



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

Modificación de las curvas  
características de motor para  
un prototipo tipo formula

TESIS

Que para obtener el título de  
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Omar Cabrera Ramírez

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Mariano García del Gallego



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo lo dedico a las personas que han sido, son y siempre serán muy importantes en mi vida.

Agradezco a mis padres, Martha Ramírez Reyes e Israel Cabrera Amador, y a mi hermana, Jessica Samantha Cabrera Ramírez, por su apoyo y comprensión en este gran paso para mí, a mi familia por cada una de las lecciones enseñadas.

Agradezco al amor de mi vida, Adriana Rodríguez Rodríguez, no sólo por ser uno de mis apoyos más grandes para la elaboración de este trabajo, también por el apoyo, la comprensión y el amor incondicional que me has brindado siempre, por caminar siempre a mi lado y estar en cada uno de mis logros. Muchas gracias por todo. TE AMO INMENSAMENTE.

A ti gran amigo, José Alejandro Trejo García (q. e. p. d.), a un año de tu partida seguimos recordándote como la gran persona que fuiste, gracias por dar siempre lo mejor de ti y enseñarnos tanto.

A mi tutor académico, Cesar Vázquez Segovia (q. e. p. d.), gracias por todas tus palabras y tu apoyo, por alentarnos a ser cada vez mejores. Siempre estarás con nosotros.

A mi director de tesis, Mariano García del Gallego, por la orientación para este trabajo, por su paciencia y apoyo.

A la escudería UNAM Motorsports, por brindarme la oportunidad de vivir experiencias inolvidables, de crecer personal y académicamente, además de permitirme conocer amigos y colegas extraordinarios.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería perteneciente a la misma, por la maravillosa oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura en ella y formarme como una mejor persona.

# Índice

## **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.**

1.1	Clasificación de los motores de combustión interna .....	5
1.2	Motor de cuatro tiempos.....	7
1.3	Ciclo Otto real.....	8
1.4	Sistemas de inyección.....	11
1.5	Sistemas de ignición.....	15

## **CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL MOTOR YAMAHA YZF R6.**

2.1	Ficha técnica.....	21
2.2	Curvas características del motor .....	22
2.3	Sensores.....	26
2.3.1	Sensores de posición .....	26
2.3.2	Sensores de temperatura .....	29
2.3.3	Sensor de presión .....	30
2.3.4	Otros sensores.....	31
2.4	Unidad de control de motor (UCM).....	33
2.4.1	Mapa de inyección .....	33
2.4.2	Mapa de ignición .....	35
2.4.3	Compensaciones.....	36
2.5	Ricardo wave.....	37

## **CAPÍTULO 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS.**

3.1	Objetivos.....	39
-----	----------------	----

## **CAPÍTULO 4. DESARROLLO.**

4.1	Metodología.....	40
4.2	Análisis teórico.....	40
4.3	Simulaciones en Ricardo wave .....	42
4.3.1	Resultados de simulación Ricardo Wave. ....	46
4.4	Modificaciones a mapa de inyección. ....	49

4.5.	Modificaciones al mapa de ignición.....	56
4.6.	Calculo de compensaciones .....	57
4.7.	Resultados y discusión. ....	58
4.7.1	Curvas de dinamómetro. ....	61

## **CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.**

## **CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.**

## **Capítulo 1. Antecedentes**

Existe una gran clasificación dentro de los motores de combustión interna que se construye de acuerdo a su aplicación. En este caso nos enfocaremos a los motores que utilizan gasolina y cuyo proceso es en cuatro tiempos, ya que este tipo de motor es el que se usó durante las competencias Formula Student en Italia y Austria celebradas durante julio del 2017.

Dentro de este tema existen algunos términos que se relacionan con el funcionamiento termodinámico del motor además de algunos sistemas externos y sus diferentes configuraciones, tal como el sistema de admisión, inyección y escape que cumplen un papel importante dentro del ciclo.

### **1.1 Clasificación de los motores de combustión interna**

Los motores de combustión interna, son máquinas que convierten la energía que existe dentro de una mezcla de combustible/comburente en trabajo mecánico.

Los motores de combustión interna se clasifican en dos grandes grupos:

- Motores de encendido provocado (MEP)

La característica fundamental de este motor es que el inicio de la combustión se produce mediante un aporte de energía externo al ciclo termodinámico, en motores modernos se consigue al hacer saltar una chispa entre los dos electrodos de una bujía. El instante en el que se debe hacer saltar la chispa deberá de ser el adecuado para conseguir que el proceso de combustión sea lo más eficiente posible.

En estos motores la mezcla de aire puede realizar fuera del cilindro durante el proceso de admisión o puede introducirse únicamente aire durante el proceso de admisión y el combustible se introduce posteriormente durante la compresión directamente en el cilindro formándose una mezcla heterogénea.

Como consecuencia característica de lo anterior, el proceso de combustión se produce por el avance de un frente de llama que recorre la cámara de combustión, partiendo desde la bujía y separando en todo momento dos zonas claramente definidas, una con gases frescos y otra con gases quemados. <sup>[1]</sup>

- Motores de encendido por compresión (MEC)

En estos motores la combustión se inicia mediante un proceso de autoencendido de la mezcla de combustible al conseguirse temperaturas suficientemente altas en la cámara de combustión debido al proceso de compresión. Para controlar de modo aproximado el instante de encendido, durante el proceso de admisión se introduce solamente aire, y el combustible se inyecta hacia el final de la carrera de compresión, cuando el aire alcanza niveles de temperatura altos para producir el autoencendido.

A diferencia de los MEP, en estos motores la mezcla de aire combustible es espacialmente heterogénea, y la combustión se produce en aquellas zonas en las que las condiciones de la mezcla son las adecuadas, con preferencia donde el dosado (relación aire combustible en la mezcla) local es cercano al

estequimétrico. No existe pues una zona claramente definida donde se produce la combustión, sino que aparecen muchos frentes de llama cuya evolución depende del chorro de combustible inyectado y del movimiento del aire en la cámara de combustión.

Por lo tanto, el proceso de combustión depende espacial y temporalmente del proceso de inyección, y está controlado por el desarrollo de los procesos físicos que tienen lugar en el chorro de combustible como la atomización, evaporación y la mezcla con el aire.

- Rotativos

Al igual que un motor de pistones, el motor rotativo emplea la presión creada por la combustión de la mezcla aire-combustible para producir trabajo. La diferencia radica en que esta presión está contenida en la cámara formada por una parte del estator y por uno de los lados del rotor triangular, que en este tipo de motores reemplazaría a los pistones siguiendo con la comparación.

El rotor sigue un recorrido en el que mantiene sus 3 vértices en contacto con el estator, delimitando así tres compartimentos separados llamados cámaras de trabajo. A medida que el rotor gira dentro de la cámara, cada uno de los 3 volúmenes se expande y contrae alternativamente; es esta expansión-contracción la que succiona la mezcla aire-combustible hacia el motor, comprime la mezcla, extrae su energía durante la expansión y realiza el escape. Por cada vuelta del rotor, el árbol motriz gira tres veces. No hay sistema de distribución, ya que la admisión y escape están controlados por lumbreras del propio bloque sin la interposición de válvulas.

Cada una de las tres cámaras de combustión al terminar su vuelta alrededor del árbol motriz hará los cuatro tiempos, y se producirán tres explosiones en un giro completo del rotor. <sup>[2]</sup>

Los diseños de los motores de combustión pueden variar de acuerdo a:

- Número de cilindros: Mono cilíndricos, bicilíndricos, de 4, 6, 8 y 12 pistones.
- Arreglo de cilindros:
  - Bóxer: Los pistones se encuentran dispuestos de manera horizontal, con esta configuración los pistones llegan al punto muerto inferior y superior simultáneamente
  - Radial: Los cilindros se ubican de manera radial respecto al eje del cigüeñal, formando una estrella, este tipo de motores suelen usarse principalmente en la aviación.
  - En línea: La configuración de los cilindros es sobre una misma fila, sin desfases. Esta configuración tiene la ventaja de ser la más fácil en cuanto a su construcción respecto de los anteriores.
  - Formación en V: En estos motores los cilindros se agrupan en dos bloques o filas formando una letra V que convergen en el mismo cigüeñal.
- Aplicación: automóviles, camiones de carga, aviación, generadores de corriente y locomotoras.

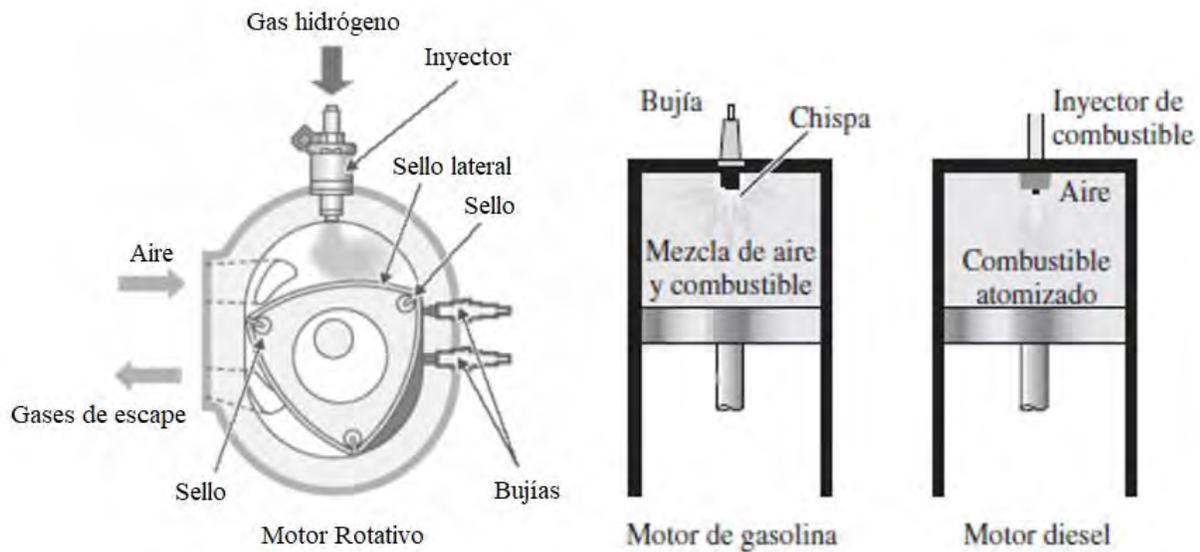


Ilustración 1.1.1 Diferencias entre los diferentes diseños de motores de combustión interna.

## 1.2 Motor de cuatro tiempos

La mayor parte de los motores de encendido por chispa operan bajo el funcionamiento de un ciclo de cuatro tiempos. Cada ciclo requiere dos vueltas del cigüeñal para completar una secuencia de eventos lo que produce una etapa de potencia:

### **Admisión:**

En esta etapa del ciclo, la válvula de admisión se abre permitiendo que la mezcla de aire/combustible entre en el interior del cilindro, mientras que el pistón se dirige hacia el punto muerto inferior (PMI).

### **Compresión:**

El proceso comienza cuando la válvula de admisión se cierra, y comienza la etapa de compresión, en donde el pistón se dirige del PMI hacia el punto muerto superior (PMS), comprimiendo así la mezcla de aire/combustible.

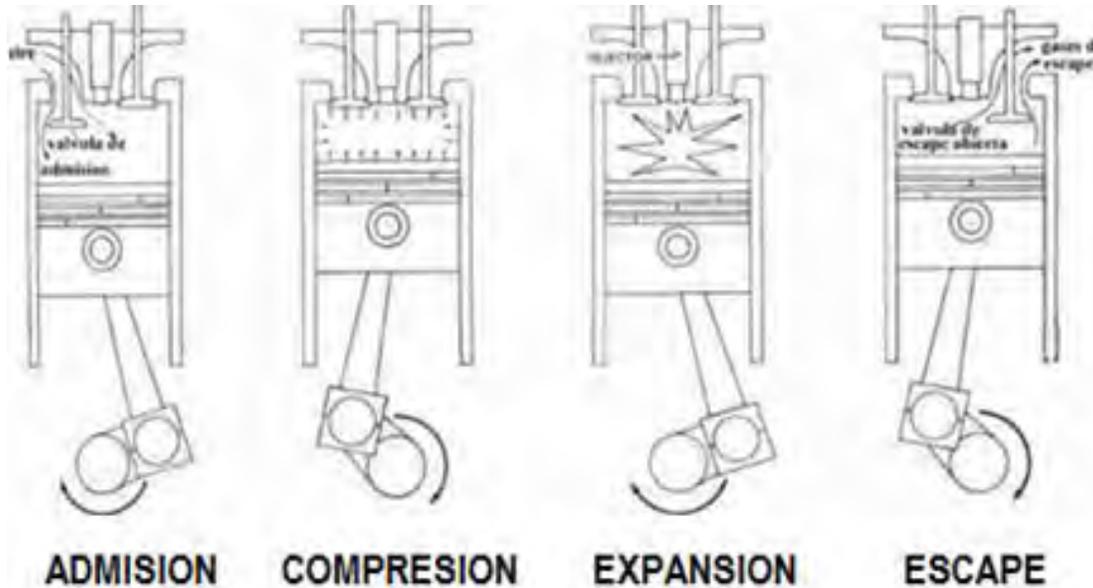
### **Expansión:**

Mientras las válvulas de admisión y escape se mantienen cerradas, y el pistón se encuentra en el PMS, la ignición de la mezcla se lleva a cabo empujando el pistón hacia el PMI; a esta etapa se le denomina carrera de trabajo.

### **Escape:**

Cuando el pistón se encuentra en el PMI se abre la válvula de escape y el pistón empuja a los gases producto de la combustión hacia afuera del cilindro mediante los conductos del sistema de escape, hasta que llega al PMS del cilindro y comienza de nuevo el ciclo. <sup>[14]</sup>

La sucesión de las etapas se puede observar en la ilustración 1.2.1.



*Ilustración 1.2.1 Etapas de Admisión, Compresión, Expansión y Escape. Secuencia de procesos en un motor de cuatro tiempos. <sup>[3]</sup>*

### **1.3 Ciclo Otto real**

A diferencia del ciclo Otto ideal, éste lleva consigo varias consideraciones:

1. Existe un sistema abierto, en el cual, los gases no retornan al inicio del ciclo, como lo que sucede en un motor de combustión.
2. Las pérdidas de calor debido a la transferencia de calor por conducción en el motor tienen un lugar en el análisis, ya que existe transferencia de calor de las cámaras de combustión hacia las líneas de enfriamiento, paredes del cilindro, aceite y válvulas además de las pérdidas mecánicas de potencia debido al movimiento de elementos auxiliares.
3. La apertura de las válvulas (admisión y escape) no corresponden exactamente al PMS y PMI, como lo podemos observar en un típico diagrama de distribución para un motor de encendido por chispa (ilustración 1.3.1).

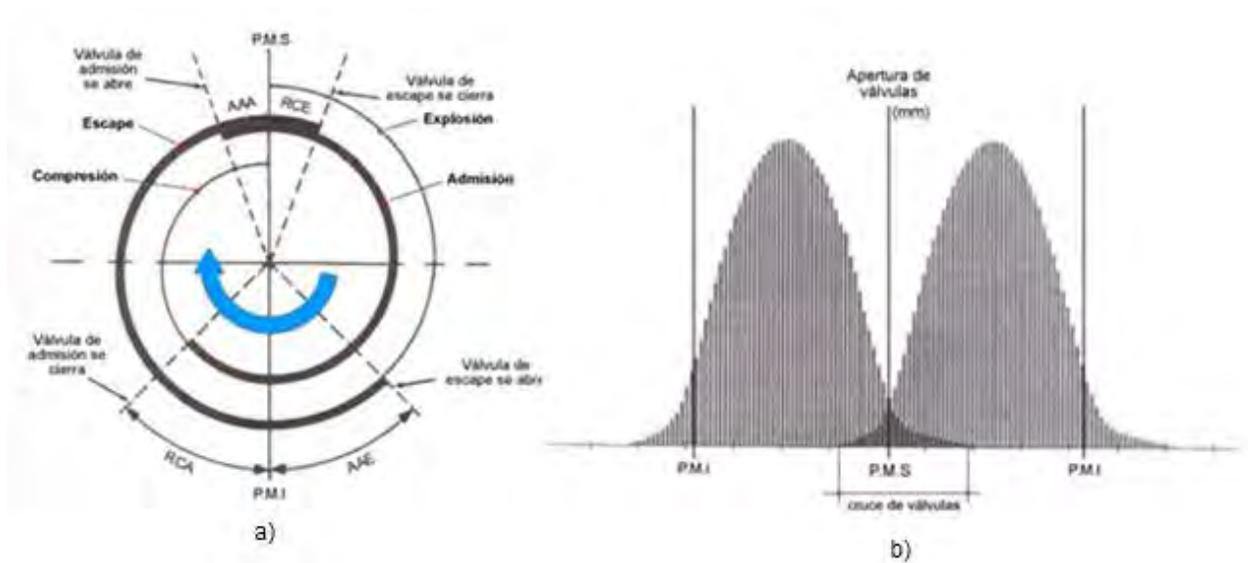


Ilustración 1.3.1 Diagrama de distribución a), gráfica de elevación de válvulas b). La figura nos muestra los puntos de adelanto y retraso de apertura de válvulas (a) y una gráfica de la apertura de las válvulas de acuerdo a la posición del pistón (b)

La etapa de admisión tiene una duración de más de 180 grados, mientras que la de compresión, se ve afectada por dos efectos: adelanto de apertura de admisión (AAA) y retraso de cierre de admisión (RCA). Esto no quiere decir que la etapa de compresión se detenga, al contrario, ésta continúa, pero la válvula de admisión sigue abierta. Por otro lado podemos observar que la etapa de escape de igual forma tiene una duración mayor a 180°, a estos efectos se les denomina adelanto de apertura de escape (AAE) y retraso de cierre de escape (RCE) ya que la duración de la etapa se prolonga. Cabe destacar que la etapa de expansión se ve comprometida debido a este efecto (Ilustración 1.3.1).

Estos cambios se realizan para llenar y evacuar de una manera más eficiente las cámaras de combustión utilizando la inercia de los gases.

A la sección comprendida por el AAA y RC, se le llama traslape o cruce de válvulas, en esta parte las válvulas de admisión y escape se mantienen abiertas al mismo tiempo.

4. Pérdidas por bombeo: Estas se originan por el trabajo al efectuar para el llenado y la evacuación de los gases de escape además de las pérdidas por la fricción entre los metales (pistones y cilindros).
5. La relación correspondiente entre presión y volumen en el ciclo de una manera más aproximada a la real se representa de acuerdo a la ilustración 1.3.2:

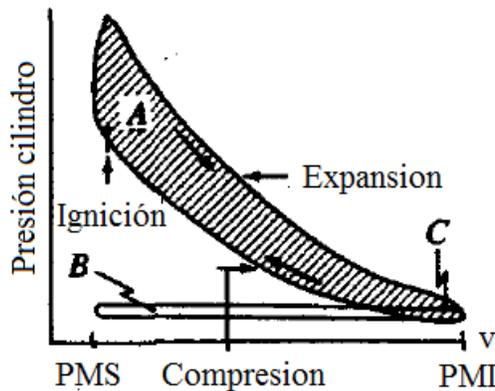


Ilustración 1.3.2 Diagrama presión- volumen para el ciclo de cuatro tiempos en un motor de encendido provocado por chispa. [5]

En donde el trabajo indicado por ciclo (por cilindro) se obtiene integrando el área dentro de las curvas del diagrama anterior.

Esta área se puede representar como:

$$W_{in,c} = \oint p \, dV \text{ -----(1.3.1)}$$

Que en términos del diagrama queda:

$$W_{in,c} = (\text{área A} + \text{área C}) - (\text{área B} + \text{área C}) = (\text{área A} - \text{área B}) \text{-----(1.3.2)}$$

El área B y área C son el trabajo transferido a los gases por bombeo en las etapas de admisión y de escape. Al resultado lo llamaremos trabajo indicado por ciclo.

De esto, la potencia que se desarrolla de este trabajo:

$$Pi = \frac{W_{in,c} N}{n_R} \text{ -----(1.3.3)}$$

Donde:

$n_R$  = Número de revoluciones del cigüeñal por etapa de expansión por cilindro, en motores de 4 tiempos, el valor de  $n_R = 2$ .

$N$  = Número de revoluciones del cigüeñal (rev/min).

$Pi$  = Potencia indicada.

La potencia indicada es la potencia neta entregada por el pistón, a diferencia de la potencia efectiva, ésta no considera las pérdidas de potencia que se transfieren a accesorios tales como bomba de agua, generador y sistema de distribución. La potencia efectiva es la que se registra a la salida del cigüeñal.

## **1.4 Sistemas de inyección.**

Los sistemas de inyección son los encargados de suministrar y distribuir el combustible a cada cilindro del motor, éstos están compuestos generalmente por una bomba, filtro, regulador, sensor de presión del combustible, inyectores, carburador u otro tipo de actuador (dependiendo del sistema al que se esté refiriendo), depósito de combustible, sistema de aceleración y sensor de oxígeno a grandes rasgos.

Estos sistemas podemos clasificarlos de acuerdo a diferentes configuraciones:

### **Por número de inyectores**

#### ***a) Sistema de inyección mono punto***

Este sistema consiste en un único inyector que se encuentra en el cuerpo de aceleración. La cantidad de combustible inyectada es calculada mediante la UCM (unidad de control del motor), la cual recibe la información de los diferentes sensores del motor. A un sistema con un solo carburador también se le puede llamar sistema mono punto, ya que es un único lugar en el cual el combustible es suministrado. En la ilustración 1.4.1 figura a) podemos observar como el suministro de combustible se lleva a cabo antes de la mariposa del cuerpo de aceleración, de ahí pasa por los conductos de admisión de cada cilindro hasta llegar a la cámara de combustión.

#### ***b) Sistema de inyección multipunto***

En esta configuración nos podemos encontrar a cada cilindro del motor acompañado de un inyector, el cual puede estar colocado en el sistema de admisión de aire o también puede estar inyectando directamente dentro de la cámara de combustión. A este último sistema se le denomina inyección directa Ver figura b) de ilustración 1.4.1.

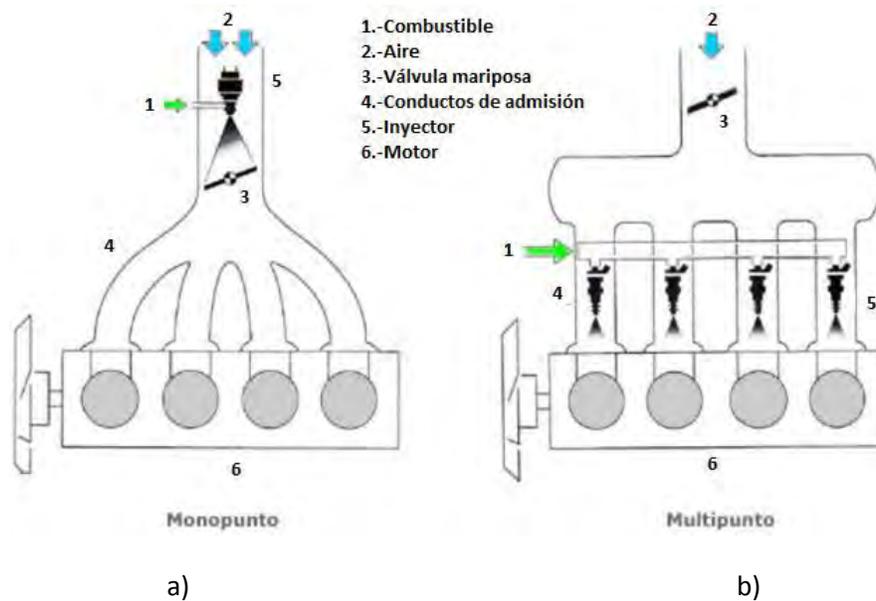


Ilustración 1.4.1 Inyección mono punto a) y multipunto b). [6]

## Por cómo se realiza la inyección

### a) Inyección Directa

La inyección directa se distingue por introducir el combustible directamente en la cámara de combustión, más específicamente en la parte superior del cilindro. Para este arreglo es esencial que la inyección ocurra alrededor de los 60 grados antes del PMS, ya que el tiempo de rociado de combustible es tan corto que es necesario crear una gran turbulencia. Para compensar el tiempo tan corto en la inyección y el mezclado, la presión en las líneas de combustible debe ser más alta que en la inyección indirecta. La posición y la dirección en la cual los inyectores apuntan son dos de las características con mayor importancia para obtener un óptimo rendimiento. Generalmente la mezcla aire/combustible se realiza de una manera homogénea cuando los cilindros son más largos, ya que se cuenta con un mayor espacio para mezclarse. [14]

### b) Inyección Indirecta

La forma de este sistema se distingue por que la inyección se lleva a cabo fuera de la cámara de combustión. Una vez realizada la inyección, el aire y el combustible se comienzan a mezclar para después ser llevados hacia el interior del cilindro en el motor. Este sistema tiene la desventaja de no poder aprovechar de una manera efectiva toda la cantidad de combustible debido a que se crea un remanente que se adhiere a los ductos de admisión antes de llegar a la cámara de combustión.

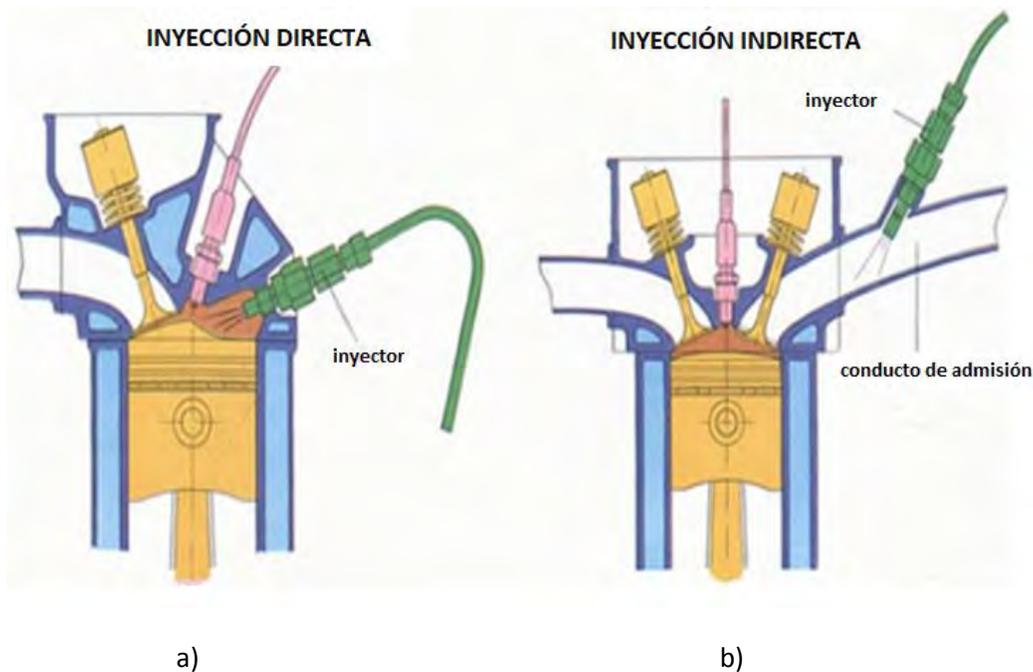


Ilustración 1.4.2 Inyección directa a) e inyección indirecta b). [7]

#### Por la forma de inyección:

##### a) Continua

Con este tipo de inyección, la boquilla del inyector y la válvula están permanentemente abiertos mientras el motor continúa en operación y la cantidad de combustible descargado en forma de spray es controlado por la geometría de la salida del inyector o con la presión de descarga del combustible, o una combinación de ambas variables.

##### b) Intermitente

El combustible es entregado en la zona de aspersión del inyector en intervalos regulares con una presión de descarga continua y la cantidad de combustible es controlada por un periodo de tiempo en la boquilla. La inyección intermitente se divide a su vez en:

##### -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.

##### -Semi secuencial:

El combustible es inyectado en los cilindros de forma que los inyectores abren y cierran en pares.

**-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. <sup>[15]</sup>

**Por su funcionamiento**

**a) Mecánica:**

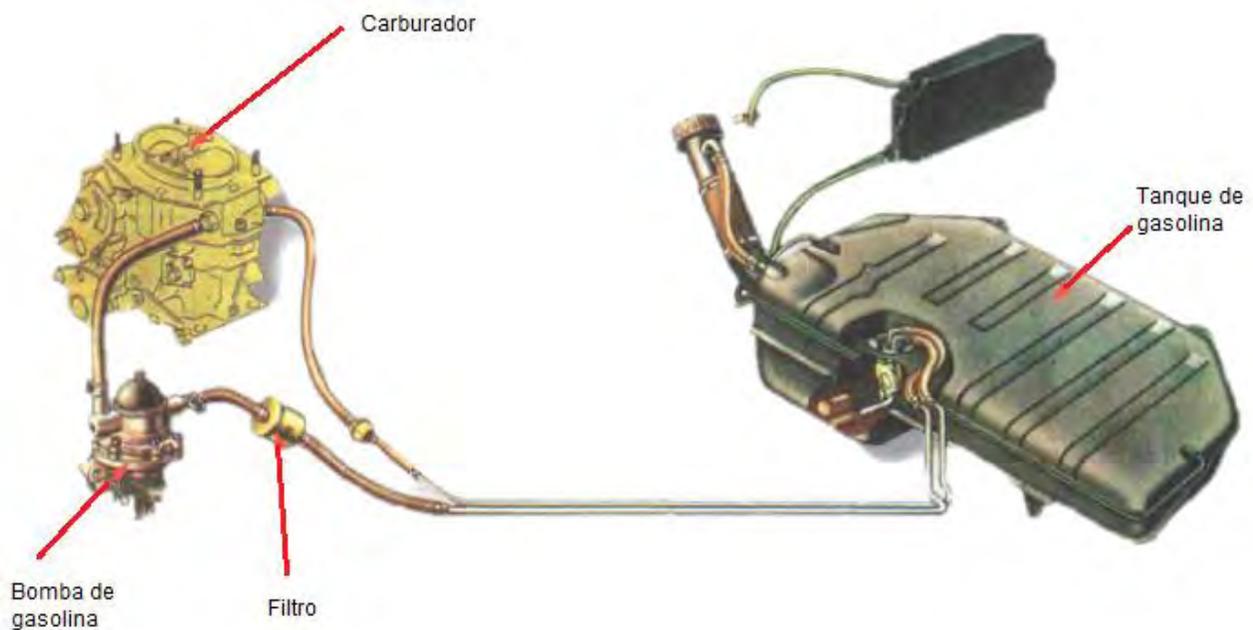
Para que este sistema pueda funcionar, es necesario que sus componentes funciones en sincronía; ellos son, la bomba de combustible mecánica (que aspira la gasolina y la suministra al motor), el filtro (que retiene la suciedad acumulada en el combustible) el carburados (que es el elemento principal del sistema, y mezcla la gasolina con el aire) y las líneas de combustible (que entrelazan a todos estos componentes). Además de estas piezas, el sistema de combustible cuenta con múltiple de admisión, ahogador, válvula de derivación y filtro de aire tal como se muestra en la ilustración 1.4.3.

Filtro de combustible: Retiene la suciedad y humedad de la gasolina (partículas de arena, gotas de agua etc.). Su ubicación depende del modelo del vehículo; puede estar en el compartimiento del motor o cercano al tanque de combustible.

Bomba de combustible mecánica: En este caso, es accionada por la rotación de un eje de levas. Un diagrama interior de la bomba se mueve hacia arriba y hacia abajo, para aspirar el combustible y bombearlo a través de la línea de combustible.

Carburador: Este dispositivo con ensambles mecánicos realiza la mezcla de aire combustible. Contiene un depósito de gasolina, desde el cual la suministra a la(s) esprea(s) correspondiente (s); el nivel de combustible se controla por medio de un flotador construido en el propio carburador. Una vez que el combustible es bombeado, filtrado y regulado se almacena temporalmente en un depósito auxiliar dentro del carburador; y ahí, su nivel es controlado mediante un flotador. Cuando el flotador está lleno, el flotador activa una válvula de paso o de derivación que hace que la presión del combustible excedente regrese al tanque.

El carburador consigue la mezcla de aire combustible basado en el efecto Venturi, que hace que toda corriente de aire que pasa por una canalización genere una baja de presión; esto se aprovecha para arrastrar el combustible proporcionado por el carburador. <sup>[17]</sup>



*Ilustración 1.4.3. Componentes del sistema de inyección mecánica.*

#### **b) Electrónica:**

Los principales componentes en este tipo de inyección son:

**UCM (Unidad de Control del Motor):** Es una computadora que contiene toda la lógica necesaria para controlar tanto la entrada de información enviada por los sensores, como las diferentes señales de salida. Determina la presión y cantidad de combustible que se necesita, controla todos los elementos de ajuste e inyectores y el momento del encendido.

**Sensores:** Son dispositivos que detectan manifestaciones de fenómenos físicos como: flujo, velocidad, aceleración, posición, cantidad, niveles, etc. y los convierte en señales eléctricas.

**Actuadores:** Son elementos capaces de generar una fuerza, a partir de líquidos, de energía eléctrica o energía gaseosa, por medio de ellos la unidad de control electrónico puede gestionar el comportamiento del motor para que se ajuste a las condiciones óptimas de funcionamiento

**Inyectores:** Son dispositivos controlados por la UCM. Cada inyector abre con un pulso eléctrico teniendo una duración de milisegundos. Los pulsos son enviados por la ECU y, a medida que cambian las rpm del motor, el tiempo de apertura del inyector cambia y se ajusta <sup>[16]</sup>.

## **1.5 Sistemas de ignición.**

El objetivo del sistema de ignición es llevar a cabo la combustión mediante la adición de calor, comúnmente generando una chispa en la mezcla en un momento específico del ciclo. Para hacer más

eficiente este proceso, la presión máxima de la mezcla aire/combustible debe desarrollarse después del PMS, ya que, de no ser así esta presión estaría deteniendo al pistón y por lo tanto se perdería potencia. Hay que considerar también que el tiempo en el que la presión de la mezcla se convierte en máxima es dependiente del régimen de revoluciones del motor. Siguiendo la idea anterior se puede plantear que a mayor régimen de revoluciones, la ignición debe iniciar antes.

En general podemos decir que existen diferentes tipos de sistemas de ignición:

**a) Sistema convencional**

Básicamente un sistema de encendido convencional está compuesto por los siguientes componentes:

- Batería: es la encargada de proporcionar la energía para el funcionamiento del circuito.
- Llave de contacto: Cierra el circuito para que el sistema de encendido se ponga en funcionamiento.
- Bobina de encendido: Transforma la baja tensión de batería en alta tensión.
- Distribuidor: Es el elemento encargado de distribuir la chispa en el momento preciso.
- Platino: Es quien conecta o desconecta el circuito primario de la bobina de encendido.
- Leva: Se aloja en el eje del distribuidor, contiene tantos lados como cilindros posee el motor.
- Condensador: Controla los picos de alto voltaje producidos en el secundario de la bobina de encendido.
- Rotor: Es un elemento que distribuye junto con los contactos de la tapa del distribuidor, la chispa a las distintas bujías.
- Avance de encendido: Estos sistemas son necesarios para el correcto funcionamiento del motor. Debido a que la combustión no se realiza de manera inmediata es necesario adelantar el salto de chispa en los distintos regímenes del motor.
- Cables de bujías: Son necesarios para transmitir la corriente del sistema hasta las bujías.
- Bujías de encendido: Por lo general se ubican en la cámara de combustión, son las encargadas de generar la chispa para que se realice la combustión. <sup>[18]</sup>

**b) Sistema de encendido transistorizado por contactos**

Muy parecido al encendido convencional pero con la diferencia que hace uso de un elemento o bloque electrónico, que es un transistor de potencia, su función es la de cortar la corriente del bobinado primario de la bobina de encendido.

Tiene varias ventajas respecto al encendido convencional:

- Mayor duración de los contactos del ruptor o platino.
- Chispa de mayor potencia.
- Los contactos están sometidos a bajas tensiones. <sup>[18]</sup>

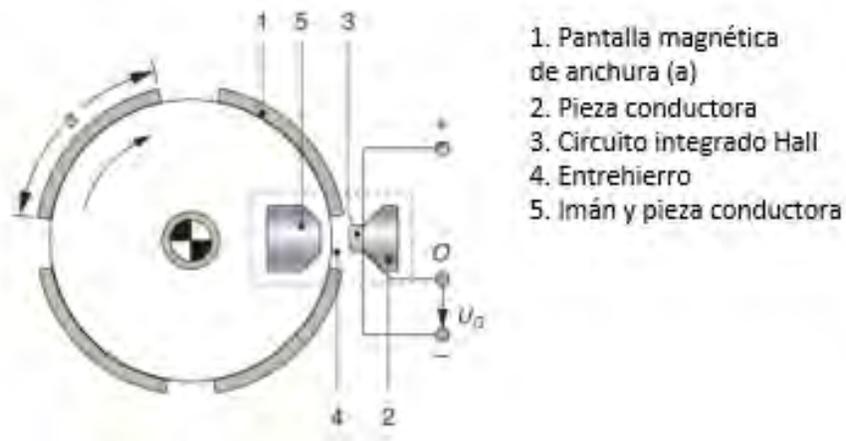
**c) Sistema de encendido transistorizado por efecto Hall**

En este sistema el platino o ruptor es sustituido por un generador de impulsos de efecto Hall.

El efecto Hall es un efecto físico que presentan algunos semiconductores.

El generador de impulsos físicamente se encuentra alojado en el distribuidor y se compone básicamente de:

- Barrera magnética (Parte fija)
- Pantalla magnética (Parte móvil giratoria)



*Ilustración 1.5.1 Generador de impulsos de efecto Hall. <sup>[18]</sup>*

La barrera magnética está formada por un imán permanente tal y como se muestra en la ilustración 1.5.1.

Todo sensor Hall siempre tiene tres conexiones, una para el positivo (por lo general es de 12 V), otra negativa o masa y otro cable de señal.

La pantalla magnética va unida al distribuidor, el número de las pantallas es igual al número de cilindros, que dirigen el campo magnético hacia la capa Hall cuando se encuentran frente al imán de esta manera se produce una tensión positiva en la salida del sensor Hall integrado.

El bloque electrónico o módulo tomará esa tensión producida por el sensor Hall y pondrá a masa el primario de la bobina de encendido,

En el momento que la pantalla deja de estar frente al imán, entonces el campo magnético deja de afectar al sensor Hall y deja de emitir voltaje.

La excitación del bloque electrónico desaparece y por consiguiente se interrumpe el primario de bobina y con ello se produce la chispa.

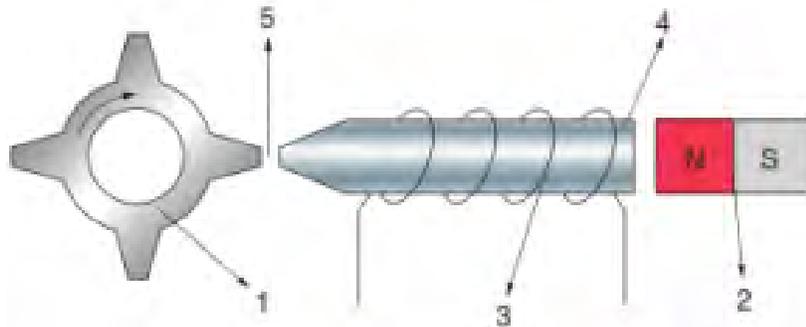
El avance de encendido en este sistema es igual que en el encendido convencional. <sup>[18]</sup>

#### **d) Encendido por generador de impulsos por inducción**

La inducción electromagnética es generada por impulsos eléctricos cuando hay variación de flujo magnético en el interior de una bobina.

El generador está ubicado en el distribuidor, está compuesto por:

- Rotor **(1)** (Magnético, unido al eje del distribuidor con tantos dientes como cilindros)
- Estator o unidad magnética (Imán permanente) **(2)**
- Bobina (Arrollada en el núcleo magnético) **(3)**
- Núcleo Magnético **(4)**



*Ilustración 1.5.2 Generador de impulsos por inducción <sup>[18]</sup>*

El entrehierro se ve reducido a medida que el diente del rotor se acerca al núcleo magnético, así el paso del flujo magnético es mejor aumentando la intensidad, es así como se muestra en la ilustración 1.5.2.

La variación de intensidad del flujo magnético produce en la bobina una tensión positiva.

El valor máximo positivo se produce justo antes de enfrentarse los dientes, ya que es en ese momento cuando el entrehierro disminuye con mayor rapidez.

El flujo magnético decrece cuando el diente comienza a alejarse. La tensión inducida en la bobina pasa a valores negativos y alcanza su valor mínimo.

En el momento en que los dientes se encuentran perfectamente alineados es cuando la tensión inducida cae a cero, por el motivo que la tensión pasa de positivo a negativo.

Justo en ese instante tiene lugar el encendido y debe coincidir con el salto de chispa en la bujía. <sup>[18]</sup>

**e) Encendido controlado por la UCM:**

Los sistemas de encendido controlados por la unidad de control activan y controlan la bobina de encendido.

Ésta acción la realiza mediante la información de varios sensores.

Los sistemas de encendido electrónico integral suprimen varios componentes como el avance de encendido por ejemplo.

Existen algunos componentes fundamentales para que se lleve a cabo la combustión como son:

**Sensor de reluctancia variable (CKP Crankshaft Position Sensor):** Este sensor indica la posición del cigüeñal que va ligada a la posición de un pistón de referencia con la que se puede conocer la posición de los restantes.

**Sensor de efecto Hall (CMP Camshaft Position Sensor):** Con este sensor se puede conocer la posición del árbol o de los árboles de levas (admisión y escape) y determinar el inicio del encendido de la mezcla.

**Bobinas:** Funcionan bajo el principio del transformador, están compuestas básicamente por un bobinado primario y uno secundario, recubierto de un material cerámico aislante resistente a las altas temperaturas que forma parte de la estructura externa y un electrodo que puede ser de Iridio o platino.

**Bujías:** Este es el componente encargado de encender la mezcla de aire combustible, en ella se genera la chispa debido a la energía que le suministra la bobina.

**UCM:** Es la unidad de control del motor que recolecta la información de los sensores y determina en qué momento se debe de llevar a cabo la combustión. Esta unidad cuenta con entradas/salidas analógicas y digitales que controlan los diferentes actuadores dentro del motor.

**Arnés:** Es el conjunto de cables y conectores por los que viajan las diferentes señales analógicas y digitales de los sensores, la alimentación hacia diferentes componentes eléctricos así como las conexiones de la UCM.

**TPS:** Este sensor indica el ángulo al cual se encuentra la mariposa del cuerpo de aceleración, con ayuda de este sensor se puede estimar la cantidad de aire que entra en la admisión.

**MAP:** Se utiliza este sensor para conocer la presión absoluta dentro del plenum con el objetivo de estimar la cantidad de aire que ingresa a los cilindros.

**Sensor de oxígeno:** Para conocer cómo se está llevando a cabo la combustión (mezcla rica o pobre en combustible de acuerdo a la relación lambda), el sensor de oxígeno es el encargado de medir la cantidad

de partículas que existen en el múltiple de escape, y con ello realizar las correcciones necesarias para reducir las partículas de hidrocarburos e incrementar el rendimiento de combustible

**Sensor de detonación (Knock):** Este sensor juega un papel importante en la ignición, puesto que indica cuando la combustión se está llevando a cabo antes del PMS, y con ello realizar las correcciones en los actuadores para que la potencia no se vea afectada negativamente y disminuir la cantidad de explosiones fuera del cilindro debido a residuos de combustible.

**Sensor de temperatura del refrigerante:** La temperatura del refrigerante juega un papel importante, ya que esta puede llegar a afectar el rendimiento del motor, la temperatura del motor debe llegar a su punto óptimo lo más rápido posible para que la combustión pueda realizarse de una manera mas eficiente.

**Sensor MAF:** Este sensor se usa para conocer la cantidad de flujo de aire dentro de los conductos de aire de admisión y con ello calcular la cantidad de aire que entra en cada cilindro. Suele usarse en lugar del sensor MAP

**Sensor de temperatura de aire de admisión (IAT):** Este otro sensor mide la temperatura del aire a la entrada de la admisión, esto para conocer la densidad del aire bajo diferentes condiciones atmosféricas, y mejorar la estimación de aire en cada cilindro.

## Capítulo 2. Descripción del motor YZF R6

El motor Yamaha R6 es considerado como un motor de alto rendimiento por su relación peso potencia, configuración de distribución, sistema de admisión, inyección y por el uso de aleaciones metálicas en algunos de sus componentes para reducir el peso del mismo. Este motor cuenta con cuatro cilindros y cada uno cuenta con 4 válvulas (2 en admisión y 2 en escape), en cuanto a la instrumentación, cuenta con sensor en el cigüeñal, sensor en el árbol de levas, sensor de temperatura en el sistema de refrigeración y un sensor para el nivel de aceite en el cárter.

Los sensores utilizados fueron sensores originales que ayudaron a medir las variables para controlar los fenómenos de inyección e ignición. Todo esto controlado mediante una computadora reprogramable que sirvió como canal de comunicación entre el usuario y el motor.

### 2.1 Ficha técnica

Con base en las especificaciones técnicas del motor se tiene la tabla 2.1.1

Tabla 2.1.1 Características motor Yamaha YZF R6. [13]

YAMAHA YZF R6	2010
<i>Configuración del motor</i>	en línea 4 cilindros
<i>Desplazamiento</i>	599 cc
<i>Sistema de enfriamiento</i>	liquido
<i>Relación de compresión</i>	13.1:1
<i>Válvulas por cilindro</i>	4
<i>Válvulas por cilindro (admisión)</i>	2
<i>Válvulas por cilindro (escape)</i>	2
<i>Diámetro x carrera</i>	67 x 42.5 mm
<i>Longitud de biela (centro a centro)</i>	90.5 mm
<i>Potencia máxima</i>	125 hp @ 13,500 rpm
<i>Par máximo</i>	44.25 lbs.ft @ 11,000 rpm
<i>Límite máximo de revoluciones</i>	16,000 rpm
<i>Sistema de distribución</i>	Doble árbol de levas.
<i>Orden de chispa</i>	1-2-4-3
<i>Grados para válvulas de admisión</i>	
AAA	39 grados
RCA	65 grados
Apertura	284 grados
<i>Grados para válvulas de escape</i>	
AAE	64 grados
RCE	24 grados
Apertura	268 grados

De la tabla anterior podemos obtener una referencia del par y potencia efectiva del motor.

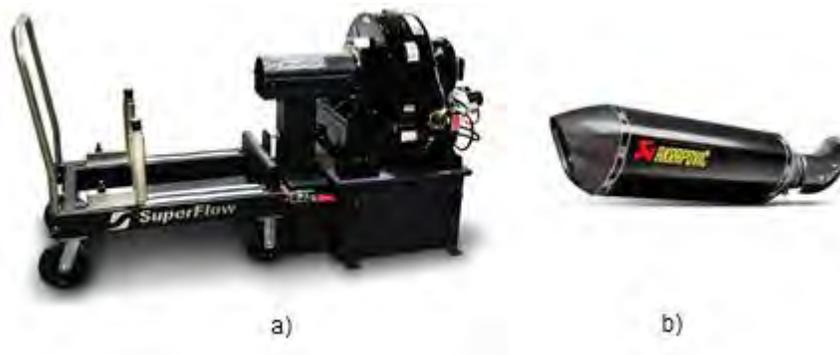
El motor Yamaha R6 2010 se recibió con 2200 millas recorridas. A continuación se muestra en la Ilustración 2.1.1 su estado.



*Ilustración 2.1.1 Motor adquirido Yamaha R6 2010*

## **2.2 Curvas características del motor**

De acuerdo a pruebas realizadas en un dinamómetro de rodillos marca SuperFlow Cycle Dyn para conocer las ventajas del silenciador Slip-On line por la marca AKRAPOVIC, las curvas de par y potencia se muestran en la ilustración 2.2.2.



*Ilustración 2.2.1. a) Dinamómetro de motor usado para obtener las curvas de par y potencia del motor Yamaha R6 2010. b) Silenciador de la marca AKRAPOVIC tipo Slip On usado durante las pruebas en dinamómetro.*

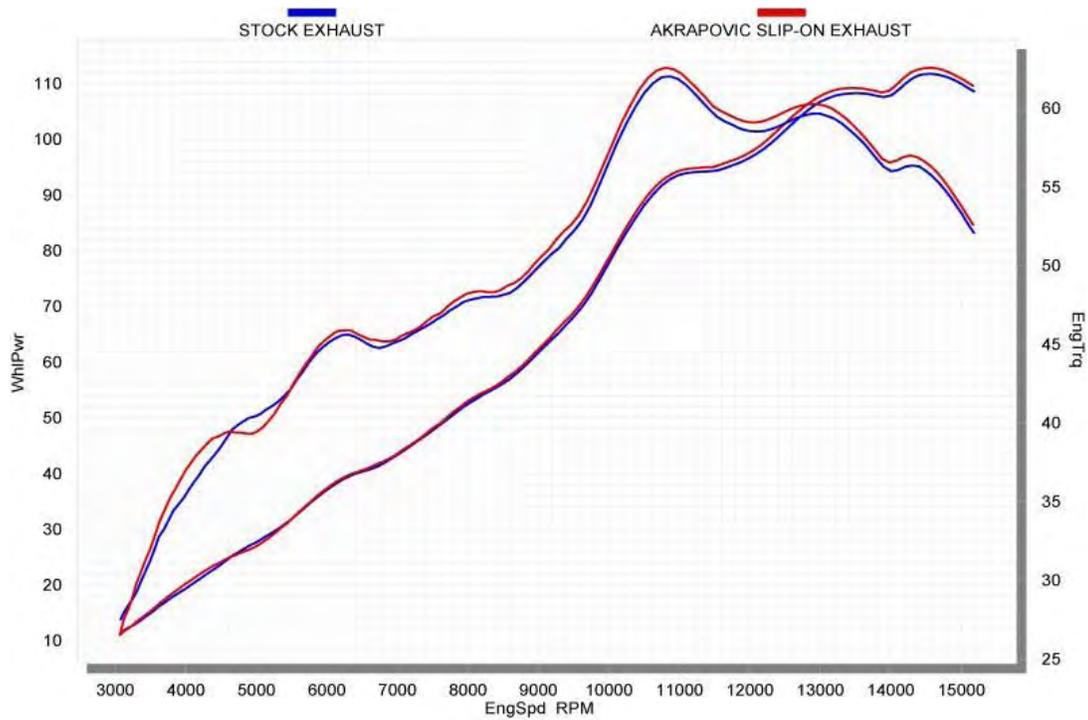
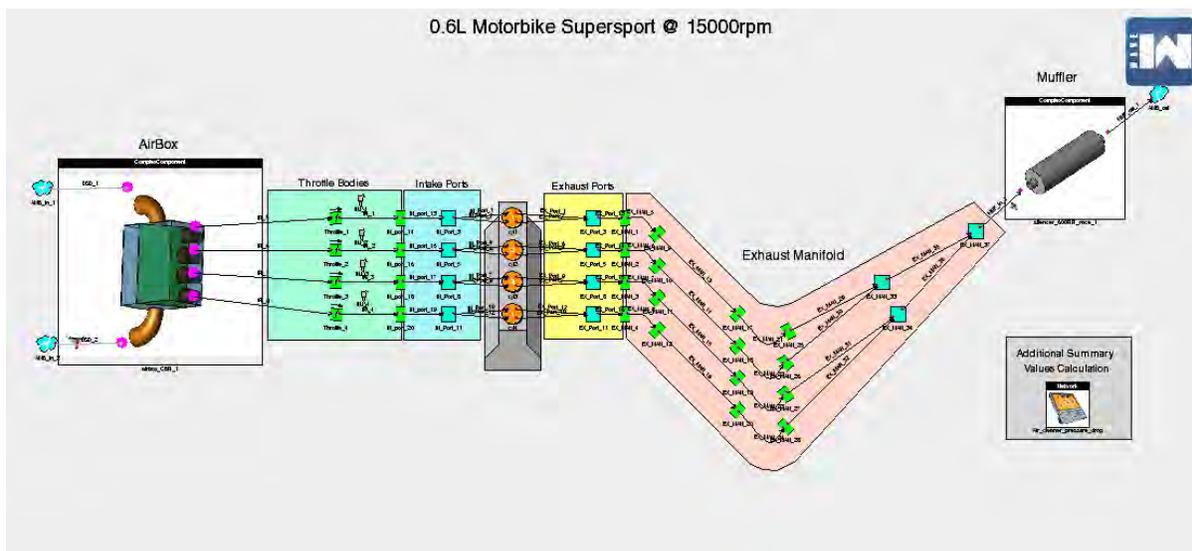
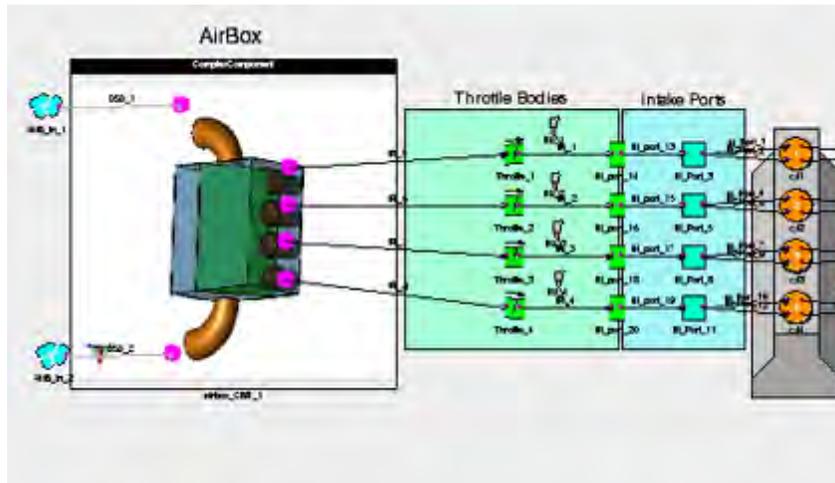


Ilustración 2.2.2 Curvas de dinamómetro Yamaha R6 2010 pruebas AKRAPOVIC. [8]

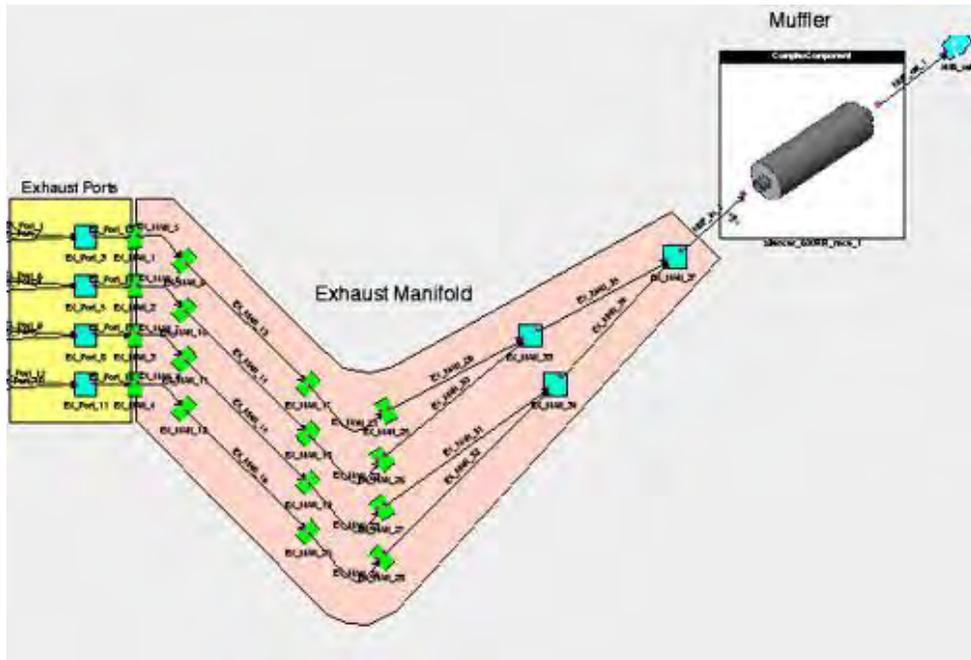
Las líneas azules indican la potencia y el par en las llantas con el escape de fábrica. Como punto de comparación se obtuvieron las curvas características de par y potencia del software Ricardo Wave. Este software cuenta con las configuraciones precargadas de un motor 0.6 litros en stock de 4 cilindros, alimentación de aire sin restricción en la admisión y una configuración en el escape 4-2-1 con silenciador como lo podemos observar por medio de la ilustración 2.2.3:



a)



b)



c)

Ilustración 2.2.3 a) Diagrama completo de simulación Ricardo wave original. b) Detalle de airbox (con cad adjunto para cfd) throttle bodies, intake ports y secciones (4 por cilindro) del motor Yamaha. c) Detalle de exhaust ports, exhaust manifold y muffler (con cad adjunto para análisis en cfd) usados en configuración original del motor.

Estas configuraciones son idénticas al motor usado por lo que se tomó como parámetro para determinar la potencia a la salida del cigüeñal del motor. Ilustración 2.2.3:

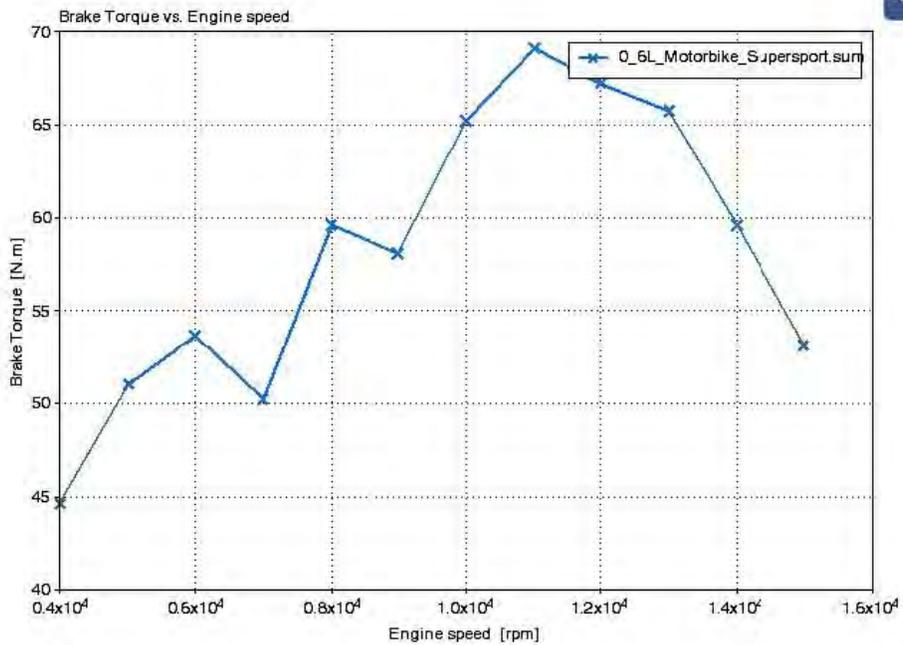
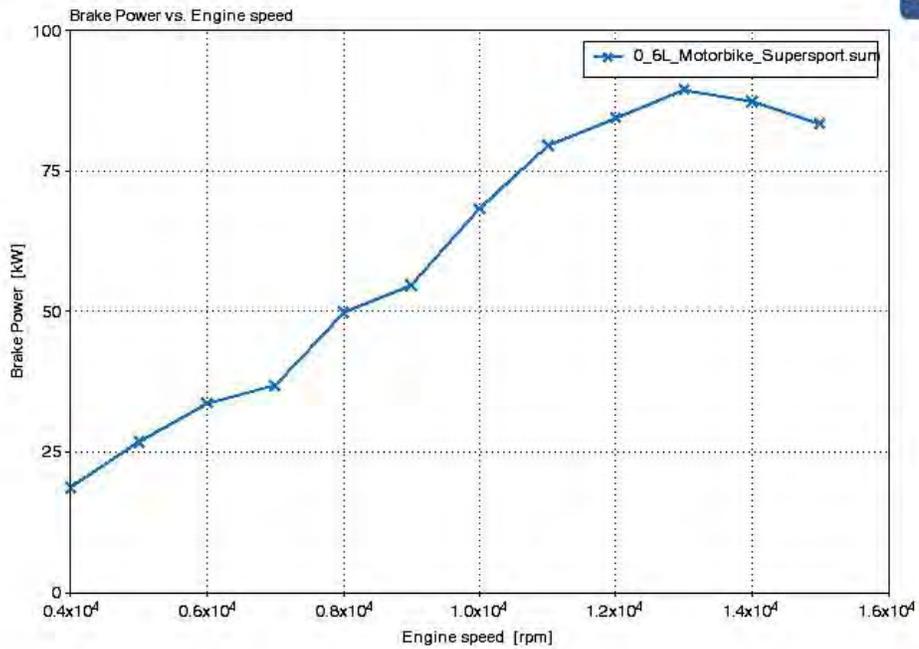


Ilustración 2.2.4 Curva de potencia (arriba), curva de par (abajo) en Ricardo wave original.

Cabe resaltar que la forma de las gráficas de potencia y par entre el dinamómetro y la simulación respetan la misma tendencia, esto en cuanto a tener la misma cantidad de valles y crestas, lo que significa que también en el dinamómetro se utilizaron las mismas configuraciones de escape y admisión.

## 2.3 Sensores

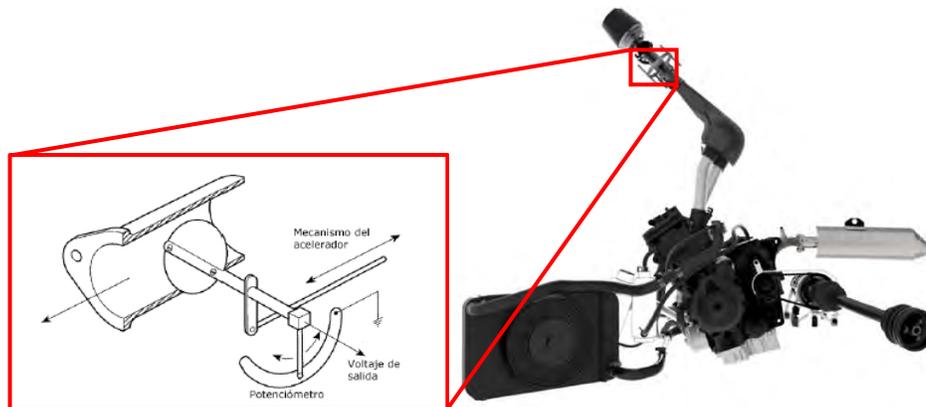
Existen variables como la temperatura del motor, temperatura de aire de admisión y cantidad de aire que está ingresando al motor que se necesitan medir para que la UCM (unidad de control del motor) realice los cálculos necesarios para la dosificación e ignición. Los sensores que se utilizan en el vehículo los podemos ordenar de acuerdo a su funcionalidad y a su principio de operación:

### 2.3.1 Sensores de posición

Estos sensores indican la ubicación de los componentes tales como árboles de levas y pistones con ayuda de la posición del cigüeñal y el papalote del cuerpo de aceleración.

#### *Sensor de cuerpo de aceleración (TPS)*

Por lo general a este sensor se le conoce como sensor TPS (Throttle Position Sensor). Este sensor indica el porcentaje de apertura en la mariposa del cuerpo de aceleración permitiendo hacer una estimación del flujo de aire que va hacia el motor (Ilustración 2.3.1.1).



*Ilustración 2.3.1.1 Ubicación del sensor TPS*

El principio de operación es similar al de un potenciómetro, mediante una variación de la resistencia se puede determinar la cantidad de corriente que fluye a través del circuito. Esta resistividad variable se logra con el movimiento del mecanismo del acelerador que se encuentra del lado del piloto, con lo que dicha apertura se puede relacionar a un régimen de revoluciones.

El sensor que se utilizó fue de la marca Magneti Marelli modelo PF2c, mismo que venía integrado en el cuerpo de aceleración adquirido en la competencia. Dicho cuerpo de aceleración cumple con las geometrías descritas en el reglamento "FSAE RULES 2017" de las competencias en Italia y Austria. Su

calibración se realizó ajustando los parámetros de la resistencia en la apertura y cierre total del papalote. Dichos valores se muestran en la tabla 2.3.1.1.

Tabla 2.3.1.1 Tabla de calibración para sensor TPS en Performance Electronics

TPS	
voltage based TPS	TPS Voltage 0.00
0% Throttle Voltage	1.80
100% Throttle Voltage	2.93
Low Out Of Range Limit (V)	0.00
High Out Of Range Limit (V)	5.00

### Sensor de árbol de levas. CMP (Camshaft Position Sensor)

El sensor se utilizó para determinar la posición de uno de los árboles de levas (admisión), y determinar tanto el tiempo como el inicio de la inyección de combustible.

Al principio de funcionamiento de este sensor se le denomina efecto Hall (ilustración 2.3.1.2), el cual consta de un semiconductor por el que se hace fluir una corriente eléctrica que, al someterlo a un campo magnético perpendicular a él, dará por resultado una diferencia de potencial que se traduce en una señal cuadrada y cuya frecuencia cambia de acuerdo al régimen de revoluciones del árbol de levas. El sensor indica a la UCM la etapa del ciclo en la que se encuentra y con ello calcular el momento en que se debe realizar la inyección de combustible.



Ilustración 2.3.1.2 Sensor de efecto Hall. En la fotografía podemos observar el sensor original incluido en el motor (derecho) y la rueda que está unida al árbol de levas de los puertos de admisión (izquierdo). [9]

### Sensor de cigüeñal. CKP (Crankshaft Position Sensor)

Este sensor está constituido por una bobina, un imán y una rueda dentada que al girar induce una corriente en la bobina, misma que cambia con el tiempo, traduciéndolo así a las revoluciones de giro del cigüeñal, a este fenómeno se le conoce como reluctancia variable (ver ilustración 2.3.1.3).

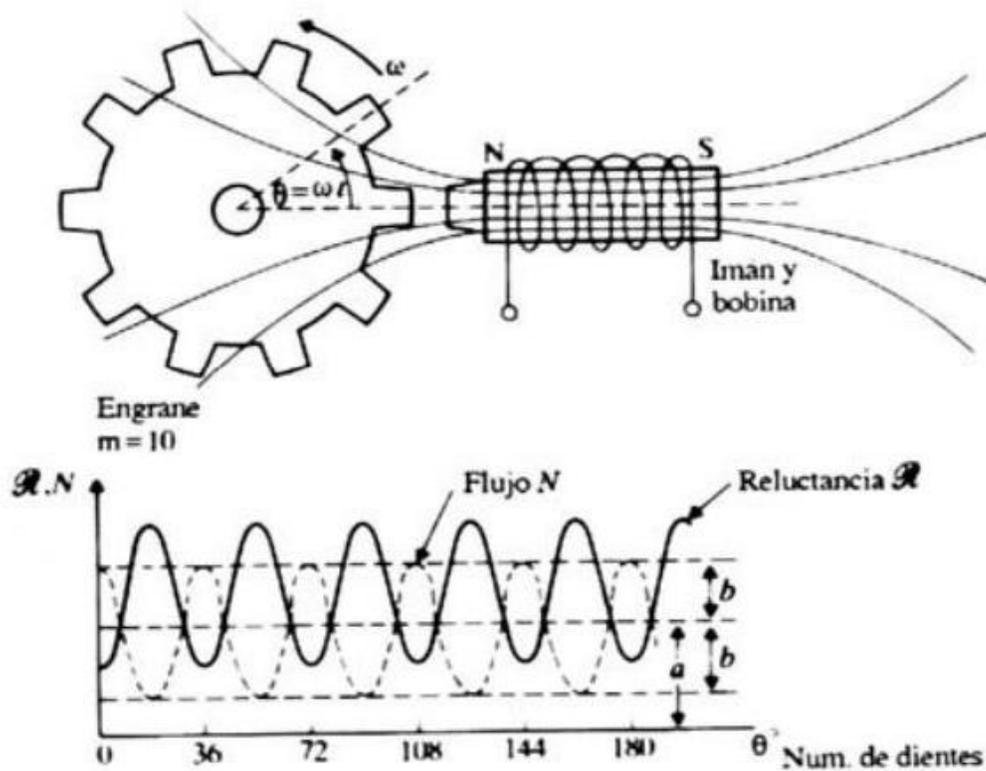


Ilustración 2.3.1.3 Funcionamiento de sensor por reluctancia variable. Esquematación del fenómeno de reluctancia variable, lo que da por resultado una señal sinusoidal. [10]

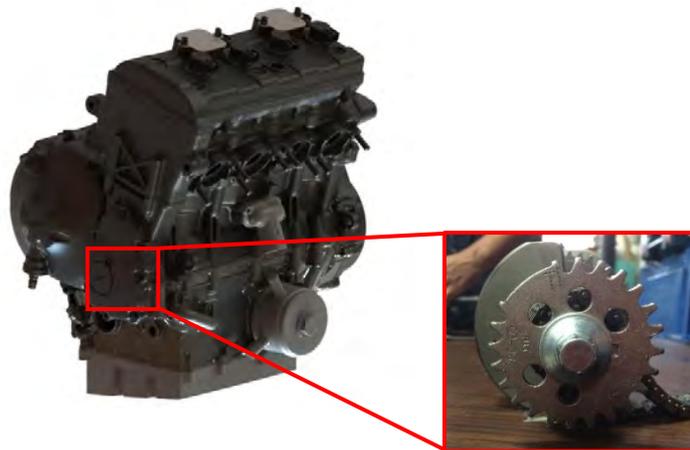


Ilustración 2.3.1.4 Ubicación de disco dentado en motor.

El disco dentado del motor cuenta con 22 dientes y 1 diente largo, este disco está conectado al cigüeñal e indica la posición del primer pistón cuando éste se encuentra en el punto muerto superior.

## 2.3.2 Sensores de temperatura

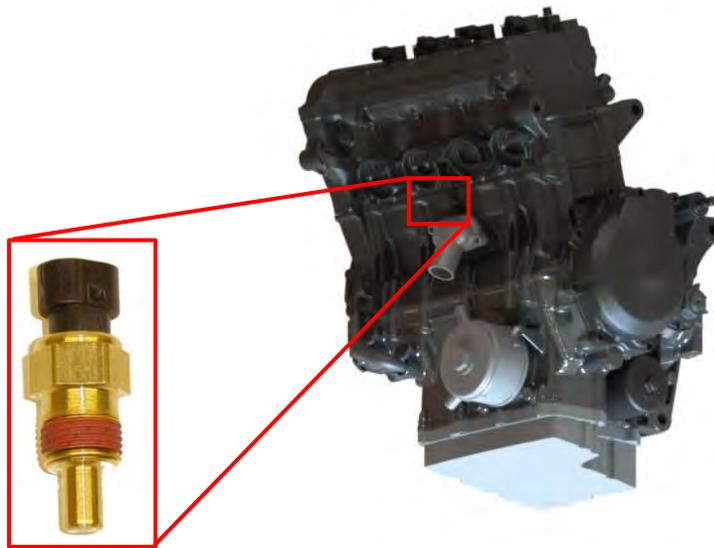
### *Sensor de temperatura de aire. IAT (Inlet Air Temperature)*

Este sensor mide la temperatura del aire a la entrada del múltiple de admisión (ilustración 2.3.2.2). Este funciona gracias a un termistor, en el cual el valor de la resistencia es inversamente proporcional al de la temperatura. Con este sensor se realizaron las compensaciones por variaciones de temperatura ambiente.

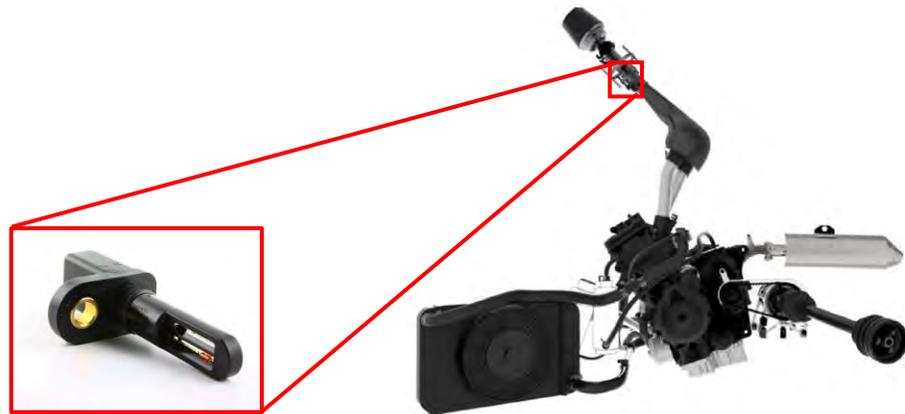
Para la calibración, se necesitan dos puntos de temperatura como referencia, por lo que el primero se tomó a 0°C y el otro a la temperatura de ebullición del agua en la Ciudad de México (94°C). Con esto se registró el valor de la resistencia del sensor en la configuración de la UCM.

### *Sensor de temperatura del refrigerante del motor. ECT (Engine Coolant Temperature)*

El principio de funcionamiento de este sensor es el mismo que el anterior: el valor de la resistencia es inversamente proporcional al de la temperatura. El sensor que se usó es el original del motor Yamaha YZF R6, ya que la UCM cuenta con soporte y configuración precargada para estos sensores, lo que facilitó su calibración (ilustración 2.3.2.1).



*Ilustración 2.3.2.1 Ubicación de sensor para medición de temperatura de refrigerante*



*Ilustración 2.3.2.2 Ubicación de sensor IAT*

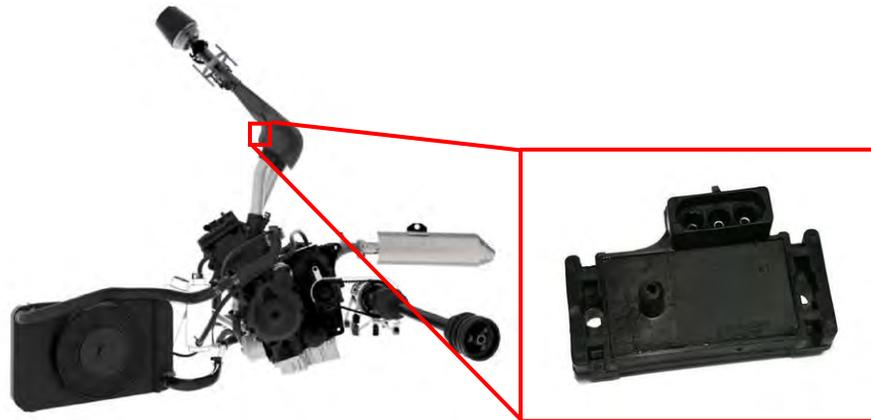
### **2.3.3 Sensor de presión**

*Sensor de presión. MAP (Manifold Absolute Pressure)*

Puesto que la cantidad de aire dentro del múltiple de admisión es función de la apertura del papalote y apertura de las válvulas en el puerto de admisión, es necesario medir esta carga de aire que va a los cilindros para estimar la cantidad de combustible necesario.

Los sensores MAP permiten encontrar una relación entre la cantidad de aire y la presión que se registra. Este sensor funciona gracias a un diafragma cuya deformación permite registrar una variación de voltaje que se traduce en un cambio de presión.

Para la instrumentación del motor se utilizó un sensor GM de 1 bar puesto que el motor cuenta con aspiración natural y la presión mínima estimada en el múltiple de admisión es de 0.2 bar. Este sensor se trabajó con prototipos anteriores, por lo que ya se tenía experiencia en él. La calibración del sensor se realizó con los valores precargados en la UCM. El sensor se ubicó en la parte trasera del plenum, ya que es ahí donde no existen grandes variaciones de velocidad en comparación con otros lugares del mismo múltiple de admisión.



*Ilustración 2.3.3.1 Ubicación de sensor MAP. Fotografía del sensor MAP utilizado.*

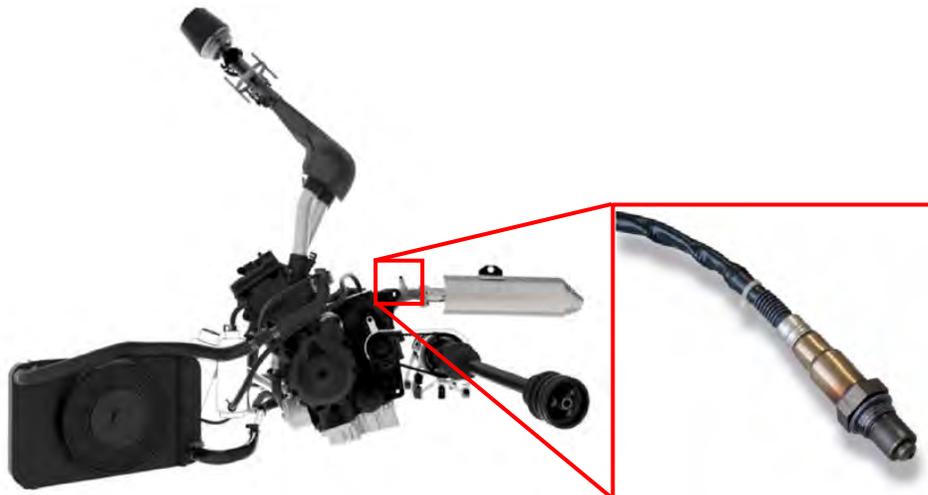
## **2.3.4 Otros sensores**

### *Sensor de oxígeno*

El sensor Lambda usado en el prototipo fue de la marca BOSCH, modelo LSU4.9.

Este sensor está diseñado para registrar y comparar la cantidad de oxígeno en los gases de escape en motores a gasolina o diésel, dicho sensor así como su ubicación en el prototipo se muestra en la ilustración 2.3.4.1.

Este sensor funciona gracias a un electrolito sólido de circonio cuyo material es un conductor iónico de oxígeno, éste mide la temperatura de los gases a partir de 300 °C, por lo que el sensor cuenta con un calentador integrado; el contenido de oxígeno en el gas de escape se mide mediante los electrodos situados en la parte interior (referencia/aire ambiental) y la parte del gas de escape (gas de medición). La señal de salida se crea con los iones de oxígeno que se mueven por el elemento e intentan compensar la diferencia de oxígeno. <sup>[10]</sup>

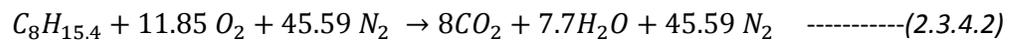


*Ilustración 2.3.4.1 Ubicación sensor lambda*

Existe una relación que determina la cantidad de aire que es necesaria para que la combustión se lleve a cabo de una manera ideal, a esta relación se le conoce como relación lambda, y matemáticamente se define como:

$$\lambda = \frac{\text{Relacion}_{\text{combustible}}^{\text{aire}} \text{real}}{\text{Relacion}_{\text{combustible}}^{\text{aire}} \text{ideal}} \text{-----}(2.3.4.1)$$

Para este caso, la relación de aire/combustible ideal (estequiometria) es igual a 14.7 para una combustión completa de acuerdo al balance químico:



Realizando la suma de los pesos molares del aire y del combustible esto queda:

$$r_{a/c} = \frac{\text{peso molar del aire}}{\text{peso molar del combustible}} = \frac{11.85 \left( \left( 31.9988 \frac{gr}{mol} \right) + 45.59 \left( 28.01348 \frac{gr}{mol} \right) \right) * 0.9902}{8 \left( 12.0107 \frac{gr}{mol} \right) + 15.4 \left( 1.00794 \frac{gr}{mol} \right)} \text{-----}(2.3.4.3)$$

Se consideró que la cantidad de oxígeno y nitrógeno en el aire era de 99.02%.

De lo que resulta

$$r_{a/c} = 14.7 \text{-----}(2.3.4.4)$$

Donde  $r_{a/c}$  es la relación aire combustible.

Por lo tanto, este sensor registra la cantidad de oxígeno que hay en el ambiente y lo compara con el que hay después de la combustión, de lo que se puede obtener un valor de Lambda que nos muestra cuando la mezcla fue “rica” o “pobre” en cuestión de combustible. De acuerdo a la tabla 2.3.4.1:

Tabla 2.3.4.1Valores de lambda

Valor de lambda	Significado
$\lambda = 1$	Mezcla ideal
$\lambda < 1$	Mezcla rica en combustible
$\lambda > 1$	Mezcla pobre en combustible

## 2.4 Unidad de control de motor (UCM)

La UCM es el dispositivo electrónico que mediante la lectura de los sensores (entradas), calcula y da una respuesta mediante los actuadores (salidas). En el motor, los actuadores que controlaremos serán inyectores y las bobinas.

La UCM que se utilizó fue de la marca Performance Electronics serie 8400 ya que ésta es reprogramable con una interfaz sencilla, tiene soporte e información precargada de los sensores Yamaha originales, además de que se cuenta con bastante documentación disponible (diagramas, compatibilidad con sensores y manuales), experiencia en uso y soporte técnico.

Esta computadora cuenta además con:

- 1MB de memoria para adquisición de datos internos y externos.
- Tablas de inyección e ignición, así como graficas desplegadas en 3D.
- Tablas de Compensaciones por temperatura, presión barométrica e ignición.
- 8 entradas analógicas y 7 digitales.
- 10 salidas digitales y 8 analógicas.
- Funciones de diagnóstico.

Puesto que se dio un enfoque a la modificación de los mapas de inyección e ignición con los sensores antes mencionados en este capítulo, se considera que la ECU es la adecuada para este fin.



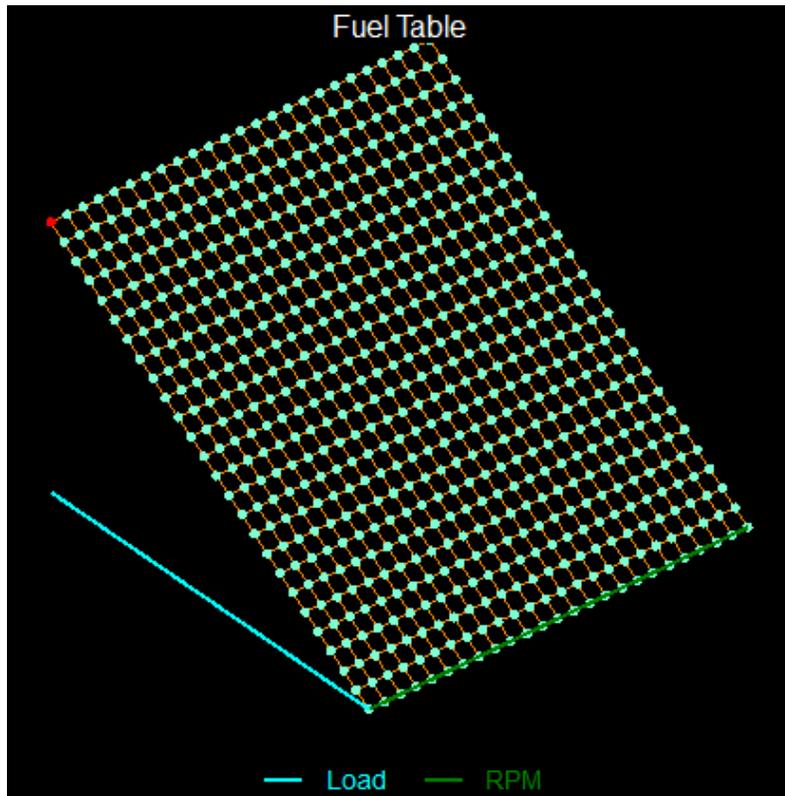
*Ilustración 2.4.1 UCM reprogramable marca Performance Electronics [11]*

### 2.4.1 Mapa de inyección

El mapa de inyección es una representación visual de la cantidad de combustible que se debe de inyectar en todo el rango de revoluciones del motor respecto de un sensor de carga, este sensor en nuestro caso es un sensor MAP (ver ilustración 2.4.1.1).

C A R G A	RPM											
	0	325	650	975	1300	1625	1950	2275	2600	2925	3250	3575
15.0	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
14.5	5.81	5.81	5.81	5.81	5.81	5.81	5.81	5.81	5.81	5.81	5.81	5.81
14.0	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63
13.5	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44
13.0	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25
12.5	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06
12.0	4.88	4.88	4.88	4.88	4.88	4.88	4.88	4.88	4.88	4.88	4.88	4.88
11.5	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69
11.0	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
10.5	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
10.0	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13
9.5	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94
9.0	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
8.5	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56
8.0	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38
7.5	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19

a)



b)

Ilustración 2.4.1.1 Interfaz del mapa de inyección

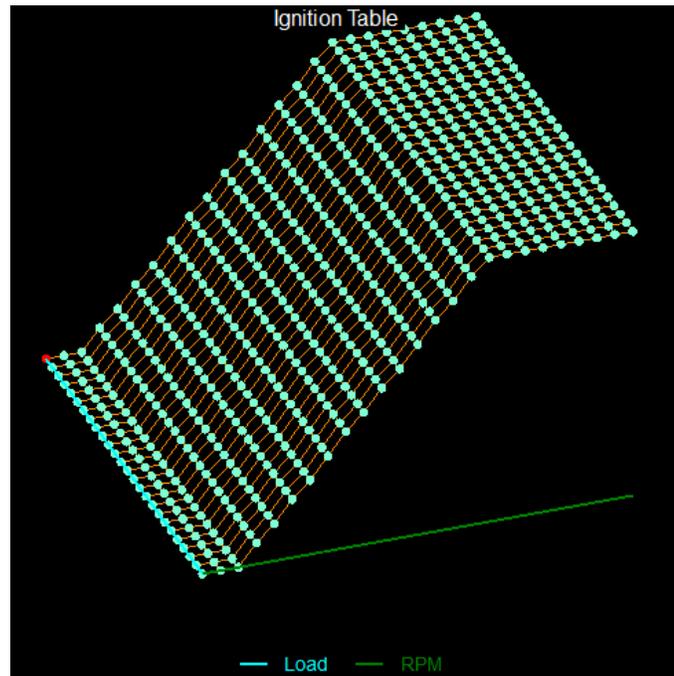
En la ilustración 2.4.1.1 la imagen a) muestra el mapa de inyección cuyos ejes desglosan la lectura del sensor de carga, mismo que puede tener la escala que nosotros configuremos, y en el otro se muestran las revoluciones por minuto en el motor. En la parte central se muestra el tiempo (en milisegundos) de inyección de combustible. En la imagen número b) podemos observar una gráfica en tres dimensiones donde se plasman los ejes anteriores, y donde se esclarecen los tiempos de inyección de combustible.

### 2.4.2 Mapa de ignición

El mapa de ignición es muy similar al mapa de inyección (ver ilustración 2.4.2.1).

		RPM											
		0	325	650	975	1300	1625	1950	2275	2600	2925	3250	3575
C A R G A	15.0	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	14.5	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	14.0	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	13.5	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	13.0	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	12.5	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	12.0	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	11.5	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	11.0	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	10.5	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	10.0	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	9.5	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	9.0	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	8.5	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	8.0	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
	7.5	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0
7.0	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0	
6.5	10.0	10.0	10.0	12.0	13.5	15.5	17.0	19.0	21.0	22.5	24.5	26.0	

a)



b)

*Ilustración 2.4.2.1 Interfaz del mapa de ignición*

En la imagen a), tenemos a la tabla cuyos ejes están compuestos por una columna principal que muestra al mismo sensor de carga que la tabla de inyección y un renglón que muestra las revoluciones del motor. En la parte principal de la tabla se observan los grados que se adelantará la chispa respecto del punto muerto superior para adelantar el proceso de ignición dependiendo del rango de revoluciones. La imagen b) muestra una representación en 3 dimensiones del adelanto en grados de la chispa en la bujía.

### **2.4.3 Compensaciones.**

Las compensaciones son una forma de ajustar las variaciones de temperatura y presión del aire en el ambiente, variaciones de voltaje en la batería, temperatura del motor, entre otras que no pueden ser controladas y que pueden afectar el rendimiento del motor.

Para este caso nos enfocamos en las compensaciones de temperatura y presión, de acuerdo a los registros la base de datos de worldmeteo del año 2016, los lugares de las competencias se encuentran a diferentes alturas y con diferente temperatura ambiental (ver tabla 2.4.3.1).

Tabla 2.4.3.1 Valores de temperatura y presión en competencias

País	Temperatura promedio (K)	Presión atmosférica (Pa)
México (C.U. 10.6-24.1 °C)	290.5	77955
Italia (Parma) (15.9-28.8 °C)	295.5	101321
Austria (Spielberg 12.1-24°C)	291.2	92685
Alemania (Hockenheim 13.8-24.7)	292.4	98781

Para la configuración del motor se consideraran los datos de temperatura y presión correspondientes a la Facultad de ingeniería de CU. Se utilizaron dos sensores (sensor MAP y sensor IAT) cuyos valores se usaron para realizar las compensaciones ya que estos describirán la cantidad de aire que existe en el ambiente. Para calcular el porcentaje de compensación se utilizó la ecuación de estado considerando aire húmedo:

$$p = \rho R T_v \quad (2.4.3.1)$$

Donde

$\rho = \text{Densidad [Kg/m}^3\text{]}$

$R = \text{Constante del gas (aire seco)[287 J/Kg K]}$

$T_v = \text{Temperatura virtual [k].}$

$T_v$  es la temperatura que el aire seco debe tener para igualar la densidad del aire húmedo y se define como:

$$T_v = \frac{T}{\left[1 - \frac{e}{p}(1 - \epsilon)\right]} = 1.01T \quad (2.4.3.2)$$

En donde el valor de 1.01 es válido donde la presión parcial del vapor de agua “e” toma un rango de [1 – 5 Kpa] y la presión “p” toma un rango de [80-100 Kpa].

Se consideró un rango de operación en la presión de 80 (presión atmosférica en CU) a 101 Kpa (presión atmosférica a nivel del mar) y un rango de temperatura de 17 (mínima) 22 °C (máxima) debido a las temperaturas registradas en cada lugar de las competencias.

## 2.5 Ricardo wave

Puesto que la potencia es dependiente de las geometrías y configuración del múltiple de admisión, múltiple de escape, temperatura del motor, inyección de combustible entre otros sistemas y realizar las

modificaciones a estos sistemas lleva mucho tiempo, se optó por realizar simulaciones en un software llamado Ricardo Wave.

Este software de simulación se utiliza en diferentes sectores de la industria, incluidos el transporte terrestre y marino, vehículos de alto rendimiento y generación de energía para el análisis de la dinámica de motores y gases denominado de una sola dimensión. También permite llevar a cabo simulaciones acústicas y de rendimiento basadas virtualmente en cualquier configuración de sistema de admisión, combustión y escape, en el que se puede incluir un modelo de transmisión para permitir la simulación completa del vehículo.

Este módulo permite crear un modelo del motor completo, caracterizando y definiendo todas sus propiedades, tales como parámetros geométricos, térmicos y mecánicos; así como caracterizar las propiedades de los materiales, del múltiple de admisión, múltiple de escape, sistema de enfriamiento y combustible, definir modelos de combustión, modelos de turbulencia entre otros.

## **Capítulo 3. Planteamiento del problema**

El punto máximo de potencia efectiva del motor se encuentra en un intervalo de 13,000 rpm, lo que provoca que el vehículo tenga que recorrer una distancia mayor a 100 metros para llegar a ese punto máximo de revoluciones.

Los circuitos de la competencia tienen rectas cortas (entre 80 y 100 metros) y en su mayoría son curvas, por lo que para obtener un tiempo de vuelta bajo se necesita que el motor genere la mayor cantidad de potencia posible desde un intervalo bajo de revoluciones.

Las características del motor (cilindrada, número de pistones, tamaño de bielas, tipo de distribución entre otras) restringen el intervalo de revoluciones a las cuales es posible obtener la máxima potencia.

### **3.1 Objetivos**

- Igualar el valor original de la potencia efectiva en el motor en un intervalo de revoluciones inferior al de fábrica, usando una UCM reprogramable de la marca Performance Electronics.
- Configurar el mapa de inyección (combustible), ignición (adelanto de chisa) y compensaciones atmosféricas de un motor Yamaha R6 que se usará en un prototipo tipo formula.
- Estimar el comportamiento de la curva de potencia efectiva del motor mediante un análisis teórico y simulaciones realizadas con el programa Ricardo wave.

## Capítulo 4. Desarrollo

### 4.1 Metodología

Se utilizó la curva de consumo específico de combustible para encontrar un intervalo menor de revoluciones en las que la eficiencia efectiva del motor es mayor. Con ello se intentó igualar la potencia original en dicho rango, garantizando así que se tendría el mejor desempeño.

### 4.2 Análisis teórico

Para los cálculos de la eficiencia utilizaremos la gráfica de consumo específico de combustible de la simulación de Ricardo wave. Ver ilustración 4.2.1:

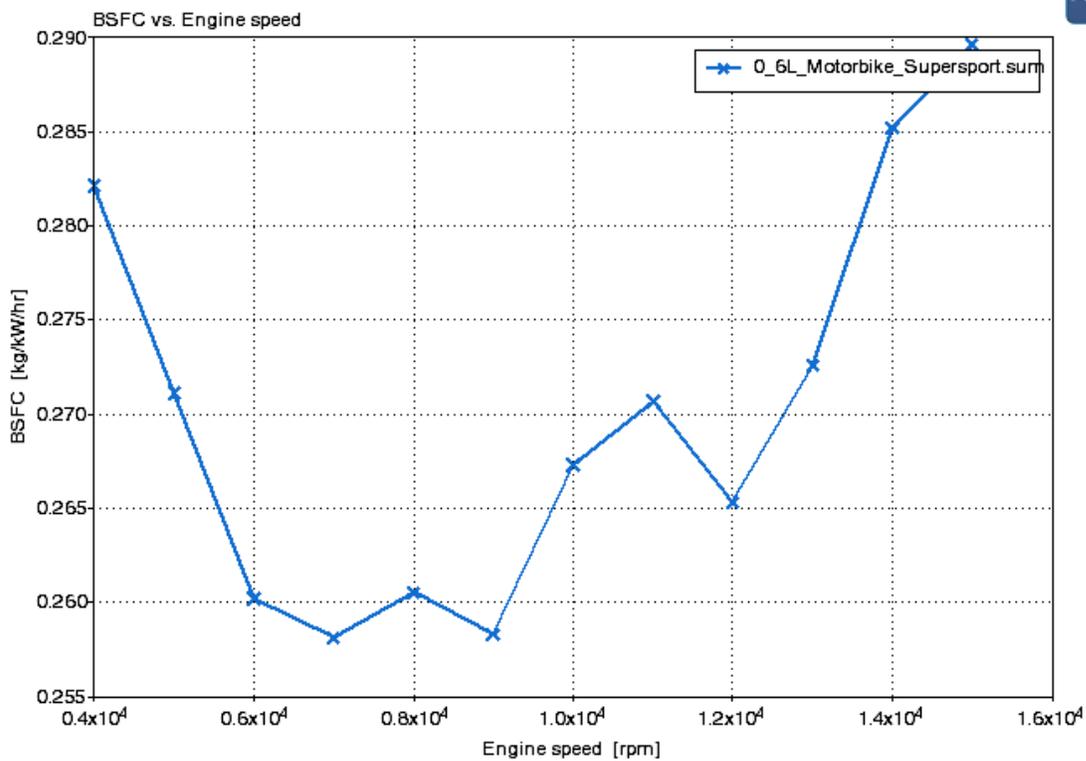


Ilustración 4.2.1 Gráfica de gasto específico de combustible para un motor Yamaha R6

De acuerdo a la publicación “Internal combustion engine fundamentals” por John B. Heywood en 1988 , la eficiencia efectiva de un motor se expresa:

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_c h_c} \quad (4.2.1)$$

En donde  $\dot{m}_c$  equivale al flujo másico de combustible y se expresa como:

$$\dot{m}_c = g_{ec} N_e \quad (4.2.2)$$

Al sustituir la ecuación (4.1) en (4.2) queda:

$$\eta_e = \frac{1}{g_{ec} h_c} \quad (4.2.3)$$

En donde  $h_c$  es el poder calorífico de la gasolina y equivale a 43950 Kj/Kg considerando una densidad de 730 kg/m<sup>3</sup>.

Con esta información y las curvas de potencia y gasto específico de combustible obtenemos la gráfica de la eficiencia efectiva (ver ilustración 4.2.2).

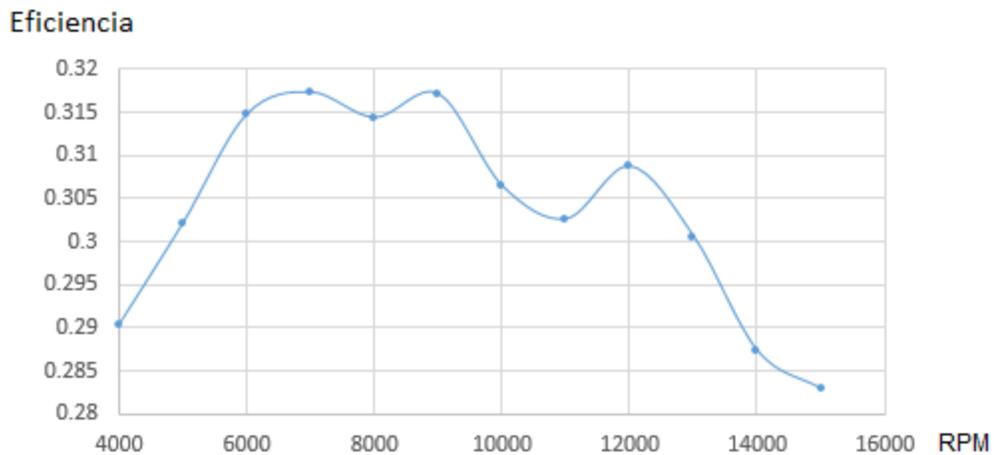


Ilustración 4.2.2 Gráfica de eficiencia efectiva para motor Yamaha R6. Los puntos máximos de eficiencia se encuentran en un intervalo de 7000 a 8000 rpm, por lo que seleccionamos este intervalo para aumentar la potencia en el motor.

### 4.3 Simulaciones en Ricardo wave

Teniendo en cuenta las características físicas del motor en el prototipo y considerando las revoluciones objetivo a las cuales los sistemas del tren de potencia trabajarán, se realizaron los trabajos de simulación en el software Ricardo Wave en un análisis denominado de una dimensión, cuya metodología se resume en la ilustración 4.3.1:

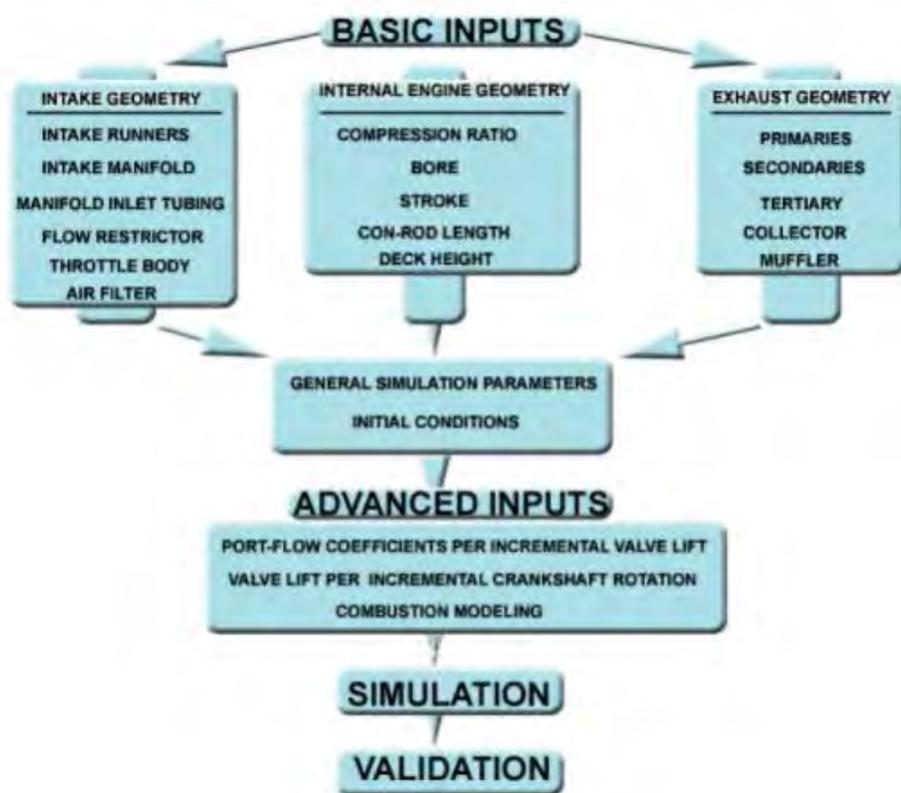
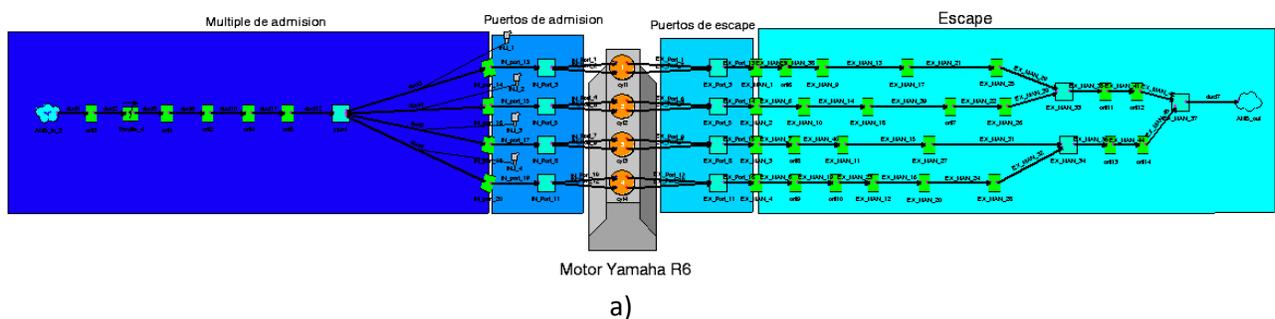
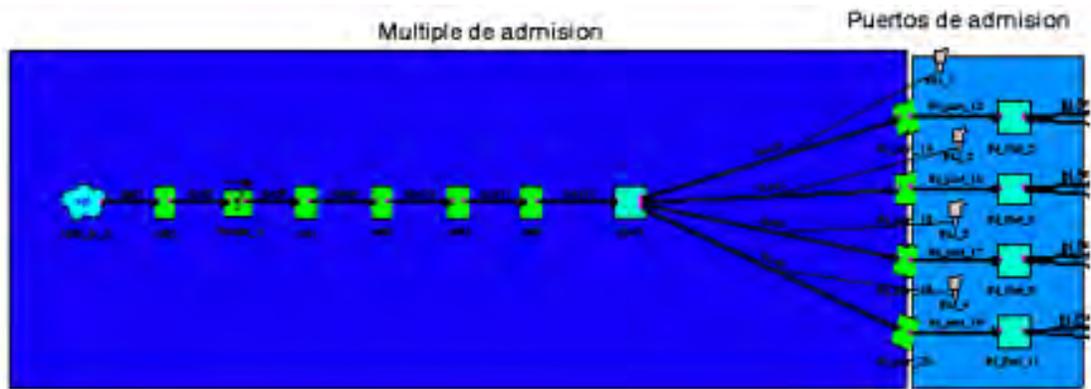


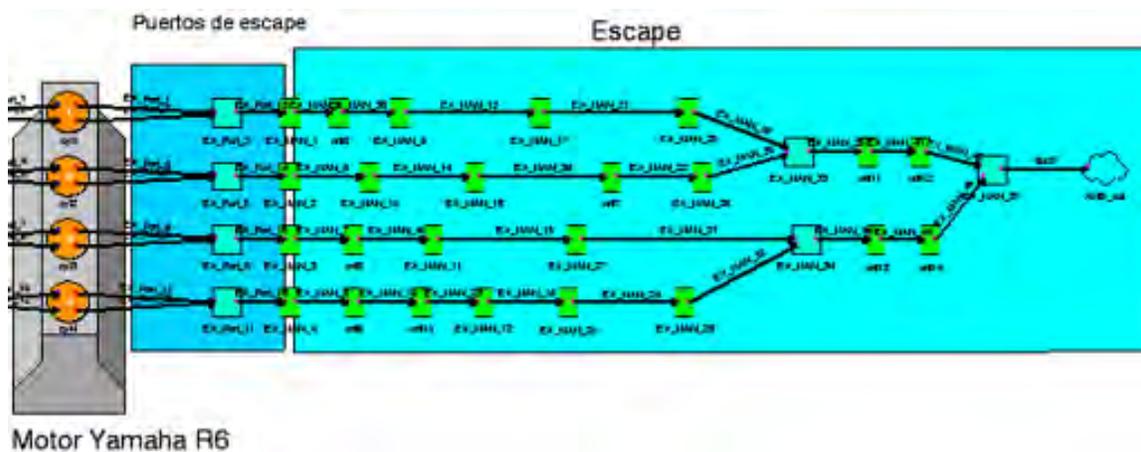
Ilustración 4.3.1 Diagrama de la metodología para simulación en una dimensión [12]

Para comenzar se establecieron las geometrías de los sistemas de admisión, motor y escape. Ver ilustración 4.3.2:





b)



c)

Ilustración 4.3.2 a) Configuración completa de simulación en Ricardo wave (Prototipo UM-248). b) Detalle de múltiple de admisión, inyectores y puertos de admisión, seccionado en 8 partes de acuerdo a múltiple de admisión usado en prototipo. c) Detalle de motor, puertos de escape y múltiple de escape, esquematizando los 4 cilindros del motor, y las 11 secciones del escape (por cilindro) usado en prototipo.

La primer parte consta de la configuración del múltiple de admisión, en donde se encuentra la restricción de aire de 20mm de acuerdo al reglamento de la competencia, enseguida se encuentra el cuerpo de aceleración, los inyectores (uno por cilindro localizados antes de los puertos de admisión) y los ductos hacia cada cilindro. Después se encuentran los puertos de admisión y el motor con las características geométricas descritas por el fabricante. Por último se encuentran los puertos de escape y el escape con la configuración 4-2-1 con los segmentos de tubería que constituyen el sistema tal y como se diseñó para el prototipo.

Dentro de los subsistemas se configuraron algunos de los parámetros que sirvieron para establecer las diferentes propiedades térmicas y mecánicas de los materiales. Esta información fue extraída de la página matweb.com la cual sirve como base de datos para las diferentes propiedades de materiales poliméricos, metálicos, cerámicos y otros materiales de ingeniería.

Con lo anterior y las mediciones realizadas por segmentos de los sistemas se registró la información. Algunos ejemplos de ello se muestran en las ilustraciones 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5 y 4.3.6:

Para el múltiple de admisión:

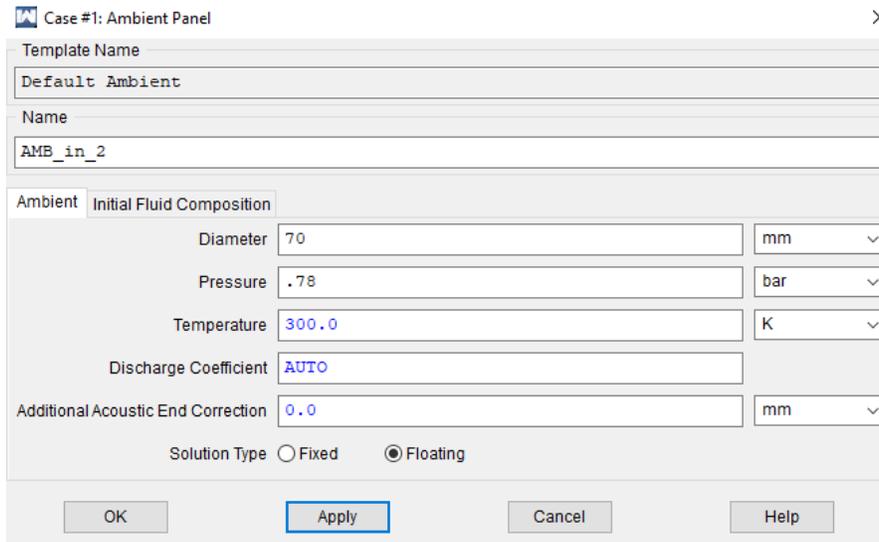


Ilustración 4.3.3 Configuración de parámetros ambientales en la entrada del múltiple de admisión. Los datos del diámetro se refieren a la entrada del múltiple de admisión, los datos de presión y temperatura son del ambiente.

Para la tubería en la restricción del aire del múltiple de admisión (considerando los 20mm de diámetro):

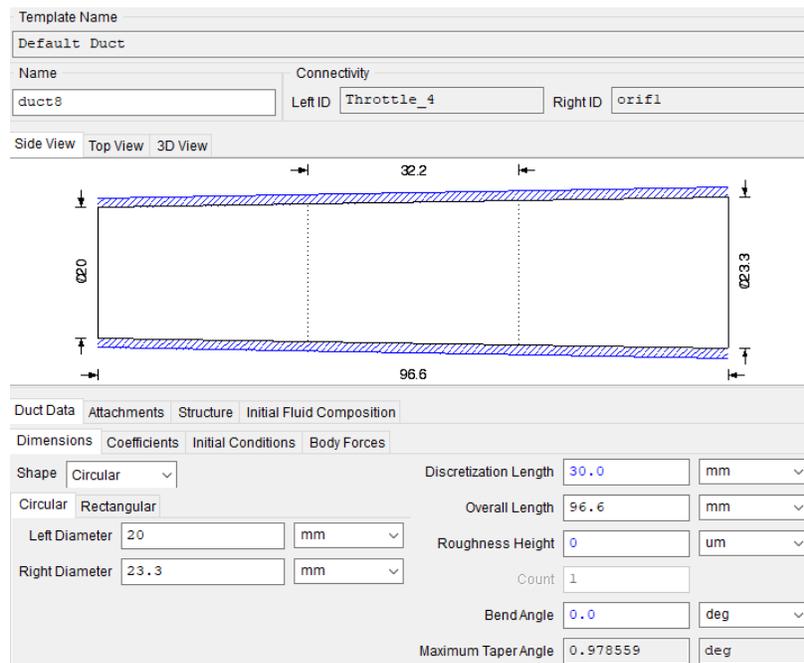


Ilustración 4.3.4 Configuración de parámetros del múltiple de admisión (restricción). Los diámetros y las longitudes corresponden al cuerpo de aceleración del prototipo UM248, así como las propiedades del material de dicha pieza.

Para las geometrías de los cilindros:

Ilustración 4.3.5 Configuración de parámetros del múltiple de admisión (colectores de admisión). Las medidas de diámetro y carrera se tomaron de las especificaciones del motor Yamaha R6, así como las tolerancias indicadas por el manual.

Para el motor de acuerdo a las especificaciones de fábrica:

	1	2	3	4
Cylinder	1	2	4	3
TDC	0	180	0	180

Ilustración 4.3.6 Configuración de parámetros del motor. Los datos de número de cilindros, TDC, y el tipo de motor se tomaron de las especificaciones del motor, las propiedades de los materiales se hacen referencia de la base de datos de matweb. Los modelos de combustión, turbulencia y transferencia de calor fueron cargados de los datos precargados del software.

Puesto que se requiere información adicional sobre el comportamiento del fluido dentro de las cámaras para establecer modelos de combustión, turbulencia y flujo se consideraron configuraciones preestablecidas de los puntos anteriores cargadas dentro del mismo software.

Después de ello, se establecieron las condiciones de frontera. Se discretizaron las simulaciones en intervalos de 1000 revoluciones hasta el límite de revoluciones por el motor, lo que dio un total de 12 casos. Para cada caso se modificaron las siguientes constantes de la simulación original mostradas en la tabla 4.3.1:

Tabla 4.3.1 Configuración de constantes programadas para simulación

	Name	Units	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Status			Run	Run	Run	Run	Run	Run
Title			Full load -					
1	SPEED	rpm	15000	14000	13000	12000	11000	10000
2	AFR		12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
3	BDUR	deg	30	29	28	27	26	25.2
4	CA50	deg	0	0.8	1.8	2.9	4	5.2
5	Coolant_Head	W/m^2/K	13000	12000	11000	10000	9000	8500
6	Coolant_Liner	W/m^2/K	3700	3500	3300	3050	2800	2500
7	Coolant_Piston	W/m^2/K	3100	3000	2900	2600	2500	2400
8	dxe		35	35	35	35	35	35
9	dxl		25	25	25	25	25	25
10	EV_TEMP	K	381	380	378.5	377	376	375
11	EX_ANCHOR	deg	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5
12	HEAD_TEMP	K	636	635	632.5	630	625	620
13	idur		50	50	50	50	50	50
14	INT_ANCHOR	deg	461	461	461	461	461	461
15	IV_TEMP	K	321	320	320	319	318	318
16	LINER_TEMP	K	620	615	608	600	597.5	595
17	PISTON_TEMP	K	598	595	590	585	582.5	580
18	T_cell	K	313	313	313	313	313	313
19	T_Coolant	K	393	394	393	393	388	383
20	T_Oil	K	363	363	363	363	363	363

Algunas de las constantes tales como la temperatura del aceite y temperatura en el interior de las cámaras se tomaron de la configuración precargada para facilitar el análisis.

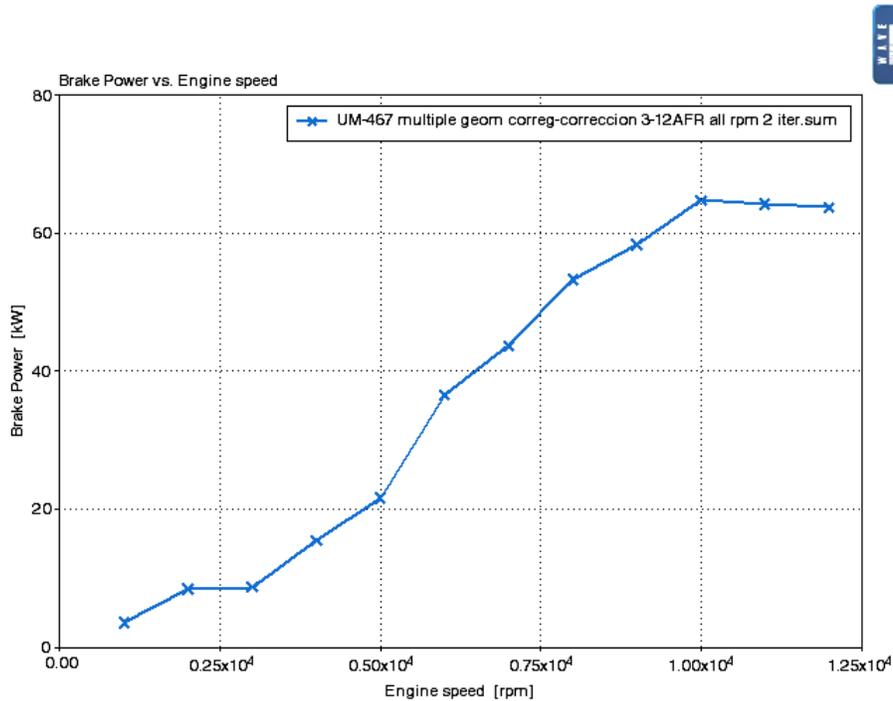
### 4.3.1 Resultados de simulación Ricardo Wave.

Se realizaron un total de 14 iteraciones que incluían cambios en la relación aire/combustible, apertura del tps y longitudes de los conductos del múltiple de admisión. Se iteró hasta encontrar los valores de las constantes que tuvieran una mejor aproximación a las curvas reales. Dichos valores se muestran en la tabla 4.3.1.1:

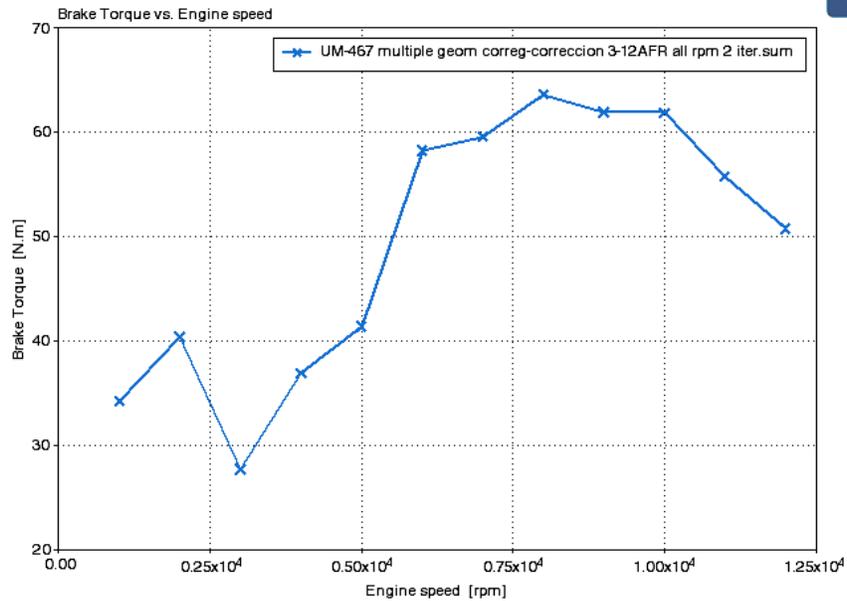
Tabla 4.3.1.1 Modificación de constantes programadas para simulación (UM-248)

Status	Name	Units	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
			Run							
Title			Full load -							
1	SPEED	rpm	12000	11000	10000	9000	8000	7000	6000	5000
2	AFR		14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
3	BDUR	deg	27	26	25.2	24.5	23.8	23.1	22.4	21.7
4	CA50	deg	2.9	4	5.2	6.4	7.6	8.8	10	11.2
5	Coolant_Head	W/m^2/K	10000	9000	8500	8000	7500	7000	6500	6000
6	Coolant_Liner	W/m^2/K	3050	2800	2500	2300	2000	1700	1500	1200
7	Coolant_Piston	W/m^2/K	2600	2500	2400	2100	1900	1500	1400	1300
8	dxz		35	35	35	35	35	35	35	35
9	dxl		25	25	25	25	25	25	25	25
10	EV_TEMP	K	377	376	375	372.5	370	368	366	365.5
11	EX_ANCHOR	deg	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5	252.5
12	HEAD_TEMP	K	630	625	620	607.5	595	587.5	580	565
13	idur		50	50	50	50	50	50	50	50
14	INT_ANCHOR	deg	461	461	461	461	461	461	461	461
15	IV_TEMP	K	319	318	318	317	316	315	314	313
16	LINER_TEMP	K	600	597.5	595	587.5	580	575	570	565
17	PISTON_TEMP	K	585	582.5	580	565	550	540	530	515
18	T_cell	K	313	313	313	313	313	313	313	313
19	T_Coolant	K	393	388	383	378	373	368	362	363
20	T_Oil	K	363	363	363	363	363	363	363	363
21	throttle angle	deg	90	90	90	90	90	90	90	90

De las simulaciones anteriores se obtuvieron graficas de potencia y par, mismas que se muestran en la ilustración 4.3.1.1:



a)



b)

Ilustración 4.3.1.1. Curva de potencia a) y par b) obtenida de la simulación en Ricardo wave para el prototipo UM-248.

Al realizar la comparación pudimos distinguir las diferencias entre la configuración original y la configuración del prototipo UM-248.

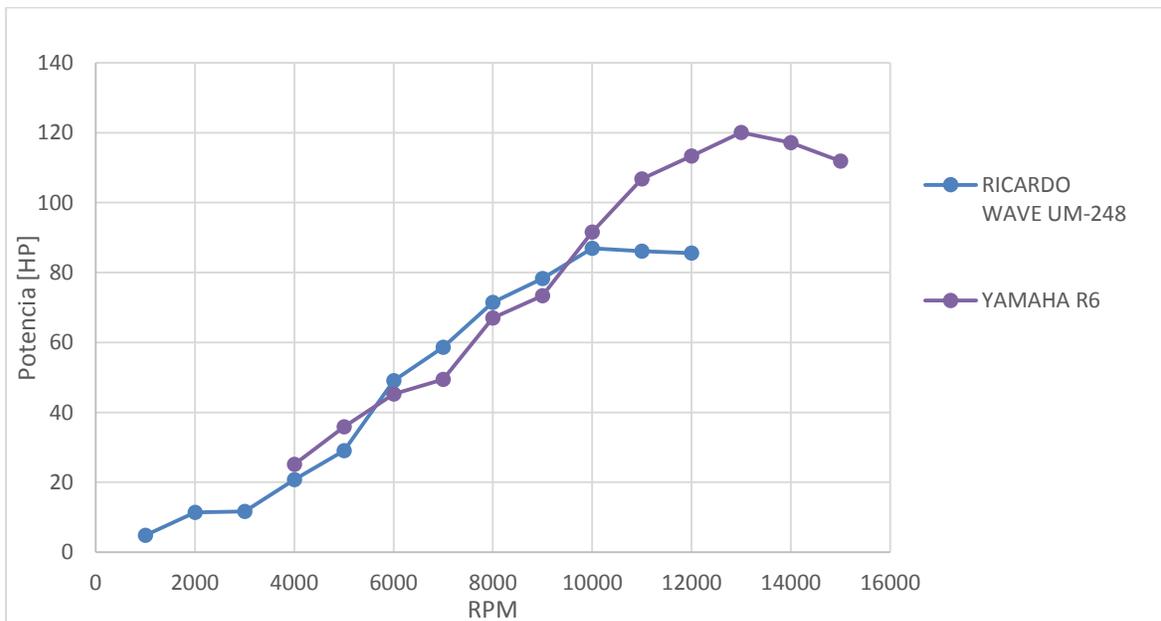


Ilustración 4.3.1.2 Comparación de gráficas Yamaha R6 2010 vs configuración de motor para prototipo UM-248.

En la ilustración 4.3.1.2. Se observa que el punto máximo de potencia efectiva en el motor del prototipo fue a las 10,000 revoluciones, 2500 revoluciones por encima de nuestro objetivo, y una diferencia del 3.25% en la eficiencia.

#### **4.4 Modificaciones a mapa de inyección.**

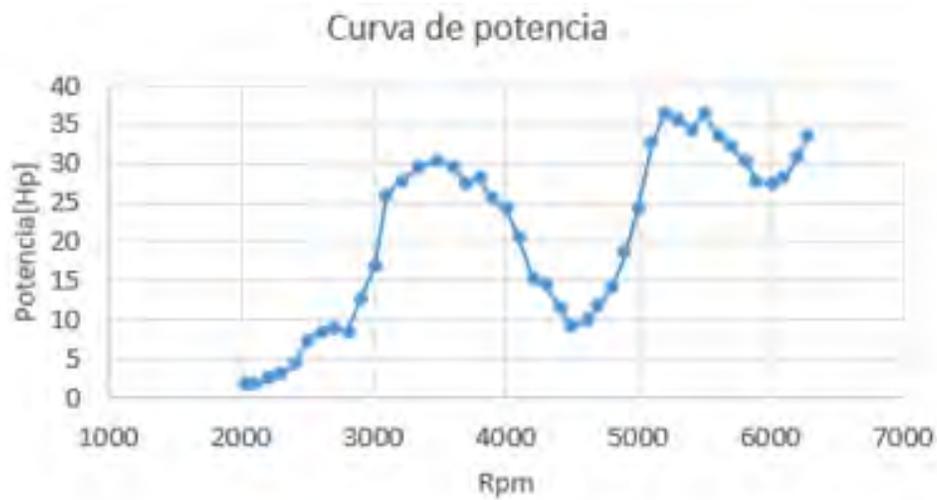
Una vez conocidos los resultados de las simulaciones y los alcances con el sistema de tren de potencia, se procedió con las modificaciones del mapa de inyección del motor, para esto el motor se probó en un banco dinamométrico de la marca Dynamate cuyo freno hidráulico es de la marca Go Power con una capacidad de frenado de 1000Hp tal y como se muestra en la ilustración 4.4.1. En éste se midieron las revoluciones por minuto, la potencia, el par, el gasto específico de combustible, la temperatura del sistema de refrigeración y la temperatura en cada uno de los ductos del escape.



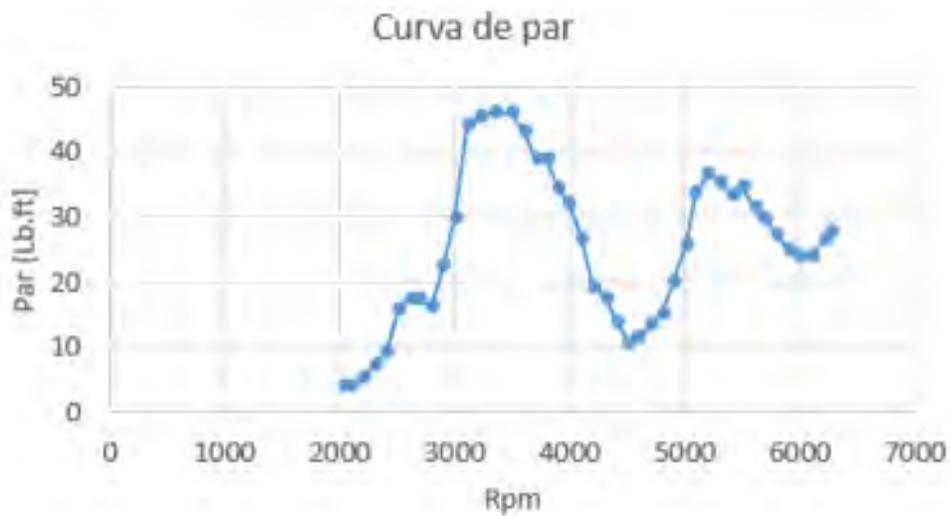
*Ilustración 4.4.1. Freno utilizado en el banco dinamométrico de la marca Dynamate.*

Durante la toma de resultados en el dinamómetro también se registraron las revoluciones del motor, porcentaje de apertura del papalote, presión en el plenum, tiempo de apertura de los inyectores, y la medición del sensor lambda.

Para la primera prueba, el motor se probó con un mapa precargado que contenía las configuraciones del motor original. Las curvas de esta prueba se muestran en la ilustración 4.4.1.



a)



b)

Ilustración 4.4.2 Curva de potencia (a) y par (b) para prototipo UM-248 en banco dinámico

Como se ve en la ilustración 4.4.2, la potencia desarrollada por el motor para el prototipo no sobrepasa los 36 Hp mientras que, con los componentes originales de fábrica, éste llega a desarrollar alrededor de 82 Kw (110 hp) tal y como se muestra en la ilustración 4.4.3 .

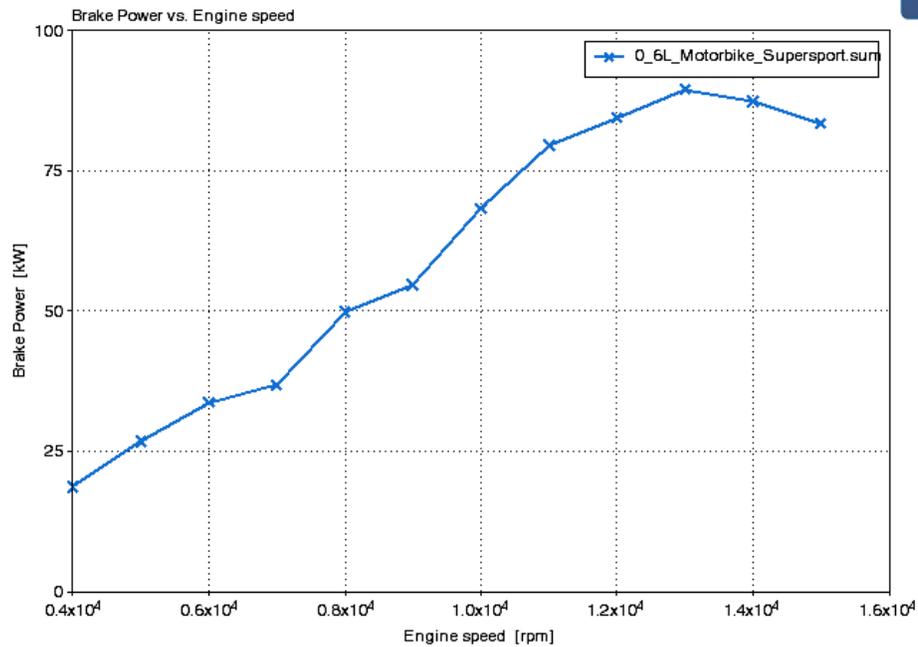


Ilustración 4.4.3. Grafica de Potencia efectiva desarrollada por el motor Yamaha R6 en stock.

Para la modificación del mapa de inyección se llevó un procedimiento iterativo que constó de dos partes:

### **Parte 1**

La primer parte se realizó en el dinamómetro de motor. De acuerdo a las simulaciones, los valores de mayor potencia se alcanzan cuando el valor de lambda se encuentra en un intervalo de 0.81 a 1 por lo tanto se estableció el siguiente diagrama de flujo (ilustración 4.4.4) para llevar a cabo las modificaciones:

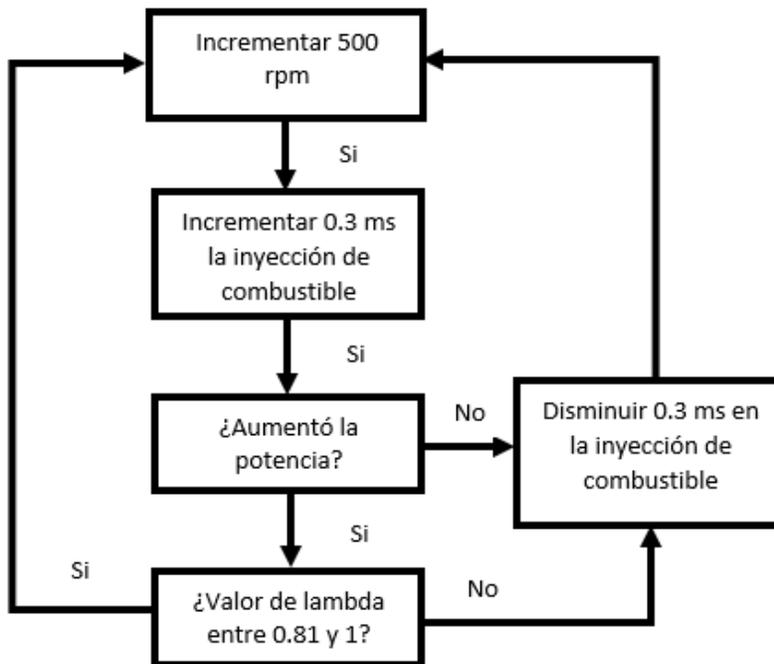


Ilustración 4.4.4 Diagrama de flujo para las modificaciones del mapa de inyección

Puesto que los valores de lambda registrados se mantenían en un rango pobre de combustible, se realizaron cambios al mapa de inyección, aumentando cada 500 revoluciones el tiempo de inyección de combustible, esto con el objetivo de incrementar la potencia del motor.

Una vez concluidos estos cambios, se realizaron pruebas para obtener la curva de potencia.

Los resultados de estas pruebas se muestran en la ilustración 4.4.3

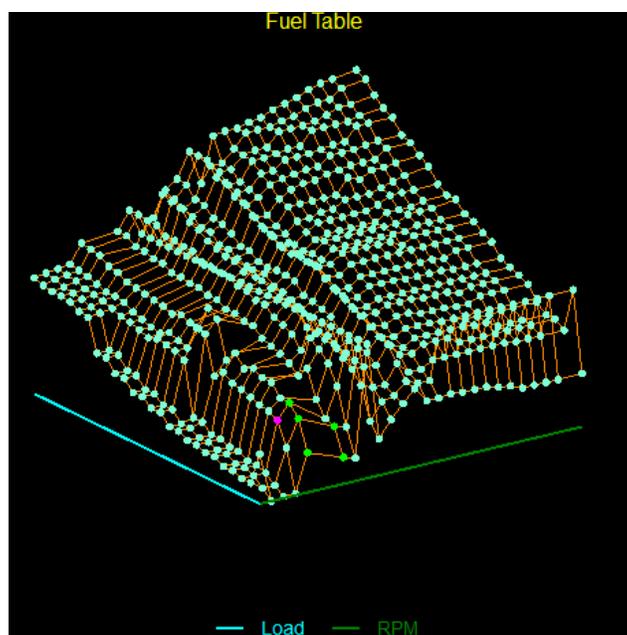
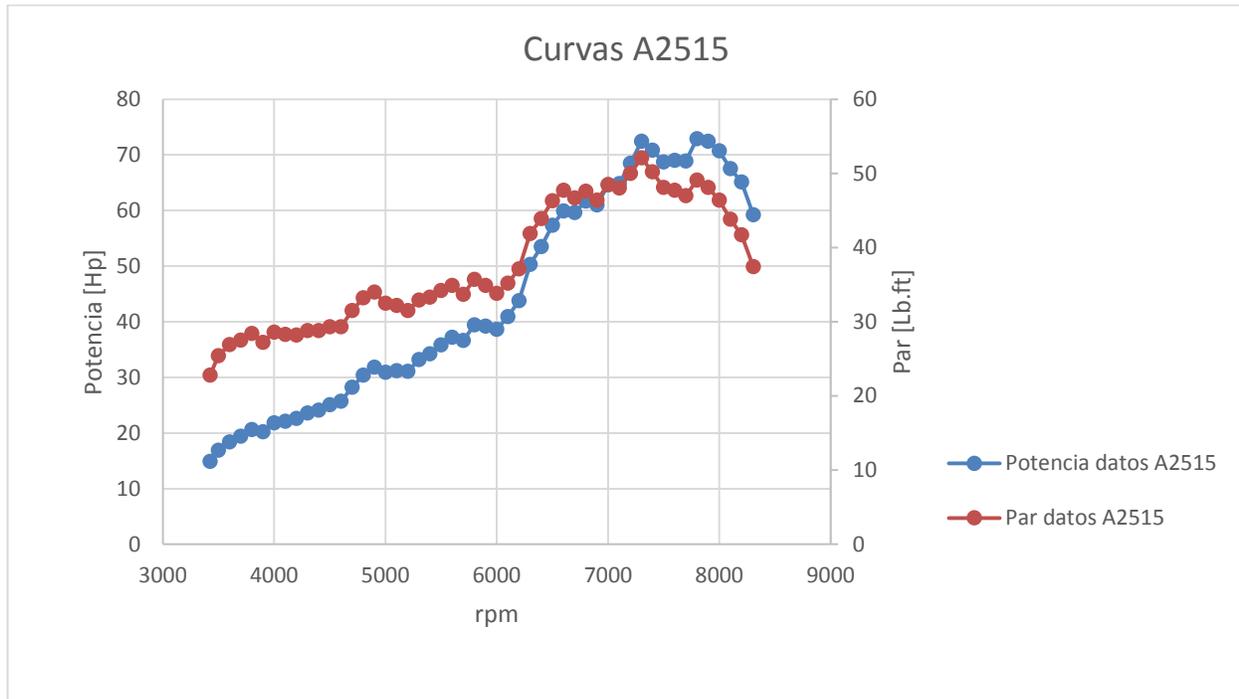


Ilustración 4.4.5 Mapa de inyección después de las primeras 15 iteraciones



*Ilustración 4.4.6 Curva de par después de las primeras 15 iteraciones*

Posteriormente se modificó nuevamente el mapa, esta vez para interpolar los valores en los rangos cuyos puntos se encontraban desfasados de la curva 3D.

### **Parte 2**

En la segunda parte se realizaron pruebas al prototipo en un circuito tipo ovalo de 120 metros de longitud y 25 metros de radio, durante las pruebas se guardaron los valores de los sensores y actuadores del motor en la UCM.

Durante estas modificaciones se observó la respuesta del motor frente a la exigencia de carga del piloto. Para ejemplificar el proceso se consideraron los siguientes datos (ver ilustración 4.4.) obtenidos del módulo PeViewer de la ECU:

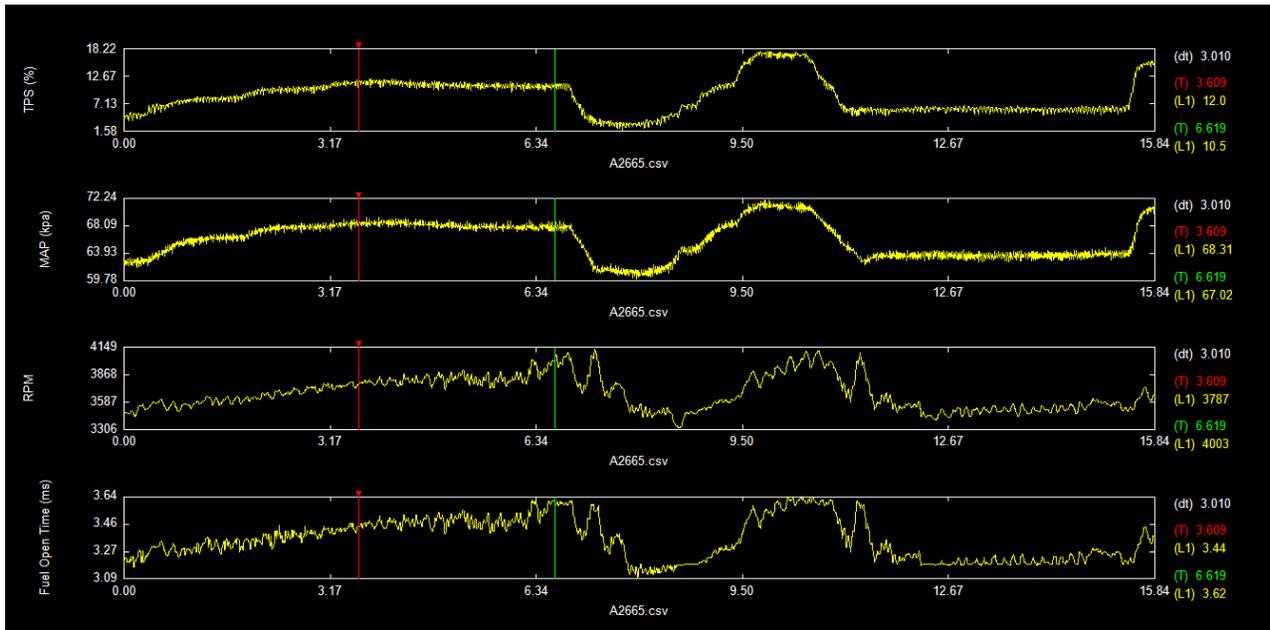
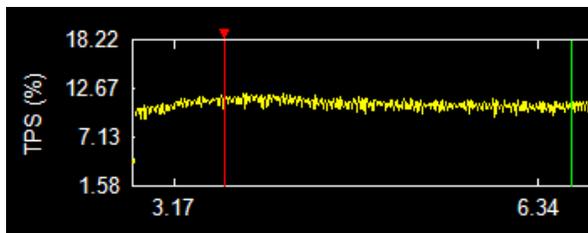
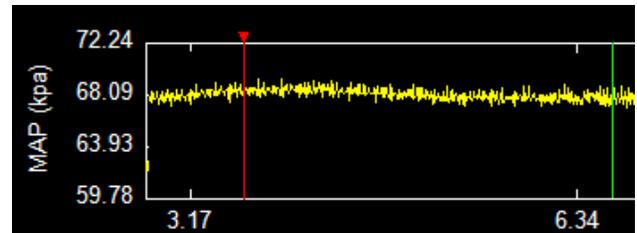


Ilustración 4.4.7 Datos obtenidos en pruebas dinámicas

Al dividir esta gráfica y delimitar el área podemos simplificarlas y decir lo siguiente:



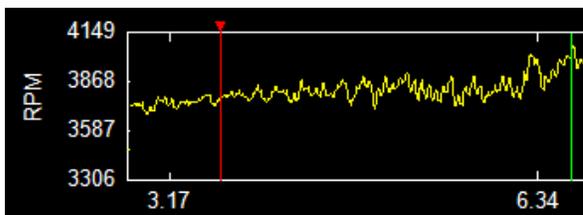
a)



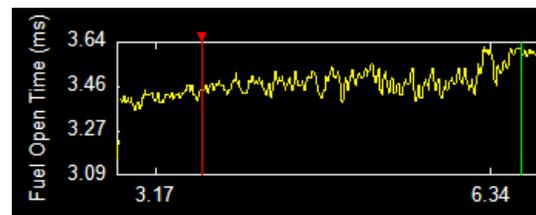
b)

Ilustración 4.4.8 Datos del sensor TPS a) y sensor MAP b)

Las gráficas del TPS y MAP son casi constantes, lo que quiere decir que el papalote del cuerpo de aceleración se mantiene casi en la misma posición y por ende la presión en el plenum del múltiple de admisión no varía. Esto nos lleva a pensar que si la carga se mantiene constante, las revoluciones del motor deberían de mantenerse constantes.



a)



b)

Ilustración 4.4.9 Datos de las rpm a) e inyección de combustible b)

Al observar las gráficas de revoluciones por minuto del motor vemos que existen variaciones considerables que van desde las 3500 a las 4100 rpm aproximadamente, esto es porque también la curva que describe el tiempo de inyección varía desde los 2.36 a los 2.64 ms, lo que produce que el motor se acelere y desacelere continuamente para una misma posición del acelerador. Esto lo corregimos disminuyendo el tiempo de inyección en esa parte del mapa de inyección, tomando como referencia la presión registrada por el sensor MAP y procurando que en esa zona la transición en el tiempo de inyección de un punto a otro no sea mayor a los 0.5 ms, ya que de tener más, el motor se comienza a acelerar.

Lo mismo sucede con otro caso similar, la gráfica de la ilustración 4.4.10 indica que el acelerador se soltó por completo, pero al observar la gráfica de revoluciones existen variaciones en las mismas que producen que el motor se acelere.

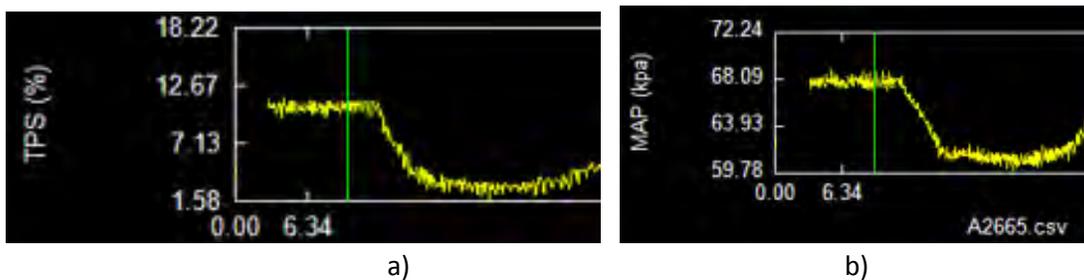


Ilustración 4.4.10 Datos del sensor TPS a) y sensor MAP b).

Una forma de realizar la corrección es interpolar los valores cercanos en esa zona de la curva 3D para no tener tantas perturbaciones en esta zona.

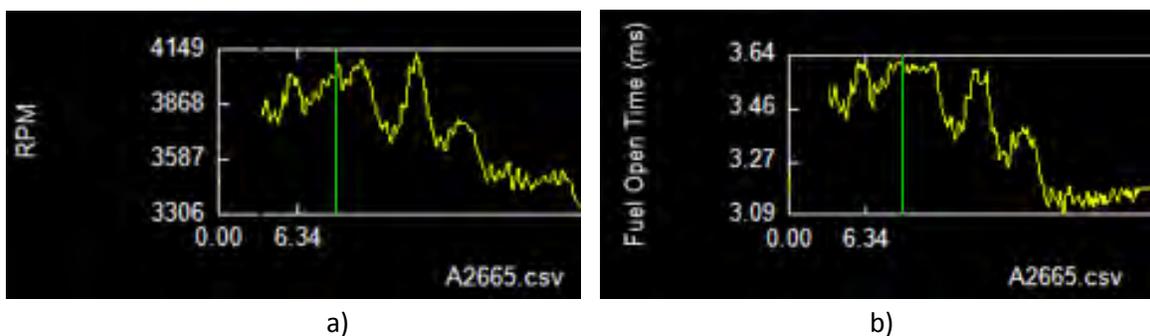


Ilustración 4.4.11 Datos de las rpm a) e inyección de combustible b).

Se corrigieron las variaciones de revoluciones con los datos recabados por la ECU hasta que la diferencia en los tiempos de inyección de combustible de un punto a otro fue menor a 0.5ms. Esto se realizó con el propósito de garantizar que el motor no presente sobresaltos de velocidad durante su operación.

#### 4.5. Modificaciones al mapa de ignición.

Para realizar estas modificaciones, se consideraron los valores de la tabla 4.5.1 obtenidos de la simulación:

*Tabla 4.5.1 Tabla de datos para simulación en Ricardo wave de adelanto de chispa*

SPEED	rpm	13000	12000	11000	10000
AFR		14.7	14.7	14.7	14.7
BDUR	deg	28	27	26	25.2

En la tabla 4.5.2 se muestran los resultados que se utilizaron para el adelanto de chispa.

*Tabla 4.5.2 Tabla para datos de adelanto de chispa*

SPEED [rpm]	BDUR [GRADOS]
1000	18.9
2000	19.6
3000	20.3
4000	21
5000	21.7
6000	22.4
7000	23.1
8000	23.8
9000	24.5
10000	25.2
11000	26
12000	27
13000	28

El valor de BDUR representa la duración de la combustión (en grados) utilizando como referencia la geometría de la leva. Bajo el supuesto de que la combustión duró la cantidad de grados establecida en la tabla 4.5.2, se utilizaron estos datos para configurar el mapa de ignición, mismo que se encuentra en la ilustración 4.5.1.

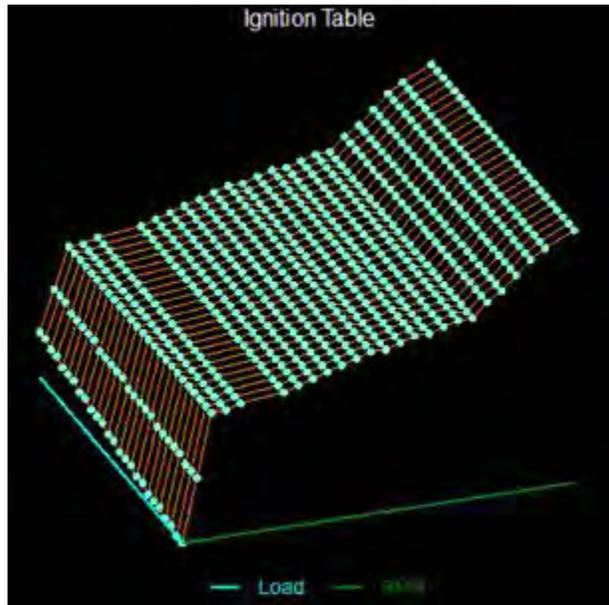


Ilustración 4.5.1 Gráfica final de adelanto de chispa para motor en prototipo UM-248.

#### 4.6. Cálculo de compensaciones

Con los valores de presión y temperatura mostrados en el subcapítulo 2.4.3 podemos estimar la cantidad de aire húmedo que se necesita por cada cilindro para una combustión completa, esto se calculó contemplando los siguientes parámetros:

$$p = 101,321 \text{ Pa.}$$

$$R = 287 \text{ J/Kg K.}$$

$$T = 295.5 \text{ K.}$$

$$\text{Volumen por cilindro} = V_c = 0.00015 \text{ m}^3$$

De la ecuación de estado considerando aire húmedo:

$$p = \rho RT_v \text{ -----(4.6.1)}$$

$$\rho = \frac{p}{RT_v} = \frac{101,000 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}}{287 \left( \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right) * [1.01(295.5 \text{ K})]} = 1.1791 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \text{ -----(4.6.2)}$$

De tal modo podemos estimar la cantidad de aire que habrá en cada cilindro:

$$\text{Cantidad de aire humedo por cilindro} = \rho * V_c = 1.1791 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 1.5e^{-4} \text{ m}^3 = 1.7869 e^{-4} \text{ Kg} \text{ -----(4.6.3)}$$

Considerando que se esperarí una combustión completa, calculamos la cantidad de combustible utilizando la relación aire/combustible estequiometria:

$$Cantidad\ de\ combustible = \frac{Cantidad\ de\ aire\ humedo * eficiencia\ volumétrica}{relacion\ estequimetrica\ aire/combustible} \quad ----(4.6.4)$$

$$Cantidad\ de\ combustible = \frac{1.7869\ e^{-4} Kg\ aire * 0.85}{14.7 \frac{Kg\ aire}{Kg\ combustible}} = 1.02233e^{-5}\ Kg \quad ----(4.6.5)$$

Con este cálculo obtenemos el porcentaje de combustible que se debe de incrementar en las diferentes sedes de la competencia teniendo como parámetro los datos de presión y temperatura de Ciudad Universitaria en la facultad de ingeniería.

$$\% \text{ Compensación} = \left| \frac{8.0294e^{-6} - 1.02233e^{-5}}{8.0294e^{-6}} * 100\% \right| = 127.32\% \quad ----(4.6.5)$$

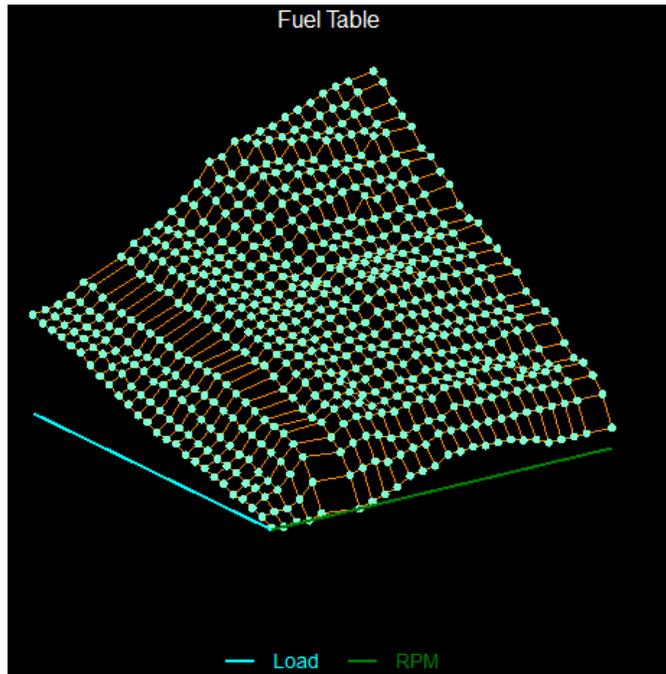
Con este planteamiento se calcularon las demás compensaciones para las diferentes temperaturas y presiones (ver tabla 4.6.1.) que se programó en la UCM:

Tabla 4.6.1 Tabla con valores finales de compensaciones para interfaz de la UCM.

Load - MAP (kpa)	Compensation Factor - Percent								Temperature (°C)
105.0	139.1	137.9	136.8	135.7	134.6	133.5	132.4	131.4	8.1
98.5	130.5	129.4	128.3	127.3	126.2	125.3	124.2	123.3	10.5
88.5	117.3	116.3	115.3	114.4	113.4	112.5	111.6	110.8	12.9
77.5	102.7	101.8	101.0	100.2	100.7	101.4	102.2	103.0	15.2
									17.6
									19.9
									22.3
									24.6

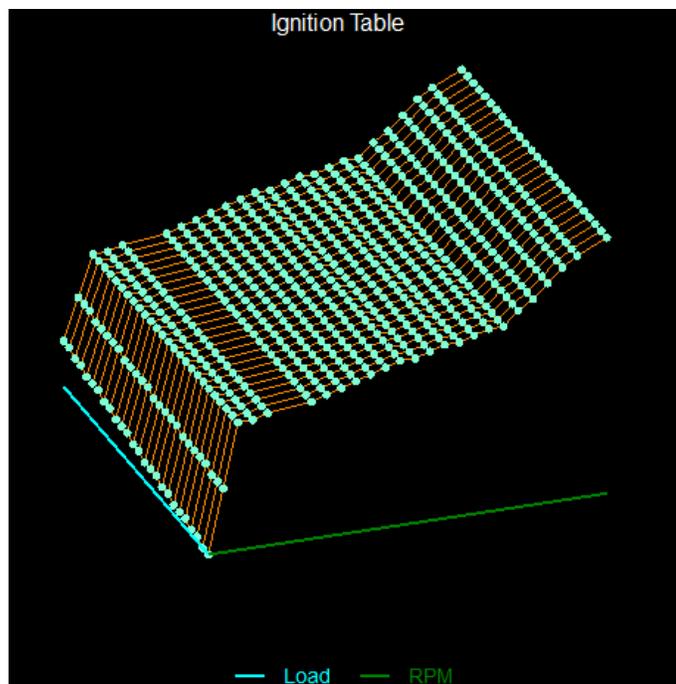
#### 4.7. Resultados y discusión.

Después de trabajar en el mapa de inyección y realizar las correcciones se obtuvo la forma de la curva, misma que se aprecia en la ilustración 4.7.1.



*Ilustración 4.7.1 Mapa final de inyección de combustible*

Con ayuda de las simulaciones, la gráfica del mapa de ignición se muestra en la ilustración 4.7.2.



*Ilustración 4.7.2 Mapa final de ignición*

De las pruebas realizadas con los mapas mostrados en las ilustraciones 4.7.1 y 4.7.2, se obtuvieron datos del sensor de oxígeno (ver ilustración 4.7.3.)

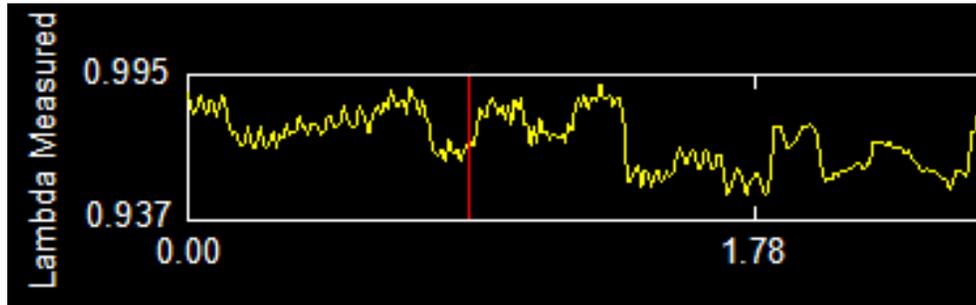


Ilustración 4.7.3 Datos del sensor lambda en pruebas dinámicas.

Podemos observar que los valores de lambda con este mapa se encuentran en un intervalo de 0.937 a 0.995.

Por otra parte, utilizando las compensaciones para condiciones atmosféricas, se obtuvo el mapa utilizado para las competencias en Europa, mismo que se muestra en la ilustración 4.7.4.

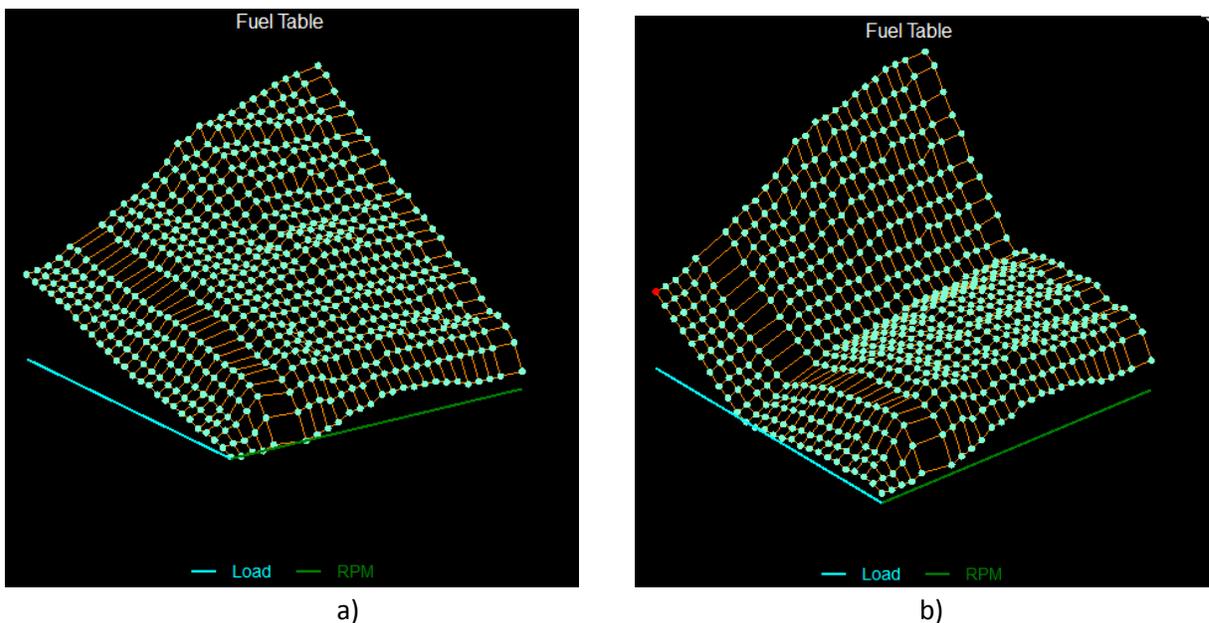


Ilustración 4.7.4 Comparación entre mapa usado en Anexo de ingeniería UNAM a), mapa usado para competencias en Europa b). La forma de la gráfica con compensaciones obedece a la ecuación de estado del aire húmedo.

Como se puede observar en la imagen b) de la ilustración 4.7.4, las compensaciones por factores atmosféricos modifican significativamente el valor último de inyección de combustible en comparación con la imagen a), principalmente en los rangos superiores a 80Kpa, mientras que por debajo de este valor, las compensaciones afectan principalmente valores cercanos a los 40 Kpa, esto por la diferencia de la densidad del aire.

### 4.7.1 Curvas de dinamómetro.

Con todas las configuraciones en los mapas de inyección, ignición y compensaciones, las curvas de par y potencia para el motor del prototipo final se exponen en la ilustración 4.7.1.1.

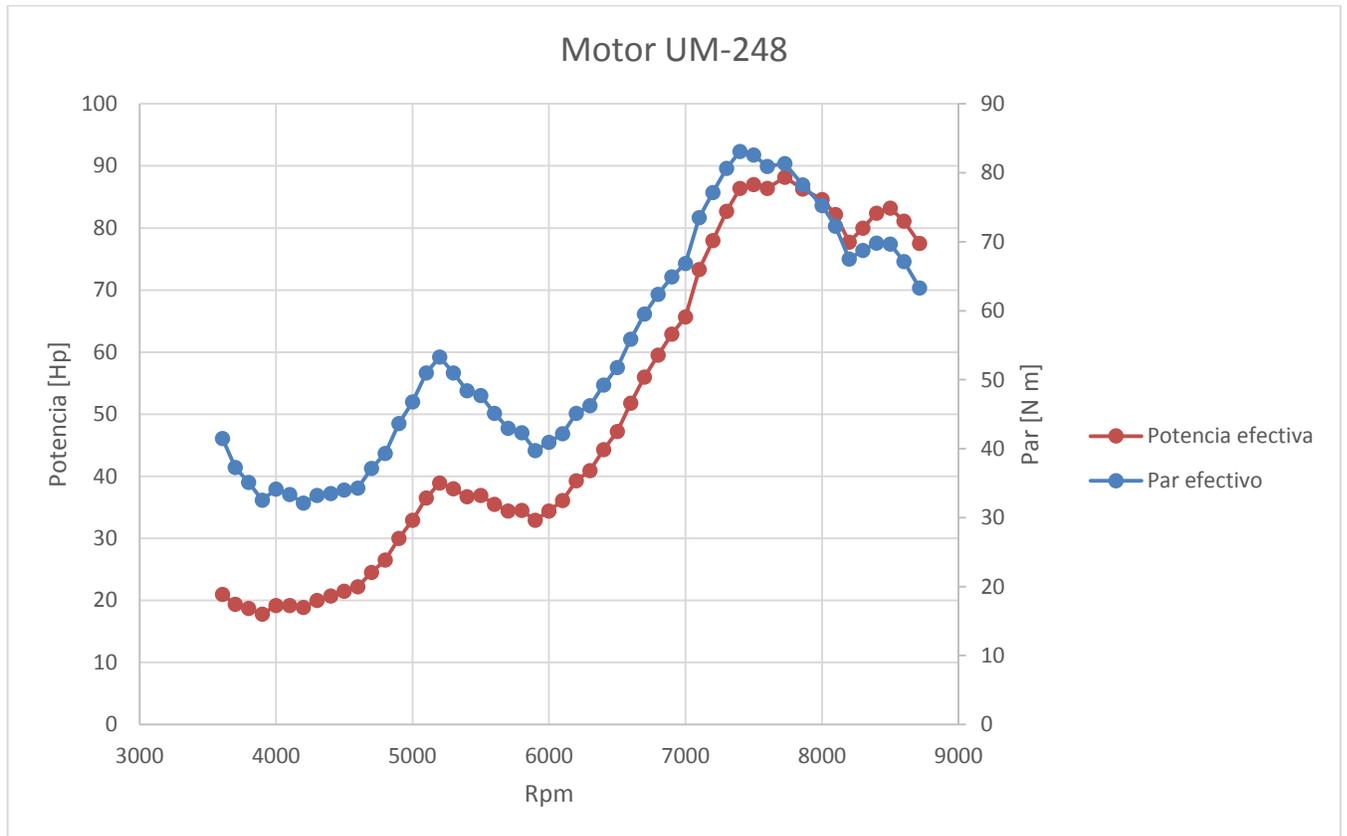
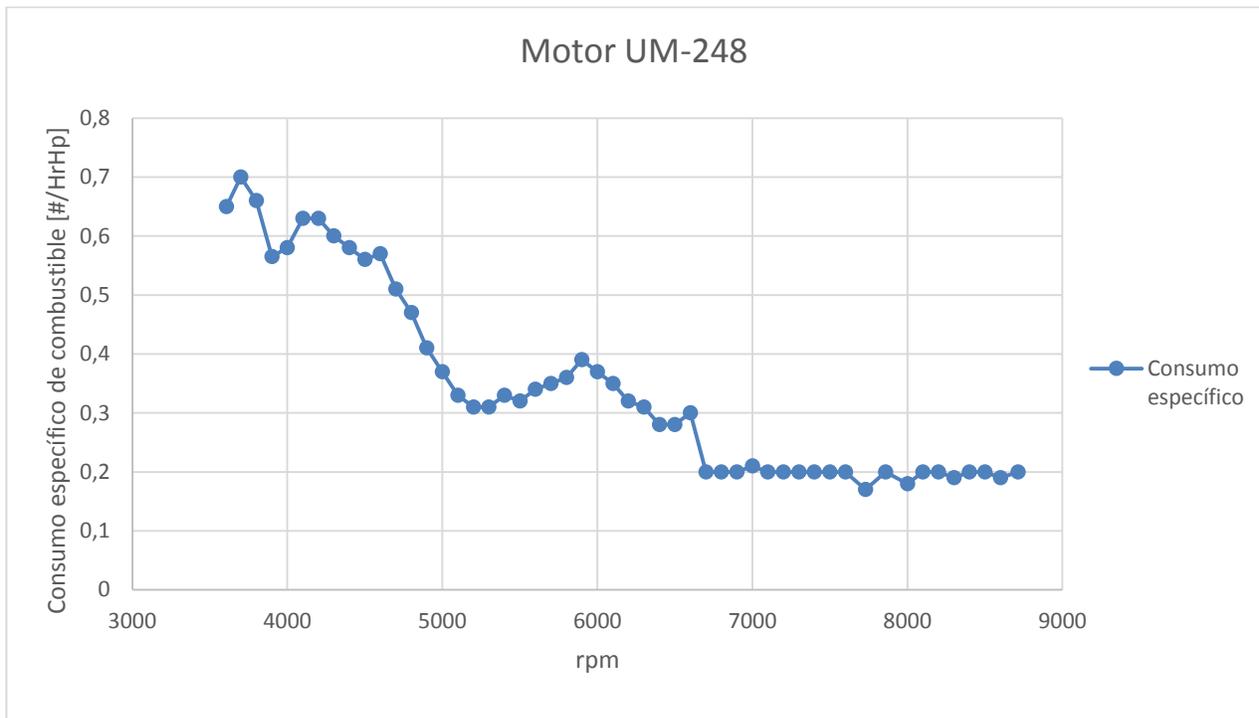


Ilustración 4.7.1.1 Curva de potencia efectiva final para motor en prototipo UM-248.

Con estos métodos iterativos se obtuvo un incremento del 56.6% en la potencia efectiva con una diferencia de 1800 revoluciones respecto a las de la primer prueba y una diferencia 400 revoluciones respecto a las revoluciones estimadas.

La curva del gasto específico de combustible se muestra en la ilustración 4.7.1.2.



*Ilustración 4.7.1.2 Curva de gasto específico de combustible final para motor de prototipo UM-248.*

En donde el intervalo de mínimo consumo de combustible se conserva en el intervalo de 7000 a 8000 revoluciones por minuto.

## Capítulo 5. Discusión y conclusiones.

Se logró tener una configuración en los mapas de ignición e inyección de tal forma que el consumo de combustible fuese bajo y la potencia desarrollada fuese alta en un rango inferior al de fábrica (6000 revoluciones menos).

La potencia efectiva desarrollada fue de 88 Hp, 32 Hp menos que la potencia desarrollada con la configuración original. Esto se debe a que la construcción del motor en cuanto a geometrías de sus partes internas da pauta a un límite que restringe la potencia máxima desarrollada por el mismo, independientemente del mapa que se construya.

La diferencia máxima entre la potencia real respecto a la simulada en Ricardo Wave fue de 12.5 Hp y se presenta a las 8000 rpm tal y como se puede observar en la ilustración 5.1.

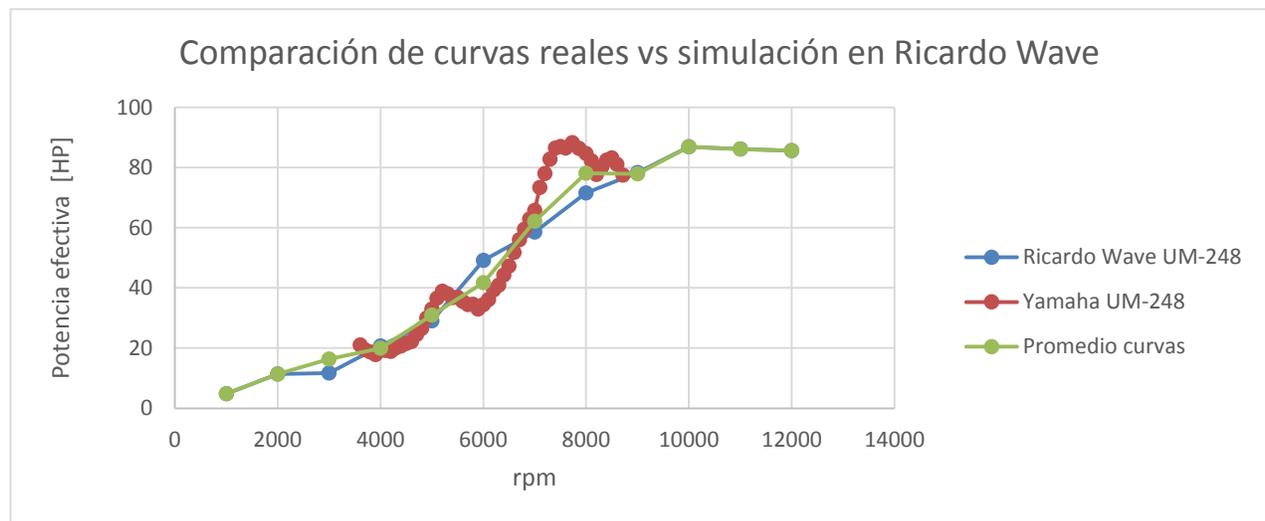


Ilustración 5.1 Gráfica comparativa de potencia efectiva en simulación y potencia efectiva real en prototipo UM-248.

La diferencia que se observa en la gráfica 5.1 entre la curva del prototipo y la simulada se atribuye a las idealizaciones consideradas para algunas constantes utilizadas para caracterizar el motor, tales como las temperaturas en el sistema de refrigeración, temperaturas del aceite y temperaturas en diferentes puntos del múltiple de escape así como en los ductos de admisión y plenum.

El trabajo del mapa se llevó a cabo de una forma iterativa y experimental aplicando el conocimiento teórico de cada sistema involucrado.

Como trabajo a futuro se puede establecer lo siguiente:

1. Se recomienda realizar simulaciones del comportamiento de la mezcla dentro de la cámara de combustión de este motor, tomando como referencia las revoluciones a las cuales se establecieron los objetivos con la finalidad de justificar y de ser posible mejorar los tiempos de adelanto de la chispa en la bujía.
2. Considerar la temperatura del sistema de refrigeración para los cálculos de las compensaciones, esto con el objetivo de realizar los ajustes necesarios de inyección de combustible así como determinar la temperatura óptima del sistema.
3. Verificar que el circuito de refrigeración es lo suficientemente robusto mediante pruebas dinámicas para garantizar que la temperatura no exceda la temperatura óptima o en su defecto la temperatura que indica el fabricante. Considerar la potencia de la bomba así como la trayectoria de las mangueras para realizar estos cambios. Agregar un sistema de refrigeración para el aceite del motor de ser necesario.
4. Mediante el uso de un banco de flujos determinar la cantidad de aire real que pasa a través de los runners del múltiple de admisión, tomando como referencia las condiciones atmosféricas a las cuales el motor estará trabajando durante las competencias.

## Capítulo 6. Bibliografía

- [1] F.Payri (2011). Motores de combustión interna alternativos. REVERTÉ. Consultado en marzo de 2018.
- [2] Marc Barthe Farell (2009). Motores rotativos tipologías y combustibles. Recuperado de: [www.upcommons.upc.edu](http://www.upcommons.upc.edu). Consultado en junio de 2018.
- [3] Diferencias entre motor de cuatro y dos tiempos (2013). Ciclo de cuatro tiempos [Figura] recuperado de [www.mecanicabasicacr.com/wp-content/uploads/2013/08/4-TIEMPOS.gif](http://www.mecanicabasicacr.com/wp-content/uploads/2013/08/4-TIEMPOS.gif). Consultado en junio de 2018.
- [4] Colado, N (2015). Ciclo de trabajo del motor Otto de cuatro tiempos [Figura] recuperado de <http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-distribucion.htm>. Consultaod en mayo de 2018.
- [5] John Heywood. Internal combustion engine fundamentals (1988). McGraw-Hill. Consultado en abril de 2018.
- [6] Mecánica virtual (2011). Inyección mono punto y multipunto [Figura] recuperado de [www.mecanicavirtual.org/inyecci-gasoli-intro.htm](http://www.mecanicavirtual.org/inyecci-gasoli-intro.htm). Consultado en mayo de 2017.
- [7] Dani, A (2014). Inyección directa e indirecta [Figura] recuperado de [www.revistamotor.eu/images/RVM/2014/Noticias/Art.Dani/ID1.jpg](http://www.revistamotor.eu/images/RVM/2014/Noticias/Art.Dani/ID1.jpg). Consultado en abril de 2017
- [8] Motostarz (2010). Curvas de dinamómetro Yamaha R6 2010 pruebas silenciador AKRAPOVIC recuperado de <https://www.motostarz.com>. Consultado en noviembre de 2017.
- [9] Totalparts (2016). Camshaft Yamaha R6 2010. [Figura] Recuperado de <https://www.totalparts.nl>. Consultado en marzo de 2018
- [10] Ngk Spark plug europe (2017). Sonda Lambda de dióxido de circonio. Obtenido de <https://www.ngk.de/es/productos-y-tecnologias/sondas-lambda/tecnologias-de-sondas-lambda/sonda-lambda-de-dioxido-de-circonio/>. Consultado en enero 2018.
- [11] Performance electronics (2015). PE3-8400A ECU, Aluminum Enclosure.[Figura]. Obtenido de <http://pe-ltd.com>. Consultado en agosto 2017.
- [12] Cordon D, Dean C, One dimensional engine modeling and validation using Ricardo Wave (2007). NIATT. Consultado en noviembre 2017.
- [13] Yamaha Motor Corporation (2010). Yamaha R6 2010 Service manual. Consultado en marzo 2018
- [14] Heinz Heisler. Advance engine technology (1995). SAE International. Consultado en abril 2017
- [15] Aldo C,Rolando R. Análisis y diseño de un módulo de control electrónico para la optimización de la potencia de un motor de combustión interna toyota 4afe (2015). Universidad Católica de Santa María. Consultado en abril de 2018.

[16] Enrique E, Paúl L. Construcción de un banco digital comprobador de computadoras automotrices para vehículos con sistemas de inyección electrónica a gasolina para el laboratorio de autotrónica de la carrera de ingeniería automotriz de la época (2017). Escuela superior politécnica de Chimborazo. Consultado en mayo de 2018.

[17] Manual Automotriz. Sistema de combustible con carburador e Introducción a la inyección electrónica (2009). Mecánica automotriz fácil. Consultado en abril de 2018.

[18] Sistemas de encendido: Tipos y principios de funcionamiento (2013). Auto y técnica. Obtenido de: <https://autoytecnic.com/sistemas-de-encendido-tipos/>