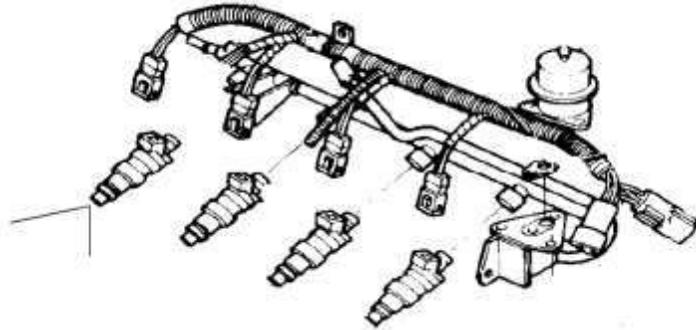


## PROYECTO Y DISEÑO FINAL

# “Adaptación de un sistema de inyección electrónica a motor de ciclo Otto con carburador”



**Facultad de Ingeniería – UNLPam**

**Autor:** Merlo, Emanuel Iván.

**Carrera:** Ingeniería Electromecánica (Plan 2015 - (Resolución N°375 / 2014 C.S.) (Resolución N°069/2021 Anexo II).

**Director:** Ing. Antonelli, Sergio - **Cátedra:** Máquinas Térmicas.

**Codirector:** Ing. Flores, Gustavo Marcelo – **Cátedra:** Tecnología Mecánica.

**Jurado:**

- Dr. Hecker, Rogelio – Facultad de Ing. UNLPam.
- Ing. Cotella, Nelson Gustavo - Facultad de Ing. UNLPam.
- Ing. Fruccio, Walter - Facultad de Ing. UNLPam.

**Lugar:** General. Pico, La Pampa, Argentina.

**Fecha de aprobación:** 2 de junio de 2023.

## RESUMEN

---

Mediante el proyecto y diseño final desarrollado en este trabajo, se realiza la dosificación de combustible de un motor mono-cilíndrico de combustión interna de encendido provocado, como resultado de la adaptación de un sistema de inyección electrónica. El motor a ensayar pertenece a la marca HONDA y su cilindrada es de 160 [cm<sup>3</sup>], cuyo funcionamiento responde al ciclo Otto. Para lograrlo, se reemplazó el carburador original por un sistema de gestión electrónica cuya dosificación de combustible se realiza por medio de un inyector y la señal de control es un pulso eléctrico de una duración calculada por un microprocesador Arduino.

Partiendo de una investigación bibliográfica se elabora un modelo de sistema que relacione las variables necesarias para la dosificación de combustible.

Una vez elaborado el modelo, se estudiaron las características de funcionamiento de los componentes, lo que llevó a una posterior selección de sensores, actuadores y el microprocesador. Con técnicas de diseño mecánico y utilización de tecnología en impresión 3D se realiza el diseño y fabricación de piezas partes, necesarias para el montaje de los componentes.

Para la comunicación con el microprocesador y la modificación de parámetros, se usa el software TunerStudio MS. Con el uso de una PC, esto permite la visualización de señales en tiempo real y realizar el “setting” de parámetros configurables.

Como resultado final se logró la puesta en marcha del motor. El comportamiento del sistema no arrojó los resultados esperados, ya que, la marcha no mostró cambios frente a distintas cargas del motor al hacer variar la posición de la válvula mariposa de aceleración, obteniendo solo el funcionamiento a un régimen fijo del motor. Con la observación de las variables por medio del uso de software y mediciones sobre el modelo, se concluyó en que la presencia de errores en el relevamiento de señales de entrada, tal como las R.P.M y el ruido magnético de bobinas, como las principales causantes del incorrecto comportamiento del sistema.

Las problemáticas surgidas, junto con las conclusiones de la experiencia se comparten al final del trabajo, dejando el camino abierto para trabajos futuros a realizar en busca de mejorar el rendimiento del sistema armado.

*Palabras claves:* adaptación, sistema de inyección electrónica, carburador, inyector, microprocesador Arduino

## ABSTRACT

---

Through the project and final design developed in this work, the fuel dosage of a single-cylinder internal combustion engine with spark ignition is carried out, as a result of the adaptation of an electronic injection system. The engine to be tested belongs to the HONDA brand and its displacement is 160 [cm<sup>3</sup>], whose operation responds to the Otto cycle. To achieve this, the original carburetor was replaced by an electronic management system whose fuel dosage is carried out by means of an injector and the control signal is an electrical pulse with a duration calculated by an Arduino microprocessor.

Starting from a bibliographical investigation, a system model is elaborated that relates the necessary variables for the fuel dosage.

Once the model was developed, the operating characteristics of the components were studied, which led to a subsequent selection of sensors, actuators and the microprocessor. With mechanical design techniques and the use of 3D printing technology, the design and manufacture of parts, necessary for the assembly of the components, is carried out.

For communication with the microprocessor and parameter modification, the TunerStudio MS software is used. With the use of a PC, this allows the visualization of signals in real time and the “setting” of configurable parameters.

As a final result, the start-up of the engine was achieved. The behavior of the system did not yield the expected results, since the gear did not show changes against different engine loads by varying the position of the throttle butterfly valve, obtaining only operation at a fixed engine speed. With the observation of the variables through the use of software and measurements on the model, it was concluded that the presence of errors in the survey of input signals, such as the R.P.M and the magnetic noise of the coils, as the main causes of the incorrect system behavior.

The problems that have arisen, together with the conclusions of the experience, are shared at the end of the work, leaving the way open for future work to be carried out in search of improving the performance of the armed system.

*Keywords:* adaptation, electronic injection system, carburetor, injector, Arduino microprocessor

# ÍNDICE

---

RESUMEN .....	2
ABSTRACT.....	4
ÍNDICE .....	6
1 INTRODUCCIÓN .....	8
1.1 Definiciones.....	9
1.1.1 Carburación .....	9
1.1.2 Mezcla Estequiométrica .....	10
1.1.3 Mezcla Rica.....	10
1.1.4 Mezcla Pobre .....	10
1.2 Sistemas de Carburación .....	12
1.2.1 Gestión por Carburador .....	12
1.2.2 Sistemas de Gestión por Inyección Electrónica .....	14
1.3 Sistema combinado de encendido e inyección MOTRONIC.....	20
1.3.1 Variables de Control .....	21
1.3.2 Componentes del Sistema .....	22
1.4 Objetivos .....	27
1.4.1 Objetivo General .....	27
1.4.2 Objetivos Específicos .....	28
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
2.1 Motor de Ensayo .....	29
2.2 Modelo del Sistema .....	30
2.2.1 Requisitos del Sistema .....	32
2.2.2 Precisión de la Etapa Electrónica .....	32
2.3 Componentes del Sistema Implementados .....	33
2.3.1 Microprocesador Arduino-ECU.....	33

2.3.2	Software de Programación para Arduino .....	38
2.3.3	Sensores .....	41
2.3.4	Actuadores .....	47
2.4	Adaptación del Sistema Sobre el Motor .....	53
2.4.1	Cuerpo de Admisión .....	54
2.4.2	Línea de Combustible .....	58
2.4.3	Sensor CKP.....	60
2.4.4	Cableado de Sensores.....	62
2.4.5	Adaptación Sobre el Motor .....	62
3	GESTIÓN ELECTRÓNICA-PUESTA EN MARCHA.....	64
3.1.1	Estrategia de Gestión Alpha-N.....	64
3.1.2	Cálculo de Combustible .....	68
3.2	Verificación y Puesta en Marcha .....	79
3.2.1	Verificación de Señales .....	80
3.2.2	Puesta en Marcha.....	86
3.2.3	Problemática Ocurrida.....	88
4	CONCLUSIONES .....	90
	Referencia Bibliográfica .....	94
	Anexos.....	96

## A. Planos

# 1 INTRODUCCIÓN

---

Se sabe que los motores endotérmicos tienen la finalidad de transformar la energía térmica contenida en un combustible en energía mecánica utilizable.

El movimiento de los órganos de estos motores es generado por un fluido de trabajo. Se conforma parcialmente por una mezcla de combustible y comburente, el cual sufre transformaciones debido a la reacción de combustión. Cuando la combustión se produce en el fluido de trabajo y la energía introducida es aprovechada por órganos dotados de movimiento alternativo, se está frente a un **motor endotérmico alternativo**. Un motor característico de este tipo es el **motor de ciclo Otto**, en donde la energía de activación de la combustión es aportada comúnmente por una descarga eléctrica, normalmente denominada salto de chispa (ECh). [1]

Este tipo de motores equipa la mayor parte de automóviles, motocicletas y una gran parte de motores para vehículos industriales. Los combustibles son las gasolinas (bencinas) y la alimentación puede ser por **carburación**, o bien por **inyección**.

El **carburador** ha sido por décadas el dispositivo encargado de dosificar el combustible de modo de obtener la razón de mezcla (razón en masa aire /combustible) que satisfaga las condiciones de funcionamiento del motor, y por otra parte, pulverizar y mezclar el combustible homogéneamente con el aire. Es así, que la mezcla la realiza mediante la difusión creada por depresión originada por la aspiración y la presencia de un Venturi. Por otro lado, la regulación del caudal es controlada por un orificio calibrado. Este sistema no puede satisfacer todas las exigencias, las cuales varían según la carga, el número de revoluciones, la temperatura y la presión atmosférica, presentando inconvenientes como difícil arranque en frío, ausencia de control sobre la calidad de los gases de escape, entre otros. [1]

En busca de mejores prestaciones y actualmente, debido a la creciente necesidad de reducir las emisiones nocivas y el consumo de combustible, junto al desarrollo de la electrónica, se ha incrementado en un gran volumen el uso de la **inyección electrónica** para la dosificación de combustible, dejando casi obsoleta la utilización del carburador para motores de

automóviles, aunque no así, en motores de baja cilindrada como motocicletas o motores de usos varios de baja potencia.

Los sistemas de gestión electrónica, consisten básicamente en introducir el combustible bajo presión por medio de inyectores, lo cual permite un mayor control en la dosificación. Al tratarse de inyectores “todo o nada”, es decir, que pueden tener dos estados estables: abierto o cerrado; la cantidad de combustible inyectado depende solo del tiempo de apertura.

El tiempo de apertura es determinado por una central de control electrónico, conocida generalmente como ECU (Engine Control Unit), en función de las condiciones de uso del motor. Estas condiciones son relevadas por una serie de sensores, ubicados estratégicamente. De este modo, la inteligencia de la central de control puede elegir un tiempo ideal de apertura del inyector, el cual será afectado por distintos coeficientes que influyen en el rendimiento del motor.

Un factor importante y fundamental que afecta a este tiempo es el factor  $\lambda$  (lambda). Este factor, es el encargado de realimentar el lazo de control con el índice de oxígeno presente en los gases de escape. Esto último denota un desarrollo muy importante para reducir las emisiones nocivas, ya que es uno de los factores encargados de ajustar el enriquecimiento o empobrecimiento de la mezcla aire/combustible. Esta es una de las principales ventajas frente a un sistema con carburador, ya que permite cerrar el lazo de control de la dosificación de combustible.

## **1.1 DEFINICIONES**

Luego de esta breve introducción, se presentan algunas definiciones relevadas de la bibliografía necesaria para conocer el funcionamiento de la dosificación de combustible por medio de sistemas de inyección electrónica.

### **1.1.1 Carburación**

Para que se produzca la combustión, la mezcla debe contar con dos componentes: aire y combustible, y además deben tener una proporción que los relacione. Al proceso de pulverización, vaporización y mezcla de la correcta cantidad de aire y combustible se lo conoce como carburación.

### 1.1.2 Mezcla Estequiométrica

La mezcla ideal entre aire/combustible para que la combustión se realice del modo más eficiente posible se denomina mezcla estequiométrica y se mide en gramos.

Cuando la mezcla no cumple con la relación estequiométrica, ya sea por exceso o falta de combustible, el motor varia la entrega de potencia, el consumo de combustible y la emisión de gases contaminantes, aunque deberá ajustarse según las exigencias que se le pidan al motor.

La relación aire/combustible depende del combustible con el que se trabaje en particular, pero para los combustibles comerciales usados normalmente, su valor es 14,7, es decir que por cada parte de combustible se precisan 14,7 partes de aire. Es así que se puede expresar:

$$R_{A/C \text{ estequiométrico}} = \frac{m_a}{m_c} = 14,7 \quad [1]$$

El dosado se puede representar mediante la expresión  $\lambda$ . Este parámetro está definido por la relación entre la razón aire/combustible real y la razón aire/combustible estequiométrica. Debido a esta relación,  $\lambda$  es un valor que oscilará alrededor de 1,

Despejando de la Ecuación [1] la masa de aire estequiométrica y trabajando algebraicamente,  $\lambda$  queda expresado por:

$$\lambda = \frac{m_{a \text{ real}}}{14,7 m_c} = 1 \quad [2]$$

Siendo  $m_a$  la masa de aire real que entra al cilindro y  $m_c$  la masa de combustible.

### 1.1.3 Mezcla Rica

Cuando la mezcla aire/combustible posee más combustible que la relación estequiométrica se está en presencia de una mezcla rica y se tiene un  $\lambda < 1$ .

### 1.1.4 Mezcla Pobre

Se denomina así a la mezcla que contiene menor cantidad de combustible que la relación estequiométrica y se tiene un  $\lambda > 1$

En motores de ECh, la relación aire/combustible varía en función de los distintos requerimientos de carga que se le exigen al motor según las diversas situaciones que se pueden presentar en el uso del mismo.

Algunas de las situaciones puntuales en las que se debe ajustar la mezcla a dosificar son:

- Máxima potencia.
- Máxima economía.
- Ralentí.
- Arranque en frío.
- Variación de altura sobre el nivel del mar donde se encuentra ubicado el motor.

En la Figura 1.1, se observa cómo varía la razón de mezcla según la carga del motor, de lo que se puede notar que cuando se está en una situación de máxima potencia (curva 1) la razón de mezcla es más rica que la estequiométrica, mientras que para una situación de uso normal (curva 2) o de máxima economía, la razón de mezcla es más pobre que la estequiométrica.

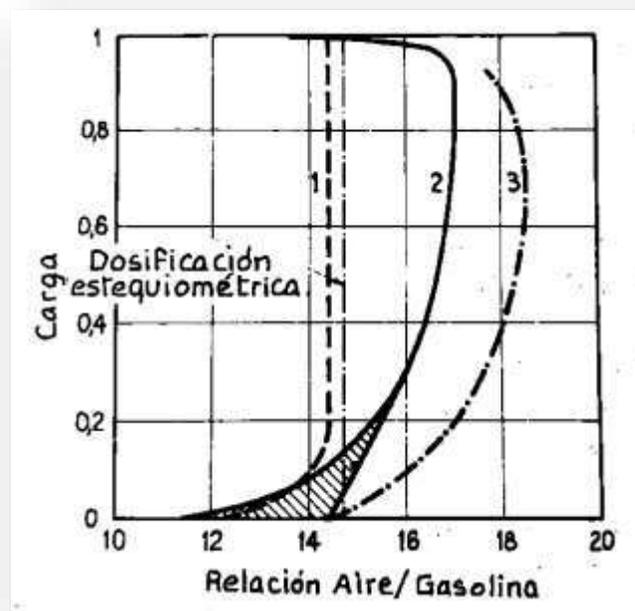


Figura 1.1 - Razón aire/combustible vs carga [1].

## 1.2 SISTEMAS DE CARBURACIÓN

La preparación de la mezcla en los motores de ECh se realiza por medio de un conjunto que comprende, además del depósito de combustible, las siguientes partes:

- Filtro de aire y conducto de admisión (o aspiración).
- Bomba de combustible con filtro y tuberías.
- Dispositivo para mezclar el combustible con el aire y regular el caudal.

Este dispositivo de mezcla es la parte más importante y sofisticada del sistema de alimentación, ya que de éste depende la rapidez y la precisión de la respuesta del motor a los mandos y las exigencias del servicio.

Dos son los principios adoptados:

- Con el primero el combustible es introducido y mezclado con el aire que pasa por el conducto de admisión por efecto de la depresión creada en él por la aspiración y se trata del **carburador** tradicional, considerado por cierto un medio mecánico.
- Con el segundo el combustible es introducido bajo presión por medio de inyectores, es decir, por **inyección**.

### 1.2.1 Gestión por Carburador

En el dosado realizado por carburador, el ajuste se hace mediante pasos calibrados variables (tornillos de regulación de aire o mezcla) y diafragmas que habilitan o deshabilitan conductos. Esta dosificación no cuenta con ningún tipo de realimentación, con lo cual en pocas situaciones se logra un dosado estequiométrico.

En la Figura 1.2 se puede observar la estructura básica de un carburador.

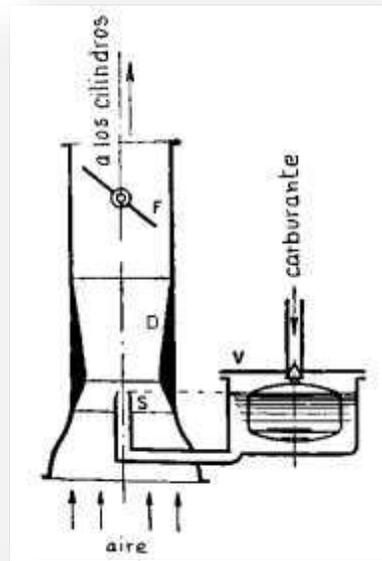


Figura 1.2 - Esquema básico de carburador [1].

Dentro de las partes que conforman un carburador se pueden mencionar:

- a) Un dispositivo llamado cuba V, donde el carburante es mantenido a nivel constante;
- b) Un difusor D en forma de tubo Venturi;
- c) Un surtidor S del cual fluye el carburante arrastrado por la depresión que se genera en la sección más estrecha del Venturi;
- d) Una válvula F (generalmente de mariposa), situada después del surtidor, que sirve de órgano de regulación de la cantidad de aire y por tanto de mezcla que se introduce en los cilindros.

Este sistema tiene la ventaja de ser sencillo y sólo en raras ocasiones presenta irregularidades de funcionamiento por defecto en el cierre de la válvula o por sensibilidad a las acciones dinámicas.

Dependiendo la aplicación de cada motor, la forma y la posición del flotador en el carburador, y del surtidor con respecto al flotador, se escogen de modo que el nivel con relación al surtidor se mantenga correcto. En la Figura 1.3 se pueden ver las distintas configuraciones de surtidor/flotador más comunes que se pueden encontrar.

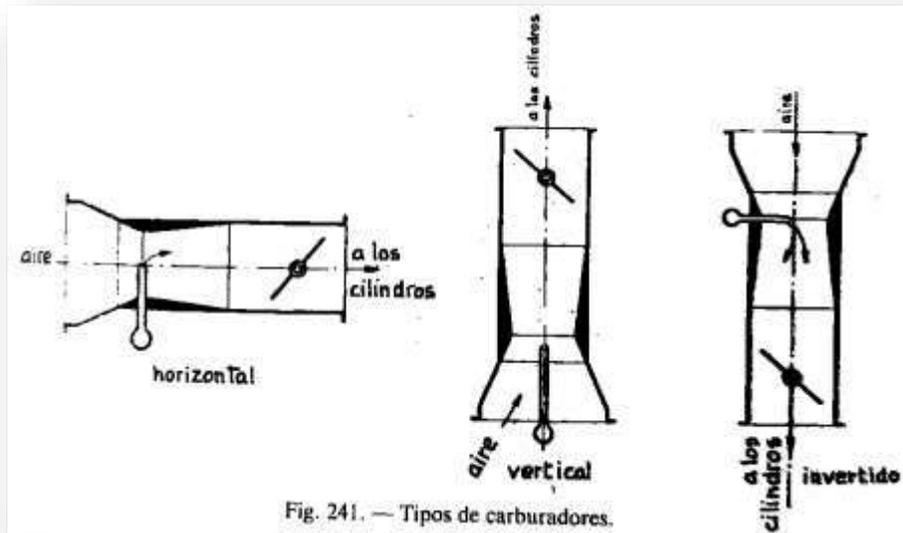


Figura 1.3 - Configuraciones comunes surtidor/flotador [1].

## 1.2.2 Sistemas de Gestión por Inyección Electrónica

Con el pasar de los años, las regulaciones acerca de los gases contaminantes que se liberan en la combustión aumentaron las exigencias para los sistemas de formación de la mezcla, lo que llevó a un desarrollo aún vigente en los sistemas de dosificación de combustible.

Es así, que se desarrollaron los sistemas de dosificación por inyección electrónica, donde estos sistemas pueden cumplir con los requisitos propuestos y además lograr mejores prestaciones. En los motores equipados con este tipo de sistemas, es una computadora la encargada de realizar la gestión lógica de cuanto combustible inyectar según la demanda del motor.

En lo que respecta al resto de este capítulo se explicará el principio de funcionamiento de estos sistemas y los distintos tipos de clasificación que pueden tener.

### 1.2.2.1 Generalidades del Principio de Funcionamiento

En motores equipados con sistemas de inyección electrónica, una unidad de control electrónica denominada ECU (Engine Control Unit), es la encargada de determinar la razón de mezcla adecuada de combustible correspondiente para cada situación particular.

Para la toma de decisiones, la ECU debe conocer diferentes valores que le permitan determinar el estado del motor, siendo algunos de ellos la cantidad de aire que ingresa al motor, la presión del múltiple de admisión, si el motor está girando o no, entre otros.

Para lograr conocer estos valores, el sistema cuenta con una serie de sensores y junto con la información almacenada en su memoria, determina las acciones a tomar, como lo es el control del combustible a inyectar y el control de la marcha al ralentí

En la Figura 1.4, se muestran los componentes básicos encontrados comúnmente en motores equipados con sistemas de inyección electrónica, clasificándolos en dos grandes grupos:

- Sensores: son los encargados de relevar las señales para determinar el estado del motor.
- Actuadores: son los encargados de ejecutar las acciones de control emitidas por la central de control a partir de la información relevada por los sensores.

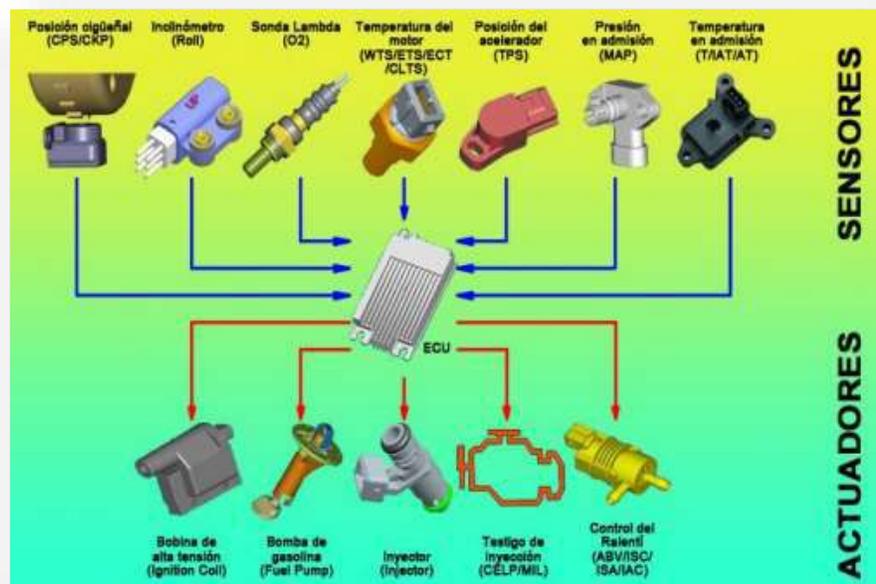


Figura 1.4 - Componentes básicos de sistemas de inyección de combustible [14].

En los sistemas de inyección electrónica, la conexión entre los componentes se realiza mediante un arnés de cables que permite la transmisión de señales para la comunicación con la ECU.

El conexionado de los componentes es representado a través de planos eléctricos. Dentro de los planos que se pueden encontrar, se pueden mencionar:

- Planos funcionales
- Planos de identificación de conectores y pines.
- Ubicación de componentes.

De los planos, se puede obtener información de los componentes, la posición en la que se encuentran ubicados y la identificación de los pines de sus conexiones.

El último ítems, es de gran utilidad para diagnosticar fallas de componentes o circuitos en caso de que el sistema presente un mal funcionamiento.

Un ejemplo de estos planos, se muestra en la Figura 1.5, del cual al observarlo se puede sacar información de los componentes que conforman el sistema y el conexionado entre ellos.

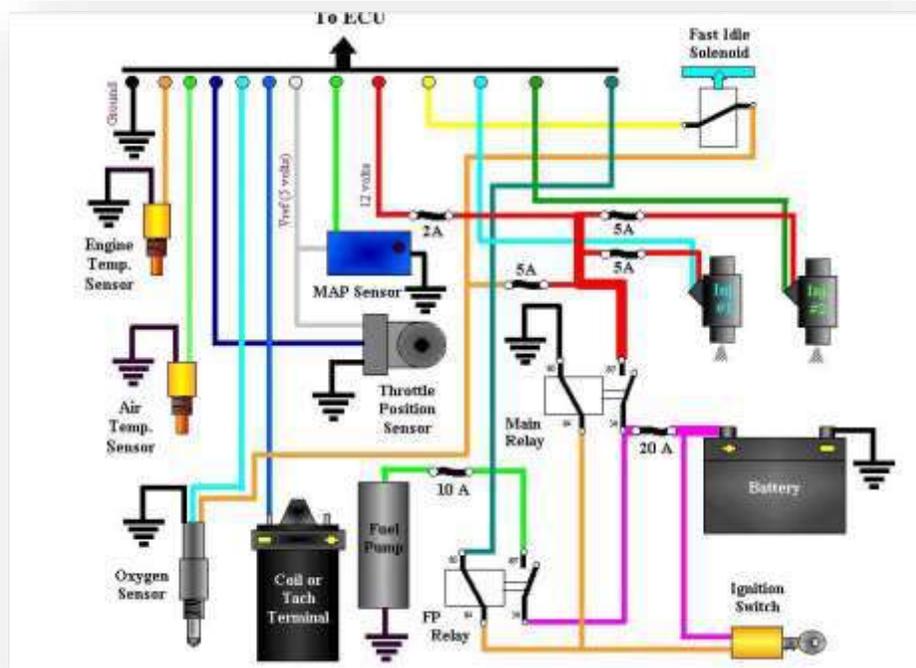


Figura 1.5 - Esquema de sistema de inyección [14]

### 1.2.2.2 Ventajas de la Gestión por Inyección Electrónica

La tendencia, es preparar la mezcla por medio de la inyección de combustible en el colector de admisión. Esta tendencia se basa en las ventajas que supone la inyección de combustible

en relación con las exigencias de potencia, consumo, comportamiento de marcha, así como de limitación de elementos contaminantes en los gases de escape.

Las razones de estas ventajas residen en el hecho de que la ausencia del tubo Venturi en la entrada de aire, en los sistemas de inyección permite una dosificación muy precisa del combustible en función de los estados de marcha y de carga del motor. Estas características, permiten mejorar el rendimiento volumétrico, viéndose reflejadas en el consumo, potencia y par motor. [1]

Así mismo se tiene en cuenta la preservación del medio ambiente al controlar la dosificación de tal forma que el contenido de elementos nocivos en los gases de escape sea mínimo.

Además, asignando una electroválvula o inyector a cada cilindro, se consigue una mejor distribución de la mezcla.

La sustitución del carburador, también permite dar forma a los conductos de admisión. Esto permite crear corrientes aerodinámicamente más favorables, mejorando el llenado de los cilindros, reflejándose en mejoras del par motor y la potencia.

### **1.2.2.3 Clasificación de los Sistemas de Inyección Electrónica**

Los sistemas de inyección electrónica se pueden clasificar en función de cuatro características distintas:

1.-Según el lugar donde inyectan.

INYECCION DIRECTA: El inyector introduce el combustible directamente en la cámara de combustión. Este sistema de alimentación es el más novedoso y se está empezando a generalizar su uso. En la mayoría de los motores sobrealimentados ya cuentan con sistemas de inyección directa de combustible.

INYECCION INDIRECTA: El inyector introduce el combustible en el colector de admisión, antes de la válvula de admisión, que no tiene por qué estar necesariamente abierta. Es la más usada actualmente.

En la Figura 1.6 se ilustra la situación descripta.

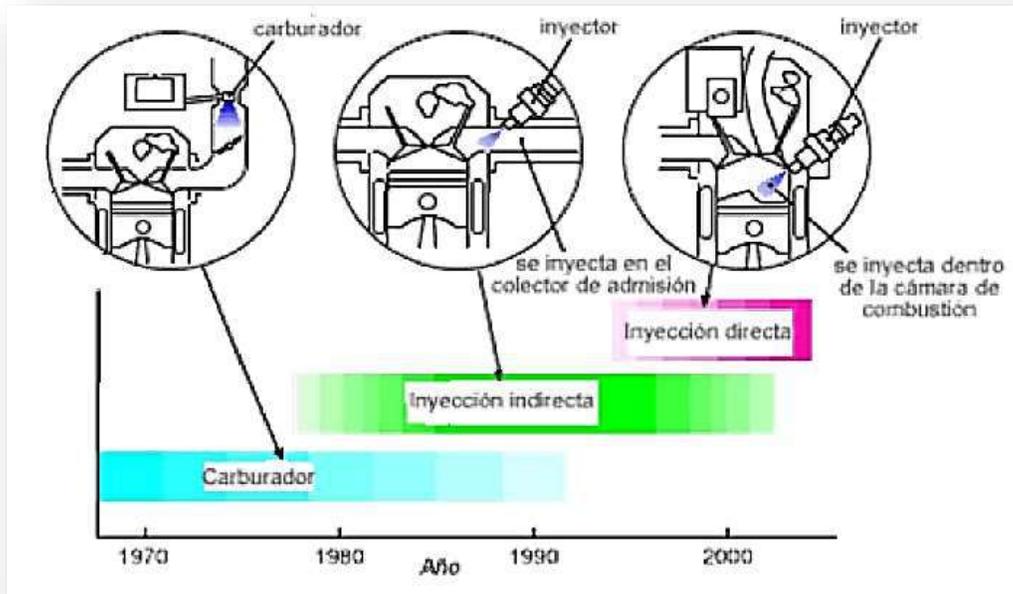


Figura 1.6 - Clasificación según el lugar donde se inyecta la mezcla [5].

2.-Según el número de inyectores.

**INYECCION MONOPUNTO:** Hay solamente un inyector, que introduce el combustible en el colector de admisión, antes de la válvula de mariposa. Prácticamente se encuentra en desuso.

**INYECCION MULTIPUNTO:** Hay un inyector por cilindro, pudiendo ser del tipo "inyección directa o indirecta". Es la que se usa en vehículos de media y alta cilindrada.

En la Figura 1.7, se muestra la disposición de las dos configuraciones anteriores.

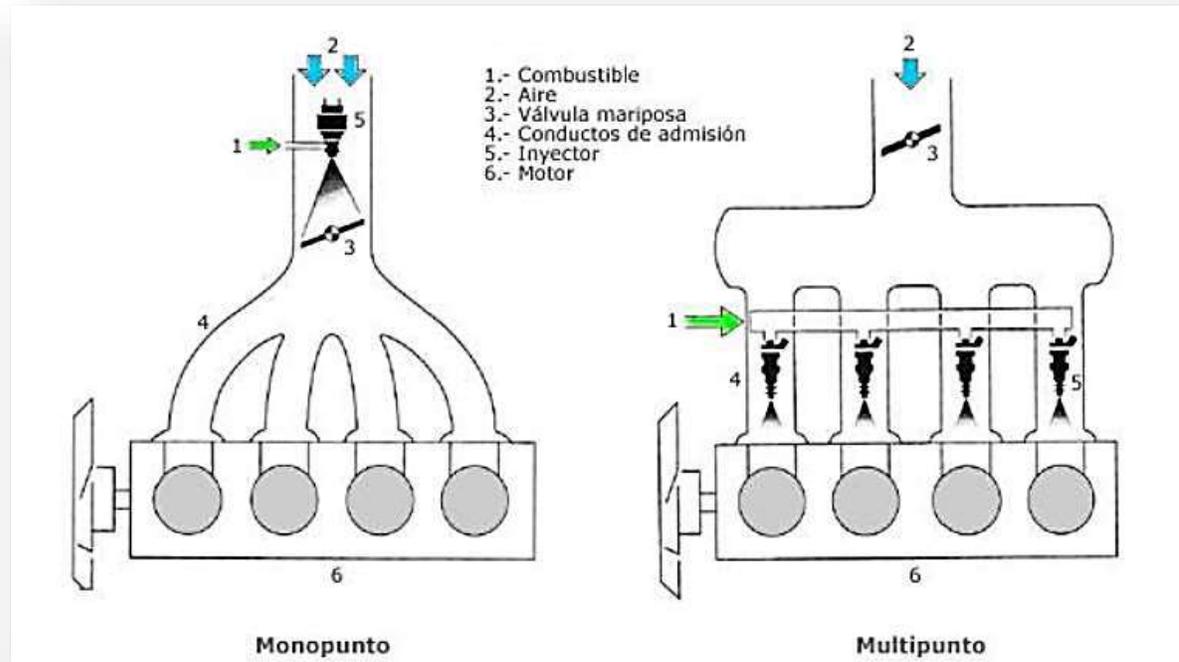


Figura 1.7 - Inyección Monopunto y Multipunto [5].

### 3. Según el número de inyecciones.

**INYECCION CONTINUA:** Los inyectores introducen el combustible de forma continua en los colectores de admisión, previamente dosificada y a presión, la cual puede ser constante o variable.

**INYECCION INTERMITENTE:** Los inyectores introducen el combustible de forma intermitente, es decir; el inyector abre y cierra según recibe información del módulo electrónico. La inyección intermitente se divide a su vez en tres tipos:

- **SECUENCIAL:** El combustible es inyectado en el cilindro con la válvula de admisión abierta, es decir; los inyectores funcionan de uno en uno de forma sincronizada.
- **SEMISECUENCIAL:** El combustible es inyectado en los cilindros de forma que los inyectores abren y cierran una vez por cada vuelta de cigüeñal.

**SIMULTANEA:** El combustible es inyectado en los cilindros por todos los inyectores a la vez, es decir; abren y cierran todos los inyectores al mismo tiempo.

### 4. Según las características de funcionamiento.

**INYECCIÓN MECANICA (K-Jetronic-BOSCH)**

**INYECCIÓN ELECTROMECHANICA (KE-Jetronic-BOSCH)**

## INYECCIÓN ELECTRÓNICA (L-Jetronic, LE-Jetronic, Motronic, etc. BOSCH)

Todas las inyecciones actualmente usadas en automoción pertenecen al último grupo, es decir, son electrónicas y en general tipo Motronic. [2]

### 1.3 SISTEMA COMBINADO DE ENCENDIDO E INYECCIÓN MOTRONIC

Por ser el Motronic el modelo de uso general en la actualidad, como guía para el sistema de inyección implementado en este proyecto se parte de las bases de este modelo, motivo por el cual en las siguientes secciones de este capítulo se describe con mayor detalle este sistema. En la Figura 1.8 se presenta el esquema de este sistema, donde se detallan cada uno de los componentes que lo constituyen. [2]

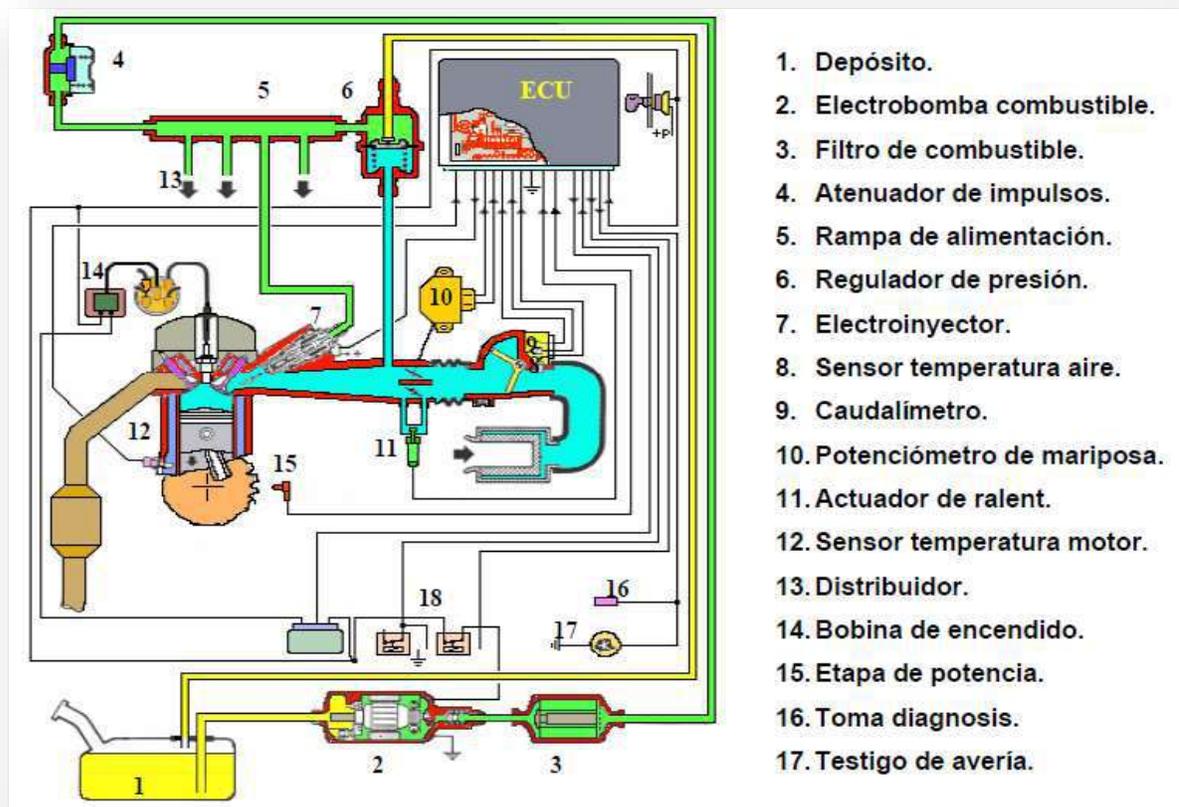


Figura 1.8 - Sistema de control del motor MOTRONIC [5].

El Motronic es un sistema electrónico integrado de control de la inyección de nafta y del encendido, en el cuál una unidad de control electrónico realiza el control de la dosificación de combustible y el avance de encendido. Esto representa uno de los avances tecnológicos más importantes de los últimos tiempos, aplicados en los motores a nafta.

Este sistema combina la inyección de combustible del L- Jetronic con un sistema de encendido electrónico a fin de formar un sistema de regulación del motor completamente integrado, con un procesamiento de señales completamente digital.

### **1.3.1 Variables de Control**

Para una dosificación correcta de la mezcla aire/combustible necesaria para obtener una razón lo más próxima a la estequiométrica y controlar las emisiones en los gases de escape, se debe realizar la medición de las variables físicas del motor.

El número de revoluciones y el estado de carga forman las magnitudes principales de regulación. [2]

En la Tabla 1, se presenta una serie de variables a controlar y los componentes involucrados en su medición que también contribuyen a la determinación del estado del motor y el correcto funcionamiento frente a las distintas situaciones de funcionamiento.

<b>Funciones del motor</b>	<b>Sistema inyectado</b>
Enriquecimiento en arranque	Inyector secuencial Sensor de refrigerante ECT
Enriquecimiento con motor frío	Sensor de refrigerante ECT Sensor de temperatura de aire IAT Actuador de control de aire en marcha mínima IAC
Velocidad de marcha mínima	Sensor de masa de aire MAF Sensor de presión del múltiple MAP
Mezcla en marcha mínima	Sensor de masa de aire MAF Sensor de presión del múltiple MAP Sensor de oxígeno H2OS
Mezcla en velocidad crucero	Sensor de masa de aire MAF Sensor de presión del múltiple MAP Sensor de oxígeno HO2S
Enriquecimiento con carga	Sensor de posición de mariposa TPS
Enriquecimiento en aceleración	Sensor de posición de mariposa TPS

*Tabla 1. – Variables de control para distintas situaciones de funcionamiento.*

## 1.3.2 Componentes del Sistema

### 1.3.2.1 Sensores

Para el cálculo de las revoluciones se utiliza la variación de la tensión inducida en un sensor inductivo, el cual capta la influencia de un campo magnético a través de los dientes de una corona dentada montada en el cigüeñal.

El estado de carga se averigua por el caudal de aire aspirado o por la medición de la presión en el colector de admisión.

A partir de estas magnitudes se determinan en un campo característico los parámetros óptimos para el tiempo de inyección y el ángulo de encendido.

El procesamiento simultáneo de ambas magnitudes sólo lo pueden garantizar sistemas integrados.

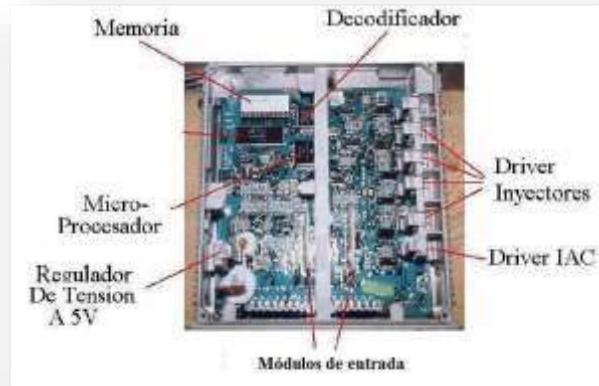
En la Tabla 2, se especifican una serie de sensores con sus siglas características que se utilizan para relevar el estado del motor:

Proceso físico del motor		Sensor
Revoluciones por minuto del motor (rpm)	CKP-CMP	
Posición del cigüeñal-sincronización de ignición	CKP	
Posición del árbol de levas-sincronización de inyección	CMP	
Temperatura de motor	ECT	
Temperatura de aire de admisión	IAT	
Flujo de masa de aire de admisión	MAF	
Carga mecánica	Interruptores MAP-TPS	
Presión del múltiple de admisión	MAP	
Presión barométrica	BARO	
Control de mezcla con oxígeno en el escape	HO2S	
Recirculación de gas de escape EGR	DPFE	
Posición del acelerador	TPS	
Sensor de detonación	KS	

Tabla 2. – Sensores y siglas.

### 1.3.2.2 Unidad de Control Electrónico ECU

En términos generales, se puede decir que, la ECU está conformada por una serie de componentes electrónicos y un microcontrolador dispuestos sobre una placa impresa en cobre, que realizan los cálculos necesarios para el ajuste del motor, como se muestra en la Figura 1.9,



*Figura 1.9 - Apariencia de una ECU.*

En términos globales, el funcionamiento de la unidad de control se puede comprender mediante la segmentación del circuito general en bloques:

- Alimentación o circuito fuente: suministra la tensión para el funcionamiento de los distintos componentes del circuito.
- Circuito de procesamiento de datos: recepta y procesa las señales de los sensores y toma las decisiones correspondientes según sus valores preestablecidos.
- Drivers o salidas: son los circuitos que requieren tensiones y corrientes que luego distribuirán sobre los actuadores para realizar las acciones de control.
- Circuito de datos y periferia: son los circuitos que llevan la información y permiten la comunicación entre los distintos componentes de la ECU y el microcontrolador.

En la Figura 1.10, se muestra de forma genérica la arquitectura de una ECU, para la gestión del motor así como las interacciones con las diferentes señales tanto de entrada como de salida.

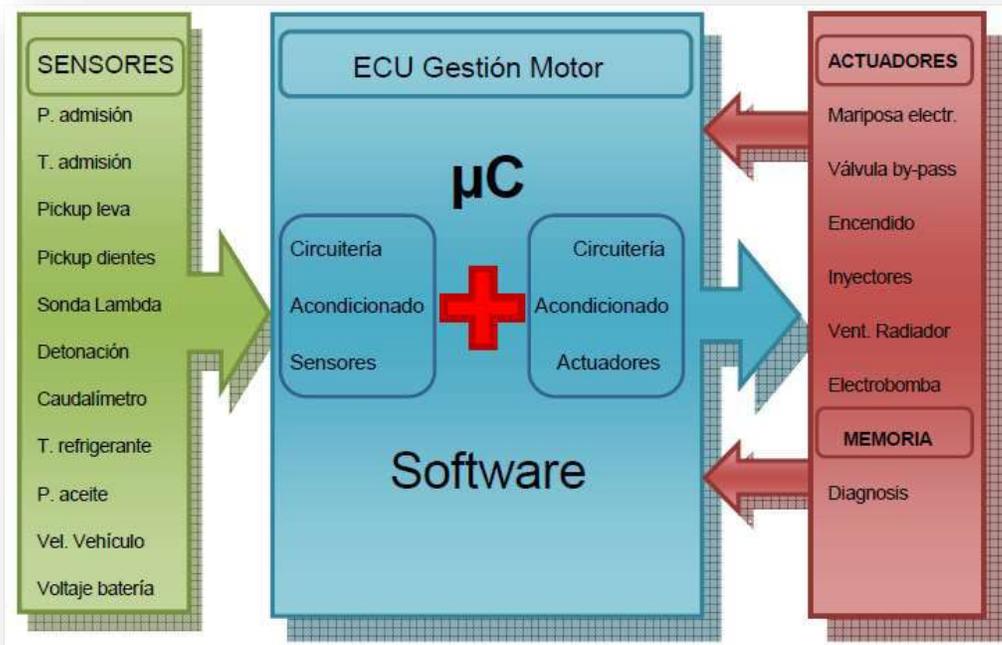


Figura 1.10 - Arquitectura genérica de una Unidad de Control Electrónico [2].

Al energizar el sistema para poder encender el motor, la ECU comienza a recibir las señales enviadas por los sensores y a partir de ello determinar el estado del motor.

Una vez captado el estado del motor, las conexiones de entrada eliminan las interferencias en las señales y las sitúan en un intervalo uniforme de tensiones. Un conversor analógico/digital transforma las señales al rango numérico, en el cual el microprocesador efectúa todo el procesamiento de la información y la compara con los valores preestablecidos guardados en su memoria hasta obtener las señales de salida.

A continuación se detallan las diferentes memorias que conforman el microcontrolador, usadas para el almacenamiento de programas y campos característicos:

- Memoria ROM de solo lectura: la memoria ROM (Read Only Memory) es de almacenamiento permanente en un chip, es decir, si se desconecta la batería las instrucciones contenidas siguen memorizadas. En esta memoria, los datos solo

pueden ser leídos, por lo que es en esta memoria donde se guardan los datos preestablecidos “programas”, que van a hacer funcionar el motor.

- Memoria RAM de acceso aleatorio: es una memoria de transición con los datos de entrada de los sensores, los cuales pueden ser escritos y leídos temporalmente, está disponible para elaborar eventuales señales de control y está dividida en dos secciones:

Memoria volátil RAM (Random Access Memory), sección que memoriza datos desde que la llave se pone en ON y se borra cuando la llave se pone en OFF.

Memoria no volátil KAM (Keep Alive Memory), sección que memoriza datos en las tablas de correcciones, para realizar un futuro aprendizaje con los ajustes provocados por los desgastes del motor. Estos datos son mantenidos mientras la batería no sea desconectada.

- Memoria EEPROM: es un tipo de memoria ROM (Eléctricamente Erasable Programmable Read Only Memory) que es escrita y programada eléctricamente más de una vez. Dentro de las funciones que realiza, se encarga de recibir de la memoria RAM y KAM los registros de las irregularidades producidas durante el funcionamiento y transmitir la información a un escáner a través del conector de diagnóstico.

Una vez obtenida la señal de salida, a través de los circuitos de datos y periferia, en la etapa final de potencia se ajustan las magnitudes de bajo nivel de potencia hasta el nivel requerido para los actuadores.

### **1.3.2.3 Actuadores**

En la etapa final de potencia los actuadores son aquellos componentes que mediante la habilitación de la ECU, realizan la tarea específica de ajuste.

Estos actuadores se amoldan a los diferentes requerimientos del motor de forma adecuada sin necesidad de una puesta a punto mecánica.

El sistema Motronic es reconocido por el gran número de campos característicos tridimensionales programables a voluntad que posee.

En la Tabla 3, se mencionan una serie de sistemas del motor y actuadores encargados de realizar las acciones de ajuste.

<b>Sistema del motor</b>	<b>Actuador</b>
Sistema de combustible	Bomba de combustible
Sistema de encendido	Avance de chispa de bobinas
Sistema de admisión	Válvula de mínima marcha IAC
Sistema evaporativo	Válvula de venteo EVAP
Sistema de recirculación de gases de escape	Válvula EGR

*Tabla 3 – Sistemas del motor y actuadores*

#### **1.3.2.4 Diagnóstico Integrado**

En los sistemas regulados por microprocesadores, el auto diagnóstico es parte del equipo básico. Se efectúa paralelamente con otras funciones como la inyección y el encendido durante el servicio normal de marcha. Este anexo cumple varias funciones, dentro de las cuales se pueden mencionar:

- Comprobación de todos los componentes y sistemas.
- Protección de los componentes en peligro ante la aparición de fallos.
- Proporcionar magnitudes de reemplazo para la marcha de emergencia.
- Indicación al conductor.
- Almacenamiento de informaciones detalladas.
- Lectura en el taller de los datos almacenados.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 Objetivo General**

El objetivo de este proyecto es adaptar un sistema de inyección electrónica a un motor de ciclo Otto con carburador, cuya gestión se realice por un microprocesador Arduino MEGA2560 y a través de éste, mediante conexión USB y el uso del software TunerStudio MS [13] como interfaz de comunicación con el microcontrolador, poder modificar los

parámetros preestablecidos en la memoria y ajustar los valores de control para la puesta en marcha del motor.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Ampliar conocimientos sobre motores de Combustión Interna con encendido provocado.
- Identificar los distintos sistemas de dosificación de combustible.
- Identificar las variables de control básicas necesarias para gestionar la dosificación de combustible.
- Conocer el principio de funcionamiento de sensores y actuadores de los sistemas de inyección electrónica.
- Desarrollar habilidades prácticas de diseño e implementación de sistemas de control sobre un modelo real.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

---

### 2.1 MOTOR DE ENSAYO

Como el objetivo del proyecto es poder reemplazar un carburador de un motor de encendido provocado que funcione según el ciclo Otto, por un sistema adaptado de inyección de combustible y lograr realizar la gestión de la dosificación, uno de los componentes necesarios para ello es disponer de un motor con estas características sobre el cuál se pueda realizar esta modificación.

El motor disponible para este caso resulta ser un motor de la marca HONDA modelo GC160, el cual se trata de un modelo mono-cilíndrico de 160 [cm<sup>3</sup>] de cilindrada y 5[HP] de potencia. Este motor cuenta con un sistema de dosificación por carburador, un sistema de encendido transistorizado excitado por el giro del motor y un sistema de arranque por cuerda. En la Figura 2.1 se muestra una imagen del motor comercial y en la zona superior derecha se puede ver el carburador original con que se equipan estos motores.



*Figura 2.1 - Motor HONDA GC160 [10].*

Al realizar la gestión de un motor que funciona bajo el ciclo Otto se debe controlar tanto la formación de la mezcla aire/combustible, como así también el salto de chispa de la bujía. En el caso del presente proyecto para el control de la chispa se dejará montado el encendido original con que cuenta el motor, haciendo el enfoque netamente en la dosificación del combustible.

Por lo tanto, para poder cumplir con este fin, se deberá realizar la modificación solo del sistema de admisión, para poder montar los componentes necesarios que permitan realizar la dosificación del combustible, así como también, la elaboración de un modelo de sistema de inyección a armar, que se ajuste lo mejor posible, a los requisitos determinados por las características técnicas del motor a ensayar. Se debe tener presente que los componentes del sistema de inyección son piezas partes recuperadas disponibles en talleres mecánicos de la zona y no repuestos comprados a medida.

## **2.2 MODELO DEL SISTEMA**

Tomando como guía el diagrama que se observa en la Figura 2.2, el aire atraviesa la mariposa de aceleración y se dirige hacia la válvula de admisión a través del conducto de ingreso. Mientras atraviesa el conducto de entrada, el aire se combina con la pulverización de nafta que emite el inyector para formar la mezcla de aire/combustible necesaria. Para poder pulverizar el combustible, será necesario abastecer el sistema con nafta a presión, Para lograr esto, se usa una línea de suministro de combustible formada por el depósito de combustible, una bomba eléctrica encargada de elevar la presión y transportar el combustible, un riel de presión que entregue el combustible en la boca del inyector y un regulador de presión que establezca la presión en el riel y permita la derivación al retorno hacia el depósito del combustible sobrante, tal como lo hace el sistema MOTRONIC.

Una vez que se abre la válvula de admisión, la mezcla ingresa a la cámara de combustión, y al finalizar el ciclo de compresión del motor en la bujía aparece una chispa que enciende la mezcla. Durante el ciclo de escape, los gases resultantes se liberan a través de la válvula de escape y recorren el conducto de salida.

Todas las lecturas y acciones llevadas a cabo por los sensores y actuadores son recibidas y enviadas por un microprocesador a través de un arnés de cables, el cual, proporciona el medio para transmitir la información en forma de señales eléctricas.

El microprocesador, junto con los componentes necesarios a colocar para poder manejar la parte de potencia eléctrica que gobiernan los actuadores como el inyector, son los componentes que van a desempeñar la función de ECU.

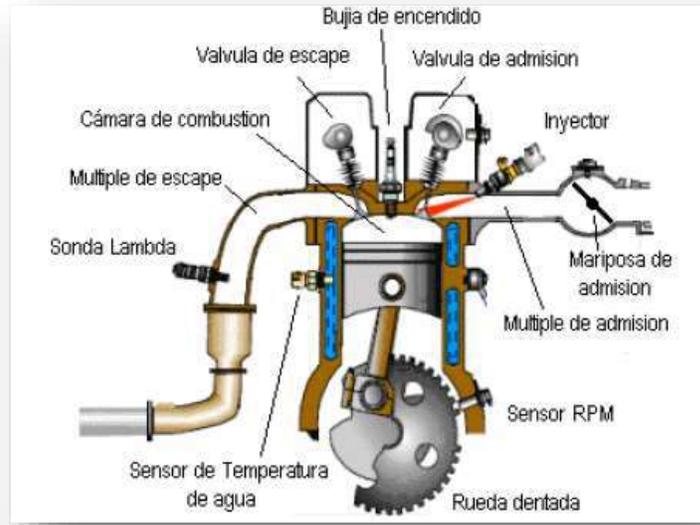


Figura 2.2 - Diagrama de modelo del motor [4].

Como el sistema a adaptar debe poder hacer funcionar el motor, el modelo que se implementa para realizar el proyecto no contempla la formación de gases contaminantes producto de combustiones incompletas, por lo que sólo se va a controlar la cantidad de combustible inyectada y no se va a medir la calidad de los gases de escape, no siendo necesario el uso de una sonda Lambda para realimentar el sistema.

Con la salvedad de no controlar la calidad de los gases de la combustión, el modelo resulta ser un lazo de control de tipo abierto, como el mostrado en la Figura 2.3.

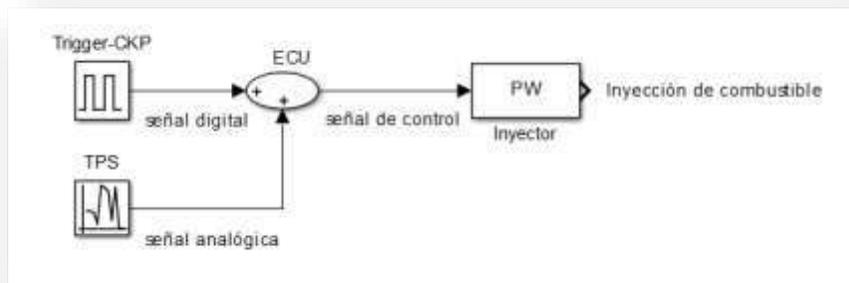


Figura 2.3 - Lazo de control abierto.

De este modo, las variables de entrada del sistema para determinar el estado del motor que se necesitan son: el ángulo de apertura de la mariposa  $\alpha$ , relevado por el sensor TPS y el número de revoluciones  $n$ , relevado por el sensor CKP.

Luego de la secuencia lógica de cálculo, llevada a cabo por la ECU conformada por el microprocesador Arduino MEGA 2560, dará como resultado la señal de control de salida usando la ecuación de combustible inscripta en el código de la ECU, que será la encargada de controlar el ancho de pulso necesario para suministrar el combustible requerido para que se lleve a cabo la posterior combustión de la mezcla.

Finalmente, el actuador encargado de hacer la dosificación del combustible será un inyector el cual funciona bajo la señal de control enviada por la ECU.

De este modo, la selección de componentes para la implementación del sistema planteado se resume a la siguiente lista:

- Selección de ECU.
- Software de control.
- Sensor TPS.
- Sensor CKP.
- Inyector.
- Línea de suministro de combustible.

### **2.2.1 Requisitos del Sistema**

La construcción del sistema debe cumplir una serie de requisitos para poder lograr los objetivos del proyecto. Así, a continuación, se mencionan una serie de requisitos a cumplir:

- Solución fiable desde el punto de vista constructivo.
- Nivel de precisión acorde con las exigencias del sistema.
- Capacidad de controlar tanto el tiempo de inyección como el ángulo de adelanto o atraso de inyección respecto al P.M.S (Punto Muerto Superior).
- Mínimo costo de implementación posible.

### **2.2.2 Precisión de la Etapa Electrónica**

De la precisión de esta etapa depende la exactitud y fiabilidad del funcionamiento de todo el sistema en conjunto. La precisión, está referida al momento de apertura y cierre del inyector.

El inyector, por tratarse de un sistema electromecánico tiene un retraso propio de la inercia del sistema. Para este tipo de actuadores, el tiempo estándar aproximado adoptado es de 1 [ms]. Teniendo en cuenta que la resolución del sistema debe ser de un 5% del tiempo mínimo de inyección, todos los cálculos de precisión tienen que tener como máximo una resolución de:

$$\text{- Para } 1[\text{ms}] \rightarrow 1[\text{ms}] \times 0,05 = 0,05[\text{ms}]$$

Los chips usados para circuitos electrónicos tienen velocidades de respuesta, igual o superiores a:

$$f=16[\text{MHz}] \rightarrow 1/16[\text{MHz}]=6,25 \times 10^{-5} [\text{ms}]$$

Este valor es despreciable frente a los cálculos de resolución necesarios, por lo que, cualquier microcontrolador con una velocidad de 16 [MHz] o superior será suficiente.

## **2.3 COMPONENTES DEL SISTEMA IMPLEMENTADOS**

### **2.3.1 Microprocesador Arduino-ECU**

El microprocesador Arduino tiene todos los elementos necesarios para conectar periféricos a las entradas y salidas de un microcontrolador, y puede ser programado tanto en Windows u otros sistemas operativos vigentes.

Para el desarrollo del proyecto, se usa un microprocesador Arduino modelo MEGA 2560, el cual, es el encargado de llevar a cabo la secuencia lógica de cálculo. En la Figura 2.4 se puede ver esta placa.



*Figura 2.4 - Microprocesador Arduino MEGA2560 [11].*

El Arduino MEGA 2560 es un microprocesador electrónico, que cuenta con un microcontrolador para el procesamiento de código, que cuenta con 54 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas/salidas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), un oscilador de 16 [MHz], una conexión USB, un conector de alimentación y un botón de RESET. A continuación en la Tabla 4 se muestran las características técnicas del microprocesador MEGA2560. Para más información sobre la placa, se puede consultar la referencia bibliográfica [15]:

<b>Microprocesador</b>	<b>Arduino MEGA 2560</b>
Tensión de trabajo	5 [V]
Tensión de entrada (recomendada)	7 – 12 [V]
Tensión de entrada (límite)	6 – 20 [V]
Pines digitales I/O	54 (15 de ellos proporcionan salida PWM)
Pines de entradas analógicas	16
DC corriente por pin I/O	20 [mA]
DC corriente por pin 3,3 [V]	50 [mA]
Memoria FLASH/ROM	256 [kB]
RAM	8 [kB]
EEPROM	4 [kB]
Velocidad del reloj	16 [MHz]
Largo	101,52 [mm]
Ancho	53,3 [mm]
Peso	37 [g]

*Tabla 4 - Características técnicas.*

El Arduino MEGA 2560 puede ser alimentado a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa.

La alimentación externa (no USB) puede venir de un adaptador de CA (corriente alterna) a CC (corriente continua) o de una batería. El adaptador se conecta al enchufe de 2,1 mm de centro-positivo en la clavija de alimentación de la placa. Una alimentación con menos de 7 [V], puede ocasionar que el pin de 5 [V] suministre menos de cinco voltios y el microprocesador se puede volver inestable. Si se utiliza más de 12 [V], el regulador de voltaje se puede sobrecalentar y dañar la placa.

Es así, que para la alimentación del sistema se utiliza una fuente reguladora de tensión de 12 [V] CC conectada a la red de suministro eléctrico de 220 [V] CA de 50 [Hz] para evitar el

uso de una batería convencional de corriente continua, evitando contar con una fuente de carga para la misma como consecuencia de su consumo frente a las pruebas a realizar.

El suministro de energía llega a la ECU e ingresa a ella a través de un conector, luego del cual se alimenta un interruptor y a partir de allí se realizan la derivación de alimentación del Arduino y las conexiones de potencia para actuadores. En la Figura 2.5 y Figura 2.6 se muestra la fuente y la conexión de alimentación a la placa.



*Figura 2.5 - Fuente reguladora de tensión.*



*Figura 2.6 - Conexión eléctrica de 12[V].*

El uso de los pines queda definido por la programación del microcontrolador, es decir, mediante la escritura en líneas de programación a través de la interfaz de IDE de Arduino donde a cada entrada/salida se le asigna una función en el bucle principal.

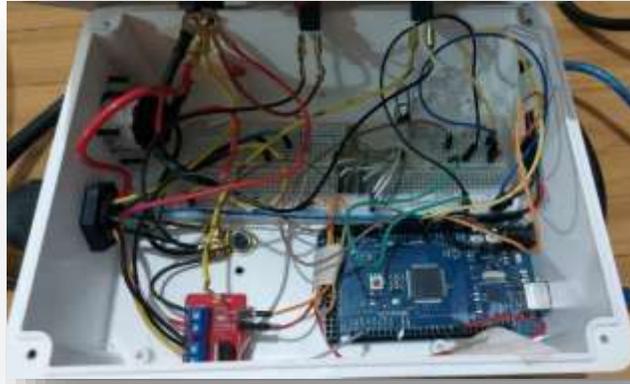
La diferencia entre los pines analógicos y digitales radica en que los pines analógicos se caracterizan por leer valores de tensión de 0 a 5 [V] CC, siendo aptos para la lectura de componentes como potenciómetros, mientras que los pines digitales se caracterizan por captar o enviar señales de solo dos niveles, es decir LOW de 0 [V] CC, o HIGH de 5 [V] CC, siendo aptos en el uso de lecturas de sensores tipo Hall, finales de carrera o salidas como controladores gobernados por pulsos de abierto o cerrado como es el caso del inyector en este trabajo.

En el proyecto desarrollado en este trabajo, las entradas y salidas quedan determinadas en el momento de la programación del código en el microcontrolador. De este modo resulta que: de los pines analógicos se usan los pines A2 y A4 como entradas para la señal del sensor TPS de posición de la válvula del acelerador y el voltaje de referencia de batería para corregir el pulso de inyección según la tensión del sistema. De los pines digitales, el pin 19 se usa como entrada de la señal del sensor de r.p.m y el pin 8 se usa como salida, el cual es el encargado de entregar la señal de control de baja potencia para el inyector de combustible.

Debido a la flexibilidad que presenta este microprocesador, la razón de su elección se menciona en los siguientes ítems:

- Bajo costo de adquisición.
- Entorno de programación simple y claro.
- Código abierto.
- Hardware extensible.
- Robustez y fiabilidad necesaria para el proyecto.

A continuación, en la Figura 2.7, se muestra la placa Arduino MEGA2560 ya montada con un encapsulado para el uso en el proyecto con la aislación de IP65 que garantiza protección contra polvillo y partículas que pueden ocasionar posibles daños.



*Figura 2.7 - Microprocesador Arduino MEGA2560 montada en el encapsulado final.*

## **2.3.2 Software de Programación para Arduino**

### **2.3.2.1 IDE Arduino**

El IDE Arduino (Integrated Development Environment), es un entorno de programación que permite la escritura del código que va a realizar la gestión de cálculo para la dosificación del combustible. Consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica. Una vez que ya se tiene el código listo, el mismo IDE es el responsable de cargar el código a la memoria flash/ROM del microcontrolador.

Los programas de Arduino están compuestos por un solo fichero con extensión “ino”, aunque es posible organizarlo en varios ficheros. El fichero principal siempre debe estar en una carpeta con el mismo nombre que el fichero.

El lenguaje de programación está basado en C y la estructura está compuesta por:

- Void setup
- Void loop

setup() es la configuración, y loop() es la ejecución del bucle de código que lleva a cabo la secuencia lógica de cálculo.

La sección `setup()`, se encuentra siempre al comienzo del programa, en él se configuran los `pinMode`, se inicializa la comunicación serie, etc. La función `setup()` solo se ejecutará una vez, después de cada encendido o cuando se resetea la placa Arduino.

En la sección `loop()` se encuentra el código que será ejecutado, como la lectura de entradas y disparos de salidas.

### **2.3.2.2 Código de Ejecución**

Es el software del sistema que se ejecuta en el microcontrolador de Arduino y lleva a cabo la gestión aritmético/lógica del proceso de dosificación del combustible.

Una alternativa comercial para ECU's originales hoy en día son las "ECU's programables", las cuales permiten la fácil conversión de motores con dosado por carburador a inyección electrónica. Estos equipos pueden ser mapeados y programados fácilmente por medio de una conexión USB a una computadora y modificar sus valores mediante un programa que funcione de interfaz entre el programador y la ECU.

Dentro de las alternativas comerciales que se pueden encontrar en el mercado se pueden mencionar las ECUS's de la marca FuelTech, MegaSquirt, RaceTec, Speeduino, entre otras.

Speeduino no está muy difundida en el mercado, pero es un proyecto de código abierto. Los proyectos de código abierto son los programas informáticos cuyo contenido es accesible por cualquier programador para utilizarlo y modificarlo a gusto. Es por este motivo, que para la gestión lógica del presente proyecto se utilizará el código de gestión proporcionado por la página de Speeduino, el cual se conoce con el nombre de Firmware.

El firmware de Speeduino es el código que alimenta el hardware y se instala en el microprocesador Arduino MEGA 2560 por medio del IDE antes de usar la ECU.

El ciclo principal en el archivo "speeduino.ino" se ejecuta continuamente y tiene dos funciones principales: determinación de los requisitos del motor y configurar los programas de inyección de acuerdo con estos requisitos.

Para la instalación del Firmware en el microprocesador Arduino MEGA2560, se debe iniciar el IDE Arduino, e indicar en la pc en que puerto y que microprocesador se está conectando. Como se puede ver en la Figura 2.8, en la barra superior, en la pestaña “Herramientas” están las opciones de placa y puerto a indicar para poder empezar a trabajar con la placa.

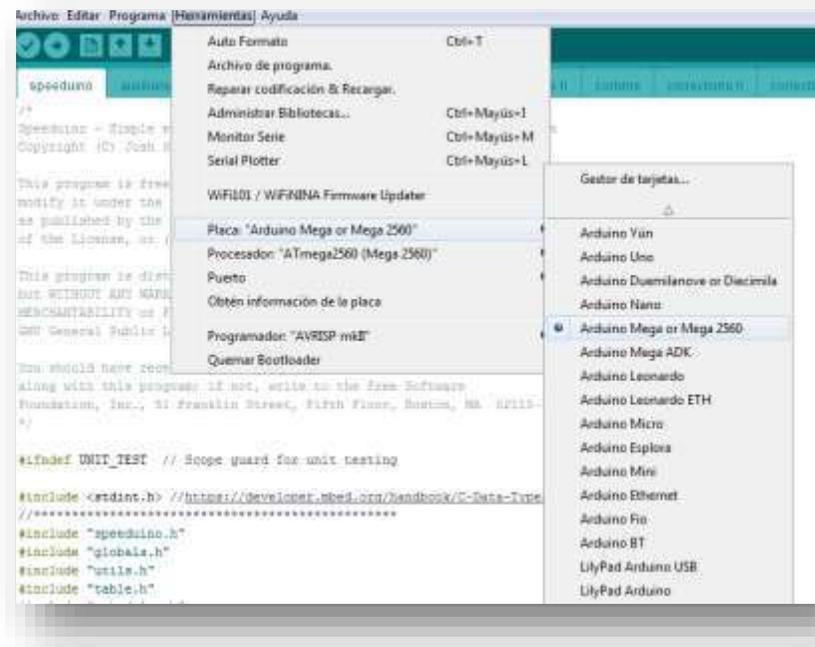


Figura 2.8 - Configuración del microprocesador y puerto.

La descarga del Firmware, se realiza mediante la página web de Speeduino. La misma se puede acceder utilizando el link de la referencia bibliográfica [12].

Una vez descargado, desde el IDE Arduino se realiza la búsqueda del archivo “speeduino.ino” guardado en la carpeta descargada y el entorno IDE se encarga de compilarlo y cargarlo en el microcontrolador.

El desarrollo de las líneas de código es realizado en código ensamblador con soporte de sintaxis para lenguaje C, entendiéndose por lenguaje ensamblador al medio por el cual se representan las instrucciones básicas para los microcontroladores y circuitos integrados programables. Constituye la representación más directa del código específico legible por un programador.

### 2.3.2.3 TunerStudio

Mediante este software se obtiene una interfaz de comunicación entre el microprocesador y el programador.

Por medio de esta interfaz el programador puede ver y modificar las variables del sistema en tiempo real, modificándolas directamente en la memoria del microprocesador sin necesidad de acceder a las líneas de código mediante el IDE Arduino.

La descarga del software se hace directamente de la página EFI Analytics [13].

Una vez descargado se accede a una página de inicio como la de la Figura 2.9:



Figura 2.9 - Página de inicio TunerStudio MS.

Al iniciar el software, se crea un “nuevo proyecto”, a través del cual en los pasos contiguos se va a indicar el firmware que se tiene cargado en el microprocesador, para lograr la comunicación y lectura de parámetros, y las características del algoritmo que va a controlar el sistema. Para más detalles de estos pasos, se puede consultar el manual de Speeduino citado en las Referencias Bibliográficas [12].

### 2.3.3 Sensores

Los sensores son los dispositivos encargados de transformar las variables físicas en variables eléctricas capaces de ser reconocidas e interpretadas por el microcontrolador.

Cada sensor cuenta con características propias que lo definen, tales como: rango de medición, sensibilidad, resolución, tipo de señal provista, precisión, etc.

### 2.3.3.1 Sensor de Posición (recorrido/ángulo)

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

Este sensor consiste en una resistencia variable que regula la intensidad del voltaje de salida, la cual puede variarse a voluntad comandada por un eje solidario a la válvula de mariposa del acelerador.

La curva característica de la señal enviada a la ECU es una curva de comportamiento lineal de tipo analógica como puede observarse en la Figura 2.10, siendo coincidente este tipo de señal, con el tipo de pin asignado en el microprocesador para la lectura de este dato.

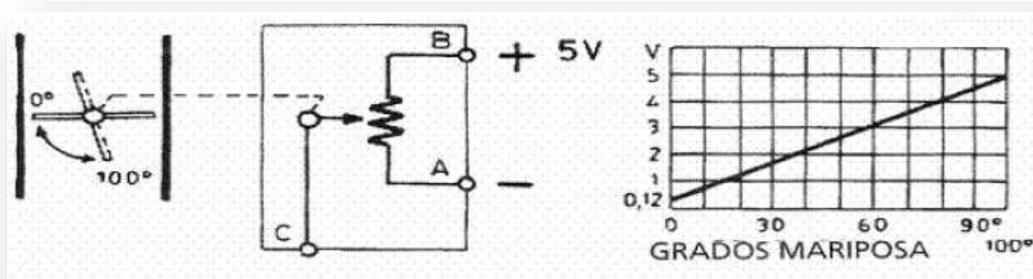


Figura 2.10 - Curva característica del sensor TPS.

El circuito eléctrico consiste en una conexión de alimentación a la fuente de 5 [V], un conductor de señal que envía la señal a la ECU y un circuito de conducción a masa o GND, como se puede observar en la Figura 2.11.

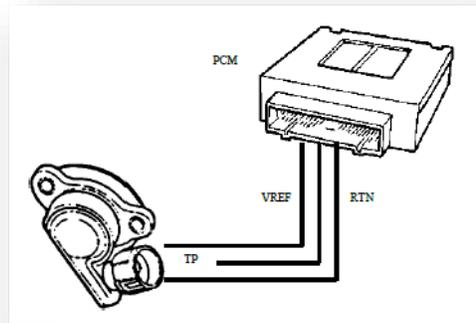


Figura 2.11 - Esquema funcional de sensor TPS.

El sensor con que se trabaja para la construcción del modelo es un sensor de TPS de la marca Ford, perteneciente a un motor ROCAM 1.6 equipado con un sistema de inyección electrónica.

En la Figura 2.12, se puede ver el sensor usado.



Figura 2.12 - Sensor FORD para montaje en motor ROCAM 1.6.

### 2.3.3.2 Sensor de Rotación/R.P.M

Este sensor es el encargado de captar los incrementos y decrementos de velocidad de giro del motor. Este sensor es conocido como sensor CKP (Crankshaft Sensor Position).

Existen dos sensores de uso generalizado para este fin, diferencia que radica en el principio de funcionamiento de ellos. Uno se basa en el funcionamiento inductivo y el otro en el principio de efecto Hall.

Para el relevamiento del dato de R.P.M de giro, en este proyecto se optó por la utilización de un sensor de rotación de tipo Hall.

Este sensor está conformado por un circuito semiconductor Hall y un generador magnético, que por lo general se trata de un imán fijo.

La entrada asignada mediante software en el microcontrolador Arduino es una entrada de tipo digital, por lo que la señal que llega es una serie de pulsos de onda cuadrada de 0 [V]-5 [V] CC cuya frecuencia representa la velocidad de giro del motor.

Los sensores CKP de efecto Hall cuentan con tres líneas. La primera es la línea de alimentación de 5 [V], la cual será alimentada por la placa Arduino. La segunda es la línea de tierra conocida como GND (Ground), común a ambas líneas. La tercera línea es la de señal. Esta se encarga de enviar un voltaje al pin de señal del microprocesador Arduino. Este voltaje es suministrado por la línea 1 de alimentación por medio de una resistencia de alto valor óhmico para evitar la circulación de corriente y permitir una correcta polarización del transistor del circuito Hall.

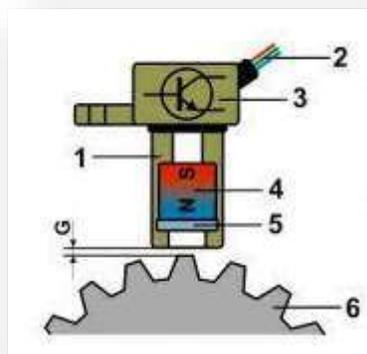
En el momento que el motor gira, una rueda dentada, conocida generalmente como “rueda fónica”, que gira solidaria al cigüeñal, va posicionando sus dientes y hueco frente al sensor. En el instante que un hueco se encuentra frente al sensor, el voltaje en la línea de señal de la ECU se mantiene y no hay caída, pero cuando rota y frente al sensor se posiciona un diente de la rueda, esta provoca una caída de tensión en la línea de señal de la ECU al invertir la polaridad del imán y conducir a masa la señal de tensión. Este efecto es el encargado de generar la señal digital de unos y ceros que se necesita en la entrada de señal del microprocesador Arduino para tener una señal de tipo digital.

Teniendo presente el requisito para la entrada al microprocesador y basándome en el principio de funcionamiento del sensor CKP de efecto Hall, se opta por el uso de un sensor

de este tipo. La ventaja en la elección de este sensor está fundada en que su uso no requiere del acondicionamiento de la señal a la entrada, lo que conlleva una simplificación del sistema y reducción de tiempos, ya que, la señal al pasar por cada componente electrónico va sufriendo retrasos y el factor de tiempo en estos sistemas es de suma importancia por trabajar en el orden de los [ms].

Al usar solo la rueda fónica del cigüeñal para determinar las R.P.M y la carrera en la que se encuentra el motor, la rueda dentada debe tener un diente 'faltante'. Las ruedas con dientes faltantes probadas actualmente son 4-1, 12-1, 36-1 y 60-2.

En la Figura 2.13, se muestra un sensor de efecto Hall. En esta imagen se puede observar sus distintos componentes, siendo el más importante el circuito Hall 3 y el imán fijo 4. En lo que respecta al entrehierro G se debe lograr una distancia, que por lo general, está entre 0,5 [mm] y 1,2 [mm] para garantizar lecturas correctas



*Figura 2.13 - Conjunto Sensor CKP y rueda dentada.*

En la Figura 2.14, por su parte, se muestra el esquema de una rueda dentada con un diente faltante.

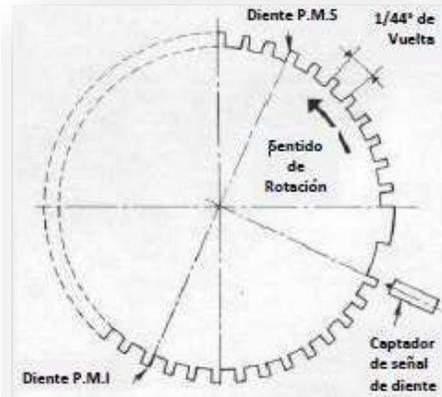


Figura 2.14 - Esquema rueda fónica.

En la Figura 2.15 se presenta el esquema eléctrico que se debe realizar para la instalación eléctrica del sensor utilizado en el proyecto. Entre el pin 1 de alimentación y la línea de señal 2 se puede ver la resistencia de 1 [kΩ] para evitar la circulación de corriente, como se explicó en párrafos anteriores.

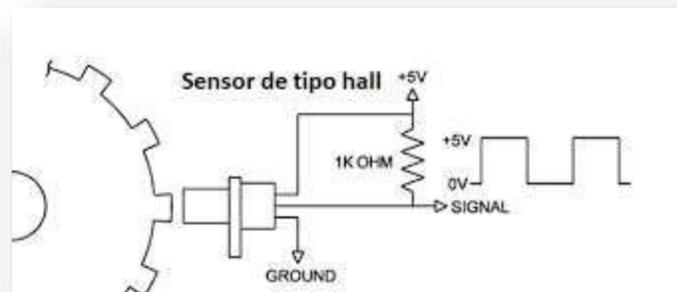


Figura 2.15 - Esquema eléctrico de sensor CKP.

El sensor que se usa corresponde a la marca Volkswagen, perteneciente al sensor de fase de leva de Amarok 2.0 TDI y una rueda fónica de 60 dientes universal de 114 [mm] de diámetro, usada generalmente para motores preparados para ¼ de milla con adaptación de sistema de inyección electrónica, la cual posteriormente se debe trabajar para tapan un hueco. En las Figura 2.16 y Figura 2.17 se muestra el sensor y rueda fónica utilizados.



*Figura 2.16 - Sensor de efecto Hall.*



*Figura 2.17 - Rueda fónica universal de 60 dientes.*

### **2.3.4 Actuadores**

Una vez interpretado por la ECU el estado del motor y la demanda del usuario, ésta envía la señal de salida para realizar la acción de control sobre la dosificación de combustible.

Para esto, el sistema, cuenta con un inyector y un conjunto de componentes adicionales que garantizan el suministro de combustible a presión necesario. Este conjunto de componentes conforman la línea de alimentación de combustible a presión.

### 2.3.4.1 Inyector – Módulo de Control IRF520

El inyector es el encargado de llevar a cabo la dosificación del combustible. Está conformado por un solenoide que se acciona eléctricamente y permite el paso de combustible de manera precisa y controlada, logrando una correcta pulverización para una mejor formación de la mezcla en el conducto de admisión.

Según el valor óhmico del solenoide, estos se pueden conocer como inyectores de baja o alta impedancia, teniendo estos últimos generalmente valores mayores a los 8 [ $\Omega$ ] de resistencia en sus bobinas. En la Figura 2.18 se muestra un esquema constructivo de un inyector tomado del manual de una ECU programable MegaSquirt.

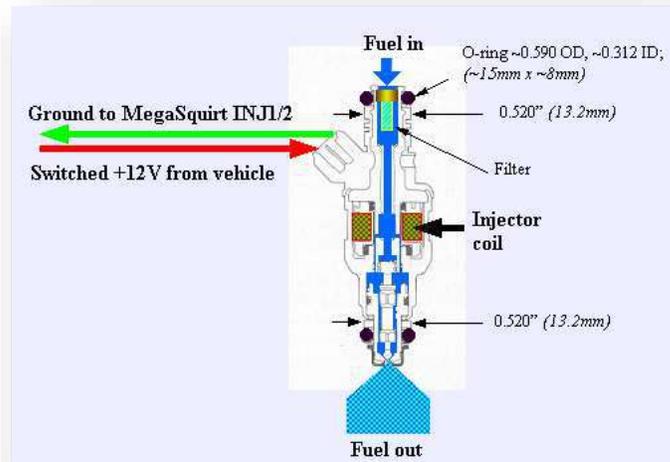


Figura 2.18 - Esquema constructivo de un inyector [14].

Para inyectores de alta impedancia, el funcionamiento radica en excitarlo con una tensión de batería de 12 [V] CC suministrada directamente de la fuente, de manera que la bobina que

tiene en su interior al estar magnetizada, desplaza una aguja y permite el paso de combustible por los orificios de salida.

En el oscilograma de la Figura 2.19 se puede ver una onda genérica del pulso de inyección medido directamente sobre el bobinado del inyector. En la misma se observa como la tensión de alimentación es conmutada a GND durante el tiempo estimado por la ECU. Al conmutar nuevamente el pulso a un nivel alto, se genera un pico de tensión como consecuencia de la corriente autoinducida por el bobinado del inyector.

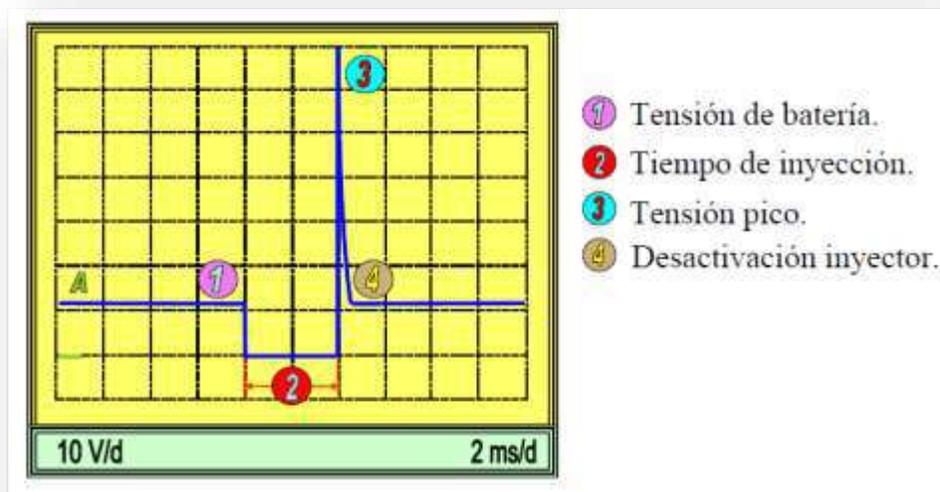


Figura 2.19 - Tiempo de inyección.

En la mayoría de las instalaciones de inyección de combustible, la apertura y el cierre se logran cambiando la conexión a tierra del inyector, es decir, el suministro de 12 [V] es continuo mientras el motor esté funcionando y el microprocesador abre/cierra el inyector al proporcionar una ruta a tierra por medio de un transistor de potencia, conocidos generalmente como “drivers de salida”. El transistor, es el encargado de transformar la señal de control de baja potencia entregada por el pin de salida del microprocesador en una señal de potencia adecuada para el funcionamiento del inyector. La señal de control del pin de salida de la ECU, conmuta la base del transistor mediante una corriente muy baja, inferior a 50 [mA] evitando que la ECU esté sometida directamente a la tensión de batería.

Los transistores aptos para este tipo de aplicaciones generalmente son transistores de tecnología MOSFET cuya ventaja radica en la velocidad de conmutación que brindan entre su entrada y salida, siendo el MOSFET de potencia el interruptor de baja tensión más utilizado en la mayoría de las aplicaciones de menos de 200 [V].

Suponiendo una resistencia del bobinado de 12 [ $\Omega$ ] y una tensión de alimentación de 12 [V] CC, utilizando la Ley de Ohm, expresada en la Ecuación [1], se obtiene la corriente nominal de consumo.

$$I = \frac{12[V]}{12[\text{ohm}]} = 1 \text{ [A]} \quad [1]$$

Al ser Arduino un microprocesador apto para diversos proyectos de automatización y robótica, ya cuenta con múltiples módulos adicionales que facilitan el ensamble de proyectos. Es así, que el módulo Arduino IRF520, es la opción que más se ajusta al proyecto para poder realizar el control del inyector. Este tipo específico de transistor es de efecto de campo MOSFET semiconductor de óxido metálico diseñado para manejar niveles de potencia significativos, cuyo modelo se puede observar en la Figura 2.20.



*Figura 2.20 - Módulo Arduino IRF520.*

El módulo IRF520 está diseñado para conmutar cargas de CC pesadas desde un solo pin digital de la placa Arduino o cualquier microcontrolador de 5 [V]. Los terminales de tornillo

se proporcionan para conectar la carga con una fuente de alimentación externa. Un indicador LED proporciona una indicación visual de cuándo se está cambiando su carga.

El módulo IRF520, por tratarse de un transistor que se activa mediante una señal de pulsos digitales, se activa mediante la señal emitida por un pin digital de la placa Arduino MEGA2560 configurado para tal fin al cargarle el software. Como el modelo de este sistema cuenta sólo con un inyector, se puede usar cualquier pin de los asignados por software como salida, siendo el pin digital numero 8 el usado para este caso.

En la Tabla 5 se muestran las características del módulo IRF520 y en la Figura 2.21 se muestra el esquema eléctrico interno del módulo y los pines de conexión al circuito.

Módulo IRF520	Parámetros
Voltaje de control [V-TTL]	5
Voltaje de salida [V- DC]	0 – 24
Corriente máxima [A]	9
Corriente nominal [A]	6

Tabla 5 - Características técnicas módulo IRF520.

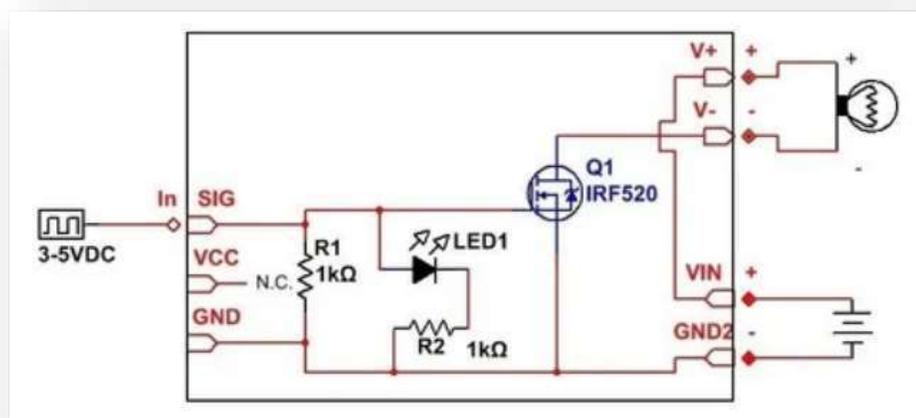
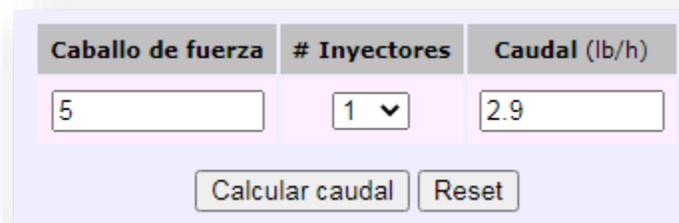


Figura 2.21 - Esquema eléctrico módulo IRF520.

Para la selección del inyector, se parte de una primera aproximación usando una calculadora de la página oficial de MegaSquirt para lo cual basta con conocer la potencia al freno estimada del motor y la cantidad de inyectores con que cuenta el sistema. El resultado de esta primera aproximación se puede ver en la Figura 2.22 a continuación.



Caballo de fuerza	# Inyectores	Caudal (lb/h)
5	1	2.9

Calcular caudal    Reset

*Figura 2.22 - Cálculo del caudal del inyector [14].*

Tomando el inyector perteneciente a un sistema de inyección multipunto, montado en un motor Rocam 1,6 que equipa usualmente los autos, por ejemplo, Ford EcoSport, por su disponibilidad física y comparando los requisitos de corriente nominal de consumo y resistencia del bobinado, se decide por la utilización del mismo. En la Tabla 2.4 y en la Figura 2.23 se muestran las características técnicas y una imagen del inyector.

En contrapartida, de la Tabla 6 se tiene que el caudal es 5 veces mayor que lo requerido, viéndose reflejado en una reducción del ancho del pulso de inyección.

Característica del Inyector	Parámetro
OEM nro	0280155925
Tipo	Inyector de combustible
Agujeros por boquilla	4
Flujo (a 3 [bar]) [g/min]/[lb/hs]	123/16,27
Voltaje de funcionamiento	12 ± 0,5 [V]
Resistencia de la bobina [Ω]	12
Temperatura de funcionamiento [C]	− 40 [C] ≈ 125 [C]
Presión de combustible [bar]	2 – 4,5
Líquido de servicio	Nafta

Tabla 6 – Características técnicas del inyector.



Figura 2.23 - Inyector de motor FORD ROCAM 1.6.

## 2.4 ADAPTACIÓN DEL SISTEMA SOBRE EL MOTOR

Para el montaje de los componentes del sistema es necesario hacer una serie de adaptaciones sobre el motor.

Para esto se debe realizar el diseño y fabricación de soportes para ensamblar y sujetar los distintos componentes del sistema sobre el motor a ensayar.

Para esto, usando el software de diseño mecánico SolidWorks [16], se procederá a realizar el diseño mecánico, elaborando los planos necesarios para su posterior fabricación.

Para la fabricación de estas piezas, se elige la impresión 3D, realizada por un tercero. El equipo encargado de realizar la tarea es una impresora Hellbot Magna 1 [17], cuyo material para la confección de piezas es el filamento PETg [18]. Según la ficha técnica de este material, se considera adecuado como material de construcción para los soportes, ya que, por sus características se trata de un plástico muy resistente a esfuerzos mecánicos, es químicamente estable frente a ácidos y bases, requerido por estar en contacto con hidrocarburos, y su adherencia entre capas es excelente.

#### **2.4.1 Cuerpo de Admisión**

El cuerpo de admisión es el encargado de suministrar el caudal de aire necesario al motor, regulándolo a través de la válvula de mariposa.

Según el apartado del libro “Trucaje de Motores 4 Tiempos” del autor Miguel de Castro Vicente, del capítulo 3 [19], se tiene que partiendo del diámetro del difusor para un cuerpo de admisión, con el gráfico de la Figura 2.24 y mediante la fórmula de la Ecuación [2] se puede encontrar el diámetro del cuerpo a utilizar:

$$D_d = D_c * (0,7 \dots 0,9) \quad [2]$$

Donde

- $D_d$ =Diámetro del difusor.
- $D_c$ =Diámetro del cuerpo.
- (0,7 ... 0,9) es un coeficiente que se utiliza según se busque mejorar potencia o aceleración.

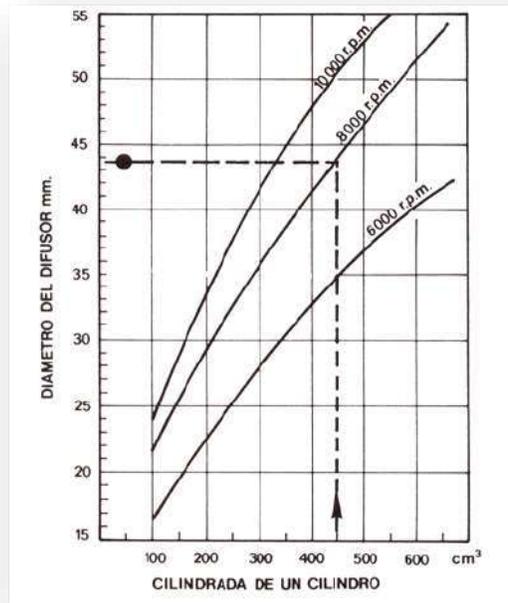
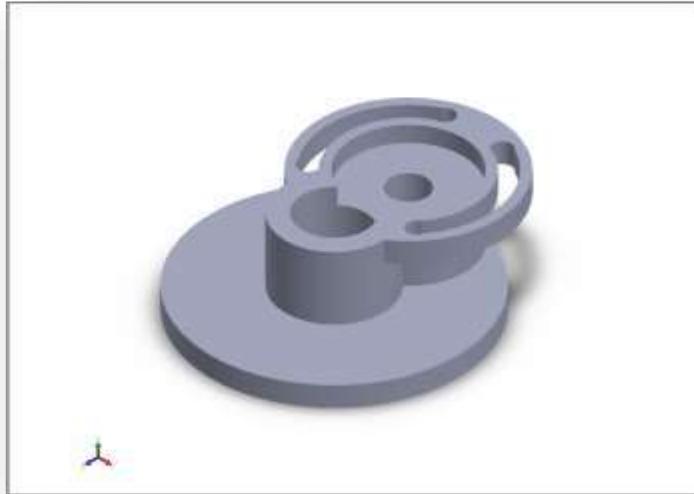


Figura 2.24 - Gráfico de difusor de admisión de motores 4 tiempos [19].

Tomando la mejor aproximación para este proyecto, con la curva de 6000 R.P.M y un coeficiente de 0,8, resulta un  $D_d \approx 20$  [mm], de lo que trabajando algebraicamente de la Ecuación [2]; resulta  $D_c = 25$  [mm]. Para su construcción se adaptará un carburador de un motor de similares prestaciones, cuyo diámetro coincida con lo estimado por cálculo. Haciéndole los recortes necesarios para poder usarlo como válvula de aceleración se logrará generar el giro del eje del potenciómetro de TPS.

Para montar el sensor TPS, con el uso de SolidWorks se realizará el diseño de una tapa a medida que permita la adaptación del sensor y se pueda vincular al eje de la válvula de mariposa, tal como se puede ver en la Figura 2.25. El plano de la pieza se adjunta en el Anexo A – PLANO N°5.



*Figura 2.25 - Diseño en SolidWorks de "soporte cuerpo de aceleración".*



*Figura 2.26 - Soporte TPS.*

El resultado final de la fabricación del soporte para este componente se puede ver en la Figura 2.26.

La sujeción del cuerpo de admisión al motor, será mediante una brida diseñada a medida como la mostrada en la Figura 2.27. Con su posterior fabricación mediante impresión 3D, todo el conjunto del cuerpo de admisión, se montará sobre un porta-inyector, para lo cual, la vinculación de ambas parte, se realizará a presión con un junta tórica tipo “oring” y un sujetador metálico tipo abrazadera.



*Figura 2.27 - Diseño de brida para cuerpo de admisión.*

El porta-inyector a utilizar, será seleccionado directamente del mercado. Dentro de las terminales de fabricación de componentes originales OEM, se determina que el porta inyector utilizado en un motor equipado con inyección electrónica colocado normalmente en los modelos de la marca YAMAHA, tal como se muestra en la Figura 2.28, resulta ser la opción más ajustada al proyecto desarrollado.



*Figura 2.28 - Porta-inyector de motor YAMAHA.*

En la Figura 2.29, se puede ver el cuerpo de admisión ya montado sobre el motor como resultado final.



*Figura 2.29 - Cuerpo de admisión.*

#### **2.4.2 Línea de Combustible**

Para poder pulverizar el combustible en forma de una fina llovizna y poder lograr una buena mezcla con el aire, el inyector requiere trabajar con presión en el orificio de entrada de combustible.

Para esto, el sistema, cuenta con una línea de alimentación encargada de entregar el combustible en las condiciones requeridas, la cual está conformada por:

- Depósito de combustible.
- Bomba de presión.
- Filtro de línea.
- Conductos de transporte de combustible.
- Riel común de presión.
- Regulador de presión.

Para el sistema Motronic, la presión ejercida sobre la rampa de inyección, es cercana a los 3 [bar], presión de trabajo requerida para el inyector utilizado.

La bomba de combustible es la encargada de elevar la presión en la línea de transporte por medio de un motor eléctrico que impulsa una turbina. El motor eléctrico es alimentado por una tensión de 12 [V] CC directamente de la fuente de energía. El encendido está comandado

directamente por la llave de contacto del sistema y el circuito eléctrico está protegido por un fusible de 3 [A] ante cualquier anomalía que pueda presentarse en la alimentación eléctrica.

La bomba se monta en el depósito de combustible, es de la marca FISPA y se extrajo del mismo sistema de inyección que equipa el motor Ford Rocam 1.6.

Una vez que se tiene el combustible a presión, mediante el uso de mangueras para aplicaciones con hidrocarburos, se transporta el combustible desde el depósito hasta la zona del inyector. En la línea de transporte, se intercala un filtro de línea, para retener cualquier partícula que pueda ingresar al depósito durante el llenado del mismo y además proteger el sistema de suciedad, ya que, por tratarse de orificios de una sección muy pequeña, la presencia de partículas pueden provocar taponamiento.

Una vez con el combustible en la zona del inyector, mediante un conducto, conocido normalmente como “Riel Común de Presión” se encarga de regular y estabilizar la presión, para el suministro al inyector mediante un regulador de presión a membrana y resorte, como el de la Figura 2.30, el cual deriva el combustible excedente por una línea de retorno al depósito del combustible.

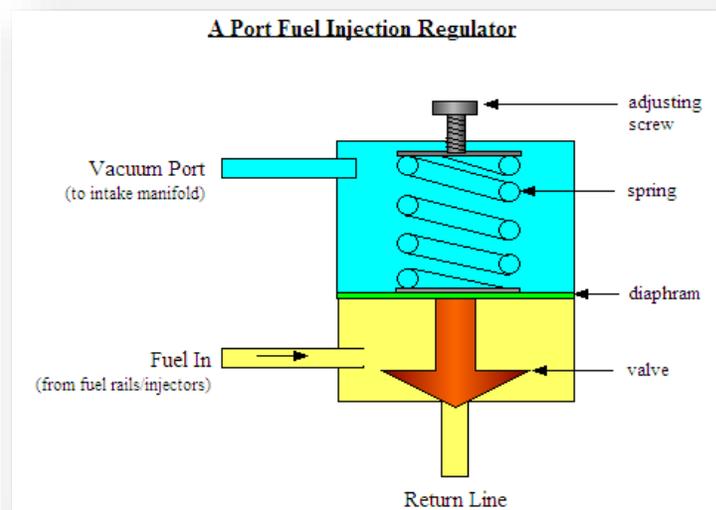


Figura 2.30 - Regulador de presión [14].

El Riel Común de Presión es diseñado para cada aplicación en particular. Para el sistema a armar se recorta el riel del sistema de inyección del motor ROCAM 1.6, y se utiliza el extremo en que se encuentra montado el regulador de presión, tal como se puede ver en la Figura 2.31.



*Figura 2.31 – Riel Común de Presión recortado.*

Finalmente, para montarlo en el motor, el conjunto del riel con el regulador se acopla al inyector y se sujeta mediante un soporte de chapa que le permita estar fijo en la posición de trabajo.

### **2.4.3 Sensor CKP**

Como ya se describió en la sección 2.3.3.2, el sensor CKP trabaja en conjunto con una rueda dentada, generalmente fijada en unos de los extremos del cigüeñal. Esto requiere que el sensor se deba montar cercano a esta zona.

Para resolverlo, se opta por el diseño y fabricación de un soporte con las características requerida, tal como se hizo para las adaptaciones anteriores, mientras que para la rueda dentada la solución más acorde es la fabricación de un acople mediante el uso de un torno paralelo.

Para el soporte, el plano mecánico para su fabricación se puede encontrar en el Anexo A mientras que en la Figura 2.32 se puede ver el proceso de diseño en SolidWorks.



*Figura 2.32 - Diseño soporte CKP.*

En la Figura 2.33 y Figura 2.34 se puede ver el conjunto ya montado sobre el motor como resultado final.



*Figura 2.33 - Conjunto rueda fónica/sensor CKP.*



*Figura 2.34 - Rueda fónica.*

#### **2.4.4 Cableado de Sensores**

En el Anexo A, se muestran los planos correspondientes tanto del conexionado como del circuito eléctrico. En el Plano N°1 “Diagrama Funcional”, se muestra el conexionado de los componentes, mientras que en el Plano N2 “Esquema Eléctrico” se puede encontrar al detalle cada punto de conexión del arnés con los pines de cada componente.

#### **2.4.5 Adaptación Sobre el Motor**

Una vez fabricadas las piezas, se procede al montaje sobre el motor de ensayo, obteniendo como resultado final el modelo mostrado en la Figura 2.35.



*Figura 2.35 - Cableado de ECU y motor.*

### 3 GESTIÓN ELECTRÓNICA-PUESTA EN MARCHA

---

El objetivo del controlador de inyección es interpretar las lecturas que se obtienen de los sensores ubicados en el motor y realizar la apertura del inyector de manera correcta, con el fin de cumplir los requisitos de exigencia que pretende el usuario del motor.

En base a esto, se tiene que la central electrónica a implementar, es la responsable de emitir la orden del tiempo de apertura del inyector.

Como primera medida la central electrónica debe ser capaz de reconocer la posición angular del cigüeñal, mediante la información emitida por el sensor de revoluciones y tener la capacidad de recibir e interpretar el ángulo  $\alpha$  de la posición de la válvula de mariposa. Luego tiene que tener la rapidez necesaria para ejecutar la orden de apertura del inyector de manera de cumplir con la dosificación.

Para garantizar que todos los parámetros sean óptimos para el correcto funcionamiento del motor, la ECU utiliza lo que se suele conocer como “estrategias de gestión”. Estas consisten en determinar cómo se va a calcular el combustible a inyectar a partir de las señales disponibles a relevar en el motor.

#### 3.1.1 Estrategia de Gestión Alpha-N

Cuando las variables involucradas para el cálculo del estado del motor son solo la posición del TPS para la carga y las RPM del motor, la estrategia que se usa se conoce como Alpha-N.

Esta estrategia consiste en usar únicamente el ángulo ( $\alpha$ ) de apertura de la mariposa, y el número de revoluciones ( $n$ ) para calcular la cantidad de combustible a inyectar en lugar de usar la presión absoluta del conducto de admisión o el caudal de aire ingresado, como lo hace el sistema Motronic.

Definiendo el WOT Efectivo como el punto a partir del cual se tiene suficiente aceleración, tal que, al abrir más la válvula de mariposa de aceleración no modificará la cantidad de aire que ingresa al motor, la desventaja que presta la estrategia Alpha-N es que no se sabe dónde

está este punto. Esta desventaja puede presentar el inconveniente, por ej., que a bajas RPM, el WOT podría tener solo un 20% de aceleración, y se vuelva un parámetro difícil de ajustar. Este punto tiene una relación no lineal y depende críticamente del tamaño del cuerpo de la mariposa, es decir, un cuerpo de mariposa excesivamente grande, provocaría que con un ángulo de apertura de mariposa bajo, el motor ya se encuentre acelerado al máximo. En el proyecto, a través del software TunerStudio MS se indica el tipo de estrategia que gobierna el cálculo del tiempo de inyección. Esto se logra configurando el control del algoritmo en la ventana emergente de la sección “Settings → Engine Constants” como se muestra en la Figura 3.1.



Figura 3.1 - Configuración de estrategia Alpha-N.

Una vez configurada la estrategia a usar, se debe configurar la rueda fónica con que cuenta el sistema y calibrar el TPS para que la ECU pueda tener una correcta interpretación del estado del motor.

En la pestaña “Settings → Trigger Settings” tenemos una ventana emergente, mostrada en la Figura 3.2.

Entre los ítems que se deben configurar en esta ventana está el “Trigger Pattern” el cual le indica al software que cuenta con una rueda de diente perdido. Luego con los ítems “Primary

base teeth” y “Missing teeth” se le indica la cantidad de dientes de la rueda y la cantidad que se dan como perdidos. Por otra parte, el ítem “Primary trigger speed” es el responsable de determinar que la señal está determinada por el cigüeñal.

Por su parte “Trigger Angle” se trata de un valor que determina el ángulo del cigüeñal después del punto muerto superior, cuando el diente perdido de la rueda fónica se encuentra posicionado en frente del sensor. Este valor hace que la ECU conozca con precisión la posición del cigüeñal y determine el momento de la inyección. Para determinar este valor, se coloca el motor en el punto muerto superior y con la ayuda de una rueda graduada, situada en cero, se hace girar el motor hasta posicionar el diente perdido frente al sensor. Así, el ángulo resultante, es el ángulo a cargar en el software.

Finalmente “Skip Revolutions” es un valor establecido por defecto y representa la cantidad de vueltas que gira el motor durante el encendido antes de que la ECU comience a dar los pulsos de inyección.



Figura 3.2 - Configuración rueda fónica 60-2.

El resto de los items quedan sin configurar ya que son necesarios en caso de contar con sensor de fase de leva, no siendo la situación de este proyecto.

En lo que respecta a la calibración del potenciómetro del TPS, en la pestaña “Tools” de la barra superior, se encuentra la opción para la calibración surgiendo una ventana emergente donde se tiene un casillero que nos marca la posición cerrada y el otro la posición completamente abierta de la válvula de mariposa del cuerpo de aceleración. Estos valores pueden ir desde 0 hasta 256, que son los posibles valores que admite una señal de tipo analógica en una entrada asignada para una señal de este tipo en el microprocesador Arduino. Lo recomendable es comenzar por un valor para mariposa cerrada, que oscile en alrededor del valor 10 y un valor, para mariposa abierta, algo inferior a 256 para evitar posible errores en la posición.

Una vez calibrado el sensor, el firmware es el encargado de determinar el ángulo  $\alpha$  para cada valor leído entre 0 y 256 de la entrada. En la Figura 3.3 se muestra la ventana para la calibración del TPS.

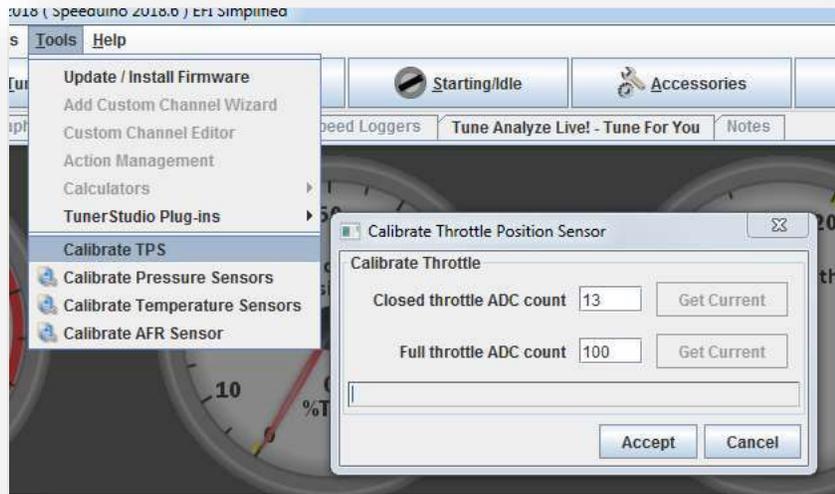


Figura 3.3 - Calibración de TPS.

**Nota:** Estos parámetros, deben ser configurados antes de poner en funcionamiento por primera vez el sistema. Solo se debe garantizar tener el swich de alimentación en la posición de ON para permitir la energización de la ECU y los sensores.

### 3.1.2 Cálculo de Combustible

La cantidad de combustible inyectado depende de varios factores:

- Ley de Gases Ideales que relaciona la cantidad de aire con su presión, volumen y temperatura, (esta es una parte fundamental del código grabado en la memoria ROM).
- Valores medidos: rpm y carga del motor. (se toman de las medidas de los sensores).
- Parámetros de ajuste: REQ\_FUEL (combustible requerido)

La ECU, utiliza todos estos factores para determinar el ancho del pulso de combustible: los anchos de pulso más largos significan más combustible (más rico), los anchos de pulso más cortos significan menos combustible (más pobre).

### 3.1.2.1 Ley de Gases Ideales

Un gas ideal obedece a la relación:

$$PV = nRT \quad [3]$$

Dónde:

**P** = presión.

**V** = volumen.

**n** = número de moles (que está relacionado con la masa del gas, es decir, 1 mol =  $6,023 \times 10^{23}$  moléculas del gas, y **M** = masa (en gramos)/masa molar (MM).

$$n = \frac{M}{MM} \quad [4]$$

**R** = la constante de los gases ideales.

**T** = la temperatura absoluta.

Para saber cuánto combustible inyectar, la ECU necesita saber cuánto aire ingresó al motor para lograr la mezcla químicamente correcta ("estequiométrica"). La temperatura en esta ecuación es "temperatura absoluta" medida en Kelvin.

La eficiencia volumétrica (VE) es un porcentaje que indica la relación entre la masa de aire que entró en el cilindro y la que teóricamente debería haber entrado. Conociendo el volumen (V) por el desplazamiento del motor la ECU puede calcular la masa de aire (M) en el cilindro (proporcional a n).

Despejando n de la Ecuación [3]:

$$n = \frac{P.V}{R.T} \quad [5]$$

Despejando M de la Ecuación [4] y reemplazando en la Ecuación [5], se tiene que:

$$M = \frac{P.V}{R.T} * MM \quad [6]$$

Ya que:

$P = VE * MAP$  (es decir, la presión en el cilindro en kPa),

$V = CYL\_DISP$  = el desplazamiento de un cilindro (en litros),

$R = 8,3143510 \text{ J/mol K}$

$T = (IAT-32) * \frac{5}{9} + 273$  para convertir IAT de °Fahrenheit a Kelvin.

La Ecuación [6] se puede expresar como:

$$M = (VE * MAP * CYL\_DISP) / (R * (IAT - 32) * \frac{5}{9} + 273) * MM_{aire} \quad [7]$$

### 3.1.2.2 Combustible Requerido REQ\_FUEL

REQ\_FUEL (abreviatura de "combustible requerido") es un parámetro de ajuste por medio del cual se le indica a la ECU el tamaño del inyector que equipa el sistema y cuál es la capacidad de sus cilindros con el término (CYL\_DISP). Este parámetro es representativo del período de tiempo en milisegundos [ms] que debe permanecer abierto el inyector para dar la cantidad de combustible, relación aire/combustible de 14,7 para naftas, con una eficiencia volumétrica VE=100%, una presión absoluta del colector (MAP) de 100 [kPa] y una temperatura del aire de 70 grados Fahrenheit y un barómetro de 30 In Hg, por cada ciclo de carrera completo, entendiendo como ciclo completo para un motor de 4 tiempos dos vueltas de cigüeñal. [14]

REQ\_FUEL se calcula a partir de la Ecuación [8]:

$$REQ\_FUEL * 10 = 36.000.000 * CID * \frac{AIRDEN(100[kPa],70[F])}{NCYL*AFR*INJFLOW} * 1/DIVIDE\_PULSE \quad [8]$$

Dónde:

**36,000,000** es el número de décimas de milisegundo en una hora, que se usa para obtener las libras por 1/10 de milisegundo de la clasificación de libras/hora de los inyectores.

**REQ\_FUEL** = Tiempo de apertura del inyector calculado en décimas de milisegundo.

**CID** = Desplazamiento en pulgadas cúbicas.

**AIRDEN** = Densidad del aire (libras por pulgada cúbica) a una presión MAP de 100 [Kpa], temperatura de 70 grados [F] y presión barométrica de 30,00 [InHG]

**NCYL**=Número de cilindros.

**INJFLOW** = Tasa de flujo del inyector en libras por hora.

**DIVIDE\_PULSE** = cantidad de chorros de inyección a realizar por ciclo del motor. Este valor tiene en cuenta el tipo de inyección intermitente con que cuenta el sistema: simultánea, semisecuencial o secuencial. Por ej.: si se aplican dos chorros simultáneos, REQ\_FUEL se divide por la mitad, ya que debe inyectar la mitad de combustible en cada disparo.

La función **AIRDEN** (utilizada anteriormente) está definida por la Ecuación [9] en unidades métricas ( $\text{kg/m}^3$ , °C, kPa) como:

$$\text{AIRDEN}(\text{MAP}, \text{temperatura}) = 1.2929 * 273.13^{\frac{1}{T+273.13}} * \frac{\text{MAP}}{101.325} [9]$$

Dónde:

- **MAP** = Presión de aire del múltiple en [kPa],
- **Temp** = Temperatura del aire en grados [F],
- **459.7** se usa para convertir de Fahrenheit a temperatura absoluta,
- **1728** se usa para convertir de libras por pie cúbico a libras por pulgada cúbica.

REQ\_FUEL queda definido en el código al cargar los valores de las constantes del motor, como se puede observar en la Figura 3.4. En la pestaña desplegable “Settings->Engine Constants” de la barra de parámetros configurables en el software TunerStudio MS es donde se va a realizar la configuración de este parámetro.

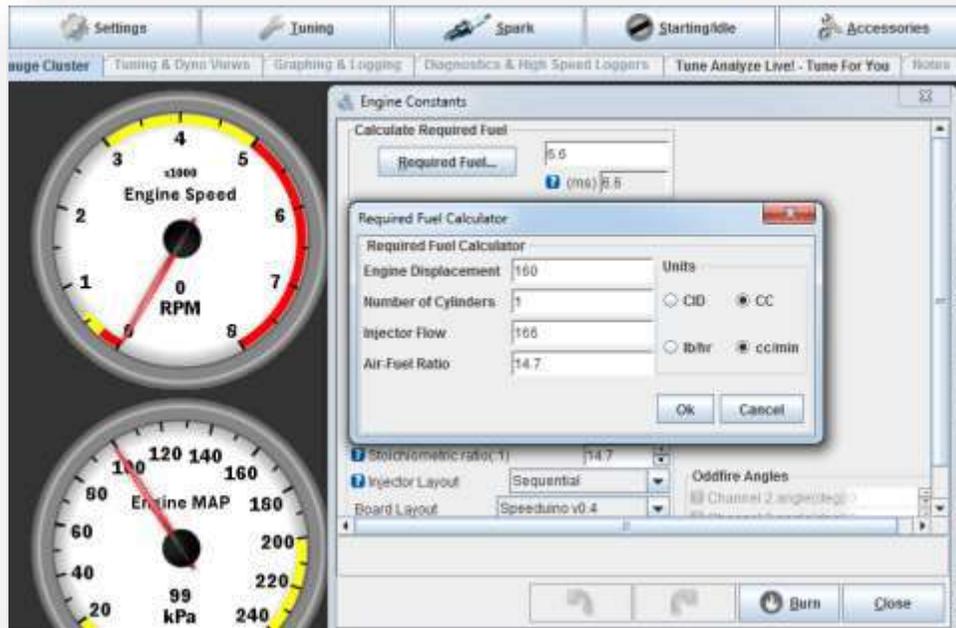


Figura 3.4 - Cálculo de combustible requerido REQ\_FUEL.

### 3.1.2.3 Ecuación de Combustible

Para configurar las curvas de combustible para el motor, la ECU tiene una serie de parámetros con lo que trabajar como lo son el combustible requerido, la relación de mezcla aire/combustible y la eficiencia volumétrica (VE).

Combinando estos parámetros, resulta la ecuación de combustible PW, la cual dará como resultado un tiempo en [ms] que debe permanecer abierto el inyector afectado de un número de factores de corrección.

Es así, que PW queda expresado por la Ecuación [10] de la siguiente manera:

$$PW = REQFUEL * VE * MAP * E + accel + Injector\_open\_time [10]$$

Gamma\_Enrich (E) es el factor de escala aplicado al valor REQ\_FUEL, junto con VE (RPM,TPS) y MAP.

El término "E" es el resultado de multiplicar todos los enriquecimientos, como el calentamiento después del arranque, el valor de ajuste de lazo cerrado de Lambda y la corrección de densidad y presión del aire basados en temperatura:

$$E = \text{GammaEnrich} = \left(\frac{\text{Calentamiento}}{100}\right) * (\text{O2Lazocerrado}/100) * \left(\frac{\text{AirCorr}}{100}\right) * (\text{BaroCorr}/100) \quad [11]$$

Para todas las correcciones, 100 % significa que no hay enriquecimiento ni mejora, ya que el valor se normaliza por 100 para obtener un multiplicador fraccionario, tal como se menciona en la referencia bibliográfica [14] de MegaSquirt.

El primer miembro de la ecuación de combustible, por tratarse de un sistema a lazo abierto sin realimentación de sonda lambda, cuya estrategia de gestión es Alpha-N, se convierte en un término de la siguiente forma mostrado en la Ecuación [12]:

$$PW = REQFUEL * VE(tps, rpm) \quad [12]$$

El “enriquecimiento por aceleración” representa la tasa de cambio de la posición del acelerador definido por el parámetro “TPSdot” con unidades de (%/s), el cual es un delta de tiempo. Los números más bajos corresponden a aceleraciones más suaves, mientras que los valores más elevados representan los cambios de aceleración más bruscos.

Para configurar el “enriquecimiento de aceleración”, en la pestaña desplegable “Tuning → Acceleration Enrichment”, en la ventana emergente se muestra una curva configurable, como en la Figura 3.5, donde, el eje X está determinado por el parámetro TPSdot y el eje Y por el porcentaje extra de combustible a inyectar. Cada punto es adaptable a gusto, así como también el tiempo de duración del mismo. El ajuste final es recomendable lograrlo con una prueba de funcionamiento en un banco de pruebas.



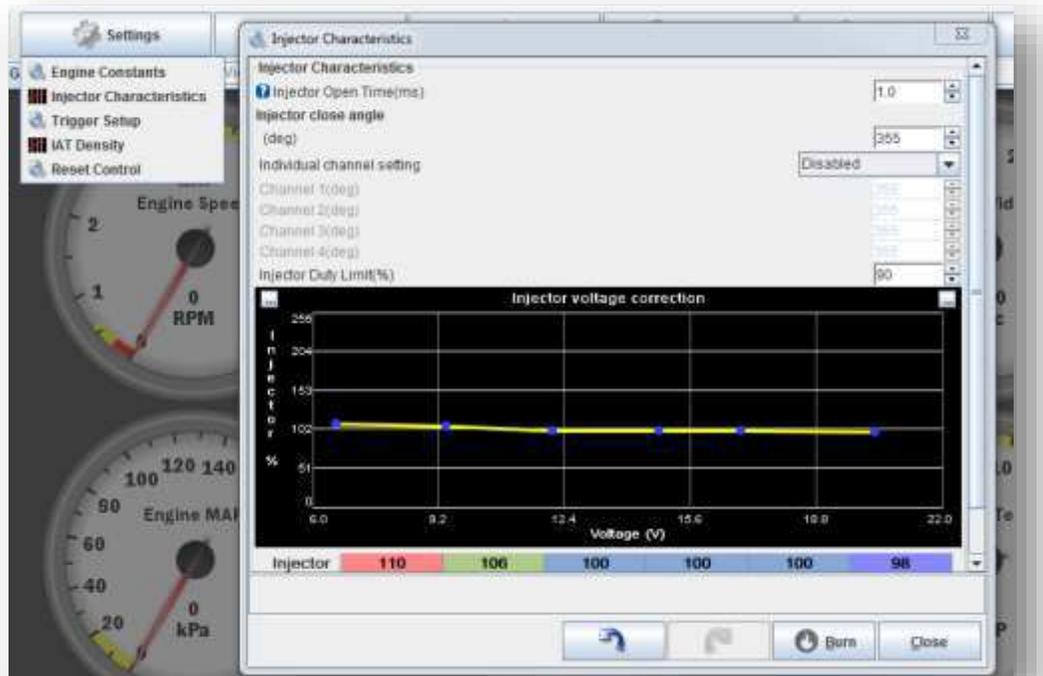


Figura 3.6 - Características del inyector.

### 3.1.2.4 Tabla VE

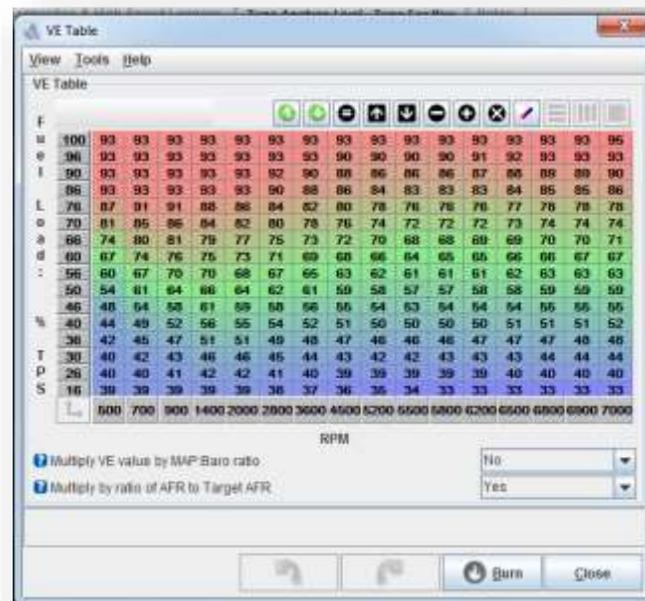
Para controlar la cantidad de combustible a inyectar en cada punto de velocidad/carga (R.P.M/T.P.S) la ECU trabaja con una tabla tridimensional, conocida como “tabla de eficiencia volumétrica VE” la cual representa la eficiencia volumétrica y la relación aire/combustible en cada rpm y presión en el conducto de admisión (0=vacío total, 100=atmósfera).

Definiendo la eficiencia volumétrica como la relación entre la cantidad de aire que realmente llena el cilindro y la cantidad que llenaría el cilindro en una situación estática, la VE en función de la presión absoluta en el conducto de admisión y la razón de mezcla aire/combustible, definida como (AFR, lambda), queda expresada, mediante la Ecuación [13], como:

$$VE = \frac{\text{masa de aire real}}{\text{masa de aire teórica}} * AFR_{stoich} / AFR_{real} \quad [13]$$

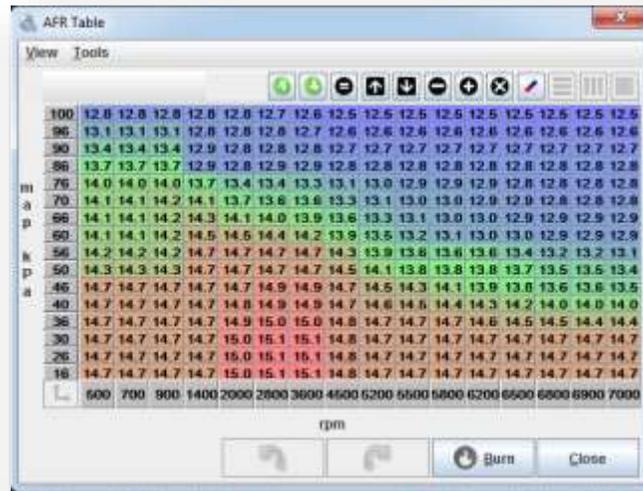
Este término es el que se introduce en la ecuación de combustible PW. Para su determinación, lo que hace la ECU es realizar un mapeo en 2D de la eficiencia volumétrica y sobre otro par de ejes coordenados, un mapeo en 2D de la relación de mezcla aire/combustible óptima para cada punto de funcionamiento, tratando de ajustarse lo mejor posible a la curva de potencia del motor. Ambas variables cambian su valor en función de la carga y las rpm del motor (T.P.S/R.P.M).

En la Figura 3.7 y la Figura 3.8, se muestran dos ejemplos de Tablas VE de eficiencia volumétrica y relación de mezcla aire/combustible.



	500	700	900	1400	2000	2800	3600	4500	5200	5500	5800	6200	6500	6800	7000
100	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	96
90	93	93	93	93	93	93	93	90	90	90	90	91	92	93	93
80	93	93	93	93	93	92	90	88	86	86	86	87	88	89	90
70	88	93	93	93	93	93	90	88	86	84	83	83	84	85	86
60	76	87	91	91	88	86	84	82	80	78	76	76	77	78	78
50	70	81	85	86	84	82	80	78	76	74	72	72	73	74	74
40	66	74	80	81	79	77	75	73	72	70	68	68	69	70	71
30	60	67	74	76	76	73	71	69	66	64	63	63	64	66	67
20	56	60	67	70	70	68	67	65	63	62	61	61	61	62	63
16	50	54	61	64	66	64	62	61	59	58	57	57	58	59	59
	46	48	54	58	61	60	58	56	55	54	53	54	54	55	55
	40	44	49	52	56	55	54	52	51	50	50	50	50	51	51
	38	42	45	47	51	51	49	48	47	46	46	46	47	47	48
	30	40	42	43	46	46	45	44	43	42	42	43	43	44	44
	26	40	40	41	42	42	41	40	39	39	39	39	40	40	40
	16	39	39	39	39	39	38	37	36	36	34	33	33	33	33

Figura 3.7 - Tabla VE de eficiencia volumétrica.



	600	700	800	1400	2000	2600	3600	4600	6200	6600	6800	6900	7000
100	12.8	12.8	12.8	12.8	12.7	12.6	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
96	13.1	13.1	13.1	12.8	12.8	12.7	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6
90	13.4	13.4	13.4	12.9	12.8	12.8	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7
86	13.7	13.7	13.7	12.9	12.8	12.9	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
80	14.0	14.0	14.0	13.7	13.4	13.4	13.3	13.1	13.0	12.9	12.9	12.8	12.8
76	14.1	14.1	14.2	14.1	13.7	13.6	13.6	13.3	13.1	13.0	12.9	12.8	12.8
70	14.1	14.1	14.2	14.3	14.1	14.0	13.9	13.6	13.3	13.1	13.0	12.9	12.9
66	14.1	14.1	14.2	14.5	14.6	14.4	14.2	13.9	13.5	13.2	13.1	13.0	12.9
60	14.2	14.2	14.2	14.7	14.7	14.7	14.7	14.3	13.9	13.8	13.6	13.6	13.4
56	14.3	14.3	14.3	14.7	14.7	14.7	14.7	14.5	14.1	13.8	13.8	13.7	13.5
50	14.3	14.3	14.3	14.7	14.7	14.7	14.7	14.5	14.1	13.8	13.8	13.7	13.5
46	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.9	14.9	14.7	14.5	14.3	14.1	13.9	13.6
40	14.7	14.7	14.7	14.7	14.8	14.9	14.9	14.7	14.6	14.6	14.4	14.3	14.2
36	14.7	14.7	14.7	14.7	14.9	15.0	15.0	14.8	14.7	14.7	14.6	14.5	14.4
30	14.7	14.7	14.7	14.7	15.0	15.1	15.1	14.8	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
26	14.7	14.7	14.7	14.7	15.0	15.1	15.1	14.8	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
20	14.7	14.7	14.7	14.7	15.0	15.1	15.1	14.8	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
16	14.7	14.7	14.7	14.7	15.0	15.1	15.1	14.8	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7

Figura 3.8 - Tabla AFR de relación aire/combustible.

De la interpolación de ambas tablas, surge la tabla tridimensional VE. En la Figura 3.9, se muestra un ejemplo de dicha tabla:

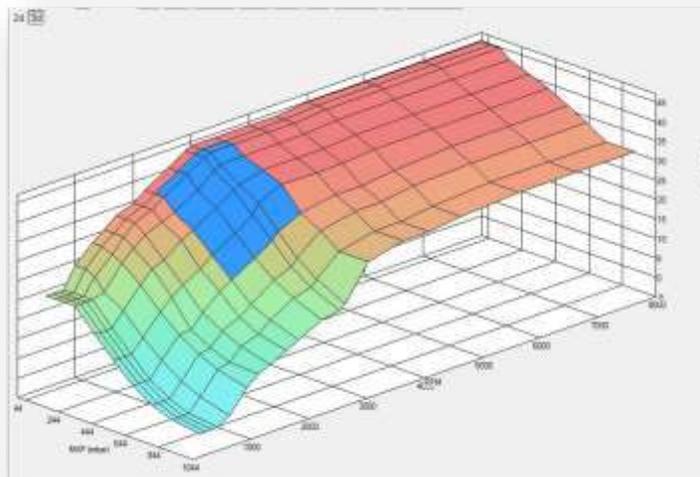


Figura 3.9 - Tabla VE tridimensional.

Estas Tablas, dependiendo del fabricante de la ECU, generalmente son de 12 x 12 definiendo zonas en el espacio 3D, de donde la estimación de cada punto la termina haciendo por

interpolación de los puntos de las esquinas de la zona del espacio donde se encuentra funcionando el motor.

Los mapas generados por estas tablas, son mapas preestablecidos por el fabricante que contienen los valores óptimos a lograr por medio de la acción de control sobre los actuadores y se encuentran grabados de forma permanente en la memoria ROM de la ECU.

Para computadoras originales (OEM), estos puntos son difíciles de acceder y modificar.

En lo que respecta a computadoras programables, como es el caso de este proyecto, los valores son de fácil acceso y lectura mediante una interfaz de comunicación que permite la modificación de los mismos según los requisitos que se estén buscando con la programación de ellos.

Cuando se inicia un proyecto nuevo, se debe cargar una Tabla VE base a partir de la cual empezar a ajustar el motor. El directorio de Speeduino cuenta con una Tabla VE base a partir de la cual se puede empezar a trabajar. Para cargarla, una vez creado el proyecto, en la barra superior del software TunerStudio MS, pestaña “File → Load Tune (msq)” se desplegara una ventana emergente que nos dará acceso al directorio donde se encuentra guardada la Tabla VE base, como se observa en la Figura 3.10:

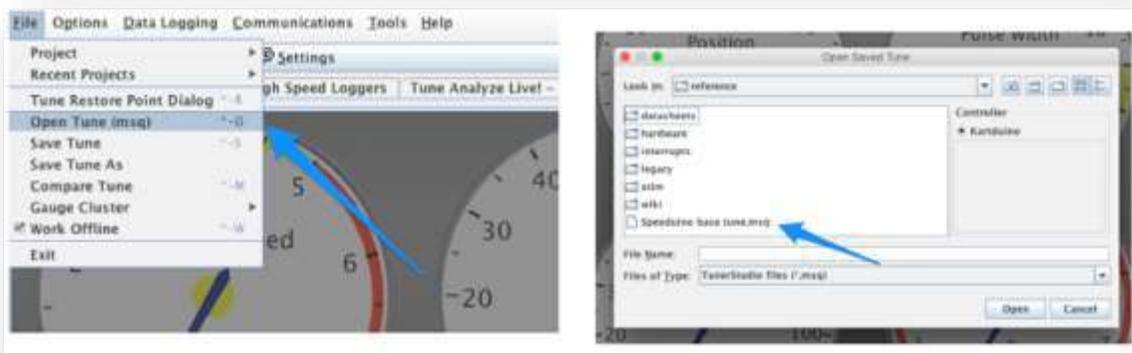


Figura 3.10 - Carga de Tabla VE básica.

Las tablas VE dependen de las características propias de cada motor como torque, potencia, torque máximo, potencia máxima y el rango de rpm. Al no contar con la versión premium del software TunerStudio MS, no se tiene la opción para crear la Tabla VE acorde al motor que se tiene para montar el sistema, por lo que, de la página MegaSquirt [20], utilizando una calculadora de tablas basada en introducir los parámetros del motor, como se observa en la Figura 3.11, se calcula una nueva tabla ajustada al motor de ensayo del proyecto.

Las RPM de ralenti son	<input type="text" value="1400"/> RPM	300 rpm mínimo
El vacío de ralenti estimado es (el mayor vacío que espera de su motor)	<input type="text" value="24"/> "Hg	~24 para stock ~15 para street/strip ~10 para motor de carreras
La línea roja de RPM (rpm máximas de operación) es	<input type="text" value="4500"/> RPM	12.000 rpm máximo
La potencia máxima del volante es	<input type="text" value="5"/> HP @ <input type="text" value="3600"/> RPM	
El par máximo es	<input type="text" value="6.9"/> lb-ft @ <input type="text" value="2500"/> RPM	
El desplazamiento del motor es	<input type="text" value="0.16"/> litros	
Nivel de impulso máximo del motor (0 para aspiración natural, impulso máximo (psi) para turbo/sobrealimentado)	<input type="text" value="0"/> psi	21 psi máximo
Haga clic en el botón "Restablecer" para volver a los valores de formulario predeterminados.	<input type="button" value="Restablecer"/>	

Figura 3.11 - Calculadora de Tabla VE.

Una vez que se tiene la tabla VE, en la ventana emergente “Tuning → VE Table” se debe editar la tabla para tener una mapa lo más justo posible al motor a ensayar, intercalando los valores de rpm en saltos de 200 [rpm] y los porcentajes de la mariposa del acelerador de entre 4% y 6%.

### 3.2 VERIFICACIÓN Y PUESTA EN MARCHA

Previo a la prueba de marcha con combustible, impulsando el motor de ensayo por medio de un motor eléctrico externo se verificó cada una de las señales de las variables que influyen en el sistema y se hizo un estudio de las distintas etapas que tiene el proceso.

### 3.2.1 Verificación de Señales

Con la implementación del sistema propuesto se pueden identificar con claridad cada etapa del sistema necesaria para lograr realizar la gestión de la dosificación de combustible:

- Entrada: se produce el relevamiento de las señales para determinar el estado del motor por medio de los sensores.
- Procesamiento de señal/secuencia aritmético-lógica: etapa correspondiente al microcontrolador, el cual, basado en las señales, hace el cálculo correspondiente del tiempo requerido para lograr un dosado acorde a demanda del usuario.
- Salida: etapa donde se da la orden de cuánto tiempo abrir el inyector. A la salida de la placa se emite la señal de baja potencia, la cual comanda el circuito de conmutación de potencia para gobernar el inyector.

Con la utilización de un osciloscopio al realizar la medición de la señal de R.P.M, se puede verificar lo esperado teóricamente. Así, de la observación del oscilograma de la Figura 3.12, se tiene que la señal del diente faltante se da luego del pulso bajo número 58, lo que corresponde con la configuración de la rueda fónica elegida de 60-2.

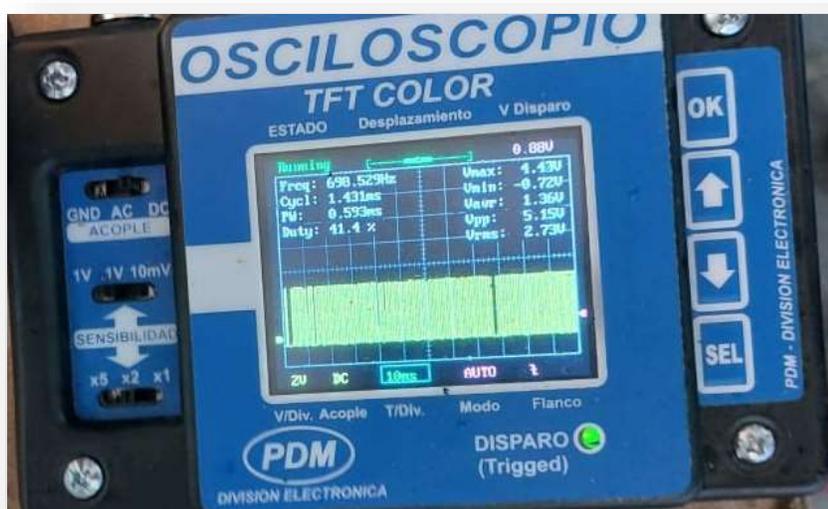
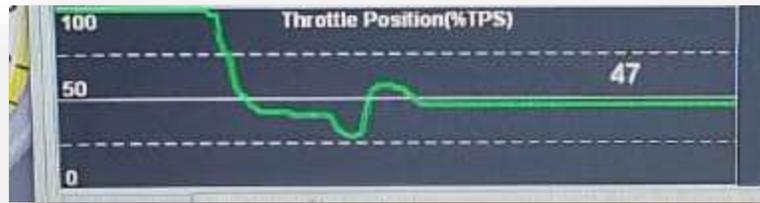


Figura 3.12 - Señal de sensor CKP.

En la parte superior derecha también se puede ver  $V_{\text{máx}} = 4,43$  [V], lo que coincide con la tensión  $V_{\text{ref}} = 5$  [V] esperada como tensión de señal del sensor.

En lo que respecta a la señal del sensor TPS, para ver el comportamiento del funcionamiento, por ser TunerStudio MS la interfaz para observar en tiempo real, entre otras señales, la lectura de sensores, utilizando la ventana emergente “Real-Time Display” de la sección “Tuning” mostrada en la Figura 3.13, se observa el comportamiento de la señal al variar la posición del eje de la mariposa, observado el porcentaje aproximado de apertura que sea coincidente con lo mostrado en pantalla por el software. En ella se puede ver como se varia de la posición cerrado a completamente abierto con la variación en las posiciones intermedias.



*Figura 3.13 - Lectura de sensor TPS en TunerStudio MS.*

A partir del análisis de la etapa de entrada, con el uso de la interfaz del software de interacción con el microprocesador, se puede realizar el análisis de la etapa de la secuencia aritmético-lógica del cálculo de combustible llevada a cabo por la ECU.

Partiendo de la configuración inicial de los parámetros del motor, se tiene que  $REQ\_FUEL=6,6$  [ms], valor calculado directamente por el Firmware y mostrado en la Figura 3.14 remarcado en color verde.

Partiendo de este valor es que la ECU realiza los ajustes requeridos en la ecuación de combustible PW para cumplir con la dosificación de combustible según lo que se demande.



Figura 3.14 – Tiempo muerto de Inyección.

	900	1100	1300	1500	1800	2000	2300	2500	2700	2900	3200	3400	3600	3900	4100	4500
100	62	62	62	62	63	63	63	63	63	63	63	62	61	60	60	
90	60	60	60	60	61	61	61	61	61	61	61	61	60	59	58	58
80	58	58	58	58	59	59	59	59	59	59	59	58	57	56	56	56
70	56	56	56	56	57	57	57	57	57	57	57	57	56	55	54	54
60	55	55	55	55	56	56	56	56	56	56	56	56	55	54	53	53
50	54	54	54	54	55	55	55	55	55	55	55	55	54	53	52	52
40	52	52	52	52	53	53	53	53	53	53	53	53	52	51	50	50
30	50	50	50	50	51	51	51	51	51	51	51	51	50	49	48	48
20	48	48	48	48	49	49	49	49	49	49	49	49	48	47	46	46
10	46	46	46	46	47	47	47	47	47	47	47	47	46	45	44	44
0	44	44	44	44	45	45	45	45	45	45	45	45	44	43	42	42
100%	43	43	43	43	44	44	44	44	44	44	44	44	43	42	41	41
90%	42	42	42	42	43	43	43	43	43	43	43	43	42	41	40	40
80%	40	40	40	40	41	41	41	41	41	41	41	41	40	39	38	38
70%	39	39	39	39	40	40	40	40	40	40	40	40	39	38	37	37
60%	38	38	38	38	39	39	39	39	39	39	39	39	38	37	36	36

Figura 3.15 – Tabla VE adaptada.

Con la Ecuación [12] de combustible PW y la Tabla VE adaptada para el motor ensayado mostrada en la Figura 3.15, se suponen dos situaciones genéricas de funcionamiento:

- Motor apagado.
- Motor a 1200 R.P.M con plena apertura de acelerador y un enriquecimiento de arranque en frio de 20%.

La primera situación, se muestra en la Figura 3.16, donde se puede observar que el tiempo abierto del inyector es de 1 [ms], valor preestablecido, que se sumará al pulso de inyección con el motor en marcha, mientras que el enriquecimiento y el pulso de inyección permanecen en cero al no detectarse giro del motor.



*Figura 3.16 - Motor apagado.*

Procediendo a poner el motor en condiciones de funcionamiento con 1200 R.P.M, observando los datos mostrados en pantalla mostrados en la Figura 3.17, la ecuación de combustible  $PW = 5,806$  [ms].



*Figura 3.17 - Motor en marcha.*

El valor de la ecuación PW resulta de escalar el REQ\_FUEL por el porcentaje del resultado de la interpolación de los cuatro puntos cercanos al punto de funcionamiento en la Tabla VE, más el tiempo muerto de inyección y un 20% del valor de PW escalado.

Matemáticamente, este valor da un  $PW_{esperado} = 5,831$  [ms], valor prácticamente coincidente al esperado mostrado por software y verificando la forma de calcular el combustible, según la estrategia de gestión Alpha-N elegida para el proyecto.

Una vez determinado el pulso de combustible a inyectar, la etapa de salida conformada por la parte de baja potencia es la encargada de manejar y llevar a cabo la orden de conmutación para el transistor y poder llevar a cabo la pulverización del combustible.

Observando el oscilograma de la Figura 3.18, se puede ver el pulso de inyección relevado a la salida del microprocesador.



Figura 3.18 - Pulso de inyección PW.

Con el osciloscopio configurado en el eje horizontal en 2[ms] por división y el eje vertical en 1 [V] por división, el pulso tiene un ancho de 6 [ms]≈5,8[ms], valor prácticamente coincidente a lo mostrado por software. En lo que respecta a la amplitud de la señal, se tiene

un pulso de  $V_{\max} = 4,35 \text{ [V]} \approx 5 \text{ [V]}$ , valor próximo al esperado para una salida de tipo digital del microprocesador Arduino MEGA 2560.

Finalmente, la parte de potencia comandada por el módulo IRF520, trabajando con el oscilograma de la Figura 3.19, se puede corroborar que la bobina del inyector presenta un comportamiento similar al esperado. En la primer parte del pulso se puede ver como el transistor genera la conmutación a GND de la alimentación de 12 [V], manteniendo el inyector abierto durante el tiempo PW. Al conmutar la ruta a tierra de la tensión de alimentación, se puede ver la aparición del pico de tensión provocado por la corriente inducida en la bobina del inyector. Este pico de tensión es superior a los 25[V] (no visible por la resolución del instrumento de medición) con una duración muy pequeña.



Figura 3.19 - Onda de pulso de alimentación del inyector.

**Nota:** El pulso de inyección PW de la Figura 3.18 no es el perteneciente a la situación de motor en marcha ya que se relevó en pruebas previas a la puesta en marcha, solo se usa a modo ilustrativo para observar el comportamiento de la onda de la bobina del inyector. La situación de relevamiento coincide con el motor al ralentí, cuyo ancho de pulso de inyección es  $PW \approx 3,2 \text{ [ms]}$ .

### 3.2.2 Puesta en Marcha

Posterior a la verificación de cada una de las señales a intervenir en el funcionamiento del sistema, se procede a realizar una prueba de funcionamiento con combustible.

Energizando el sistema con la tecla en posición ON y con la utilización de taladro eléctrico se impulsó el motor desde el cigüeñal para lograr un régimen que garantice las condiciones de encendido.

Los primeros intentos de puesta en marcha, tuvieron como consecuencia la pérdida de comunicación entre la PC y el microprocesador. Al conocer que las señales electrónicas sufren distorsiones cuando se encuentran en presencia de campos magnéticos externos, creados por ruidos del entorno, como la presencia de bobinas, se opta por la aislación del sistema de encendido transistorizado con que está equipado el motor, en busca de una solución para este problema.

Posterior a la aislación del sistema de encendido, al intentar poner en marcha el motor se logró un encendido de malas condiciones, con explosiones y excesivo olor a combustible en el sistema de escape. Como resultado posterior a estos malos encendidos, el motor no respondía a los intentos de puesta en marcha posteriores. Esta condición es conocida como “inundación” o “ahogamiento” por exceso de combustible, situación definida como mezcla rica.

La inspección visual del sistema de admisión, permitió detectar la presencia de abundante combustible en el conducto de entrada, provocando la “inundación” descrita. Al analizar el comportamiento del sistema, se determinó que al no contar con un sensor de árbol de levas que determine la posición del motor, el microprocesador ordenaba inyectar combustible en cada revolución del cigüeñal, en respuesta a la señal del sensor C.K.P cada vez que el diente perdido de la rueda dentada era detectado.

La solución a este inconveniente se encontró modificando mediante software las características del motor y la configuración del inyector montado. Esta medida consiste básicamente en modificar el REQ\_FUEL, indicándole al sistema que el motor contaba con dos cilindros, con dos inyectores por entrada y una gestión secuencial de la inyección del

combustible. Esta condición obliga al microprocesador a dividir el caudal de combustible en dos partes iguales, logrando con esta configuración el mismo tiempo PW de inyección y una señal de inyección por cada ciclo del motor, entendiendo como ciclo en un motor de cuatro tiempo, que se deben contabilizar dos R.P.M de cigüeñal para dar la orden de inyección. La configuración alternativa utilizada para estabilizar el funcionamiento se puede ver en la Figura 3.20.

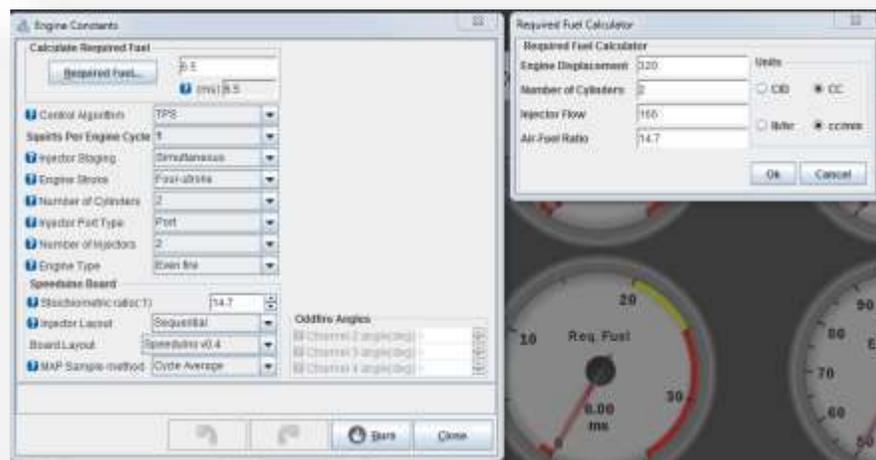


Figura 3.20 – Configuración alternativa de REQ\_FUEL.

La prueba posterior permitió asentar la veracidad de la hipótesis de falla anterior al lograr mantener el motor en marcha, observando la disminución de la presencia de humo con olor a combustible en los gases de escape y la desaparición de las explosiones ocasionadas por el exceso de combustible en la mezcla.

Con la puesta a punto alternativa, la marcha lograda tampoco arrojó el resultado esperado. Al hacer variar la carga del motor con distintas posiciones de apertura de la mariposa de aceleración, el régimen del motor no presentó cambios, logrando sólo mantenerse en marcha.

Con la utilización de la PC y el software [13], la observación en tiempo real de las variables de control para la gestión del motor, permitieron observar la excesiva oscilación de la posición del motor en la Tabla VE, cambiando de un lugar a otro de forma muy rápida sin que se pueda lograr la respuesta en el ajuste de marcha del motor.

En la consola principal de indicadores, se observó que la medición de R.P.M mostraba una medida errónea del estado real, presentando picos en la medición.

Esta observación, llevó a inferir la existencia de una falla en el sistema de relevamiento de la señal del sensor C.K.P, resultando esta falla, la causante de la excesiva oscilación de la posición del motor en la Tabla VE.

### **3.2.3 Problemática Ocurrida**

Por tratarse de un sistema totalmente armado con componentes disponibles sin coste adicional, la implementación sobre un modelo conlleva complicaciones propias de la implementación de sistemas de control, como lo son el ruido magnético sobre el cableado provocado por bobinas o errores en el relevamiento de señales generado por variación en tolerancias mecánicas de ensamble, como lo es el entrehierro del sensor y la rueda fónica.

Durante el funcionamiento del motor se hicieron presente una serie de fallas que se mencionan a continuación:

- Pérdida de comunicación entre la ECU y la PC al usar el software TunerStudio MS para visualizar los datos de funcionamiento.
- Señal errática de R.P.M.

Como el motor ensayado no cuenta con la preparación necesaria para interactuar con sistemas electrónicos, por experiencia del Tutor y Cotutor del proyecto, se sugiere la recomendación de aislar el cable de tensión de bujía para disminuir la presencia de ruido magnético en las señales. Este ruido tiene consecuencia en las señales a transportar por los cables, tal como la generación de fallas en la comunicación presente en el sistema.

Realizando la aislación del conjunto de bobina de encendido y cable de bujía mediante papel aluminio y conectándolo a GND del sistema, siendo el argumento de esta medida el principio Físico de la Ley de Faraday. Como resultado de esta práctica, se logró mantener la comunicación con la PC durante las pruebas de funcionamiento.

Al poner en marcha el motor, gestionado por el sistema de inyección montado, se puede observar en la consola de instrumentos ofrecida por TunerStudio MS una oscilación excesiva en la señal de R.P.M.

Mediante el uso de un osciloscopio, al relevar la señal se puede notar que entre diente y diente algunos pulsos se pierden al no alcanzar 0 [V] en la señal de salida del sensor, como se muestra en la Figura 3.21.



*Figura 3.21 - Señal de sensor CKP con problemas de pulso.*

Esta falla está fundada en que el sensor originalmente trabaja sobre una señal de mucha menor frecuencia al solo sensar 5 puntos con un espaciado mayor para indicar al motor perteneciente la posición de leva. En este proyecto, los dientes están separados tan solo 3° entre ellos, lo que lleva que cuando aún no termino de dar el pulso bajo, ya detecta el siguiente diente.

Observando la Figura 3.21, con la resolución del osciloscopio en 2[V] por división, estos cambios de pulso se dan por encima de este valor. En las entradas de las placas Arduino, toda señal mayor a los 1,3 [V] se toma como un pulso en alto, ocasionando una alteración en la cuenta de los 58 pulsos bajos, viéndose reflejado como un pico en las R.P.M.

## 4 CONCLUSIONES

---

En el desarrollo de este proyecto se presentó la conversión de la dosificación de combustible de un motor de combustión interna de ciclo Otto, reemplazando su carburador original por un sistema de gestión electrónica.

Para lograrlo, se tomó un motor mono-cilíndrico de la marca HONDA, cuya cilindrada es de 160 [cm<sup>3</sup>] y posee una potencia de 5 [HP]. La conversión requirió de la modificación de la admisión de aire y la colocación de un inyector, siendo este último el encargado de realizar la dosificación del combustible. Para ello, el tiempo de apertura y cierre, está dado en respuesta a la señal de control calculada por un microprocesador Arduino MEGA 2560. Este microprocesador, desempeñó la tarea de unidad de control aritmético lógica de cálculo.

Para determinar las variables necesarias para que el microprocesador pueda calcular el combustible a inyectar se elaboró un “modelo de sistema”. Para modelar el sistema se identificó el tipo de lazo que gobierna el comportamiento de la dosificación, siendo este un lazo de tipo abierto. Este tipo de lazo, responde a la estrategia de gestión “Alpha-N”. Este paso tuvo como resultado la definición de la señal de posición de la válvula mariposa del acelerador y la señal de R.P.M del cigüeñal para conocer la carga y la velocidad de giro del motor. A partir de estos datos, el microprocesador lleva a cabo el cálculo de combustible a inyectar, afectándolo de los parámetros necesarios, de modo de realizar una inyección lo más eficiente posible. Para este modelo, el enriquecimiento de arranque en frío resultó ser el único parámetro disponible para modificar.

Para relevar las señales físicas, de modo de convertirlas en señales eléctricas aptas para la interpretación del microprocesador, se utilizó un potenciómetro, llamado sensor TPS, como responsable de relavar el ángulo “ $\alpha$ ” de la posición de la válvula de mariposa de aceleración. A su vez, la utilización de un sensor de efecto Hall, conocido como sensor CKP, fue el encargado de relevar la velocidad “N” de giro del cigüeñal. Estas dos variables, son por las que recibe el nombre la estrategia de gestión, que describe el modelo propuesto.

A partir del estudio bibliográfico realizado acerca de los distintos modelos de inyección electrónica del mercado, se concluyó que estas variables resultan ser las más óptimas para el

caso de un motor mono-cilíndrico, ya que, la presión del conducto de admisión es un parámetro muy variable en este modelo de motores. Por otro lado, medir el caudal de aire que ingresa al motor requiere de un sensor más complejo y costoso, por lo que la estrategia de gestión “Alpha-N” es la mejor opción.

Para el procesamiento y análisis de las señales se cargó previamente al microprocesador el software de Speeduino, conocido como Firmware, responsable de esta tarea. Con la verificación de señales previa a la puesta en marcha, se corroboró la presencia del pulso de inyección, en respuesta al análisis de las señales relevadas por los sensores.

Estas mediciones, permitieron contrastar las señales esperadas según el estudio teórico con lo relevado. De la observación de los resultados, se tiene que existe una muy buena aproximación entre lo esperado y lo obtenido. Esta exactitud, deja por sentado la correcta selección en el microprocesador Arduino usado para la secuencia lógica de cálculo.

Luego de la instalación de los componentes y la correspondiente puesta a punto, hizo la puesta en marcha del motor. El resultado de esta prueba dio como resultado el funcionamiento del motor, no siendo este el esperado, debido al comportamiento errático presente en la señal de R.P.M.

Dentro de las observaciones que se pudieron realizar sobre el motor en funcionamiento, se puede mencionar que la marcha era inestable. A través del uso del software TunerStudio MS, se pudo constatar que la marcha inestable radica en tener una oscilación excesiva de la señal de R.P.M. La consecuencia de este comportamiento erróneo, implica que el software de cálculo no puede posicionarse en la Tabla VE para determinar el combustible a inyectar. Esta situación, genera que el motor pueda mantenerse en marcha, pero no pueda obedecer a distintas cargas del motor al variar la posición de la mariposa de aceleración. Esto se debe a no tener una buena representación del funcionamiento real del motor con las variables relevadas.

Las fallas presentes en la implementación, así como las simplificaciones adoptadas en el modelo teórico elaborado, deja el camino abierto para continuar ampliando el proyecto con

posteriores trabajos futuros, pudiendo conocer aún más sobre la gestión de motores a través de sistemas de inyección electrónica. Así, algunos de los posibles trabajos son:

- Reemplazar el sensor de efecto hall por un sensor magnético de aplicación automotriz para señal de cigüeñal, con el correspondiente acondicionamiento de señal.
- Trabajar en la aislación del cableado.
- Poder relevar la presión real en riel de combustible para garantizar el caudal entregado por el inyector.
- Colocar una sonda lambda para tener un control preciso de la calidad de la mezcla que quema el motor y poder controlar las emisiones de gases contaminantes, al cerrar el lazo de alimentación del sistema de control.
- Trabajar sobre tolerancias mecánicas y rigidez de los soportes para eliminar vibraciones que afecten en el relevamiento de señales.

El estudio de los principios de funcionamiento y el rol que cada uno realiza dentro del sistema, tanto de los sensores como los actuadores definidos a partir del modelo, fueron el punto de partida para conocer los distintos tipos de señales con que trabajan los sistemas de inyección. Esto permitió determinar qué instrumentos se requieren para el análisis de fallas o el relevamiento de señales. Este paso es de suma importancia a la hora de determinar que entradas y salidas de información usar con el microprocesador del sistema.

En lo que respecta a implementación práctica tuvo como resultado el desarrollo de habilidades personales para el diseño y montaje de componentes para ensamblajes de circuitos eléctricos y electrónicos, como así también piezas partes para la sujeción de estos.

La definición de las variables de entrada como de señales de salida de control, mientras que la tarea de grabar la información en el microcontrolador para que pueda procesar y realizar la gestión lógica, me permitió adquirir conocimientos en tareas de programación y ejecución de código en microcontroladores.

La puesta en marcha de un proyecto con estas características, es una buena oportunidad para desarrollar habilidades en el diagnóstico de fallas de este tipo de sistemas, ya que el diagnósticos de sistemas de gestión electrónica del motor requieren cada vez un análisis más

profundo acerca de circuitos integrados, lo que conlleva la intervención de mano de obra cada vez más profesionalizada. Un ejemplo de ello, queda evidenciado en la falla presente del sensor CKP, lo cual, para determinar la causa de la falla requirió de un estudio y análisis de una señal de tipo digital, ampliamente usada para la transmisión de señales en electrónica automotriz.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

---

- [1] Motores Endotérmicos – Dante Giacosa – Primera Reimpresión (2000).
- [2] Manual de la Técnica del Automóvil – BOSCH – 3ra Edición.
- [3] Automobile Electrical and Electronic Systems - Third edition  
Tom Denton BA, AMSAE, MITRE, Cert.Ed. 2004
- [4] Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems, and Perspectives.  
Edited by Richard van Basshuysen and Fred Schafer - 2004 SAE International.
- [5] Alimentación de motores de combustión interna, sistemas de inyección de motores – Martín Andrés Sardiña  
– La Plata – Buenos Aires – Argentina – 2017.
- [6] Técnicas de Competición – Manual Jose J. Passaniti – Primera Edición (2007)
- [7] Funcionamiento del Sistema de Inyección Electrónica – Curso de Mecánica – Universidad Nacional de La Plata.
- [8] Motores de Combustión Interna Alternativos – Universidad Politécnica de Valencia – 5ta Reimpresión (2015).
- [9] SPRAY CHARACTERISTICS OF DME IN CONDITIONS OF COMMON RAIL INJECTION SYSTEM(II) – International Journal of Automotive Technology – Vol 4, No 3, pp. 119-124 (2003).
- [10] Manual del Propietario – HONDA GC160.
- [11] <https://www.arduino.cc/>
- [12] <https://wiki.speeduino.com/en/home>
- [13] <http://tunerstudio.com/index.php/tuner-studio>
- [14] <http://www.megamanual.com/mt28.htm#a1tvq>
- [15] <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- [16] SolidWorks 2011-Edición Educativa
- [17] <https://hellbot.xyz/magna-1/>
- [18] Hoja de datos técnicos – Printalot – Versión 1 – 24/DIC/2017

[19] Trucaje de motores de 4 tiempos – Miguel de Castro Vicente

[20] <http://www.megamanual.com/v22manual/minj.htm>

## ANEXOS

---

- PLANO N°1 - Diagrama funcional.
- PLANO N°2 - Esquema eléctrico.
- PLANO N°3 - Brida para cuerpo de admisión.
- PLANO N°4 - Soporte sensor CKP.
- PLANO N°5 -Tapa cuerpo de aceleración.