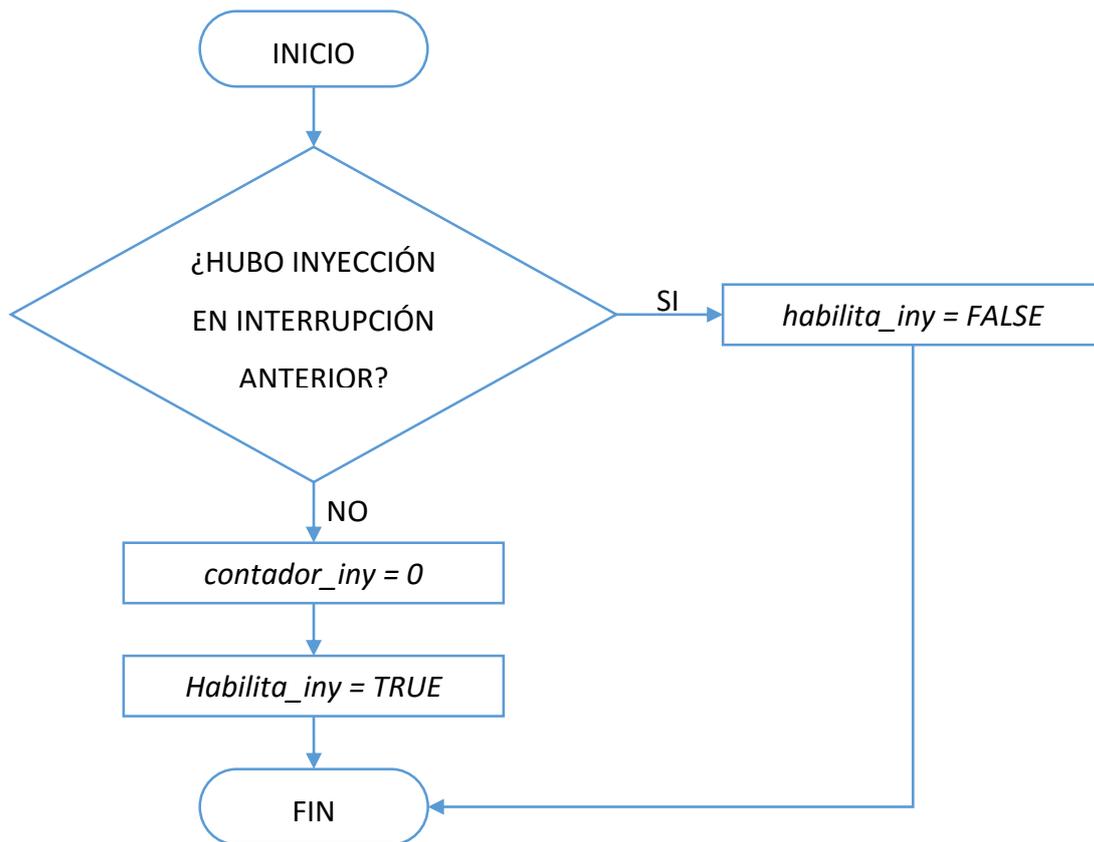


Figura 46 - Diagrama en bloques de la interrupción externa del firmware.

2.5.4.4 INTERRUPCIÓN EXTERNA 2

La segunda interrupción externa es utilizada para manejar la carga de la bobina de encendido y la chispa en la bujía. El flanco ascendente que la activa proviene de un sensor de efecto hall que indica el momento de máximo avance antes del ciclo de expansión.

En la figura 47 se muestra el proceso de decisión para carga de bobina que responde a las siguientes instrucciones:

- 1) Comprueba valor de RPM:
 - a. Si es igual o mayor a 1000:
 - i. Delay correspondiente a avance 8°
 - ii. Pasos correspondientes al caso c.
 - b. Si es igual a 2000:
 - i. Delay correspondiente a avance 10°
 - ii. Pasos correspondientes al caso c.
 - c. Si no es ninguno de los casos anteriores:

- i. Activa carga de bobina
- ii. Delay correspondiente al tiempo de carga necesario de la bobina
- iii. Apaga carga de la bobina generando la chispa

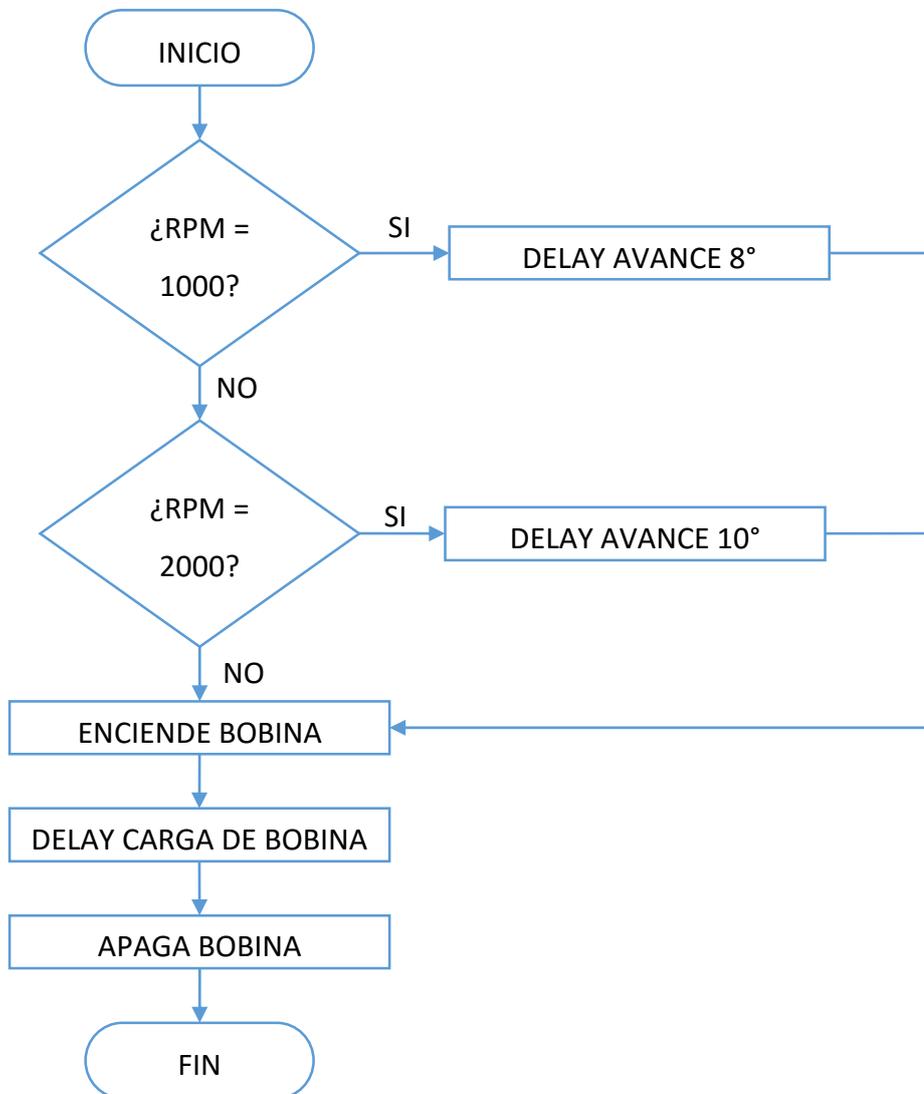


Figura 47 - Diagrama de flujo interrupción externa 2 del firmware

2.6 INTERFAZ CON LA PC

Se utilizó el recurso integrado USB que incorpora el microcontrolador de microchip 18F4550 para lograr una comunicación entre la ECU diseñada y un ordenador personal.

La interfaz fue realizada mediante el software LabView de la empresa National Instruments. Este, nos permite la utilización de bloques de función pre-programados

que facilitan la utilización de ciertos recursos. En el caso de esta interfaz, se utilizó un módulo que sintetiza la comunicación USB.

Su objetivo es disponer de una herramienta visual y accesible de diagnóstico del sistema de inyección. Mediante el mismo, se tiene acceso en tiempo real a las variables que están siendo sensadas, al estado de los actuadores y se muestra el mapa de inyección que está siendo utilizado junto con su representación en 3D.

En las figuras 48 y 49 se muestra una vista previa de las pantallas que contienen los valores de los sensores.

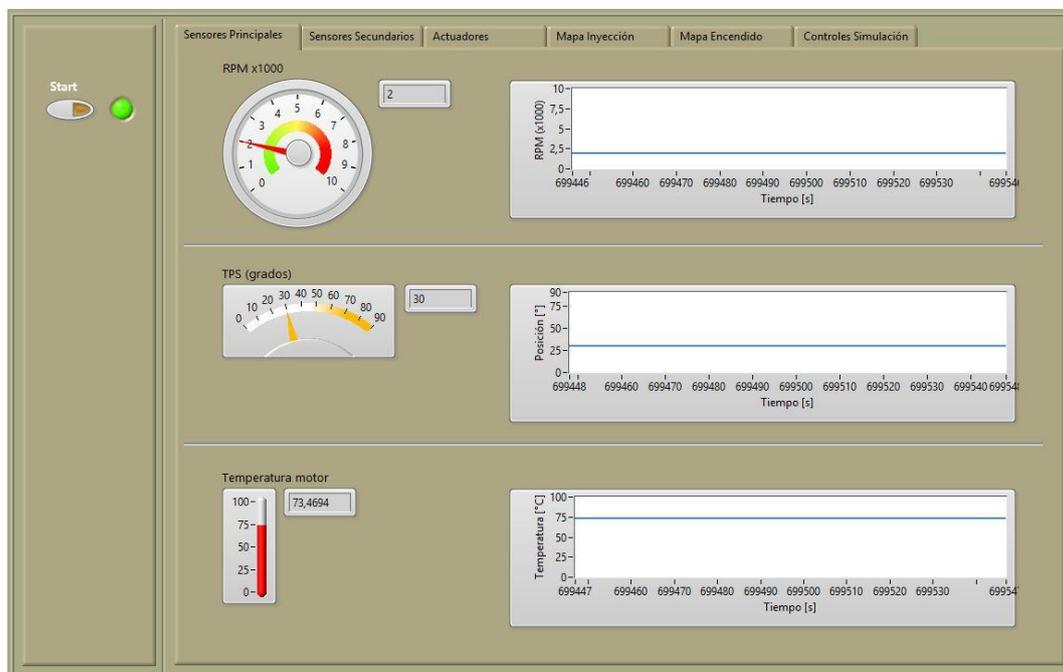


Figura 48 - Vista previa de las pantallas de sensores en interfaz

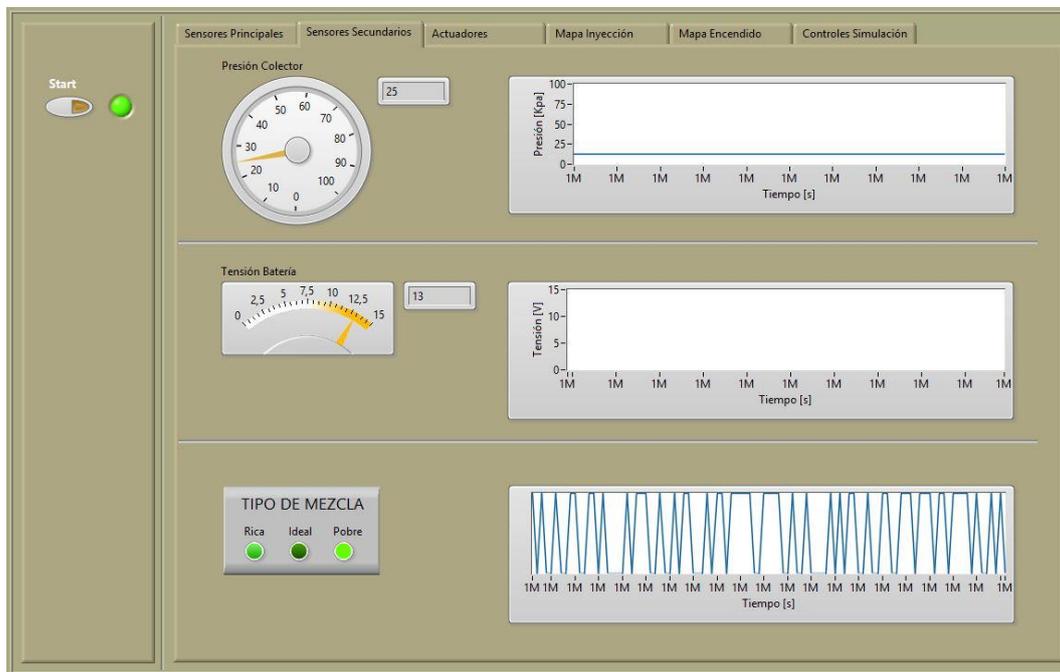


Figura 49 - Vista previa de las pantallas de sensores en interfaz.

La forma en que la interfaz muestra el estado de los actuadores se presenta en la figura 50.

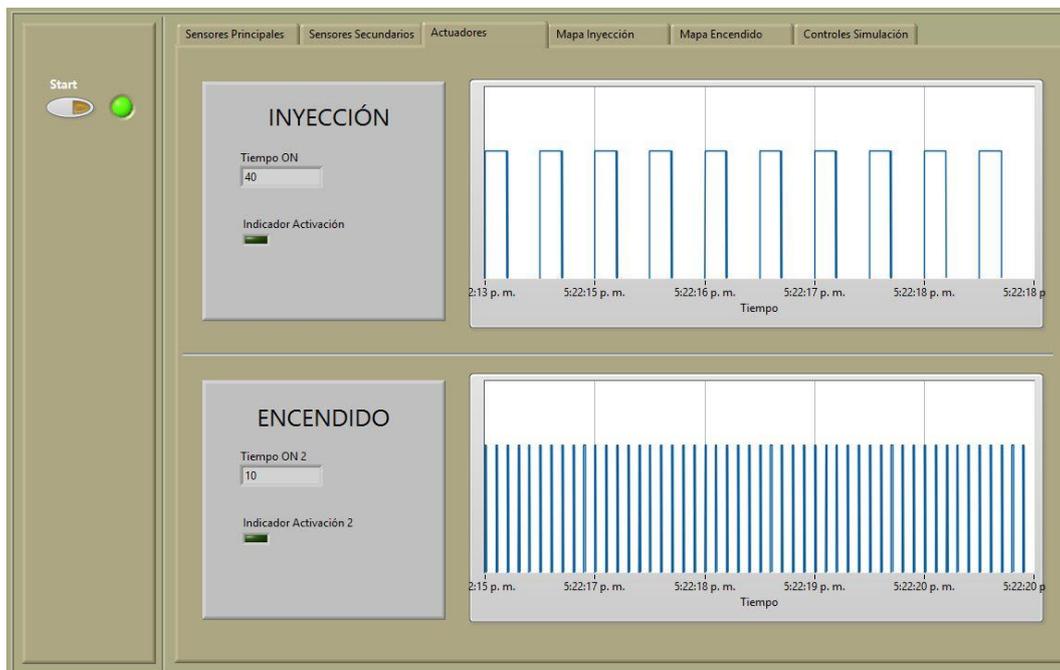


Figura 50 - Vista previa de la pantalla de actuadores de la interfaz USB.

Por último, se aprecia en la figura 51 el modo en que se facilita el mapa de inyección y su representación en un gráfico de 3 ejes el cual puede ser orientado y manipulado para mejor determinación de los datos.

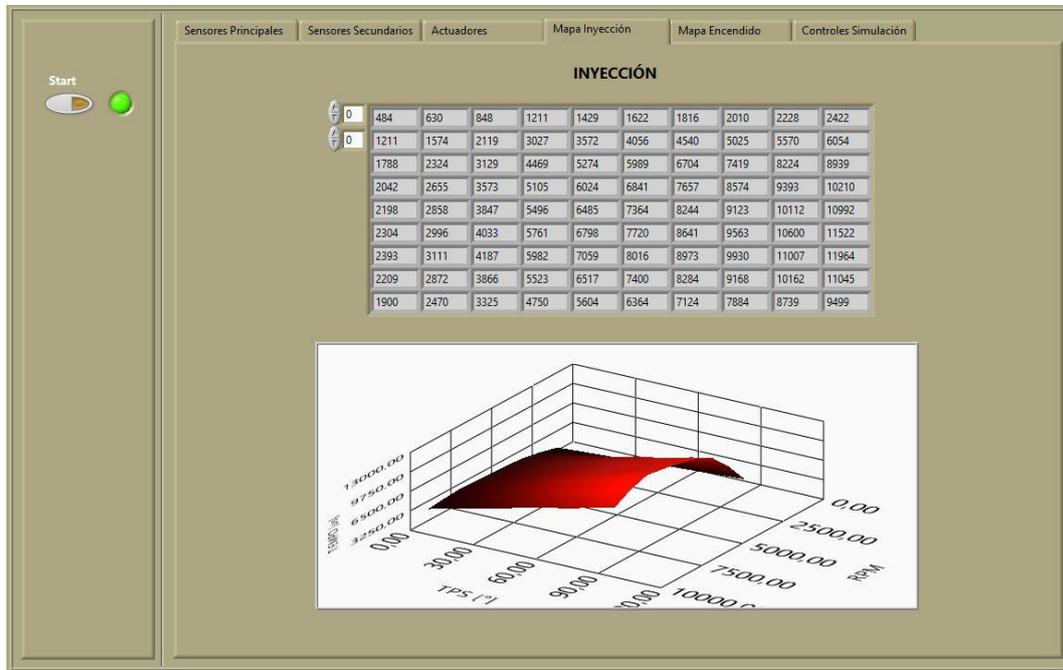


Figura 51 - Vista previa de la pantalla del mapa de inyección de la interfaz USB

Capítulo 3

3 SIMULACIONES Y RESULTADOS

El prototipo de ECU diseñado fue testeado en dos etapas. En la primera mediante simulaciones en PC con el programa ISIS Proteus de Labcenter y en la segunda, ya con el prototipo constituido prácticamente, mediante el uso de un osciloscopio para medir las señales reales obtenidas y ya no en condiciones ideales como en la primer etapa. En ambas se repitieron las mismas pruebas.

Se testearon distintos estados de los sensores y condiciones de manejo y se comprobó que los actuadores se comporten según lo diseñado.

Consideraciones para la interpretación de los resultados:

- 1) Las curvas presentadas en la pantalla del osciloscopio corresponden a:
 - a. Curva superior - Verde: Señal del sensor de efecto hall. Cada flanco ascendente representa el inicio de una vuelta de motor.
 - b. Curva media – Amarilla: Señal del inyector. El tiempo que permanezca en alto corresponde al tiempo de apertura del inyector.
 - c. Curva inferior – Rosa: Señal de encendido.
- 2) Los parámetros de ajuste del osciloscopio se muestran en la tabla 21.

	Canal A (Medio)	Canal B (Superior)	Canal C (Inferior)
V/Div	5.00 V	5.00 V	5.00 V
Offset	14.00 V	32.00 V	-1.00 V
Invert	Normal	Normal	Normal
Coupling	AC	AC	AC
	Horizontal		Trigger
Fuente	Trace	Fuente	Canal A
S/Div	10.00 ms	Modo	Auto

Tabla 21 - Parámetros de configuración de osciloscopio para realización de pruebas

A continuación se muestran algunos ejemplos de los test realizados con sus resultados.

3.1 CASO 1: ARRANQUE EN FRÍO

Con revoluciones menores a 1000 por minuto, la inyección debe regirse solo por la temperatura según la tabla 17. Solo para este ejemplo, por las bajas revoluciones a las que se realiza la prueba, se cambió la base de tiempo a 10 ms.

Condiciones:

- TPS: Sensado = 4 V – Real = 71°
- Temperatura: Sensado = 3,6 V – Real = 38 a 56 °C
- Tensión batería: Sensado = 3V – Real = 14 a 16 V
- Presión: Sensado = 1,2 V – Real = 40 kPa
- Gases: Sensado = Nivel alto
- RPM: 780

Respuesta:

- Tiempo de mapa de inyección: 6350 μ s (de la tabla de pre-arranque)
- Corrección por Temperatura y presión: 1
- Corrección por tensión de batería: 0 μ s
- Tiempo inyección total: 6350 μ s



Figura 52 - Medición con osciloscopio caso 1

3.2 CASO 2: MOTOR ACELERADO

A altas revoluciones, la velocidad de respuesta del sistema debe ser mayor. Por este motivo es importante testear y corroborar esta condición particular.

Condiciones:

- TPS: Sensado = 2,1 V – Real = 32°
- Temperatura: Sensado = 2,9 V – Real = 64 a 76 °C
- Tensión batería: Sensado = 2,3V – Real = 12 a 14 V
- Presión: Sensado = 4,4 V – Real = 101 kPa
- Gases: Sensado = Nivel alto
- RPM: 5000

Respuesta:

- Tiempo de mapa de inyección: 5500 μ s
- Corrección por Temperatura y presión: 1,1
- Corrección por tensión de batería: 1000 μ s

- Tiempo inyección: 7050 μs

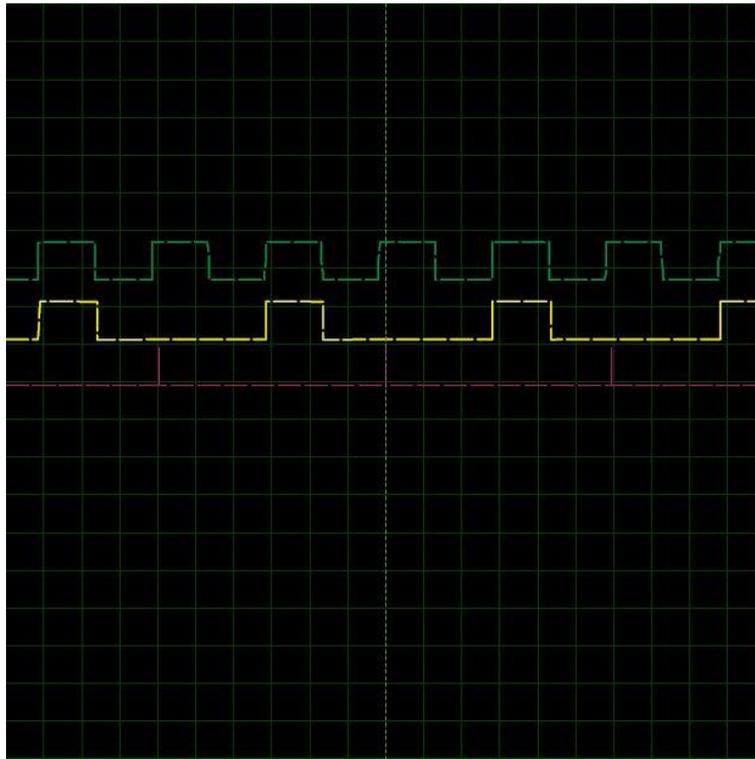


Figura 53 - Medición con osciloscopio ejemplo 2

3.3 CASO 3: VELOCIDAD CRUCERO

Este caso será en el que mayor tiempo circule la motocicleta. A bajas revoluciones y velocidad constante. El motor ya alcanzó su temperatura de funcionamiento óptima.

Condiciones:

- TPS: Sensado = 2,1 V – Real = 32°
- Temperatura: Sensado = 2,6 V – Real = 76 °C
- Tensión batería: Sensado = 2,3V – Real = 12 a 14 V
- Presión: Sensado = 4,4 V – Real = 101 kPa
- Gases: Sensado = Nivel bajo
- RPM: 2000

Respuesta:

- Tiempo de mapa de inyección: 4500 μs
- Corrección por Temperatura y presión: 1
- Corrección por tensión de batería: 1000 μs

- Tiempo inyección: 5500 μ s

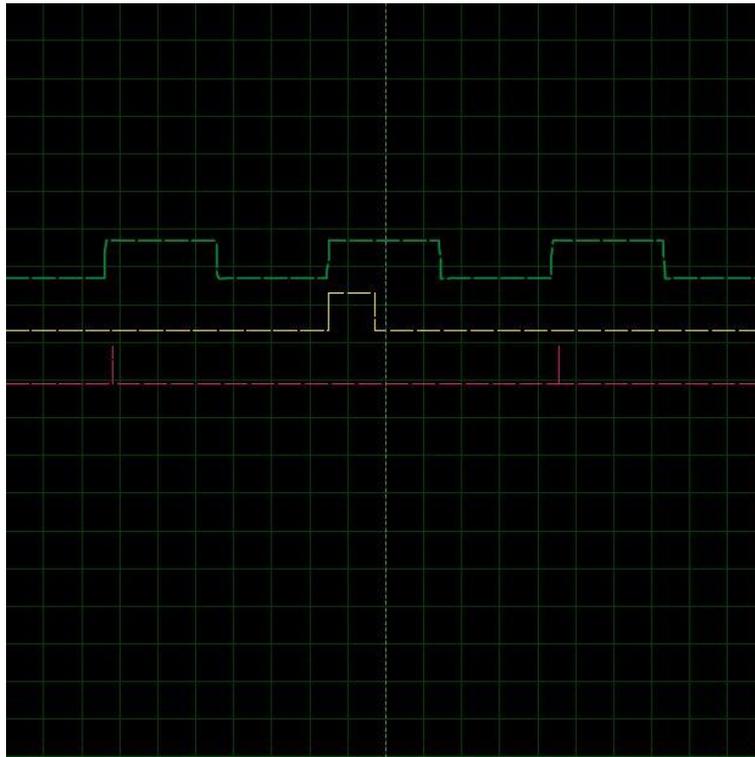


Figura 54 - Medición con osciloscopio ejemplo 3

3.4 RESULTADOS

Si bien durante la etapa de pruebas se testeó el sistema exhaustivamente bajo todas las condiciones de funcionamiento, por razones lógicas, se presentaron aquí solo tres casos representativos.

Las pruebas se realizaron de manera estática, es decir, iniciando el sistema con distintos valores; y de manera dinámica, variando las lecturas de los sensores durante el funcionamiento.

En las mediciones presentadas se puede comprobar que el sistema se comporta según lo esperado. Responde de manera efectiva a los cambios en la posición de acelerador y revoluciones, seleccionando el valor pre calculado correspondiente del mapa de inyección base. Así también como a la variación de los sensores, corrigiendo de manera efectiva el tiempo anterior.

Se puede observar también que el momento de chispa coincide con el inicio de la vuelta de motor siguiente a la de inyección, es decir, en el ciclo de expansión.

Por último, si bien hay pruebas que no pudieron ser realizadas por falta de instrumental u otras complicaciones, como ser la emisión de gases o el consumo real de circulación en calle, puede, a partir de los datos obtenidos, realizarse una aproximación teórica del ahorro de combustible logrado.

La motocicleta escogida como modelo, equipada originalmente con carburador, tiene un consumo teórico de 2,2 lt cada 100 km a un promedio de 40 Km/h.

Bajo estas condiciones, podemos calcular el consumo teórico de nuestro sistema teniendo en cuenta lo siguiente:

$$\text{litros consumidos} = \frac{x * rpm * 60 * t_{iny} * Q}{v * 2 * \delta} \quad (XXIV)$$

Donde:

- X: distancia recorrida = 100 Km
- Rpm: revoluciones por minuto del motor = 2500
- t_{iny} : tiempo del pulso de inyección = 0,0055 s
- v: velocidad = 40 Km/h
- δ : densidad de la gasolina = 680 gr/l

Reemplazando los valores específicos, obtenemos un consumo de aproximadamente 0,6 litros.

A continuación se desarrolla una deducción de la formula XXIV.

- I. En velocidad crucero, a 40 Km/h, el motor girará aproximadamente a 2500 rpm.
- II. A esa velocidad, 100 Km serán recorridos en 2,5 horas.
- III. En 2,5 horas a 2500 rpm, el motor dará 375000 vueltas, de las cuales inyectará solo en la mitad, 187500.
- IV. Según nuestros cálculos, a velocidad crucero, cada pulso de inyección dura 5500 μ s.
- V. El tiempo total de inyección en las 2,5 horas de funcionamiento será entonces de 1031,25 segundos.

- VI. Sabiendo que el caudal del inyector utilizado es 0,4 gr/s, en ese tiempo de inyección, sabemos que se consumió un total de 412,5 gr de combustible.
- VII. Utilizando el dato teórico de la densidad de combustible, 680 gr/l, traducimos la masa calculada a 0,6 litros aproximadamente.

Deducimos así una reducción del 70 % en el consumo teórico, el cual, si traemos a consideración las variaciones de velocidad al conducir, la carga transportada, las diferencias de niveles en el terreno, la variación de temperatura, etc., se puede deducir que el consumo aumentara en poco mas del 10%, pudiendo entonces obtener, en las mejores condiciones, ahorros de hasta el 55%.

Capítulo 4

4 PLAN DE NEGOCIOS

Siendo una de las motivaciones principales de la realización del presente proyecto, cubrir una ausencia de este tipo de productos en el mercado local, fue necesario realizar un breve pero efectivo plan de negocios que avale la factibilidad de la conversión de este prototipo en un producto comercializable.

El siguiente plan fue presentado ante el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Nación con el fin de resultar beneficiado con una inversión inicial de estímulo para emprendedores.

4.1 RESUMEN EJECUTIVO

Teniendo en cuenta la creciente tendencia en la modificación de las legislaciones en materia de contaminación, junto con una mayor concientización por parte de la sociedad y el continuo aumento en el precio del combustible, surge, en las industrias automovilísticas y de motocicletas, la búsqueda de una gestión de inyección y encendido que permita fabricar motores más limpios y eficientes. Así, la electrónica se presenta como la solución idónea para reemplazar el antiguo control mecánico que se viene utilizando, disminuyendo las emisiones contaminantes y maximizando el rendimiento.

El bajo costo de las motocicletas de baja cilindrada, en conjunto con el gran impulso gubernamental que la industria recibió en estos últimos tiempos, ha incrementado considerablemente el número de las mismas que circulan por las calles. En su mayoría, tienen como sistema de alimentación de combustible un carburador, lo que hace de suma necesidad una actualización del sistema de dosificación a uno electrónico.

El producto final fue planteado para ser introducido a un mercado en constante crecimiento y totalmente inexplorado. El grupo de trabajo dispone de los medios y contactos para llevar a cabo esa tarea y de una gran experiencia en el trabajo con este tipo de sistemas, lo que garantiza, en gran medida, un éxito en el alcance de los objetivos.

Es importante remarcar que si bien estamos frente a un proyecto a implementarse en la industria motociclística, no acarrea consecuencias medioambientales, por el contrario, busca mejorar considerablemente el impacto que tienen los actuales sistemas de dosificación de combustible.

4.2 ANÁLISIS DE MERCADO

En la actualidad las industrias dedicadas a la fabricación de motocicletas de baja cilindrada no incluyen sistemas electrónicos de control debido a las grandes trabas de importación existentes y a los altos costos que esto involucra. Empresas como Suzuki, han optado por volver al antiguo sistema de carburación por las razones nombradas. Este proyecto intenta ocupar ese espacio de mercado que ha sido desatendido y que es de gran importancia para la industria.

El producto final mejora las condiciones de productos similares importados siendo que alcanzan una performance similar, pero a mucho menor costo y con accesorios de gran disponibilidad en el país, por lo cual su mantenimiento, una vez instalado, también es de menor costo y mas accesible.

4.3 IMPACTO EN LA EXPORTACIÓN

Si bien este proyecto fue pensado a partir de las condiciones idóneas del país, con miras a un largo plazo, el producto final tiene muy buenas posibilidades de ser exportado y comercializado en el exterior. Las principales marcas fabricantes de sistemas similares son Estadounidenses a precios exorbitantes o Chinas con precios muy altos pero accesibles. Esto deja un buen margen competitivo para insertar el producto en el mercado extranjero si se lograra conseguir mantener un costo bajo en el exterior y la misma performance que la competencia.

4.4 IMPACTO EN LA SUSTITUCIÓN DE IMPORTACIONES

El proyecto completo surge de la necesidad de sustituir las importaciones de productos similares, por este producto de iguales prestaciones y mucho menor costo.

Actualmente, carece de sentido incluir, en modelos económicos de motocicletas de baja cilindrada, los sistemas importados de inyección electrónica debido al alto costo que implica. Esto conlleva a utilizar los viejos sistemas de carburación, con el consecuente aumento en la contaminación producida.

El sistema aquí desarrollado pretende generar una alternativa competitiva que permita nuevamente la inclusión de un sistema de inyección moderno en las motocicletas de baja cilindrada.

4.5 MODELO DE NEGOCIOS

El producto final será introducido en el mercado en dos etapas. En una primera etapa se comercializará directamente a clientes finales que ya hayan adquirido una motocicleta con el antiguo sistema de carburación, reemplazándolo por este nuevo sistema. A estos clientes se accederá por medio de la gran red de contactos y conexiones existentes con el grupo de trabajo de este proyecto.

En una segunda etapa se ofrecerá a las grandes fábricas de motocicletas del país, para que incluyan en sus modelos la alternativa de lanzarlos al mercado con el antiguo sistema de carburación o con nuestro nuevo sistema de control electrónico.

En paralelo, se ofrecerá a los talleres tanto oficiales como no oficiales, el Software para PC de modo de disponer de una herramienta fundamental de diagnóstico para estos sistemas de inyección.

Sin menor importancia, se pondrá a disposición un servicio de Post-Venta donde no solo se realizará el mantenimiento y se ofrecerá garantía, sino también se aprovechará ese espacio para mantener un constante contacto con el cliente y así poder ofrecer actualizaciones en el sistema o nuevos productos.

4.6 RETORNO DE INVERSIÓN

Se realizó un análisis del retorno sobre la inversión que estime la validez de los costos y ganancias manejados. Para esto se planteó una proyección a 5 años según el modelo de comercialización anteriormente descrito. Este modelo fue separado en dos etapas y considera una inversión inicial de \$80.000, posible estímulo asignado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

En la primera etapa, de un año de duración, se contempla la comercialización a clientes finales. Se estima un inicio de ventas bimestral de 30 unidades y un crecimiento del 30%. Esto validaría la recuperación del capital invertido dentro del año.

En una segunda etapa, de duración 4 años, se contempla la comercialización a fábricas. Se disminuye el precio de venta, pero se incrementa considerablemente la cantidad.

Al cabo de los 5 años, los cálculos teóricos y estimados garantizan una rentabilidad extraordinaria que valida la inversión a realizar.

4.7 PLAN DE MARKETING Y COMERCIALIZACION

La principal herramienta e imprescindible en sus comienzos, será la red de contactos que se posee de gente que trabaja y participa activamente en la industria de las motocicletas. De manera sencilla se podrán organizar reuniones informativas y demostrativas del producto que se sabe, hablará por sí solo al observarlo en ejecución. Serán instalados en motocicletas de personas allegadas al grupo de trabajo o incluso en propias para una fácil y efectiva demostración de su funcionamiento.

Se creará una marca comercial que represente el producto. Así mismo, se dispondrá de un sitio web de modo de tener una vía de comunicación directa y eficiente con los potenciales clientes.

Se realizará folletería promocional destinada a dos públicos diferentes, clientes finales y empresarios de la industria motociclística, que detalle las características y ventajas del producto. La misma será distribuida en los puntos de ventas de motocicletas, casas de repuestos y eventos empresariales relacionados.

Se organizarán entrevistas con el personal encargado de adquirir nuevas tecnologías en fábricas de motocicletas, ofreciendo demostraciones y precios promocionales por ventas en cantidad.

Se consideran de suma importancia los métodos presenciales, generando así un ambiente de confianza y compromiso con el negocio.

4.8 VALIDACIÓN DEL PLAN DE NEGOCIOS

Durante el proceso de investigación se logró generar entre clientes actuales y gente del medio la necesidad de acceder a un ejemplar del producto una vez esté finalizado. Esto es altamente optimista siendo que sin haber iniciado una campaña de marketing específica, ya se tienen productos preacordados validando así la hipótesis de un mercado sin explotar.

Se logró a su vez consultar y validar con profesionales de economía (Estudio contable personal, Colega Ingeniero Industrial y un dueño de una empresa motociclística), la generación de un negocio a través de este producto.

En un pensamiento a largo plazo, el ejemplo de la Unión Europea es el más claro para validar un mercado a punto de explotar. A partir de una legislación que limita las emisiones contaminantes generadas por los motores de baja cilindrada en los países pertenecientes, los fabricantes se vieron obligados a reemplazar en su totalidad los modelos que incluían un sistema de dosificación con carburador por sistemas de control electrónico. En caso de una ley similar en el país, no habría quien pudiese satisfacer la fabricación de motocicletas con ese sistema y manteniendo los accesibles precios que deben tener estos vehículos.

Capítulo 5

5 CONCLUSIONES Y MEJORAS

Finalizadas las etapas de estudio, diseño, implementación y pruebas, se está en condiciones de presentar las siguientes conclusiones y mejoras a futuro:

5.1 CONCLUSIONES

A modo de conclusión se puede confirmar la factibilidad de la fabricación de un sistema de control electrónico para motores de combustión interna 4 tiempos ciclo Otto de baja cilindrada que reemplace el actual sistema de carburación utilizado.

Se pudo demostrar, primero por medio de simulaciones y luego en mediciones sobre el circuito implementado, el correcto funcionamiento y su eficaz tiempo de respuesta a las variaciones.

Mediante la implementación del sistema obtenido, se pueden obtener ahorros en el consumo de combustible de aproximadamente 55% respecto de los sistemas con carburador.

Si bien, no se pudo cuantificar la mejora respecto a la disminución de gases contaminantes emanados, está implícito en la observación del aumento de eficiencia del uso del combustible.

Se planteó un proyecto capaz de ser ampliable con facilidad, sin modificar en gran medida el diseño original, de modo de, finalizada esta tesis de grado, ser capaz de continuar perfeccionando el sistema.

Se logró programar un firmware eficiente cuya premisa fue disminuir la carga del procesador para obtener una respuesta en tiempo real como es requerida. El amplio margen de memoria presente en el microcontrolador escogido, permitió realizar la programación en un lenguaje de alto nivel, sin necesidad de recurrir a la sintaxis en Ensamblador, cuyo desarrollo hubiese sido mas tedioso y difícil.

La inclusión en el microcontrolador de un bootloader, se volvió una herramienta fundamental para la implementación del sistema en distintos tipos de motores, sin necesidad de acceder físicamente a la placa madre y desmontar el chip para su programación.

Por otro lado, el diseño de la interfaz para PC, facilita una herramienta de diagnóstico del sistema sin necesidad de tener conocimientos avanzados sobre electrónica.

En nuestro país, las normativas ambientales con respecto a las emisiones de gases contaminantes, no son lo suficientemente estrictas como para requerir de modo obligatorio el reemplazo inmediato del sistema de carburación por el sistema de inyección en las motocicletas de baja cilindrada. En adición, a pesar de este ser un diseño de alta eficiencia y muy bajo costo con respecto a otros diseños importados de baja gama, un sistema de inyección requiere mayor mantenimiento y atención que un sistema de carburador. Ambas observaciones implican un nivel de dificultad considerable en la inserción del producto en el mercado, pero que no significa impedimento, sino que se requiere mayor atención en el enfoque elegido a la hora de elaborar un plan de negocios.

5.2 MEJORAS Y RECOMENDACIONES

La principal e inmediata mejora a realizar consiste en el aumento de la discretización de las variables utilizadas. Si bien, los valores actuales garantizan un correcto funcionamiento del sistema, aumentar la cantidad de niveles utilizados, tanto en las variables sensadas como en los mapas de actuadores, aumentará la performance del sistema considerablemente. Esta mejora requiere bajo costo de ingeniería, y la cantidad de memoria disponible en el microcontrolador utilizado nos permite su realización.

En directa relación con la mejora anterior, se puede establecer un mapa de avance de encendido mas eficiente, con mayor cantidad de niveles, que aproxime de mejor manera el momento de la chispa de la bujía al punto muerto superior de la carrera del cilindro.

En cuanto al firmware, se proponen tres correcciones importantes que disminuyan la carga del CPU y que aumenten la precisión de las correcciones:

- I. Análisis de los casos en los que la señal del sensor lambda no debe ser tomada en cuenta para evitar correcciones innecesarias o equivocadas.
- II. La variación de la temperatura en el motor es muy lenta. Si se realiza un estudio que cuantifique la velocidad del cambio, se podría deducir cada cuantos ciclos es útil la aplicación de una corrección debida a esta variable y así evitar cuentas innecesarias.
- III. Todas las correcciones del tiempo base de inyección pueden ser mejoradas mediante el uso de variables incrementales que aproximen por pasos a un valor mas exacto.

Actualmente la interfaz gráfica no es capaz de almacenar los datos leídos. Una mejora sustancialmente útil sería el agregado de esta característica para poder realizar un análisis mas eficiente de los datos e incluso de manera offline terminada la conexión.

En caso de lograr una comercialización del sistema de control obtenido, sería conveniente rediseñar el PCB en uno de doble capa. Esto reduciría el tamaño del producto final y disminuiría la permeabilidad a ruidos externos.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ "Manual de la técnica del automóvil", Robert BOSCH GmbH, 4ª edición española, 2005, ISBN 3-934584-82-9
- ✓ Toyota Motor Sales, USA INC. – Engine Controls – Input Sensors.
- ✓ Toyota Motor Sales, USA INC. – Engine Controls – ECU process and Output functions.
- ✓ "CCS C Compiler Manual", 2005.
- ✓ "Manual del Propietario – Motomel Eco 110/70", La Emilia S.A., edición 2009.
- ✓ "Motores Endotérmicos", Dante Giacosa, 3ª edición.
- ✓ "Manual Sistemas de Inyección – Bosch"
- ✓ "Manual de bujías y cables de encendido- Bosch"
- ✓ "Manual de entrenamiento Toyota". Volumen 5. EFI – Inyección electrónica de combustible. Pub. N° TTM2046
- ✓ Ley 24449 en el decreto reglamentario 779/95 establece en su artículo 33 inciso 5
- ✓ www.microchip.com
- ✓ MegaSquirt - <http://www.msextra.com/>
- ✓ http://en.wikipedia.org/wiki/Engine_control_unit
- ✓ http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_combusti%C3%B3n_interna_alternativo
- ✓ http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_cuatro_tiempos
- ✓ <http://www.megamanual.com/ms2/tune.htm#howto>
- ✓ http://autosymotores.awardspace.com/cb_mecanica_automotriz/1_motor.html
- ✓ <http://www.ni.com/white-paper/3312/es/>
- ✓ <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor>
- ✓ https://es.wikipedia.org/wiki/Masa_molar
- ✓ https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_los_gases_ideales
- ✓ https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_los_gases_ideales
- ✓ <http://www.aquihayapuntes.com/indice-practicas-pic-en-c/bootloader-usb-multiplataforma.html>
- ✓ <http://electronicams.blogspot.com.ar/2011/09/sistemas-operativos-en-tiempo-real-rtos.html>