



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL
MOTOR PARA EL VEHÍCULO FÓRMULA SAE UNAM
2011

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECATRÓNICO

P R E S E N T A:

BRUNO PATRICIO VERDE ARREGOITIA

ASESOR:
ING.MARIANO GARCÍA DEL GÁLLEGO



Ciudad Universitaria

Octubre 2011



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.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Antecedentes | 3 |
| 2.1. Motor de combustión interna | 3 |
| 2.1.1. Clasificación | 4 |
| 2.1.2. Componentes de un motor de combustión interna . . . | 5 |
| 2.1.3. Ciclo de operación de motores de cuatro tiempos . . . | 7 |
| 2.2. Sistemas de inyección y control de motores | 9 |
| 3. Objetivos | 13 |
| 4. Metodología de diseño | 15 |
| 4.1. Fórmula SAE | 15 |
| 4.1.1. Juzgado de los vehículos y puntajes | 16 |
| 4.2. Restricciones y objetivos de diseño | 18 |
| 4.3. Selección del motor | 20 |
| 4.4. Componentes del sistema de control del motor | 25 |
| 4.5. Selección de la unidad de control del motor | 29 |
| 4.6. Sistema de inyección de combustible | 33 |
| 4.6.1. Selección de inyectores | 37 |
| 4.6.1. Sistema de suministro de combustible | 45 |
| 4.7. Sensores | 45 |
| 4.7.1. Sensores de posición: | 47 |
| 4.7.2. Sensores de temperatura: | 50 |
| 4.7.3. Sensores de composición de gases de escape: | 53 |
| 4.7.4. Otros sensores: | 55 |
| 4.8. Múltiple de admisión y sistema de escape | 57 |
| 4.9. Integración del sistema | 57 |

| | |
|--|-----------|
| 5. Desarrollo experimental y pruebas | 61 |
| 5.1. Plan de pruebas | 61 |
| 5.2. Software y configuración inicial | 62 |
| 5.2.1. Configuración inicial | 63 |
| 5.3. Generación de tablas de control iniciales | 71 |
| 5.4. Calibración | 74 |
| 6. Resultados | 81 |
| 7. Recomendaciones y trabajo futuro | 85 |
| 8. Conclusiones | 87 |
| Bibliografía | 89 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 2.1. Motor de combustión interna Chrysler 2.2l [1] | 6 |
| 2.2. Geometría básica del motor de combustión interna [1] | 8 |
| 2.3. Ciclo de cuatro tiempos de un MCI [1] | 9 |
| 2.4. Carburador básico [2] | 10 |
| 4.1. Esquema de sistema de control del motor original A: Sistema de combustible B: Sistema de admisión de aire C: Sistema de control [3] | 23 |
| 4.2. Sistema Yamaha YCC-T con cuerpo de aceleración servo controlado [3] | 23 |
| 4.3. Sistema Yamaha YCC-I con ductos de admisión de largo variable [3] | 24 |
| 4.4. Motor Yamaha R6 2008 en la condición que fue adquirido | 25 |
| 4.5. Esquema de un sistema de control de un motor SI típico [4] | 26 |
| 4.6. Estructura interna de un sistema de control de motor electrónico [4] | 27 |
| 4.7. Tabla comparativa de UCM usadas comúnmente en FSAE | 31 |
| 4.8. Unidad de control Performance Electronics EDGE [5] | 32 |
| 4.9. Efecto de la RAC en la potencia del motor [6] | 36 |
| 4.10. Efecto de la RAC en la eficiencia de combustible [6] | 37 |
| 4.11. Diagrama de un inyector electrónico [7] | 38 |
| 4.12. Equipo utilizado para probar los inyectores DENSO 297500-0640 | 39 |
| 4.13. Gráfica de gasolina inyectada vs tiempo | 43 |
| 4.14. Pulso de inyección requerido en diferentes casos | 44 |
| 4.15. Principio de funcionamiento del sensor de reluctancia variable [8] | 48 |
| 4.16. Patrón de voltaje generado por un sensor de reluctancia variable[8] | 48 |
| 4.17. Principio de funcionamiento del sensor de efecto Hall[8] | 49 |

| | |
|--|----|
| 4.18. Vista del árbol de levas del motor Yamaha R6 mostrando la rueda utilizada con el sensor de efecto Hall | 50 |
| 4.19. Principio de funcionamiento del sensor de posición del acelerador (TPS)[8] | 51 |
| 4.20. Sensores de temperatura de aire (izquierda) y refrigerante (derecha) | 52 |
| 4.21. Principio de operación del sensor de presión[8] | 52 |
| 4.22. Sensor MAP tipo GM de 1 bar | 53 |
| 4.23. Principio de funcionamiento de un sensor de oxígeno [8] | 54 |
| 4.24. Tarjeta de control del sensor de oxígeno antes de soldar | 55 |
| 4.25. Sensor de oxígeno Bosch 17014 LSU 4.2 | 56 |
| 4.26. Múltiple de admisión y motor | 58 |
| 4.27. Vista explosionada del múltiple de admisión con los sensores e inyectores | 58 |
| 4.28. Ejemplo de conector Weatherpack | 59 |
| 4.29. Esquema del sistema completo de control | 60 |
| 5.1. Esquema del plan de pruebas | 62 |
| 5.2. Vista general del software peMonitor | 63 |
| 5.3. Esquema de conexión inalámbrica a la UCM | 64 |
| 5.4. Configuración de la UCM | 65 |
| 5.5. Esquema de los tipos de inyección en un motor de cuatro cilindros | 68 |
| 5.6. Posición de las ruedas dentadas con el cilindro #1 en TDC en compresión | 69 |
| 5.7. Diagrama que muestra la manera en que la UCM calcula la posición del cigüeñal | 71 |
| 5.8. Ejemplo de tabla de inyección con las zonas más utilizadas marcadas | 72 |
| 5.9. Tablas iniciales de inyección representadas en 3d | 73 |
| 5.10. Tabla inicial de ignición | 73 |
| 5.11. Captura de datos al ajustar ralentí | 74 |
| 5.12. Consideraciones de calibración | 75 |
| 5.13. Compensación por voltaje de la batería y presión barométrica | 76 |
| 5.14. Compensaciones de encendido y aceleración | 77 |
| 5.15. Datos en pista | 79 |
| 5.16. RAC y compensación por aceleración | 80 |
| 5.17. Temperatura del refrigerante y ángulo de ignición | 80 |

| | |
|---|----|
| 6.1. Curvas de potencia y torque de motores Yamaha R6 2007 y 2008 estándar sin restricción [9] | 82 |
| 6.2. Curvas de potencia y torque del motor | 83 |

Capítulo 1

Introducción

En el año 2011 la UNAM compitió por segunda vez en su historia en la competencia de ingeniería estudiantil Formula SAE, la cual es organizada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices y cuenta con mas de 20 años de antigüedad y un alto prestigio y grado de dificultad. Cada año se realizan mas de 5 competencias alrededor del mundo con alrededor de 400 equipos compitiendo en las diferentes pruebas involucradas. La competencia involucra el diseño, fabricación y pruebas de un vehículo monoplace estilo fórmula regido por un reglamento que se actualiza cada año. Cada parte y sistema del vehículo se diseña y prueba por estudiantes utilizando principios de ingeniería y basándose en consideraciones económicas, de desempeño y factibilidad.

Las reglas limitan la planta de poder a motores de combustión interna menores de 610cc alimentados a través de una restricción de aire de 20mm de diámetro. El propósito de esta regla es disminuir la potencia de los motores por razones de seguridad, pero al mismo tiempo obliga a los equipos a desarrollar nuevos sistemas de admisión, escape y control del motor con el fin de obtener el máximo desempeño del motor restringido. El presente trabajo aborda la implementación del sistema de control del motor del vehículo desarrollado durante la temporada de FSAE 2011 que compitió en Junio del 2011 en la competencia de FSAE WEST 2011 en el Auto Club Speedway localizado en Fontana, California.

El objetivo principal de un sistema de control de motor es administrar la cantidad de combustible que se adiciona en cada ciclo del motor, determinando el mejor momento para realizar la combustión. Para lograr esto se utilizan diferentes sensores que proporcionan información sobre el estado del motor a una computadora que se encarga de procesar la información y

mandar las señales adecuadas a los actuadores. En este trabajo se presenta el proceso de selección de cada uno de los componentes que forman el sistema de control junto con sus base teóricas así como la manera en la que se integró el sistema. Una vez que se tiene implementado el sistema se presenta el desarrollo de un plan de pruebas capaz de desarrollar de manera satisfactoria los parámetros de control que requiere la computadora para procesar las señales de control.

Se realizan varios experimentos y pruebas con el fin de caracterizar ciertos sensores y actuadores y se presenta el desarrollo experimental y calibración del motor desde un inicio hasta el final de la competencia, donde fue posible cuantificar el nivel de desarrollo del sistema utilizando diferentes métricas y parámetros.

Finalmente se realiza una evaluación sobre el trabajo realizado, las posibles mejoras y cambios que se recomiendan para el equipo del próximo año. El trabajo realizado tiene el objetivo de documentar el proceso de diseño y experimental con el fin de dejar una memoria que permita a los futuros equipos desarrollar sistemas cada vez mas avanzados y confiables que le permitan al equipo de FSAE UNAM llegar a ser un serio competidor en la categoría.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Motor de combustión interna

Un motor de combustión interna convierte la energía química de un combustible en energía mecánica. La energía química primero se convierte en energía térmica por medio de combustión y oxidación de aire dentro del motor. La energía térmica aumenta la presión y temperatura de los gases dentro del motor que al expandirse contra el pistón son convertidos en energía mecánica. El sistema del cigüeñal convierte el movimiento de expansión en un movimiento rotativo en la flecha del motor, lo cual es el objetivo principal de un motor. [2]

Los motores que utilizan energía térmica se han utilizado por más de dos siglos, desde motores de vapor con combustión externa hasta los primeros motores de combustión interna que comenzaron a aparecer alrededor de 1860. Los primeros motores desarrollados utilizaban presión atmosférica en la mezcla aire-combustible y obtenían eficiencias no mayores a 5 % con potencias de hasta 6 HP. En 1876, Nicolaus A. Otto probó por primera vez el prototipo de su motor de cuatro tiempos que utilizaba cuatro carreras del pistón: un tiempo de admisión, un tiempo de compresión de la mezcla aire-combustible, un tiempo de expansión en el cual se entrega potencia al cigüeñal y finalmente un tiempo de escape. El uso de los cuatro tiempos permitía elevar la presión del fluido de trabajo lo cual significó una gran reducción en peso y volumen y un aumento de en la eficiencia. El desarrollo de Otto significó el nacimiento de la industria del motor de combustión interna y para el año 1890 casi 50,000 motores se habían vendido.

Durante todo el siglo XX el motor de combustión interna siguió desarrollándose de forma continua incluyendo mejoras y descubrimientos tales como:

- Motores de dos tiempos
- Motores diesel o de ignición por compresión
- Motor de combustión interna rotativo
- Mejora en la producción y desarrollo de combustibles

Durante las últimas cuatro décadas han adquirido mayor importancia nuevos factores que afectan el diseño y operación de motores. Los más importantes siendo la necesidad de controlar la contaminación producida por estos y mejorar significativamente el consumo de combustible.

Inclusive aún después de más de un siglo de desarrollo el motor de combustión interna sigue mejorando de forma considerable en cuanto a eficiencia, potencia y control de emisiones. Gracias a la continua investigación en materiales, tipos alternativos de motores de combustión interna, combustibles alternativos, entendimiento de los procesos de los motores y avances en sistemas control las oportunidades de desarrollo de los motores de combustión interna siguen siendo muy amplias y diversas. [1]

2.1.1. Clasificación

Actualmente existe una muy amplia variedad de motores de combustión interna y por lo tanto también de la forma de clasificarlos.

- **Aplicación:** Automotivos, camiones, trenes, aviones, marinos, generación de poder.
- **Diseño básico del motor:** Reciprocantes (subdivididos según el arreglo de sus cilindros), rotativos.
- **Ciclo de trabajo:** Cuatro tiempos, dos tiempos.
- **Diseño y ubicación de puertos y válvulas:** Superior, inferior, rotativas, opuestas, uniflujo.
- **Combustible:** Gasolina, diesel, gas natural, gas de petróleo líquido, alcoholes, hidrógeno, combinados.
- **Método de preparación de la mezcla:** Carburados, inyección al múltiple de admisión, inyección al puerto de admisión, inyección directa al cilindro.

- **Método de ignición:** Ignición por chispa, ignición por compresión.
- **Diseño de la cámara de combustión:** Abierta (disco, hemisférico, bol en pistón), cámaras divididas (pequeña y auxiliar, pre-cámaras)
- **Método de control de carga:** Control de cantidad de combustible y admisión de aire, únicamente control de cantidad de combustible, combinación de ambas)
- **Método de enfriamiento:** Enfriado por aire, agua, convección y conducción natural únicamente.

Como se puede apreciar existe una muy amplia gama de diseños y tipos de motores de combustión interna, cada uno con beneficios y desventajas particulares. En general el método de ignición se usa como primera y más importante clasificación con el ciclo de operación del motor, dos o cuatro tiempos, como segunda en importancia. [1]

2.1.2. Componentes de un motor de combustión interna

En la figura 2.1 se muestra un corte de un motor Chrysler con un desplazamiento de 2.2 l con los componentes más importantes etiquetados. Es un motor de cuatro tiempos, cuatro cilindros, ignición por chispa y control de la mezcla aire-combustible con un carburador. Los componentes principales que se muestran en esta figura son utilizados en todos los motores de cuatro tiempos de ignición por chispa convencionales salvo variaciones dependiendo de los demás criterios de clasificación.

El bloque del motor se fabrica con hierro o aluminio y contiene a todos los demás componentes de la parte inferior del motor así como canales para enfriamiento y lubricación. El cigüeñal convierte el movimiento recíprocante en rotativo, provee la inercia que necesitan los pistones y balancea el motor. Se fabrica generalmente de acero forjado o hierro colado. Las bielas conectan los pistones con el cigüeñal con bujes que le permiten suficiente movimiento. Los pistones se fabrican de aluminio y su función es sellar el cilindro y transmitir la presión generada por la combustión hacia el cigüeñal. La cabeza del motor sella los cilindros y contiene las válvulas, bujías, inyectores y el sistema de distribución con el árbol de levas. El árbol de levas contiene levas con perfiles específicos encargadas de abrir y cerrar las válvulas de admisión y escape con relación a la posición de los pistones en cada parte del ciclo.

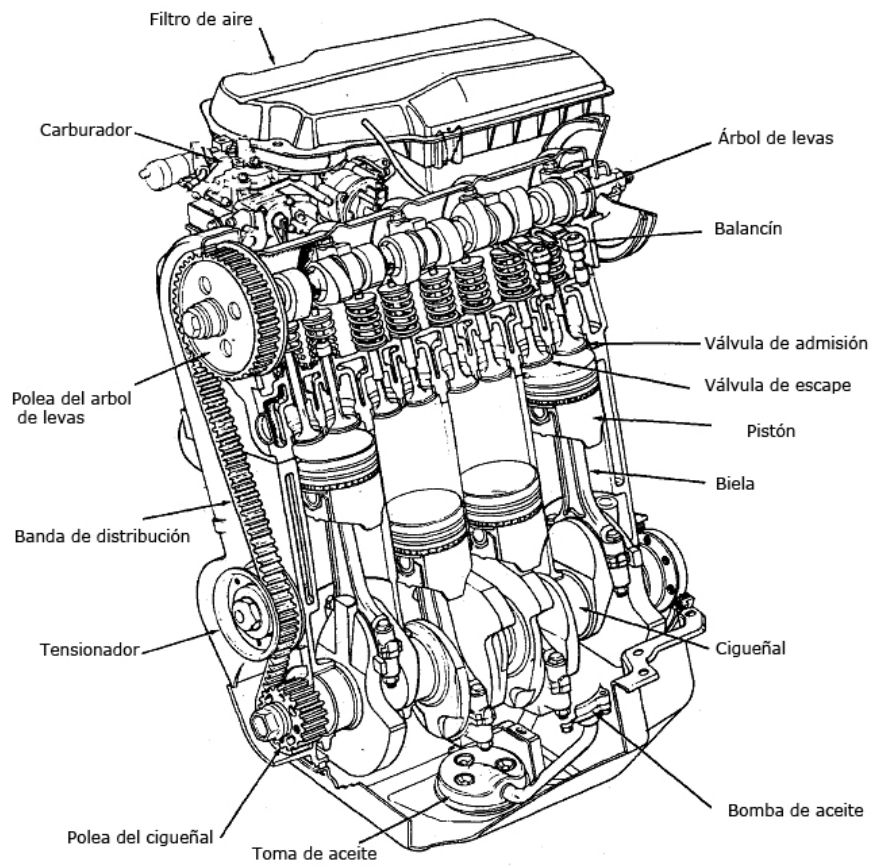


Figura 2.1: Motor de combustión interna Chrysler 2.2l [1]

2.1.3. Ciclo de operación de motores de cuatro tiempos

La figura 2.2 muestra la geometría básica del motor de combustión interna reciprocante de donde se pueden definir varios términos. La rotación del cigüeñal produce un movimiento cíclico y lineal en el pistón, el punto muerto superior (PMS) es la posición de descanso del pistón cuando el cigüeñal se encuentra en su punto más alto y el cilindro contiene el menor volumen asimismo cuando el cilindro contiene el máximo volumen el pistón llega al punto muerto inferior (PMI) . La relación de compresión (R_c) se define como la relación entre el máximo volumen y el mínimo volumen que puede existir en el cilindro.

La mayoría de los motores reciprocantes utilizan el ciclo de cuatro tiempos. Cada cilindro requiere cuatro carreras del pistón-dos revoluciones del cigüeñal-para completar la secuencia de eventos que produce una carrera de potencia.

Los pasos del ciclo son:

- (a) Tiempo de admisión: Con la válvula de admisión abierta el pistón se mueve del PMS y acaba en el PMI. Para incrementar la masa de aire-combustible inducida generalmente la válvula de entrada se abre justo antes de comenzar este tiempo y cierra poco después.
- (b) Tiempo de compresión: Con ambas válvulas cerradas la mezcla de aire-combustible dentro del cilindro se comprime a una fracción de su volumen inicial, hacia el final de esta carrera se inicia la combustión y la presión en el cilindro incrementa rápidamente.
- (c) Tiempo de potencia (expansión): Comienza con el pistón en el PMS y termina en el PMI cuando los gases de combustión de alta presión y temperatura empujan el pistón hacia abajo causando una rotación en el cigüeñal. Aproximadamente se produce cinco veces más trabajo durante este tiempo que el trabajo usado durante la compresión. Cuando el pistón se aproxima al PMI se abre la válvula de escape para iniciar el proceso de escape.
- (d) Tiempo de escape: Los gases de la combustión salen del cilindro tanto por la diferencia de presión entre el cilindro y el escape tanto como por el recorrido que realiza el pistón hacia el PMS. Justo después del PMS se cierra la válvula de escape y comienza el ciclo de nueva cuenta.

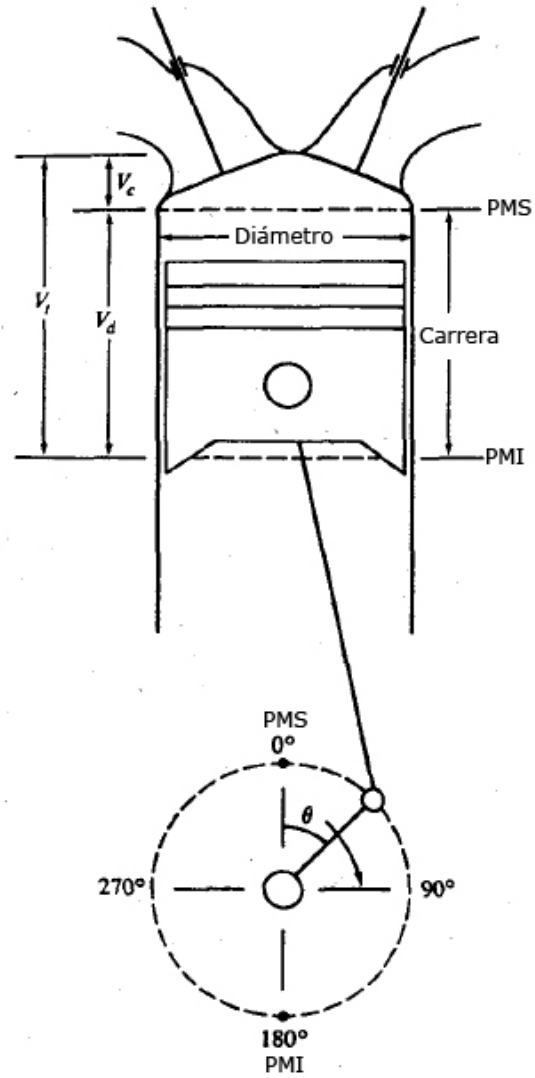


Figura 2.2: Geometría básica del motor de combustión interna [1]

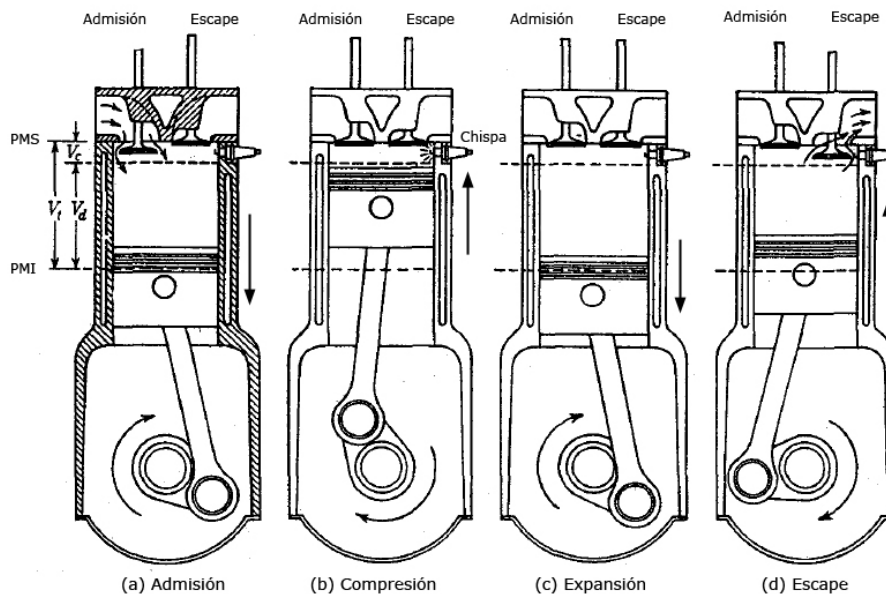


Figura 2.3: Ciclo de cuatro tiempos de un MCI [1]

Este ciclo muchas veces se denomina el ciclo Otto en referencia a su inventor aunque es preferible usar el término más descriptivo de ciclo de cuatro tiempos. [1]

2.2. Sistemas de inyección y control de motores

El sistema de inducción de aire y de combustible de un motor se encarga de preparar la mezcla de aire ambiental con combustible del tanque de tal forma que se obtenga una mezcla que satisfaga los requisitos del motor en todo su régimen de operación. La proporción entre aire y combustible que proveen el consumo más bajo de combustible, operación confiable y fluida y que satisface los requisitos ambientales de emisiones al mismo tiempo de proporcionar la potencia requerida varía según la carga y velocidad en el motor.

Durante muchos años se utilizaron los carburadores en la mayoría de los motores de gasolina como el sistema de manejo del combustible. Los carburadores utilizan un principio de funcionamiento extremadamente simple, aunque para el año 1980 cuando la inyección de gasolina reemplazó casi por completo los carburadores estos habían evolucionado a sistemas excesiva-

mente complejos y poco económicos. En la figura 2.4 se muestran las partes de un carburador elemental y se explica su principio de funcionamiento.

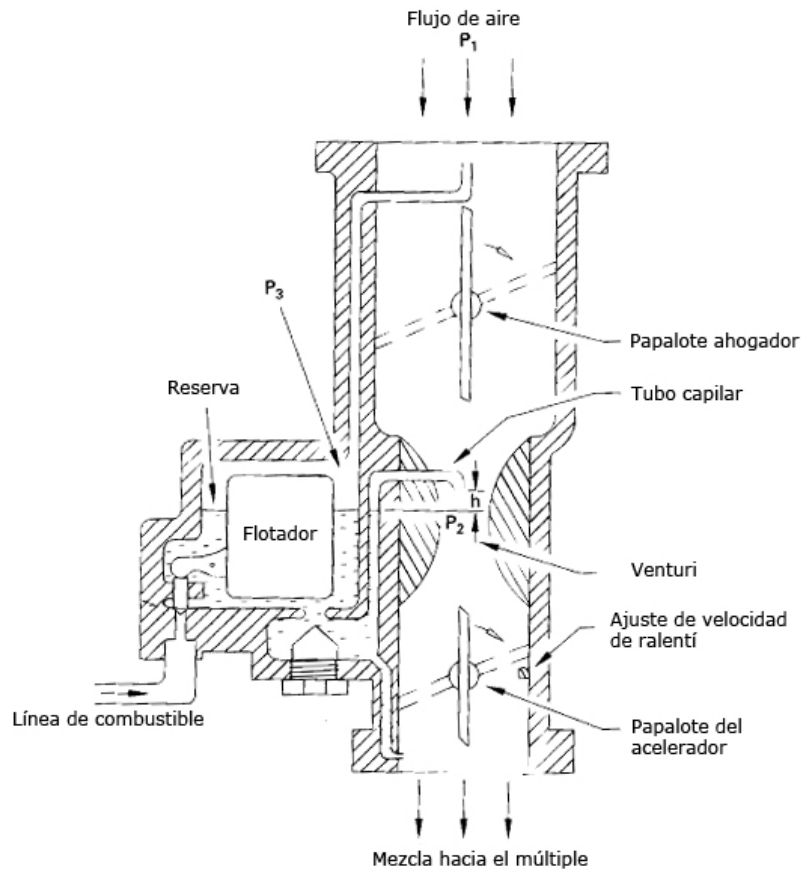


Figura 2.4: Carburador básico [2]

Un carburador básico consiste de un Venturi con un papalote y un tubo capilar conectado al depósito de combustible. Todo el aire que entra al motor pasa primero por el tubo de Venturi. La reserva de combustible, el ahogador y los ajustes de ralentí y combustible son las otras partes principales de un carburador.

La carga de aire entra al motor por el diferencial de presión creado por los pistones en los cilindros en el tiempo de admisión. El aire es acelerado por el

tubo de Venturi en su paso del ambiente hacia el vacío parcial generado en los cilindros. Por el principio de Bernoulli esta aceleración causa una caída de presión (P2) en la garganta del Venturi lo cual la reduce a una presión menor a la presión ambiental (P1).

La presión en la reserva de combustible (P3) es igual a la presión atmosférica por lo que es mayor a la presión en el punto P2. La diferencia de presión a través del tubo capilar de suministro de combustible causa un flujo hacia la garganta del Venturi. Mientras el combustible fluye fuera del capilar se rompe en muy pequeñas gotas que se mezclan con el aire a alta velocidad y son llevadas hacia los cilindros. Al incrementarse la velocidad del motor el flujo de aire mayor crea una diferencia de presión aún más grande lo cual incrementa el flujo de combustible. Un carburador bien diseñado puede suministrar una mezcla aire-combustible adecuada para el motor en todo su rango de revoluciones y carga aunque también presenta varios problemas y deficiencias.

El papalote ahogador mostrado en la figura es necesario en los carburadores para prender motores que se encuentran muy fríos, ya que el flujo de aire a bajas revoluciones genera una diferencia de presión pequeña y por lo tanto un flujo de combustible menor al necesario para prender un motor frío donde por la poca vaporización del combustible se requieren relaciones de la mezcla muy ricas. El papalote se cierra para prender el motor y se abre gradualmente mientras se calienta el motor.

Para otorgar un desempeño satisfactorio en todas las condiciones de trabajo de un motor los carburadores requirieron incrementar su nivel de complejidad añadiendo válvulas, venturis, bombas y otros elementos mecánicos que para los años 1980s convirtieron el carburador en un elemento complicado que no podía cumplir satisfactoriamente los estándares de emisiones fijados recientemente por algunos países. La inyección de combustible pudo resolver satisfactoriamente estos problemas al permitir un manejo del combustible mucho más preciso y controlado bajo cualquier situación. [2]

Los sistemas de inyección de combustible se comenzaron a desarrollar a finales del siglo XIX y se emplearon comercialmente desde 1920 en motores diesel. En la segunda guerra mundial se comenzó a utilizar la inyección de combustible en motores de gasolina para aviones que trabajan bajo cargas de fuerzas G variables en donde un carburador no funciona adecuadamente. En 1952 Bosch introdujo uno de los primeros sistemas comerciales de inyección de gasolina. Se trataba de una adaptación a uno de sus sistemas de inyección directa diesel con la adición del cuerpo de aceleración para el control de la entrada de aire. Los sistemas continuaron desarrollándose y en 1957 Bendix lanzó el primer sistema de inyección de combustible electróni-

co los cuales continuaron evolucionando y utilizándose cada vez más en los automóviles con motores de gasolina. En los años 1970s y 1980s muchos países comenzaron a introducir regulaciones en cuanto a las emisiones en los vehículos. Durante ese periodo la mayoría de los vehículos contaba con sistemas de carburador que no podían cumplir con los estándares fijados y que requerían sistemas de carburadores muy complejos y poco económicos. Para cumplir con mayor facilidad con el nuevo reglamento las armadoras comenzaron a equipar a sus vehículos con sistemas de inyección de gasolina y cada vez menos carburadores.

Los sistemas de inyección de gasolina han continuado evolucionando y los sistemas actuales proveen un método preciso, económico y confiable de administrar gasolina al motor y proveer la máxima eficiencia y emisiones limpias por lo que han reemplazado casi por completo al carburador.

Capítulo 3

Objetivos

Objetivo general

Diseñar, seleccionar e implementar el sistema de control y electrónica complementaria del motor de combustión interna para el vehículo monoplace estilo fórmula construido para participar en la competencia "Formula SAE 2011 West" para lograr un alto desempeño del motor al mismo tiempo de cumplir con el reglamento de la competencia.

Objetivos particulares

- Seleccionar cada uno de los componentes del sistema con base en evaluaciones técnicas, económicas y prácticas
- Integrar el sistema y desarrollar un plan de desarrollo y pruebas
- Desarrollar los parámetros de control utilizando el sistema físico y siguiendo el plan de pruebas
- Analizar el resultado final y sugerir un plan de trabajo futuro

Capítulo 4

Metodología de diseño

4.1. Fórmula SAE

Formula SAE es una competencia organizada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices con el objetivo de producir estudiantes de ingeniería con experiencia en proyectos reales. La competencia está diseñada para que los estudiantes se involucren en todos los aspectos de la creación de una compañía hipotética a la cual se le ha asignado el diseño, construcción y pruebas de un auto tipo fórmula rentable para el corredor amateur. Los autos se juzgan en tres categorías: inspección estática y diseño, pruebas individuales y pruebas de resistencia en una pista de alta exigencia. La competencia fue creada en 1979 en la Universidad de Houston como una variante a la competencia Mini Baja con reglas más abiertas con el objetivo de llevar los vehículos al siguiente nivel en cuanto a ingeniería. Fórmula SAE promueve excelencia en ingeniería ya que abarca todos los aspectos de la industria automotriz incluyendo investigación, diseño, manufactura, pruebas, desarrollo, mercadotecnia, administración y finanzas.

Hoy en día la competencia se ha expandido de forma considerable logrando presencia internacional y se ha consolidado como la competencia de diseño colegial más importante del mundo. Actualmente se realizan dos competencias en Estados Unidos: California y Michigan, siendo el evento en Michigan el más grande y con mayor historia. Internacionalmente se realizan competencias con las reglas oficiales y estandarizadas de SAE en los siguientes lugares:

- Fórmula SAE Australasia
- Fórmula SAE Brasil

- Fórmula SAE Italia
- Fórmula Student Inglaterra
- Fórmula Student Alemania

Los objetivos de diseño del vehículo fijados en el reglamento incluyen:

- El vehículo deberá de tener muy alto desempeño en cuanto a aceleración, frenado y maniobrabilidad y ser suficientemente durable para completar satisfactoriamente todos los eventos llevados a cabo en las competencias Fórmula SAE.
- El vehículo debe de acomodar pilotos cuya estatura se sitúe entre el rango del 5to percentil femenino hasta el 95vo percentil masculino así como cumplir los estándares de seguridad fijados por las reglas.
- Factores de diseño adicionales que deberán de ser considerados incluyen: estética, costos, ergonomía, manufacturabilidad, confiabilidad y se debe de tomar en cuenta la facilidad de darle servicio.

Asimismo las reglas indican que los vehículos construidos para la competencia deben ser diseñados y fabricados siguiendo buenas prácticas de ingeniería en todo momento.

4.1.1. Juzgado de los vehículos y puntajes

Los autos se juzgan en una serie de eventos dinámicos y estáticos incluyendo: inspección técnica, costo, presentación, diseño ingenieril, desempeño individual y desempeño de alta exigencia en pista. Los puntos que se otorgan se dividen en las siguientes categorías, siendo el ganador el vehículo con mayor puntaje al final de todas las pruebas.

Eventos estáticos:

- Inspección técnica 0
- Presentación 75
- Diseño 150
- Análisis de costos 100

Eventos dinámicos:

- Aceleración 75

- Skid-pad 50
- Auto Cross 150
- Economía de combustible 100
- Endurance 300

Total 1000 puntos

A continuación se describe brevemente cada evento:

Eventos Estáticos

- Inspección técnica: Cada vehículo debe de pasar una rigurosa inspección técnica para determinar que el vehículo cumpla con las reglas de FSAE, este evento no otorga puntos pero es un requisito para poder realizar tanto los eventos dinámicos como cualquier prueba en pista.
- Presentación: Este evento evalúa la habilidad del equipo de desarrollar y presentar un plan de negocios que convenza a un grupo de ejecutivos de una compañía que el diseño propuesto cumple con las expectativas del piloto amateur y se puede manufacturar y vender de manera redituable.
- Diseño: El objetivo del evento de diseño es evaluar el esfuerzo de ingeniería involucrado en el diseño del vehículo. El vehículo que mejor demuestre el buen uso de la ingeniería para cumplir con los objetivos propuestos así como el entendimiento del auto por los miembros del equipo gana este evento.
- Análisis de costos: El objetivo de este evento es enseñarle a los participantes que los costos y el presupuesto son factores importantes que deben de ser tomados en cuenta siempre en la ingeniería. El evento está compuesto de tres partes:
 1. Entrega de un reporte de costos detallado siguiendo reglas que estandarizan los costos internacionalmente.
 2. Discusión con los jueces sobre el reporte de costos con el vehículo presente.
 3. Caso Real donde los estudiantes deben responder a un reto relacionado a costos o manufactura de su vehículo.

Eventos Dinámicos

- **Aceleración:** Se evalúa la capacidad de aceleración del vehículo en línea recta sobre pavimento plano. Gana el vehículo en completar los 75m en el menor tiempo.
- **Skid-Pad:** El evento evalúa la maniobrabilidad del auto mientras hace vueltas de radio constante. Se utiliza una pista en forma de ocho con 15m de diámetro y el vehículo debe de entrar, dar dos vueltas por cada círculo y salir de la pista.
- **Auto Cross:** Evalúa la maniobrabilidad y velocidad del vehículo en una pista con vueltas cerradas y con el auto corriendo solo. Se requiere desempeño en aceleración, maniobrabilidad y frenado para ganar la prueba.
- **Prueba de resistencia en pista (Endurance) y economía de combustible:** Estas dos pruebas se corren simultáneamente siendo la prueba de resistencia la más importante de la competencia y la que más puntos tiene asignados. Esta prueba determina el desempeño general del auto así como su confiabilidad y durabilidad. Consiste en 22 vueltas a una pista de aproximadamente 1km con un cambio de piloto acabando la vuelta 11. Varios vehículos corren a la par en la pista lo cual incrementa el nivel de dificultad. La cantidad de combustible utilizada para recorrer los 22km determina el puntaje de la prueba de rendimiento de combustible siendo el ganador el vehículo que haya utilizado la menor cantidad.

4.2. Restricciones y objetivos de diseño

El reglamento de FSAE está compuesto de más de 100 hojas que incluyen especificaciones y reglas para cada sistema del vehículo con el objetivo principal de asegurar la seguridad del vehículo así como exigir buenas prácticas de ingeniería y especificaciones técnicas. El tren motriz y especialmente el motor y sus accesorios son de los sistemas menos restringidos en cuanto a cantidad de reglas aunque las reglas que incluye tienen grandes repercusiones en cuanto al diseño, implementación y desarrollo del tren motriz.

Las reglas que rigen al tren motriz que son pertinentes a este trabajo son:

B8.1 Limitación del motor

B8.1.1 El motor usado para propulsar el auto debe de ser un motor de cuatro tiempos de pistón con un desplazamiento que no exceda los 610cc.

B8.1.2 El motor puede ser modificado dentro de las restricciones de las reglas.

B8.3 Marcha

Cada auto debe de ser equipado con una marcha eléctrica que se utiliza para prender el motor en todo momento.

B8.5 Cuerpo de aceleración

B8.5.1 El auto debe de contener un carburador o cuerpo de aceleración que puede ser de cualquier tamaño y diseño.

B8.5.2 El cuerpo de aceleración debe de ser actuado mecánicamente, el uso de control de aceleración electrónica está prohibido.

B8.6 Restricción del sistema de admisión

B8.6.1 Con el fin de limitar la potencia del motor una restricción circular debe de ser posicionada en el sistema de admisión entre el cuerpo de aceleración y el motor de tal forma que todo el aire que entre al motor deba pasar por esta restricción.

B8.6.2 Cualquier dispositivo que pueda regular el motor posicionado después de la restricción está prohibido.

B8.6.3 Los diámetros máximos para la restricción son:

Motores a gasolina: 20.0mm

Motores que utilicen E-85: 19.0mm

[10]

La regla más importante por lo que implica es la adición de la restricción de aire que entra al motor. Esta regla tiene dos propósitos importantes, limita la potencia máxima que puede desarrollar el motor por razones de seguridad pero también significa que se debe de desarrollar por completo un nuevo sistema de admisión de aire y escape así como el sistema de control y manejo del motor. Esto requiere que los estudiantes se familiaricen por completo con el funcionamiento y componentes del motor y sus demás sistemas. Las reglas mencionadas forman la base de la justificación de este trabajo ya que para poder competir satisfactoriamente en la categoría FSAE se debe de implementar un sistema de control del motor diferente al original y se debe de afinar el motor de acuerdo a los nuevos parámetros. El diseño y manufactura del múltiple de admisión y escape también se debe de realizar y se explicará brevemente el diseño y proceso seguido.

El objetivo principal es tener un motor capaz de suministrar la potencia que requiere el vehículo en todo momento con la finalidad de desempeñarse satisfactoriamente en los eventos dinámicos así como haber implementado el sistema y diseño de manera correcta y siguiendo un proceso estructurado. Los parámetros que guiarán la implementación del sistema de control del motor incluyen en orden de importancia descendente:

- Potencia
- Eficiencia de combustible
- Confiabilidad y durabilidad del sistema
- Facilidad de manejo y suavidad en operación
- Costo inicial y disponibilidad de partes así como el costo de mantenimiento
- Capabilidad de diagnóstico y facilidad de uso

La optimización de todos los parámetros resulta a veces conflictiva por lo que se le asigna más importancia a los parámetros que directamente afecten el rendimiento del vehículo en la competencia y en segundo lugar a los que afecten los tiempos y procesos de manufactura e implementación. Para cumplir con los objetivos fijados se siguió un proceso de diseño estructurado como se muestra:

- Definición de objetivos
- Investigación y estudio del estado del arte
- Selección de componentes
- Integración del sistema
- Pruebas y validación

Cada componente del sistema fue elegido siguiendo este proceso y consiguientemente integrado al sistema general. En las siguientes secciones se explica el funcionamiento y selección de cada componente individual del sistema y su posterior integración y pruebas.

4.3. Selección del motor

El equipo participante en FSAE de la UNAM se formó por primera vez en el año 2010 y la selección del motor se realizó por primera vez en ese año. Siendo un equipo novato la selección se realizó basándose en un estudio de los motores utilizados con éxito por equipos con experiencia así como por la disponibilidad y costo de estos motores de alto desempeño en México.

La regla sobre el desplazamiento del motor restringe la gama de modelos utilizables a motores de motocicletas medianas de alto desempeño tanto deportivas como de todo terreno. La regla que especifica que el motor debe de ser de cuatro tiempos acota aún más la selección, por lo tanto los motores utilizados por la mayoría de los equipos en los últimos años no sobrepasa los 10 modelos diferentes. Se utilizan generalmente motores de 600cc, 550cc o 450cc tomados de motocicletas, con muy pocos equipos utilizando motores industriales o de cilindradas un poco diferentes.

El primer paso del proceso en el 2010 incluyó una amplia investigación sobre los motores utilizados por los equipos con buen desempeño en la competencia a lo largo de las temporadas así como de las características de sus vehículos. Los resultados de la investigación muestran dos claras tendencias en los vehículos de FSAE actuales dependiendo de la experiencia, presupuesto del equipo y filosofía de diseño.

Vehículos con estructura tubular de acero y motor de 600cc de cuatro cilindros: Esta es la combinación más común dentro de la categoría y es usada de igual manera por equipos con poca experiencia y por equipos experimentados que diseñan vehículos capaces de ganar la competencia. El motor de mayor tamaño compensa el peso de la estructura de acero del vehículo y permite tener una relación peso-potencia adecuada.

Vehículos con monocasco de fibra de carbón y motor de 450cc de un cilindro: Los equipos que cuentan con mayores recursos y una filosofía de diseño enfocada hacia la reducción de peso recientemente han desarrollado plataformas basadas en monocascos ligeros hechos de fibra de carbón propulsados por un tren motriz basado en un motor pequeño y ligero de un cilindro y 450cc. Estos motores desarrollan aproximadamente 60 % de la potencia del motor de 600cc aunque con gran par desde bajas revoluciones. Un vehículo ligero con este motor alcanza una relación peso-potencia casi igual a la del vehículo de estructura tubular y motor de 600cc al mismo tiempo que su menor peso le permite mejor maniobrabilidad en curvas lo cual es de lo más importante en la competencia.

Siendo el equipo de la UNAM un equipo que participaría por primera vez en FSAE en el año 2010 se decidió utilizar un motor de 4 cilindros y 600cc ya que se acoplaba de manera adecuada a la filosofía de diseño seleccionada el primer año. Con la decisión tomada sobre el tipo de motor el segundo criterio de selección se utilizó para escoger entre los diferentes modelos y marcas de motores de este tipo. Las marcas que manufacturan motocicletas con motores adecuados incluyen: Honda, Yamaha, Kawasaki, Aprilia y Su-

zuki. Comprar un motor nuevo con el fabricante es difícil y extremadamente costoso por lo que usualmente se utilizan motores usados sacados de motos que se venden por piezas o inclusive se compra la moto entera. El equipo finalmente se decidió por un motor Yamaha R6 2008 por su desempeño, relativo poco uso y precio accesible. A continuación se describen sus características y su configuración al momento de ser adquirido.

Yamaha YZFR6X 2008

- Motor de cuatro tiempos enfriado por agua DOHC 16 válvulas de titanio
- Desplazamiento 599 cm³ (36.55 cu.in)
- Potencia máxima 133.6 HP @14,500 RPM
- Línea roja 16,500 RPM
- Cuatro cilindros en línea inclinados hacia delante
- Diámetro pistón: 67.0mm Carrera: 42.5mm
- Relación de compresión 13.1:1
- Marcha eléctrica
- Transmisión integrada secuencial de seis velocidades
- Sistema de inyección y admisión de aire electrónico

En la figura 4.1 se muestra el sistema original de inyección de gasolina incluido en el motor.

1. Inyector secundario 2. Bomba de gasolina 3. Inyector primario 4. Sensor de identificación de cilindro 5. ECU (Unidad de control del motor) 6. Sensor de posición del acelerador 7. Sensor de posición de papalotes 8. Sensor de velocidad 9. Sensor de temperatura de aire 10. Sensor de ángulo de inclinación 11. Sensor de oxígeno 12. Convertidor catalítico 13. Sensor de temperatura del líquido refrigerante 14. Sensor de posición de cigüeñal 15. Sensor de presión de aire de admisión en el múltiple 16. Servo motor del acelerador 17. Cuerpo de aceleración 18. Sensor de presión atmosférica 19. Filtro de aire 20. Servo motor de múltiple de admisión [3]
El sistema de control original incluye estas dos tecnologías que le permiten al motor desarrollar mayor potencia en todo su rango de operación y operar con mayor eficiencia.

En la figura 4.4 se muestra el motor adquirido el cual fue comprado de un

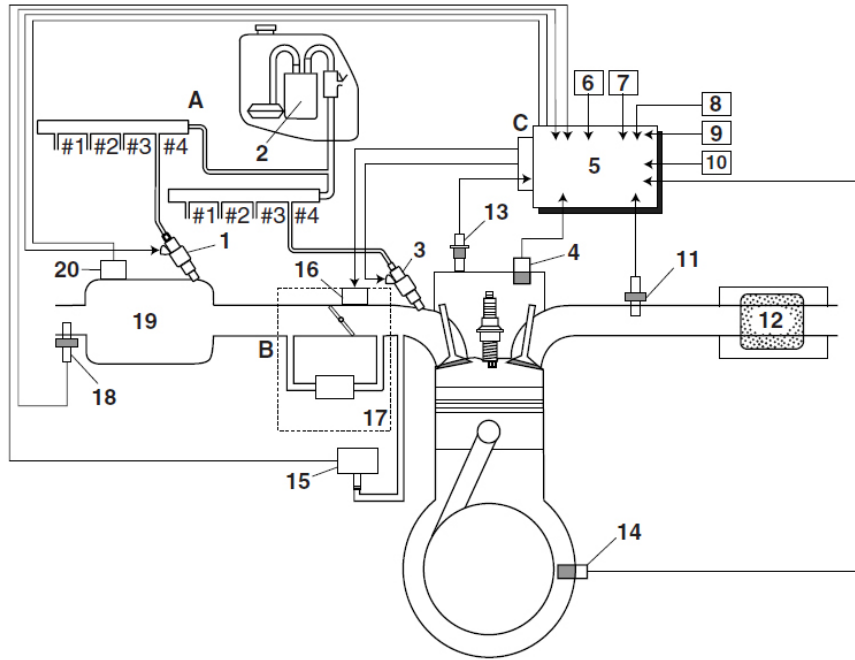


Figura 4.1: Esquema de sistema de control del motor original A: Sistema de combustible B: Sistema de admisión de aire C: Sistema de control [3]

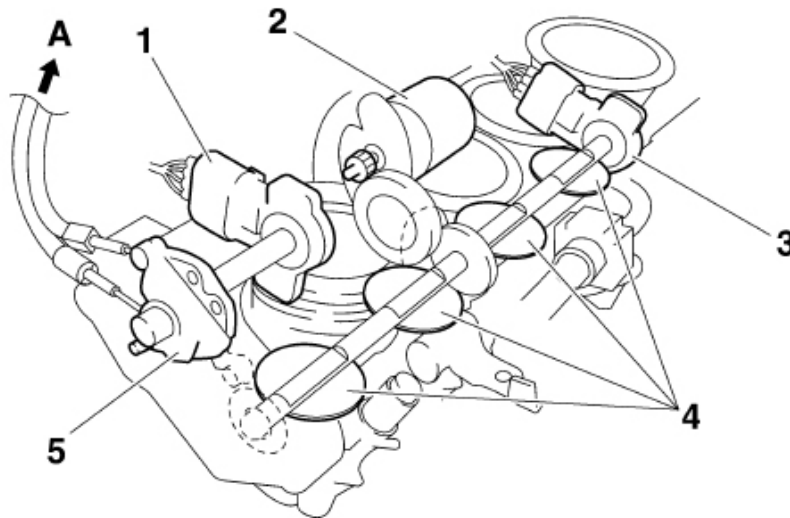


Figura 4.2: Sistema Yamaha YCC-T con cuerpo de aceleración servo controlado [3]

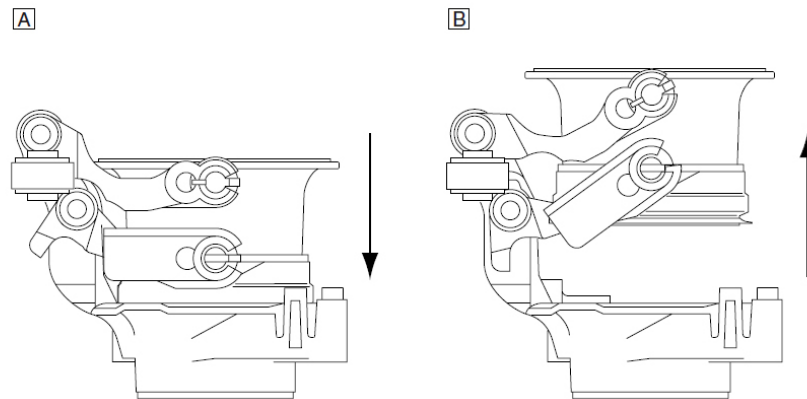


Figura 4.3: Sistema Yamaha YCC-I con ductos de admisión de largo variable [3]

taller de motocicletas que se especializa en importar motocicletas usadas y venderlas por partes o usadas. El motor fue probado en la presencia de integrantes del equipo para comprobar su estado y consiguientemente separado de la mayoría de los sistemas de apoyo que lo integran que no se necesitarían. El motor fue adquirido por el equipo con el mínimo de accesorios necesarios para reducir su costo ya que por el desarrollo que se le debe de hacer no se requirió comprar más que el bloque con los sensores e inyectores primarios, el arnés eléctrico original y parte del sistema de escape.

A partir de este estado se comenzó a desarrollar el nuevo sistema de admisión de aire, escape y el sistema de control que se implementaría para lograr competir exitosamente en la competencia.

Este motor fue usado con éxito en la competencia 2010 y al momento de comenzar el desarrollo para el vehículo del 2011 se decidió volverlo a usar ya que el equipo no se encontraba en una situación económica que le permitiera adquirir otro motor pero también por considerar que este motor seguía en buen estado y se podía aprovechar de buena manera siempre y cuando se desarrollaran correctamente los sistemas de control y admisión de aire así como sus pruebas y afinación.

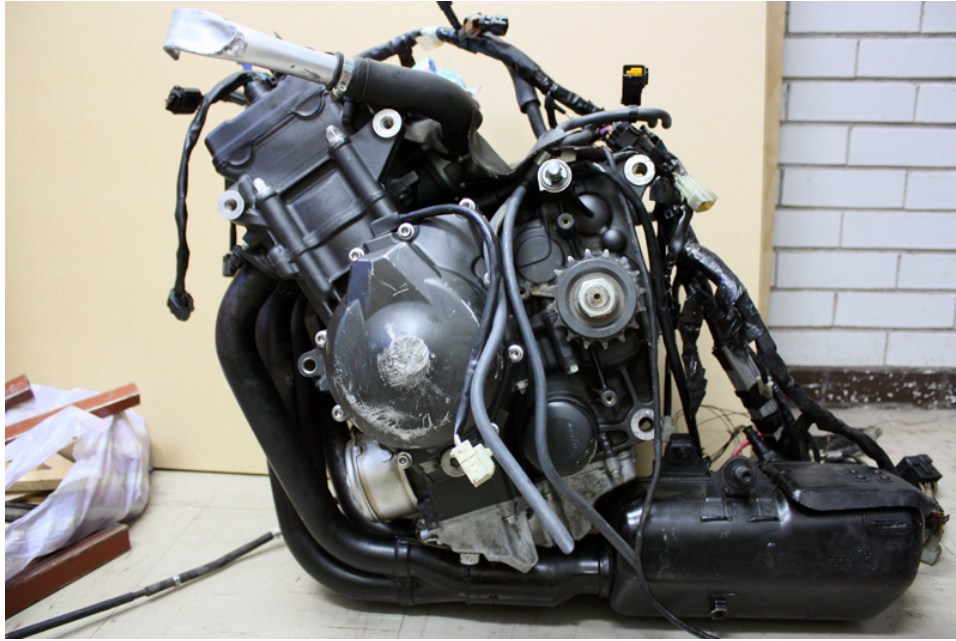


Figura 4.4: Motor Yamaha R6 2008 en la condición que fue adquirido

4.4. Componentes del sistema de control del motor

El primer paso en la implementación del sistema de control del motor es una investigación que permita comprender los componentes que forman parte de un sistema de control así como la función de cada uno dentro de este con la finalidad de poder reemplazar el sistema de control original con un sistema programable autónomo capaz de cumplir con los objetivos fijados.

Un sistema de inyección electrónica moderno es un sistema conceptualmente simple y fácil de entender ya que al final su propósito es simplemente prender los inyectores de gasolina por un periodo de tiempo determinado cada tiempo de potencia del motor. La principal tarea de este sistema es monitorear las condiciones del motor en cada momento para poder calcular el ancho del pulso de inyección requerido y en ciertos sistemas también el ángulo de ignición de la mezcla de aire combustible.

A continuación se explican brevemente los componentes requeridos y su función dentro del sistema con la finalidad de lograr un entendimiento del

sistema completo y de los pasos que se requieren para llegar a ello. La figura 4.5 muestra los componentes típicos de un sistema de control de un motor de gasolina de cuatro tiempos con inyección de puerto y sistema de convertidor catalítico como el que se encuentra normalmente en un automóvil comercial actual.

En el esquema se puede apreciar como la ECU se encarga de recibir in-

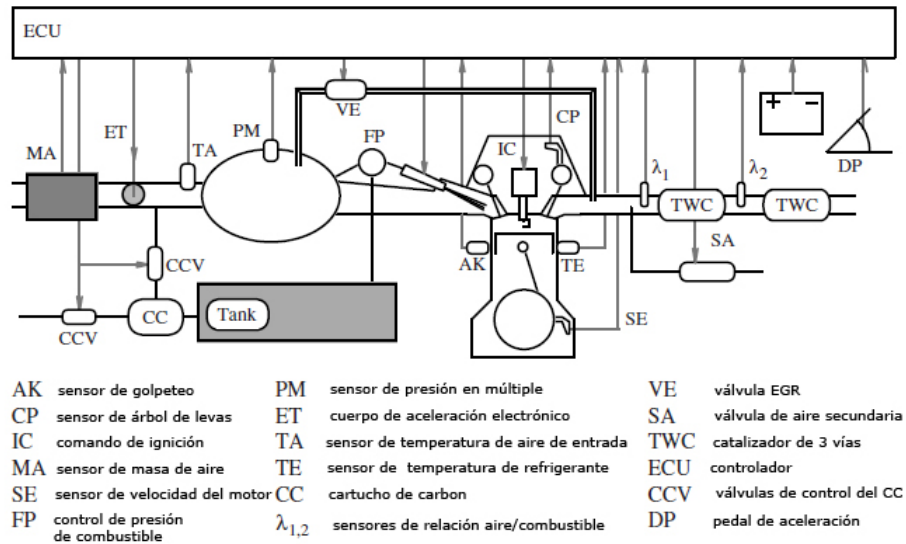


Figura 4.5: Esquema de un sistema de control de un motor SI típico [4]

formación sobre el estado del motor, procesarla y mandar las señales de control a los actuadores como son los inyectores, bujías y accesorios. El sistema mostrado incluye varios componentes dedicados al manejo y reducción de emisiones lo cual no se busca específicamente en FSAE por lo que el sistema a implementar es más sencillo que el diagrama mostrado. En la figura 4.6 se muestra de forma esquemática la estructura interna general de un sistema de control electrónico del motor moderno. Incluye al menos un microcontrolador que se encarga de recibir la información de varios sensores del motor y mandar señales al motor para lograr el par solicitado por el conductor. Aparte del microcontrolador debe de contener la circuitería y componentes necesarios para poder leer y acondicionar las señales de todos los diferentes tipos de sensores utilizados y también la electrónica capaz de generar las señales de alta corriente o voltaje que controlan los actuadores. El par generado por un motor de combustión interna encendido por chis-

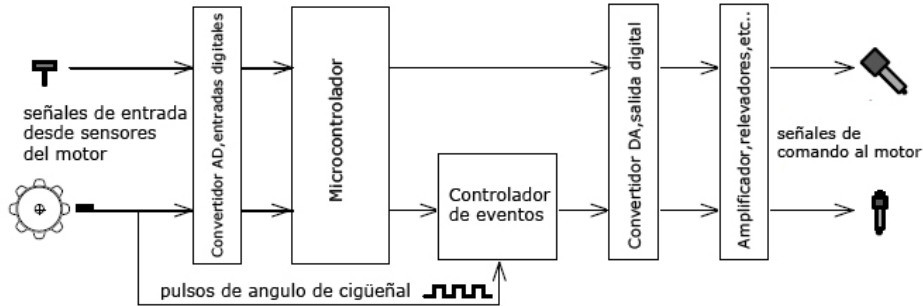


Figura 4.6: Estructura interna de un sistema de control de motor electrónico [4]

pa se controla variando la cantidad de la mezcla de aire/combustible en el cilindro durante cada carrera de potencia y no la calidad de la mezcla (relación aire/combustible). Normalmente esto se logra variando la presión de entrada de admisión de aire utilizando una placa móvil en el cuerpo de aceleración que modifica la densidad de la mezcla aunque a cambio de pérdidas de bombeo, especialmente durante bajas cargas en el motor. La importancia por lo tanto del sistema de control radica en su capacidad de mantener la relación de aire/combustible en el nivel deseado en todo el rango de uso del motor así como de encender la mezcla con la chispa en el momento adecuado logrando el mayor par y una combustión completa. [4]

A continuación se mencionan de manera simplificada los pasos necesarios para implementar un sistema de control en un motor de cuatro tiempos de inyección multipuerto como el adquirido para el vehículo.

1. *Construir el múltiple de admisión, escape y cuerpo de aceleración:* El múltiple de admisión es un importante sistema en el motor y su control ya que determina la eficiencia volumétrica del motor a cada velocidad así como sus características transitorias. El cuerpo de aceleración es una placa que permite controlar la cantidad de aire que entra al motor con el fin de controlar la velocidad del motor y la potencia generada.
2. *Diseñar el sistema de distribución de combustible:* La gasolina debe de pasar del tanque a presión atmosférica a las líneas de alta presión que distribuyen la gasolina a los inyectores a una presión constante de alrededor de 40PSI. Se utiliza una bomba eléctrica y un regulador con línea de retorno capaz de mantener la misma presión en la línea sin

importar la velocidad del motor. Los inyectores deben de ser seleccionados de tal forma de que cumplan con los requisitos del motor, siendo capaces de suministrar cantidades de gasolina muy pequeñas en situación de ralentí y cantidades considerables en un periodo muy pequeño (a altas revoluciones el tiempo que tiene el inyector para suministrar gasolina es de pocos milisegundos) por lo que la correcta selección de los inyectores es muy importante. Las bobinas y bujías seleccionadas deben de ser capaces de ser controladas por la computadora utilizada para tener el control preciso del ángulo de ignición.

3. *Suministrar a la computadora con el estado del motor:* Una vez seleccionada una computadora adecuada para el motor que se desee controlar se le debe de suministrar con sensores que le permitan monitorear al motor. Para calcular el tiempo de apertura de los inyectores se necesita saber la posición exacta de cada pistón en el motor así como el estado del motor y tener algún método de estimar la cantidad de aire que entra en cada ciclo. Sensores de temperatura, presión y posición de cigüeñal y árbol de levas continuamente suministran esta información a la computadora.

4. *Configuración y pruebas:* La computadora lee el estado del motor y en base a esta información utiliza tablas guardadas en su memoria para calcular el pulso de inyección y el ángulo de ignición adecuado. Combina la información de la tabla con cierta aritmética para ajustar continuamente y en tiempo real los pulsos requeridos en cada momento. Un motor de combustión interna instalado en un vehículo no trabaja en un estado constante sino que varía mucho su régimen de operación por lo que la computadora también debe de ser programada para ajustarse dependiendo de los estados transitorios del motor como aceleración, frenado y diferentes condiciones de trabajo que van desde la ignición del motor en frío a cambios en la presión atmosférica. El software contenido en la computadora es capaz de trabajar bajo los diferentes estados siempre y cuando se haya configurado la computadora con los sensores adecuados y a base de pruebas en cada una de sus condiciones de trabajo. Teniendo el sistema implementado se debe de proseguir a una fase de pruebas que permita lograr el máximo rendimiento del motor.

Estos son los pasos generales requeridos para lograr tener un sistema de control adecuado a la categoría y en las siguientes secciones se explica con mayor detalle cómo se realizó y seleccionó cada componente.

4.5. Selección de la unidad de control del motor

La unidad de control del motor se puede considerar como el componente más importante del sistema ya que es la encargada de recibir la información de todos los sensores, procesarla y mandar señales a los actuadores. La ECU interactúa con todos los demás componentes del sistema de control del motor y también controla los accesorios como ventiladores y la bomba de gasolina.

La selección de la computadora comenzó con una investigación de los sistemas utilizados por los equipos de FSAE en motores con características similares al seleccionado para el vehículo de la UNAM. En la actualidad existe una amplia variedad de computadoras programables con diferentes opciones, precios, funciones y facilidad de uso. Existen dos categorías principales que son los sistemas autónomos que reemplazan por completo a la computadora original del vehículo y sistemas auxiliares que trabajan en conjunto con la electrónica original pero con un rango de programación muy reducido. Por las necesidades del proyecto este tipo de sistemas se descartó ya que se requiere poder programar y controlar todos los actuadores del motor de forma completa.

Los criterios de selección utilizados en la búsqueda de la unidad de control ideal incluyeron:

- Soporte del máximo número de sensores ya incluidos en el motor
- Precio de la unidad
- Facilidad de uso, cantidad de documentación disponible y nivel de soporte técnico
- Funciones incluidas tales como manejo de los inyectores y bobinas

En el año 2010 que se seleccionó la primer ECU se decidió por un sistema de la marca Performance Electronics principalmente por su historia trabajando con equipos de FSAE y su facilidad de uso. En la figura 4.5.1 se muestra una comparativa de 7 ECUs que se investigó se usan regularmente en la categoría de FSAE. La unidad de Performance Electronics EDGE fue sacada a la venta en el año 2011 pero se muestra en la misma tabla comparativa

de las opciones del 2010. La unidad PE-1 fue seleccionada por contar con los requisitos necesarios para controlar el motor de forma sencilla ya que integra todo lo necesario a un bajo precio aunque sin la sofisticación de los competidores. Siendo el primer vehículo creado en la UNAM se seleccionó esta unidad principalmente por su facilidad de uso y precio accesible para el equipo y fue utilizada exitosamente en la temporada 2010.

En la temporada 2011 ya se contaba con mayor experiencia e información sobre los sistemas y al momento de seleccionar la nueva unidad de control se buscó una computadora con mayor número de funciones avanzadas tales como adquisición de datos, control de lazo cerrado, mayor resolución en las tablas e inyección secuencial. En Abril del 2011 Performance Electronics comenzó a ofrecer a los equipos de FSAE su nueva unidad de control que cuenta con las funciones avanzadas de competidores que cuestan el doble a un precio muy accesible. Esta unidad ya había sido probada por varios equipos de carreras de diferentes categorías por lo que se decidió adquirir esta unidad aun cuando se encontraba en estado de desarrollo beta ya que cumplía con todos los requisitos y con la seguridad de recibir soporte técnico personalizado de los ingenieros que la diseñaron.

Las características principales de la unidad de control seleccionada incluyen:[5]

- Completamente programable
- CAN bus que permite comunicación con dispositivos externos
- 1MB de memoria para adquisición de datos internos y externos
- Comunicación vía Ethernet que permite acceso inalámbrico
- Tablas de inyección e ignición de 25x26
- Control de lazo cerrado con aprendizaje
- Disparo secuencial, semi-secuencial o en tandas
- Compensaciones por ignición, temperatura y presión barométrica
- 8 entradas análogas y 7 digitales
- Hasta 10 salidas digitales y 8 análogas
- Soporte de sensores originales del motor Yamaha R6 2008
- Funciones de diagnóstico avanzadas

4.5. SELECCIÓN DE LA UNIDAD DE CONTROL DEL MOTOR 31

| Funciones de la ECU | Haltech E11 | Haltech E6X | Performance Electronice PE-1 | Performance Electronics EDGE | Walbro Minj/Bike 400 | DTA FAST P8Pro | Motec M4 |
|---|--------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Funciona hasta 14,000 RPM | Si | Si | Si | Si | Si | Si | Si |
| Número de puntos de RPM en tablas | 32 | 22/17 | 16 | 25 | 32 | 22 | 40 |
| Inyección secuencial | Si | Si | No | Si | Si | Si | Si |
| Adquisición de datos del motor | Si | No | No | Si | Si | Si | Opcional |
| Adquisición de datos externos programable | Si | No | No | Si | No | Si | Opcional |
| Corte de ignición en cambios | Si | Si | Si | Si | Si | Si | Si |
| Control de bobinas integrado | No | No | Si | Si | Si | Si | No |
| Limitador de revoluciones | Si | Si | Si | Si | Si | Si | Si |
| Soporta sensor de oxígeno y control de lazo cerrado | Si | Si | No | Si | Con convertidor externo | Con convertidor externo | Opcional |
| Salidas programables | 4 análogas y 9 digitales | 4 análogas y 1 digital | 4 digitales | 8 análogas y 10 digitales | 4 análogas | Si | 4 digitales |
| Incluye arnés | Si | Si | Si | Si | Conector de ECU | No | No |
| Ajuste individual de cada cilindro | Si | Si | Si | Si | Si | Si | Si |
| Tipos de inyectores soportados | Alta y baja impedancia | Alta y baja impedancia | Alta impedancia | Alta y baja impedancia | Alta impedancia | Alta impedancia | Alta y baja impedancia |
| Tipo de sensor de cigüeñal | Múltiples | Múltiples | Diente faltante | Múltiples | Diente faltante | Diente faltante | Múltiples |
| Costo (USD) | \$1,700.00 | \$1,100.00 | \$998.00 | \$998.00 | \$1,800.00 | \$1,530.00 | \$1,800.00 |
| Descuento para FSAE | | | 20% | 20% | 30% | 25% | |
| Costo con descuento (USD) | \$1,700.00 | \$1,100.00 | \$798.40 | \$798.40 | \$1,260.00 | \$1,147.50 | \$1,800.00 |

Figura 4.7: Tabla comparativa de UCM usadas comúnmente en FSAE



Figura 4.8: Unidad de control Performance Electronics EDGE [5]

- Soporte de ambos tipos de inyectores y todas las bobinas

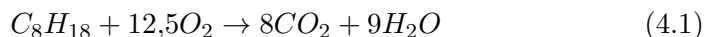
Con la el motor y la computadora seleccionados se pudo proceder a la selección de los demás componentes que integran al sistema.

4.6. Sistema de inyección de combustible

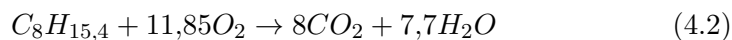
Antes de entrar a la selección y teoría de los inyectores es importante entender que es lo que se está controlando en el motor. El sistema de control no se encarga directamente de controlar la potencia y par producidos, estos son resultados indirectos del estado del motor que dependen de la velocidad del motor, el ángulo del acelerador, la cantidad de gasolina inyectada, temperatura y presión ambiental. Todos estos factores afectan cuanta potencia genera el motor. Fundamentalmente el par suministrado al volante de inercia del motor depende de cuanta presión se genera dentro de cada cilindro del motor, esta presión resulta tanto de la compresión natural del motor y más importantemente de la combustión de la mezcla de aire/combustible. Por cada determinada cantidad de aire que entra al cilindro en cada tiempo se tiene la opción de variar la cantidad de gasolina que se suministra lo cual determina la calidad y propiedades de la reacción producida en la combustión.

La relación entra la cantidad de aire y gasolina debe de mantenerse en un rango estrecho para mantener una correcta combustión. La relación químicamente correcta se conoce como la relación estequiométrica, mas gasolina en la mezcla significa una mezcla rica y menos una mezcla pobre. La relación estequiométrica se encuentra en una relación de 14.7:1 aire/gasolina por masa para gasolina convencional.

La molécula más representativa de la gasolina es el octano la cual reacciona de la siguiente manera:



El oxígeno es consumido del aire que entró al cilindro, y la reacción produce bióxido de carbono y agua cuando se tiene una combustión perfecta. La gasolina no está compuesta de solo octano por lo que tomando un promedio de los hidrocarburos que la componen podemos simplificar su reacción para efectos de la demostración únicamente como:



De aquí vemos que se necesita una relación de 11.85 moléculas de oxígeno a moléculas de gasolina para tener una combustión estequiométrica aunque esta relación es en número no en masa. Para llegar a la relación aire/combustible en masa debemos de tomar en cuenta el peso de cada molécula así como la cantidad de oxígeno en el aire. Multiplicando las moléculas por el peso atómico de los elementos que las componen llegamos a:
Masa molecular promedio de una molécula de gasolina:

$$8 \times 12,01 + 15,4 \times 1,008 = 111,6u \quad (4.3)$$

Masa molecular de molécula de oxígeno:

$$2 \times 16,00 = 32,00u \quad (4.4)$$

Por lo que la relación de oxígeno:gasolina es:

$$11,85 \times 32,00 \div 111,6 = 3,40 : 1 \quad (4.5)$$

Un motor no admite oxígeno puro sino que trabaja con aire atmosférico es cual contiene 20.95 % de oxígeno (O_2) por volumen y 78.08 % nitrógeno (N_2) así como aproximadamente 1 % de argón y otros rastros de gases. Utilizando estos porcentajes y sus masas atómicas podemos llegar al porcentaje de oxígeno en el aire por masa:

$$\frac{20,95 \% \times 2 \times 16,00}{78,08 \% \times 2 \times 14,01 + 20,95 \% \times 2 \times 16 + 0,97 \% \times 39,95} = 23,14 \% \text{ Oxígeno por masa} \quad (4.6)$$

Por lo tanto la relación estequiométrica por masa de aire a gasolina es de:

$$\text{Relación estequiométrica aire:gasolina} = \frac{3,4}{23,14} = 14,7 : 1 \quad (4.7)$$

Se debe de tomar en cuenta que el aire puede contener de 1 % a 4 % de vapor de agua dependiendo del clima y que diferentes mezclas de gasolina contienen diferentes formulaciones y por lo tanto relaciones estequiométricas.[6] Dependiendo del tipo de motor con el que se esté trabajando y su combustible se debe de tomar en cuenta la relación que tiene, a continuación se muestra la relación estequiométrica de diferentes combustibles como referencia: Dado que la relación estequiométrica cambia con cada combustible es útil tener un indicador que indique que tan alejado de la relación exacta se encuentra una mezcla por lo que se introduce una unidad denominada

| Combustible | RAC |
|---------------------------------------|------|
| Octano (C_8H_{18}) | 15.1 |
| Metanol (CH_3OH) | 6.47 |
| Etanol (C_2H_5OH) | 9.00 |
| E85 (mezcla de gasolina y etanol) | 9.87 |
| Propano (C_3H_8) | 15.7 |
| Hidrógeno (H_2) | 34.3 |
| Metano (CH_4) | 17.2 |
| LPG (butano y propano)(C_4H_{10}) | 15.5 |
| Nitrometano (CH_3NO_2) | 1.70 |

Cuadro 4.1: Relaciones estequiométricas de diferentes combustibles [6]

lambda (λ) que se define como:

$$\lambda = \frac{\text{Relación de aire combustible actual}}{\text{Relación de aire combustible deseada(estequiométrica)}} \quad (4.8)$$

Con gasolina una relación de 14.7 nos da un valor lambda de $\lambda = \frac{14,7}{14,7} = 1$, una mezcla mas rica nos da valores menores a 1, por ejemplo teniendo una relación de 13.0:1 tendríamos: $\lambda = \frac{13,0}{14,7} = 0,89$

Lo cual indica que solo tenemos el 89 % del aire necesario y por lo tanto una mezcla rica en gasolina por 11 % que si nuestro objetivo es tener una relación estequiométrica bastaría con reducir la cantidad de gasolina en - 11 %, de este ejemplo se puede ver la utilidad de manejar la relación de esta manera relativa. [11]

Cuando todas las demás variables en un motor se mantienen iguales y se varía la RAC se puede apreciar el efecto que tiene en cuanto al par producido en el motor. En la figura 4.9 se ilustra este efecto. Una mezcla ligeramente rica produce la mayor cantidad de potencia ya que aprovecha de mejor manera todo el oxígeno disponible en el cilindro. El pico en cuanto a potencia se normalmente se encuentra entre $\lambda = 0,84$ y $\lambda = 0,92$, dentro de esta región hay poco cambio en cuanto al par al variar la RAC. El límite de la izquierda de este pico se conoce como el *límite de torque rico* y a la derecha como el *límite de torque pobre*. Dentro de esta región los cambios en la RAC producen poca variación en el par generado por el motor. Saliéndose de estos límites se puede apreciar como disminuye significativamente la potencia del motor. Cada motor tiene su propia curva con diferente forma y ancho aunque la forma general se mantiene igual.

El cambio en el par producido en un motor al variar la RAC se relaciona con

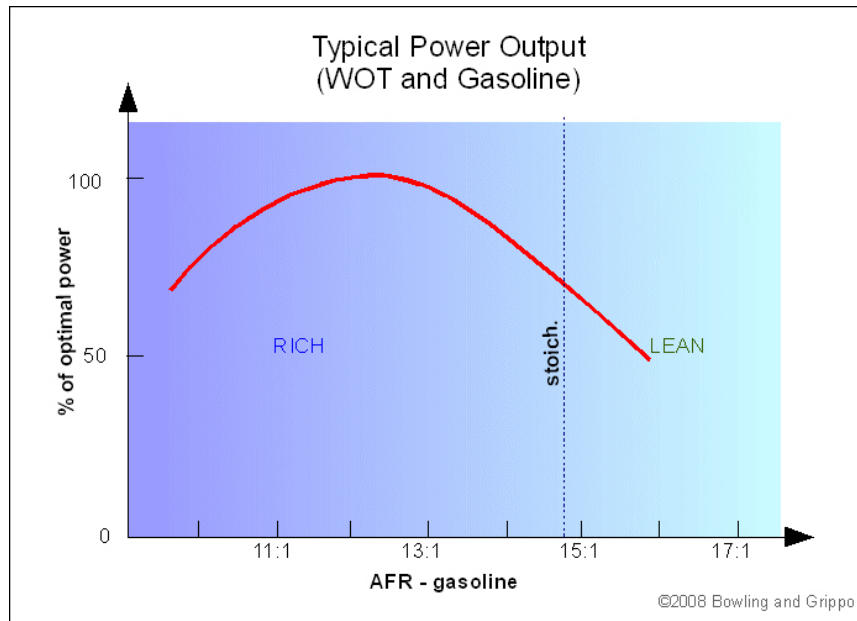


Figura 4.9: Efecto de la RAC en la potencia del motor [6]

la velocidad de la reacción química. La velocidad a la que la gasolina combustiona con el oxígeno varía con la concentración, una mezcla ligeramente rica provee las mejores condiciones posibles para que la flama se propague al resto de la mezcla. Las mezclas de aire combustible que incrementan la velocidad de la reacción tienen el mismo efecto neto en el cilindro que adelantar la chispa, los dos buscan tener la mayor concentración de presión en el pistón justo al momento de que este se encuentra en la posición del punto muerto superior.

El control de la RAC es también de vital importancia en cuanto al consumo de gasolina por el vehículo y la generación de emisiones y como se puede apreciar en la figura 4.10 el punto de mayor potencia es el opuesto al punto de mayor rendimiento de combustible por lo que se deben de tomar compromisos al momento de la afinación dependiendo de los objetivos buscados y las zonas de operación del motor. Una mezcla muy rica tiene un rendimiento de combustible pobre y emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos mayores mientras que una mezcla muy pobre puede causar eventos de combustible no quemado lo cual incrementa las emisiones de hidrocarburos. El pico en eficiencia de combustible generalmente se localiza en una RAC de alrededor de 15.4 lo cual es un poco mas pobre que la condición

estequiométrica.

Trabajar cerca de la relación estequiométrica permite una mezcla adecuada

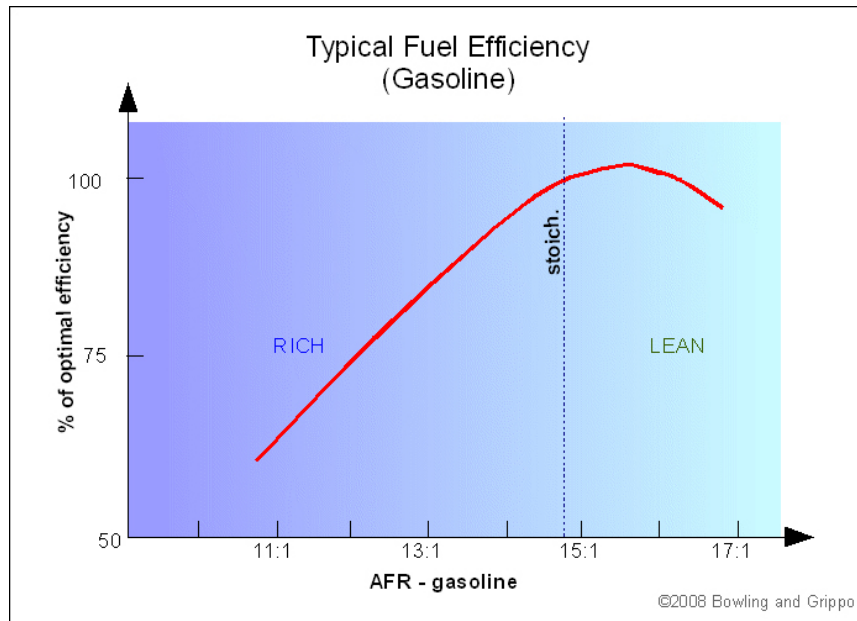


Figura 4.10: Efecto de la RAC en la eficiencia de combustible [6]

de características benéficas entre potencia generada y consumo de combustible y los convertidores catalíticos actuales están diseñados para funcionar mejor cerca de condiciones estequiométricas.

4.6.1. Selección de inyectores

Para ser capaces de suministrar la cantidad de gasolina apropiada a cada cilindro en todo el rango de operación del motor se deben de seleccionar los inyectores adecuados para el sistema implementado de manera de que sean capaces de proveer la cantidad de gasolina exacta en el tiempo reducido que dura cada periodo de admisión. En los sistemas de inyección de gasolina electrónicos se utilizan inyectores controlados electrónicamente que permiten la dosificación de gasolina. Un inyector común es simplemente una válvula controlada electrónicamente a la cual se le suministra gasolina a presión y un solenoide levanta un émbolo que controla la salida de gasolina atomizada. Los inyectores deben de ser seleccionados y caracterizados cuidadosamente para el correcto funcionamiento de todo el sistema de control del motor.

El parámetro más importante en la clasificación y selección de inyectores

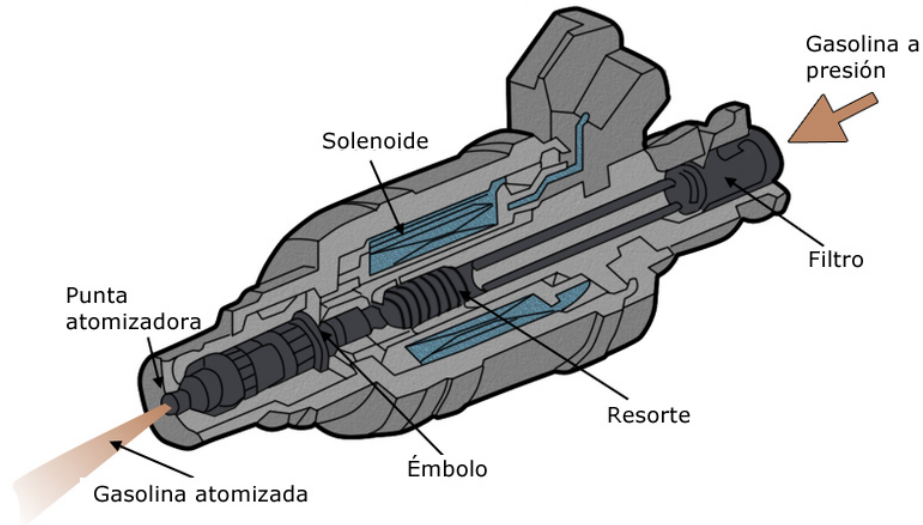


Figura 4.11: Diagrama de un inyector electrónico [7]

es por su tamaño en cuanto a su flujo volumétrico comúnmente expresado en $\frac{cc}{min}$ o $\frac{lb}{hr}$. Usar inyectores demasiado grandes para la aplicación causa dificultad en el control en ralentí y cargas medias mientras que usar inyectores muy pequeños pueden no ser capaces de suministrar la cantidad de gasolina que requiere el motor a potencia máxima e inclusive causar daño permanente en el motor. Una primer aproximación en cuanto a la selección se puede hacer utilizando la potencia que se piensa generar con el motor y el consumo de combustible específico del motor (BSFC) el cual es la cantidad de combustible que utiliza el motor para desarrollar 1HP por una hora el cual es aproximadamente de $0,55 \frac{lb}{HP \times hr}$ para un motor de cuatro cilindros como el utilizado para el vehículo. [6]

$$\text{Tamaño del inyector} = \frac{\text{Potencia(HP)} \times \text{BSFC}}{\# \text{ de inyectores} \times \text{Ciclo de trabajo máximo deseado de inyectores}} \quad (4.9)$$

Considerando que los motores similares al seleccionado generan entre 60 y 90 HP en la aplicación de FSAE y tomando un ciclo de trabajo máximo de 85 % para dejar un margen de seguridad llegamos a una primera aproximación en

cuanto al tamaño requerido.

$$\text{Inyectores para Yamaha R6} = \frac{90 \times 0,55}{4 \times 0,85} = 14,55 \frac{lb}{hr} = 152,7 \frac{cc}{min} \quad (4.10)$$

El factor de conversión entre $\frac{lb}{hr}$ y $\frac{cc}{min}$ se toma normalmente como $1 \frac{lb}{hr} = 10,5 \frac{cc}{min}$ aunque depende de la densidad de la gasolina utilizada que varía por temporada y formulación. Con esta primera aproximación se puede proceder a la búsqueda de inyectores que cumplan con los requisitos. La motocicleta Yamaha R6 2008 en su configuración original utiliza 2 inyectores por cilindro como se puede ver en la figura 4.1 para mejor control tanto a baja como a altas cargas. Los inyectores primarios fueron adquiridos junto con el motor y usados de manera satisfactoria en el 2010 por lo que el primer paso en la selección para el 2011 fue caracterizar los inyectores para determinar su posible utilización en el sistema de control de este año. Los inyectores primarios de la R6 son 4 inyectores Denso modelo 297500-0640 ?? de los cuales fue posible investigar la información de flujo ni en una búsqueda por internet ni con preguntas directas a el fabricante por lo que se decidió caracterizarlos para poder determinar su utilidad ya que por cuestiones económicas y de disponibilidad comprar 4 inyectores nuevos que cumplieran con el flujo requerido no era la mejor opción. Para probar el flujo volumétrico de los

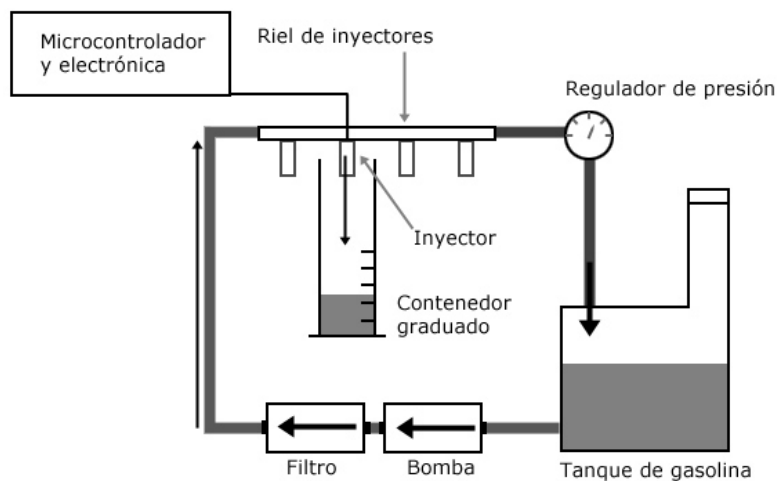


Figura 4.12: Equipo utilizado para probar los inyectores DENSO 297500-0640

inyectores y su tiempo de respuesta mínimo se utilizó la configuración de

componentes mostrados en la figura 4.12 Se utilizó el sistema de gasolina del vehículo 2010 para suministrar 42PSI constantes en las líneas que es la presión original a la que trabajan estos inyectores y se realizaron dos pruebas diferentes.

Prueba del tiempo muerto del inyector: Al ser un dispositivo electro-mecánico un inyector requiere cierto tiempo para poder activar el solenoide y mover el émbolo para producir un flujo de gasolina constante. Como el inyector trabaja en un rango muy grande de ciclos de trabajo es importante verificar el tiempo mínimo requerido para abrir el inyector totalmente y lograr un flujo ya que el tiempo muerto varía normalmente entre 1 y 2 ms y si es muy grande el inyector y requerimos controlar el ralentí con pulsos muy pequeños podemos llegar a un punto donde el pulso requerido es tan pequeño que deja de poder moverse el émbolo y perdemos el control del sistema. La prueba para determinar el tiempo muerto del inyector consistió en programar el microcontrolador para que disparara el inyector con pulsos decrecientes comenzando desde 3ms y disminuyendo en decrementos de .1ms con control del usuario. En cada ancho de pulso se realizaba una inspección visual de la punta del inyector ya que es relativamente fácil ver cuando si inyecta gasolina y se puede apreciar la gasolina en forma atomizada. Con esta prueba se pudo determinar que a 12.5V el tiempo muerto del inyector es de 1.2ms comprobado mandando múltiples pulsos de este tamaño repetidamente sin observar nada de gasolina a la salida.

Prueba de flujo volumétrico del inyector: Para esta prueba se programó el microcontrolador para que activara el inyector con pulsos de 4ms repetidos cada 4ms para trabajar con un ciclo de trabajo de 50% representativo del uso real en el vehículo ya que toma en cuenta el tiempo muerto de apertura. Se mandaron 3000 pulsos lo cual equivale a un tiempo total de apertura de 12 segundos y en ese periodo se colectaron 49ml de gasolina de lo cual llegamos a:

$$\text{Flujo volumétrico del inyector} = \frac{49ml}{12s} = 4,083 \frac{cc}{s} = 245 \frac{cc}{min} = 23,3 \frac{lb}{hr} \quad (4.11)$$

$$\text{Flujo requerido estimado inicialmente} = 152 \frac{cc}{min} \quad (4.12)$$

El flujo del inyector es de 60% más de lo que se estimó que es requerido lo cual nos garantiza su funcionamiento correcto a máxima potencia del motor pero no en ralentí y bajas revoluciones por lo que se requiere hacer un análisis para decidir si este inyector puede cumplir con ambas condiciones.

Para poder comprobar su funcionamiento a bajas revoluciones debemos de saber cuánta es la cantidad mínima de gasolina que se tendrá que inyectar al cilindro la cual se utiliza en ralentí cuando el motor se encuentra a sus mínimas revoluciones. Para llegar a un estimado de esto requerimos también saber aproximadamente cuanto aire entrará al motor cuando este gira a las revoluciones de ralentí, a continuación se explica el concepto de eficiencia volumétrica el cual es necesario para entender el análisis que se hace para llegar al estimado de aire.

Eficiencia Volumétrica

Cuando un MCI se encuentra operando, en cada tiempo de admisión generalmente no se llena completamente de aire todo el volumen de cada cilindro inclusive cuando el papalote del cuerpo de aceleración se encuentra totalmente abierto. Esto se debe a la naturaleza dinámica del ciclo y es influenciado por el diseño de las válvulas, sistema de admisión y presión atmosférica. La eficiencia volumétrica (VE) se define como la relación entre la cantidad de aire que entró al cilindro en el tiempo de admisión y el volumen actual del cilindro en condiciones estáticas.

$$VE = \frac{\text{Volumen de aire admitido}}{\text{Volumen total del cilindro}} \quad (4.13)$$

Esta relación es muy importante ya que para que la UCM pueda determinar cuanta gasolina debe de suministrar debe de saber cuánto aire fue admitido al cilindro durante el ciclo actual. Debido a que no existen sensores que puedan medir directamente la VE la UCM debe de inferir el valor en cada punto de operación utilizando información de diferentes sensores relacionados a la carga del motor para consiguientemente poder estimar la cantidad de aire admitida y por lo tanto la cantidad de gasolina necesaria.

Estimado de flujo de aire en el cilindro en condiciones de ralentí

Utilizando la ecuación de estado de un gas ideal, información de la VE del motor, las propiedades geométricas del cilindro e información del estado del motor se puede estimar el flujo de aire que entra al cilindro cada tiempo de admisión.

Comenzando de la ecuación de estado de un gas ideal tenemos:

$$PV = nRT \text{ de donde resolviendo para } n \text{ se obtiene: } n = \frac{PV}{RT} \quad (4.14)$$

Teniendo información sobre la presión y temperatura del aire de admisión la cual se puede obtener con sensores es posible encontrar la carga de aire en moles, recordando aplicar el factor de escalamiento de la eficiencia volumétrica al volumen del cilindro considerando que no se alcanza a llenar por completo dependiendo de la región en la cual se encuentre operando. Utilizando la densidad molar del aire como $n_{\text{aire}} = 0,02897 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$ podemos ajustar la constante R para las unidades en las que trabajaremos normalmente y así convertir la cantidad de carga de aire de moles a una cantidad de unidades de masa(g).

$$R_{\text{aire}} = 0,28705 \frac{\text{kpa} \times L}{g \times K} \quad (4.15)$$

Ajustando la ecuación del gas ideal con esta constante y tomando en cuenta la eficiencia volumétrica se tiene que:

$$\text{Masa}_{\text{aire}} \left(\frac{g}{\text{cilindro}} \right) = \frac{V_{\text{cilindro}}(L) \times VE \times P(\text{KPa})}{0,28705 \times T(K)} \quad (4.16)$$

$$\text{Masa}_{\text{gasolina}} \left(\frac{g}{\text{cilindro}} \right) = \frac{\text{Masa de aire} \left(\frac{g}{\text{cil}} \right)}{\text{Relación aire combustible}} \quad (4.17)$$

Con estas relaciones es posible calcular la masa de aire y combustible pero resulta más intuitivo trabajar con el flujo de aire y combustible y se llega a la relación tomando en cuenta el número de eventos de inyección que ocurren por segundo en cada cilindro. Entre mas cilindros tenga un motor y con revoluciones mas altas existe mayor flujo de aire admitido. El tiempo de admisión en cada cilindro ocurre cada 2 revoluciones del cigüeñal por lo que la siguiente ecuación permite calcular el flujo de aire por cilindro.

$$\text{Flujo de aire por cilindro} \left(\frac{g}{\text{cil}} \right) = \frac{\text{Masa de aire} \left(\frac{g}{\text{cil}} \right) \times RPM}{2(\text{Admisión cada 2 RPM}) \times 60(\text{Conversión a segundos})} \quad (4.18)$$

$$\text{Flujo de gasolina por cilindro} \left(\frac{g}{\text{cil}} \right) = \frac{\text{Flujo de aire por cilindro} \left(\frac{g}{\text{cil}} \right)}{\text{Relación aire combustible}} \quad (4.19)$$

Para examinar el posible comportamiento del inyector con el motor a revoluciones de ralentí se utilizaron estas relaciones junto con valores típicos de revoluciones, presión, temperatura y la información del motor. Tomando los casos extremos que son ralentí y apertura máxima del acelerador se puede calcular el pulso de inyección teórico requerido para suministrar la

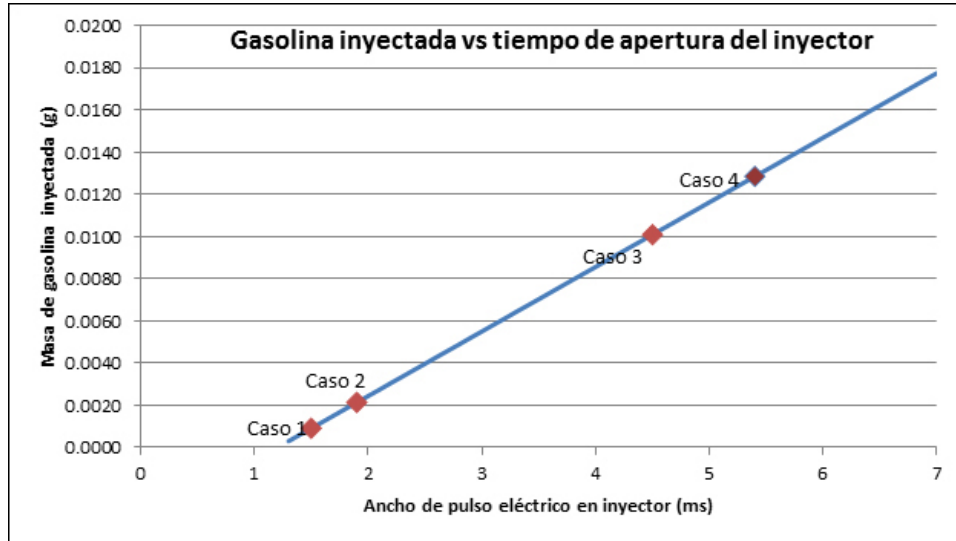


Figura 4.13: Gráfica de gasolina inyectada vs tiempo

masa de gasolina en cada caso. La gráfica 4.13 muestra el comportamiento del inyector teniendo un tiempo muerto inicial de 1.2ms y luego un comportamiento lineal. Los casos 1 y 2 que son en estado de ralentí en diferentes condiciones permiten ver que el pulso requerido si cae dentro de la región lineal del inyector por lo que aseguramos la selección de este particular inyector y su capacidad de suministrar los pulsos a bajas revoluciones. La última condición es asegurar que el pulso requerido a altas revoluciones y máxima apertura del acelerador sea menor al tiempo total del ciclo de admisión para asegurar que el motor sea suministrado correctamente de gasolina. El tiempo máximo para suministrar gasolina es el tiempo que toma un ciclo entero del motor y se conoce como el tiempo del ciclo y es:

$$\text{Tiempo del ciclo(ms)} = \frac{60(s) \times 2(\text{revoluciones por ciclo}) \times 1000}{RPM} \quad (4.20)$$

De donde podemos determinar el ciclo de trabajo del inyector dentro del ciclo:

$$\text{Ciclo de trabajo del inyector}(\%) = \frac{\text{Ancho de pulso del inyector(ms)} \times RPM}{120000} \times 100 \quad (4.21)$$

| Ralentí CASO 1 | | | | | | |
|--|-------|--------|--|-------------------|-------|--|
| Vmotor | 0.6 | Litros | Inyectores | Denso 297500-0640 | | |
| VE | 0.3 | | Flujo a 42 PSI | 245 cc/min | | |
| Presión | 20 | Kpa | Tiempo muerto=1.2ms | 0.003063 g/ms | | |
| Temperatura | 298 | Kelvin | Masa de aire | 0.011 | g/cil | |
| # Cilindros | 4 | | Masa de combustible | 0.001 | g/cil | |
| RPM | 1500 | RPM | Flujo de aire | 0.132 | g/s | |
| RAC | 14.7 | | Flujo de combustible | 0.009 | g/s | |
| Caso 1 tomando los valores de ralentí del motor R6 2008 en su configuración original y con una eficiencia volumétrica estimada para este tipo de motor | | | Tiempo de inyección requerido | 0.234 | ms | |
| | | | Tiempo real de pulso de inyección (Tiempo requerido + tiempo muerto) | 1.434 | ms | |
| Ralentí CASO 2 | | | | | | |
| Vmotor | 0.6 | Litros | Inyectores | Denso 297500-0640 | | |
| VE | 0.3 | | Flujo a 42 PSI | 245 cc/min | | |
| Presión | 60 | Kpa | Tiempo muerto=1.2ms | 0.003063 g/ms | | |
| Temperatura | 298 | Kelvin | Masa de aire | 0.032 | g/cil | |
| # Cilindros | 4 | | Masa de combustible | 0.002 | g/cil | |
| RPM | 3000 | RPM | Flujo de aire | 0.789 | g/s | |
| RAC | 14.7 | | Flujo de combustible | 0.054 | g/s | |
| Caso 2 utilizando valores de RPM y presión en ralentí comunes en un motor de FSAE | | | Tiempo de inyección requerido | 0.701 | ms | |
| | | | Tiempo real de pulso de inyección (Tiempo requerido + tiempo muerto) | 1.901 | ms | |
| Acelerador completamente abierto P_atm Cd.de México Caso 3 | | | | | | |
| Vmotor | 0.6 | Litros | Inyectores | Denso 297500-0640 | | |
| VE | 0.95 | | Flujo a 42 PSI | 245 cc/min | | |
| Presión | 78 | Kpa | Tiempo muerto=1.2ms | 0.003063 g/ms | | |
| Temperatura | 298 | Kelvin | Masa de aire | 0.130 | g/cil | |
| # Cilindros | 4 | | Masa de combustible | 0.010 | g/cil | |
| RPM | 11000 | RPM | Flujo de aire | 11.911 | g/s | |
| RAC | 12.7 | | Flujo de combustible | 0.938 | g/s | |
| Caso 3 con el motor a su máxima VE y papalote de aceleración completamente abierto a presión ambiental | | | Tiempo de inyección requerido | 3.341 | ms | |
| | | | Tiempo real de pulso de inyección (Tiempo requerido + tiempo muerto) | 4.541 | ms | |
| Acelerador completamente abierto P_atm nivel de mar Caso 4 | | | | | | |
| Vmotor | 0.6 | Litros | Inyectores | Denso 297500-0640 | | |
| VE | 0.95 | | Flujo a 42 PSI | 245 cc/min | | |
| Presión | 101 | Kpa | Tiempo muerto=1.2ms | 0.003063 g/ms | | |
| Temperatura | 298 | Kelvin | Masa de aire | 0.168 | g/cil | |
| # Cilindros | 4 | | Masa de combustible | 0.013 | g/cil | |
| RPM | 11000 | RPM | Flujo de aire | 15.423 | g/s | |
| RAC | 12.7 | | Flujo de combustible | 1.214 | g/s | |
| Caso 4 con el motor a su máxima VE y papalote de aceleración completamente abierto a presión ambiental | | | Tiempo de inyección requerido | 4.326 | ms | |
| | | | Tiempo real de pulso de inyección (Tiempo requerido + tiempo muerto) | 5.526 | ms | |

Figura 4.14: Pulso de inyección requerido en diferentes casos

Tomando el caso 4 de la figura 4.14:

$$\text{Ciclo de trabajo del inyector}(\%)_{\text{Caso 4}} = \frac{5,526(ms) \times 11000}{120000} \times 100 = 50,6\% \quad (4.22)$$

El inyector se mantiene en un ciclo de trabajo de aproximadamente 50% lo cual es bastante bajo y alejado del 85% que se recomienda no sobrepasar.

4.6.1. Sistema de suministro de combustible

El sistema de suministro de combustible fue seleccionado por un miembro del equipo considerando que cumpliera los siguientes parámetros para suministrar a los inyectores con gasolina a presión constante, en la figura 4.12 se puede ver el diagrama de sus componentes.

Presión en el riel de inyección=42 PSI

Flujo mínimo requerido (a potencia máxima Caso 4):

$$\begin{aligned} \text{Flujo de gasolina requerido por el motor} \left(\frac{l}{hr} \right) = \\ \frac{V_{\text{motor}}(l) \times VE \times P(Kpa) \times RPM}{7,1762 \times RAC \times T(K)} = \frac{0,6 \times 0,95 \times 101 \times 11000}{7,1763 \times 12,7 \times 298} = 23,3 \frac{l}{hr} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Los componentes que componen el sistema de suministro son el tanque de gasolina, el filtro, la bomba, las líneas de alta presión, el riel y regulador de presión.

4.7. Sensores

Los sistemas de control de motores toman las decisiones en cuanto a los eventos de inyección e ignición basándose en la información del estado del motor. Esta información puede existir de dos formas dependiendo de la naturaleza de la variable medida. Algunas veces proviene de tablas estáticas guardadas en la memoria de la computadora cuando se trata de variables que no cambian como puede ser la eficiencia volumétrica de un motor. Cuando se trata de parámetros que cambian continuamente estos deben de ser monitoreados constantemente para completar la información del estado del motor en la computadora.

Se utilizan diferentes tipos de sensores para el control de un motor que se pueden dividir según su función y principio operacional.

Sensores de posición:

- Posición del cigüeñal
- Posición del árbol de levas
- Posición del acelerador

Sensores de temperatura:

- Aire
- Refrigerante
- Aceite
- Gas de escape

Sensores de presión:

- Presión atmosférica
- Presión absoluta del múltiple de admisión

Sensores de composición de gases de escape:

- Sensores de oxígeno de banda ancha o angosta

Otros sensores:

- Sensor de golpeteo
- Medidor de flujo de aire
- Sensor de velocidad del vehículo
- Estado de los actuadores

Estos son los sensores normalmente utilizados en un sistema de control de un vehículo comercial. Un motor para un vehículo de carreras que trabaja en condiciones más predecibles normalmente utiliza menos sensores con una afinación del motor más específica. A continuación se explica el funcionamiento y el rol de cada sensor y la selección de los sensores utilizados en el sistema implementado. [12]

4.7.1. Sensores de posición:

Los sensores de posición se utilizan para informar a la UCM sobre la ubicación y posicionamiento de diferentes partes del motor y cuerpo de aceleración con el fin de poder sincronizar los eventos de control con las posiciones correctas de los diferentes componentes.

Posición de árbol de levas y cigüeñal: El sensor de posición del cigüeñal es fundamental para la operación del motor. Suministra a la computadora con la información de RPM y posición angular del cigüeñal de donde se puede calcular la posición de cada uno de los pistones del motor. Generalmente se utilizan sensores electromagnéticos del tipo de efecto Hall o reluctancia variable.

Reluctancia Variable: Un sensor de reluctancia (resistencia al magnetismo) variable está compuesto de un disco dentado metálico, un imán permanente y una bobina. Al girar el disco los dientes entran y salen del espacio de aire del imán lo que induce un voltaje en la bobina el cual es proporcional a la velocidad de cambio del campo magnético y por lo tanto de las revoluciones del motor. La figura 4.16 muestra el patrón del voltaje que se forma al girar el disco dentado. Cuando un diente entra al campo magnético se induce un voltaje que crece hasta un máximo y luego baja a cero cuando se alinea el diente con el imán. Cuando el diente sale del campo pasa lo mismo pero con el voltaje negativo, formando una onda con comportamiento sinusoidal.

El motor Yamaha R6 2008 utiliza un sensor de reluctancia variable (VR) para determinar la posición y velocidad del cigüeñal. Utiliza una rueda dentada conectada al cigüeñal para generar la señal en el sensor. Como se ve en la figura 4.7.3 la rueda tiene un espacio con dientes fusionados lo cual causa una señal diferente e indica cuando el pistón número uno del motor se encuentra en la posición del punto muerto superior. La computadora seleccionada es capaz de leer tanto sensores de VR como de efecto hall para determinar la posición del cigüeñal por lo que es posible utilizar este mismo sensor en su configuración original.

Efecto Hall: El efecto Hall describe el efecto donde al circular corriente por un conductor, en presencia de un campo magnético perpendicular al movimiento de las cargas, aparece un campo eléctrico dentro del conductor perpendicular al campo magnético. En la figura 4.17 se describe el principio de funcionamiento de un sensor de posición de efecto hall. El elemento Hall es un semiconductor que se conecta a una fuente y fluye una corriente

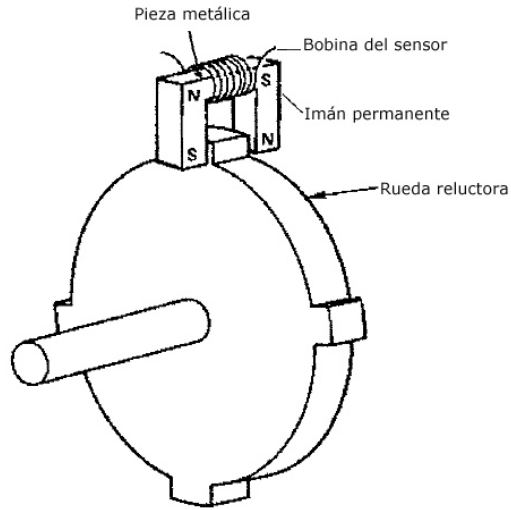


Figura 4.15: Principio de funcionamiento del sensor de reluctancia variable [8]

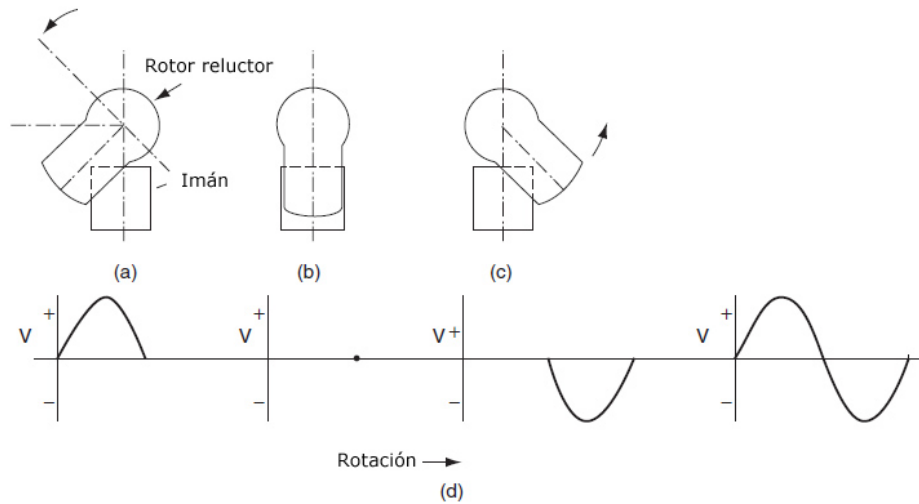


Figura 4.16: Patrón de voltaje generado por un sensor de reluctancia variable [8]

a través de él. En ausencia del campo magnético como se ve en la ilustración 4.17(a) no se presenta ningún voltaje en el circuito perpendicular al elemento Hall. Al aplicar un campo magnético con la orientación adecuada se presenta el efecto Hall y se puede medir una corriente que fluye en el circuito 2. Si se utiliza un elemento metálico para desviar el campo magnético se puede controlar cuando fluye la corriente por el circuito 2, obteniendo lo que se conoce como un sensor de efecto Hall el cual funciona como un interruptor que puede estar prendido o apagado. La salida de un sensor de efecto Hall es una señal cuadrada cuya frecuencia varía con la velocidad del motor dependiendo de la variable a medir.

El motor utilizado usa un sensor de efecto Hall como sensor de posición de

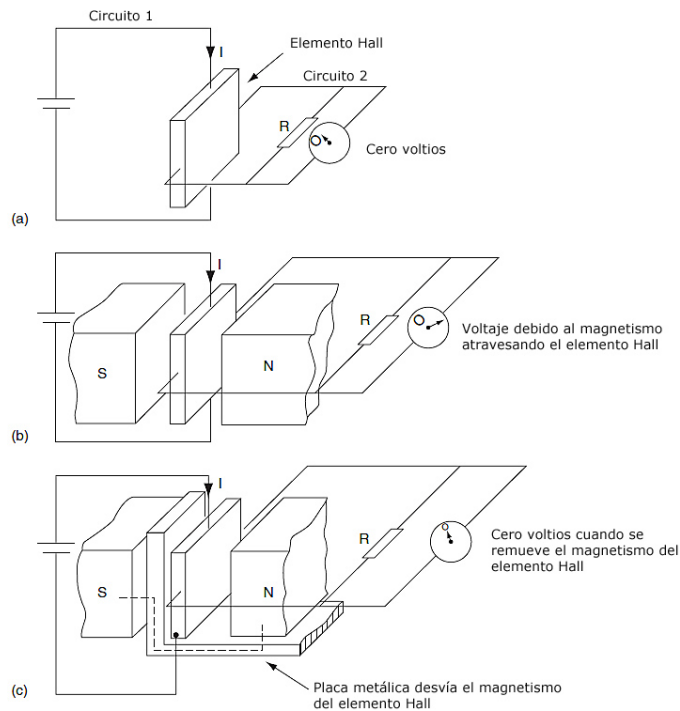


Figura 4.17: Principio de funcionamiento del sensor de efecto Hall[8]

árbol de levas para determinar en qué ciclo se encuentran los cilindros. El sensor del árbol de levas sirve para sincronizar los eventos de inyección de ignición ya que le indica a la computadora en que ciclo se encuentran los cilindros y con esa información y el sensor del cigüeñal se calcula la posición de cada cilindro. En este caso la computadora también es capaz de usar sen-

sores de VR o efecto Hall como el incluido por lo que se utilizó este sensor sin modificación alguna.

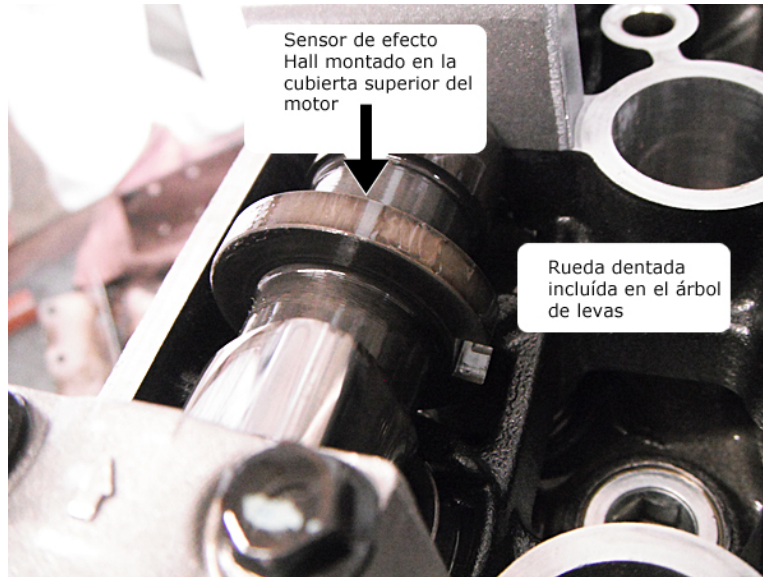


Figura 4.18: Vista del árbol de levas del motor Yamaha R6 mostrando la rueda utilizada con el sensor de efecto Hall

Posición del acelerador: Se necesita un sensor que sea capaz de determinar el ángulo de apertura del papalote del cuerpo de aceleración con el fin de obtener una idea de la cantidad de aire y régimen de operación del motor. Comúnmente se utiliza un potenciómetro conectado al eje del papalote con lo cual se obtiene un voltaje variable proporcional a la apertura del papalote. Se utilizó un sensor TPS Magneti Marelli PF2c ya que el cuerpo de aceleración adquirido lo incluía y cumple las especificaciones necesarias. La señal del sensor es una señal análoga que varía entre 0V y 5V y la UCM utiliza un convertidor analógico a digital para convertir esta señal en un valor numérico con el cual puede trabajar.

4.7.2. Sensores de temperatura:

La UCM requiere saber la temperatura del refrigerante y aire de entrada para controlar diferentes actuadores y calcular la carga de combustible requerida. Para esto se utilizan termistores los cuales son dispositivos con un coeficiente de temperatura negativo, al calentarse el dispositivo su re-

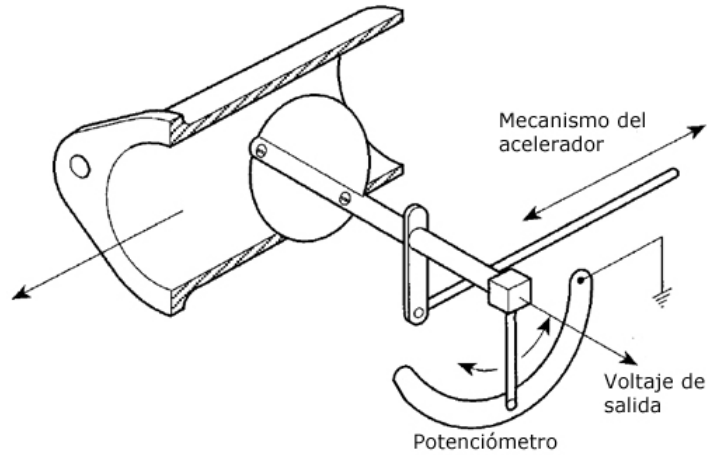


Figura 4.19: Principio de funcionamiento del sensor de posición del acelerador (TPS)[8]

sistencia disminuye lo cual permite relacionar la resistencia actual con la temperatura del aire o refrigerante una vez que se calibran estos sensores. Se decidió utilizar los sensores de temperatura de aire y refrigerante ya que de estos dependen varias compensaciones, por ejemplo de arranque en frío y son fundamentales para la correcta operación del motor. No se utilizaron los sensores de temperatura de aceite ni de gases de escape para simplificar el sistema y porque la información que proveen no es necesaria para el control sino que sirve para propósitos de seguridad y afinación.

Se seleccionaron sensores GM con cuerdas 3/8" NPT por su confiabilidad y disponibilidad. La computadora puede utilizar cualquier sensor resistivo siempre y cuando se calibren los valores correctamente.

Sensores de Presión: Otra variable importante para la estimación de la carga de aire que entra al motor es la presión del aire en el múltiple de admisión así como la medida de la presión atmosférica donde se encuentra trabajando el motor. Se utiliza un sensor de conocido como sensor de presión absoluta del múltiple (Sensor MAP) que utiliza un pequeño diafragma de silicón que al moverse puede convertir las variaciones de presión que ocurren dentro del múltiple en un voltaje variable proporcional a la presión. Los sensores MAP comerciales vienen calibrados de fábrica y la mayoría de las UCM ya incluyen los valores de equivalencias voltaje-presión en su memoria.

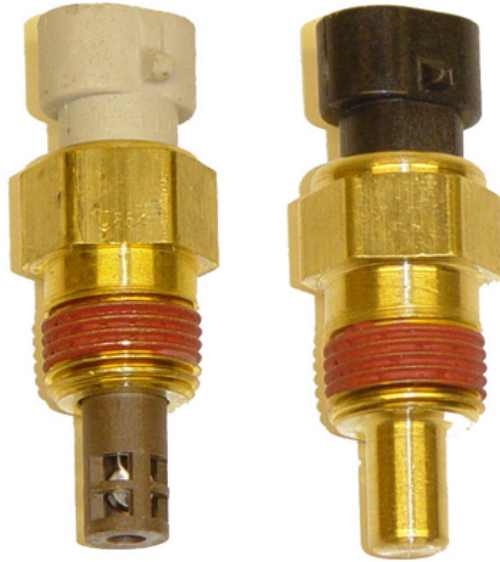


Figura 4.20: Sensores de temperatura de aire (izquierda) y refrigerante (derecha)

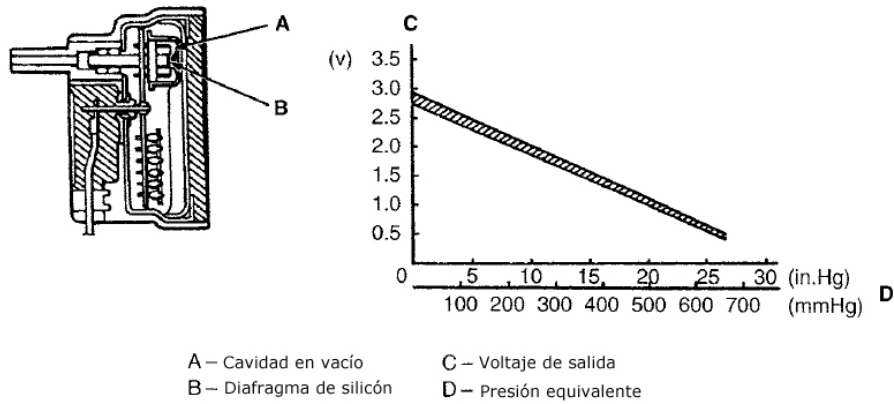


Figura 4.21: Principio de operación del sensor de presión[8]

Para el sistema de control de motor implementado se utilizó un solo sensor MAP del tipo GM capaz de medir presiones desde vacío hasta un 1bar lo cual es suficiente en un motor normalmente alimentado. El mismo sensor se encarga de medir la presión atmosférica antes de que se arranque el motor y consecuentemente de medir la presión en el múltiple de admisión una vez que se encuentra operando el motor.

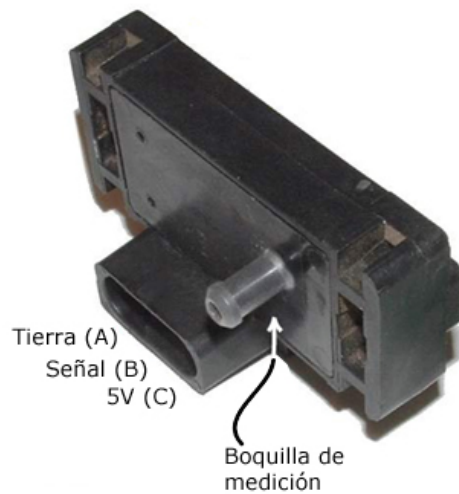


Figura 4.22: Sensor MAP tipo GM de 1 bar

4.7.3. Sensores de composición de gases de escape:

Sensores de oxígeno de banda ancha o angosta

Uno de los sensores más importantes del sistema de control es el sensor de oxígeno, el cual se instala en los tubos de escape del motor y determina la cantidad de oxígeno presente en los gases de escape, la cual puede ser usada para evaluar la relación aire combustible en la que está operando el motor. La información de este sensor permite tener retroalimentación en el sistema de control ya que con la información que proporciona se puede saber si tenemos la RAC que buscamos.

Un sensor de oxígeno del estilo voltaico utiliza la diferencia de presiones parciales del oxígeno atmosférico contra el oxígeno remanente en los gases de escape para crear una corriente de oxígeno dentro del sensor. Se utilizan

dos electrodos de platino con un electrolito de zirconio entre ellos para formar básicamente una celda voltaica cuyo voltaje depende de la concentración de oxígeno en los gases de escape. Entre mayor sea la diferencia de oxígeno entre la atmósfera y los gases se produce mayor movimiento de iones de oxígeno por el electrolito lo que causa un mayor voltaje entre los electrodos. Este tipos de sensores trabajan correctamente cuando su temperatura llega aproximadamente a los 250°C por lo que son equipados con un calentador eléctrico que le permite alcanzar su temperatura de trabajo en poco segundos sin tener que esperar a que los gases calientes de escape lo calienten ya que esto causaría un periodo de inhabilidad del sensor con grandes emisiones contaminantes en los gases de escape.

Los sensores de oxígeno pueden ser de banda angosta o ancha. Un sensor de

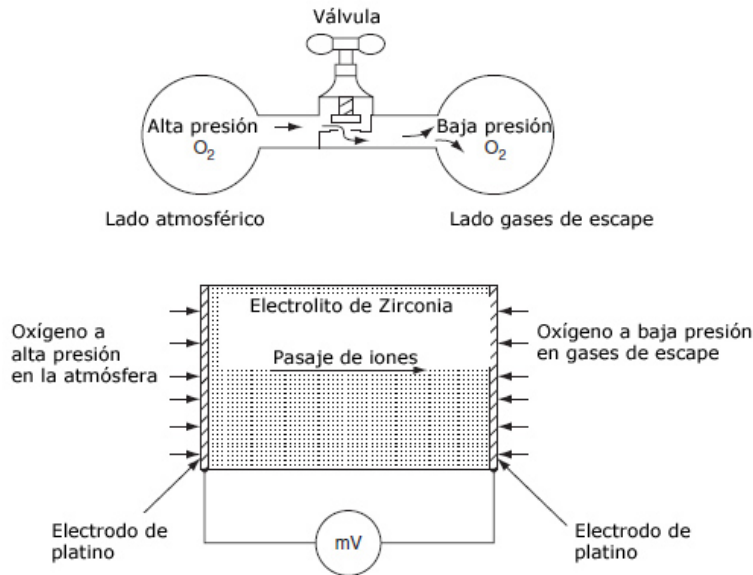


Figura 4.23: Principio de funcionamiento de un sensor de oxígeno [8]

banda angosta indica solamente cuando se encuentra la mezcla muy cerca de la relación estequiométrica y es de menor utilidad que un sensor de banda ancha que indica de $\lambda=0.68$ hasta aire libre. Para la selección del sensor de oxígeno y su controlador se tomó en cuenta principalmente el costo de las partes así como el tipo de señal que entrega a la UCM. Después de comparar las opciones disponibles se adquirió un sistema de la marca *14Point7* que incluye la tarjeta de control y un sensor de oxígeno de banda ancha Bosch

17014 LSU 4.2. La tarjeta de control viene en forma de kit que requiere ensamble y soldadura lo que permite la reducción del costo del paquete.

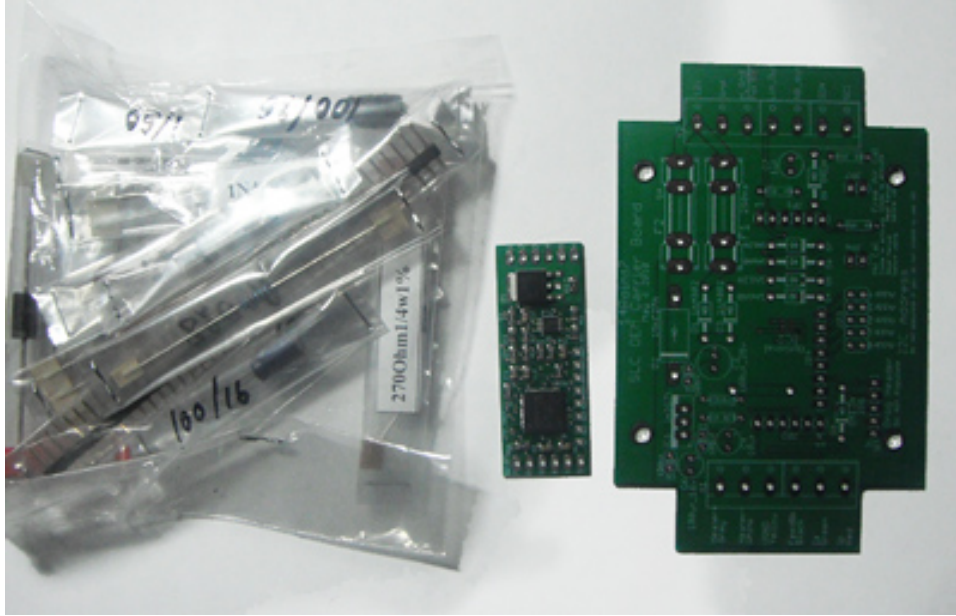


Figura 4.24: Tarjeta de control del sensor de oxígeno antes de soldar

La tarjeta de control se encarga del control de temperatura y bomba de oxígeno del sensor así como convertir la señal no lineal en una señal lineal análoga de 0 a 5V equivalente a .68 a 1.36 lambda.

4.7.4. Otros sensores:

En algunos sistemas comerciales de control de motor se utilizan más sensores complementarios con diferentes funcionalidades que no se utilizaron en esta implementación, a continuación se incluye una breve descripción de estos junto con la razón por la que no fueron necesarios o usados.

- *Sensor de golpeteo*: Los sistemas comerciales en vehículos que no son de competencia utilizan sensores de golpeteo que utilizando micrófonos piezoeléctricos pueden detectar la combustión prematura de la mezcla y ajustar el tiempo de ignición adecuadamente. Esto permite proteger



Figura 4.25: Sensor de oxígeno Bosch 17014 LSU 4.2

al motor en caso de que por ejemplo se utilice una gasolina con el octanaje inadecuado pero en el caso de un vehículo de competencia donde se tiene mayor control sobre su afinación y mantenimiento no es necesario.

- *Medidor de flujo de aire:* Muchos sistemas de control utilizan sensores capaces de medir el flujo de aire real que entra al múltiple con el propósito de utilizar esa información en el cálculo de combustible requerido. Como se explica en el siguiente capítulo por el tipo de sistema que se utiliza no fue necesario utilizar este tipo de sensor.
- *Sensor de velocidad del vehículo:* Para controlar sistemas como control de tracción, ABS y control de aceleración se requiere saber la velocidad de las ruedas del vehículo para poder compararlo con la velocidad del motor. Como no se utilizaron estos sistemas no fue necesario este sensor.
- *Estado de los actuadores:* Tener sensores que proporcionen información acerca de los actuadores le proporciona al sistema una medida extra de confiabilidad aunque a cambio de complejidad y costo agregado.

4.8. Múltiple de admisión y sistema de escape

El múltiple de admisión debe de ser diseñado con la finalidad de incrementar la eficiencia volumétrica del motor en las condiciones de operación y proveer un flujo de aire adecuado para el control del motor. Con base en la reglas de la competencia se diseñó un múltiple que cumpliera estas condiciones y que integra algunos sensores y actuadores del sistema de control. El proceso completo de diseño se encuentra documentado en la tesis *Diseño, análisis y manufactura del múltiple de admisión del Fórmula SAE UNAM 2011*, a continuación se muestra el resultado final junto con las interacciones que tiene con el sistema de control.

En las figuras 4.26 y 4.27 se puede ver el múltiple de admisión junto con los sensores y actuadores del sistema de control del motor que interactúan con él. El cuerpo de aceleración integra el sensor TPS que mide el ángulo de apertura del papalote. El sensor de temperatura del aire y la boquilla para el sensor de presión se encuentran integrados a la cámara de admisión con el fin de medir las propiedades del aire que está entrando al motor. El riel de inyección junto con los inyectores también se encuentra integrado al cuerpo del múltiple de tal forma que se realizan las inyecciones en la parte trasera de las válvulas de admisión.

Sistema de escape: El sistema de escape utilizado en el vehículo se diseñó con base en el reglamento, consideraciones de empaquetamiento y consideraciones geométricas con el objetivo de mejorar el desempeño del motor. Las restricciones principales en cuanto a reglamento son la ubicación del silenciador y los decibeles producidos a altas revoluciones. Se eligió un escape 4 a 1 y se situó un solo sensor de oxígeno donde se juntan los cuatro tubos para poder leer un promedio del remanente de oxígeno del motor que considera los cuatro cilindros. En la siguiente figura se muestra la configuración utilizada y la posición del sensor de oxígeno.

4.9. Integración del sistema

Una vez seleccionados los componentes a utilizar en el sistema de control se prosigue a integrar los todos de tal forma que permitan controlar el motor y sus accesorios de la forma requerida. Esto se realiza posicionando los sensores en sus respectivos lugares y fabricando el arnés de cableado que une los componentes a la computadora y fuente de poder. La figura 4.29 muestra un esquema del sistema eléctrico completo utilizado en el vehículo incluyendo

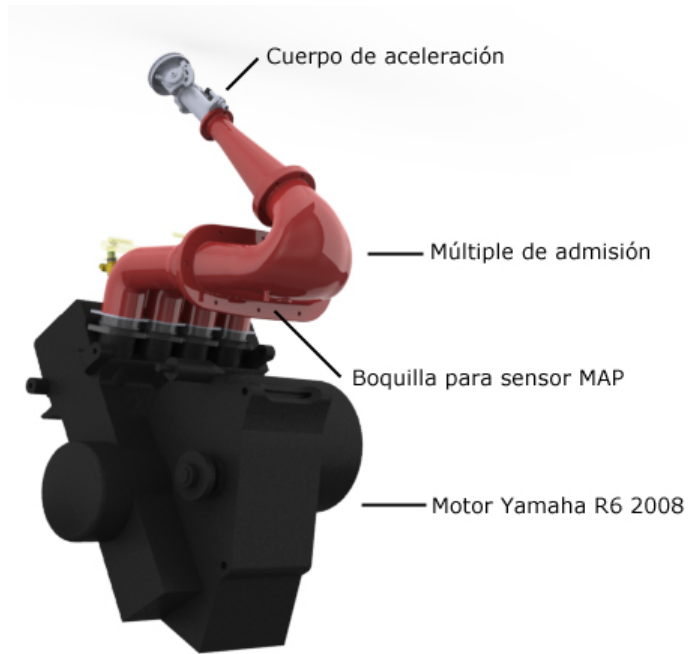


Figura 4.26: Múltiple de admisión y motor

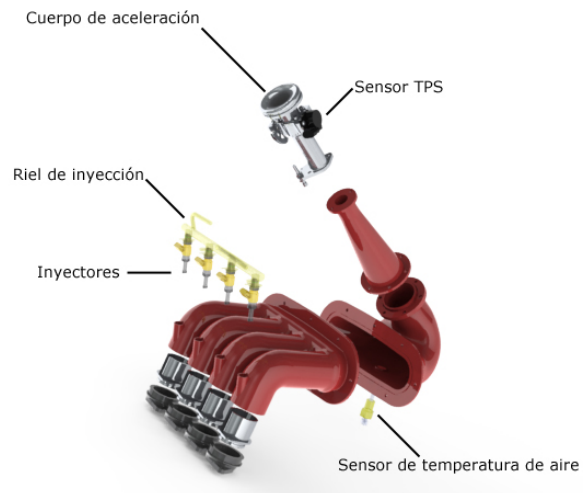


Figura 4.27: Vista explosionada del múltiple de admisión con los sensores e inyectores

la batería, interruptores, fusibles, relevadores, sensores y actuadores. El arnés y sus respectivos auxiliares se diseñaron tomando en cuenta la confiabilidad del sistema, la facilidad de diagnóstico y servicio. La conexión de cada sensor al arnés principal de la UCM se realizó con conectores estilo Weatherpack los cuales son el estándar utilizado en sistemas automotrices por su resistencia al ambiente y vibración. Utilizar conectores entre cada sensor y el arnés le proporciona al sistema facilidad al momento de diagnosticar fallas y en caso de necesidad permite realizar cambios de manera rápida. Para suministrar de energía a los actuadores (inyectores, bobinas,

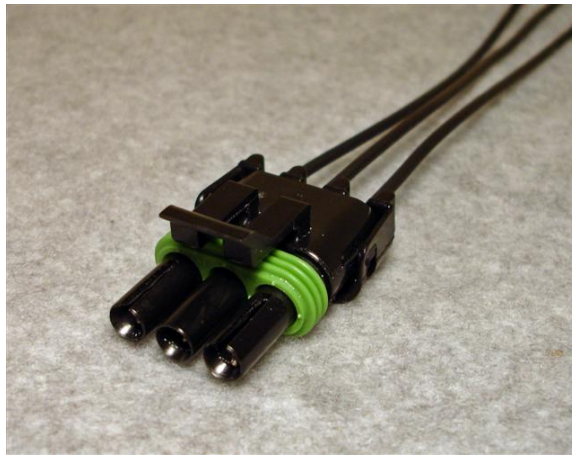


Figura 4.28: Ejemplo de conector Weatherpack

ventilador, marcha y bomba de gasolina) se utilizaron relevadores y fusibles con el fin de poder controlarlos con las señales de control de la computadora y agregar una capa extra de seguridad en caso de falla.

En el esquema 4.29 se muestran también las conexiones de los interruptores del sistema requeridos por reglamento así como el interruptor de la luz de freno, la conexión del alternador a la batería y el puerto de comunicación CAN que lleva la información de la computadora al tablero de instrumentos. Una vez que se implementó este sistema físicamente se puede proceder a la configuración y pruebas del motor.

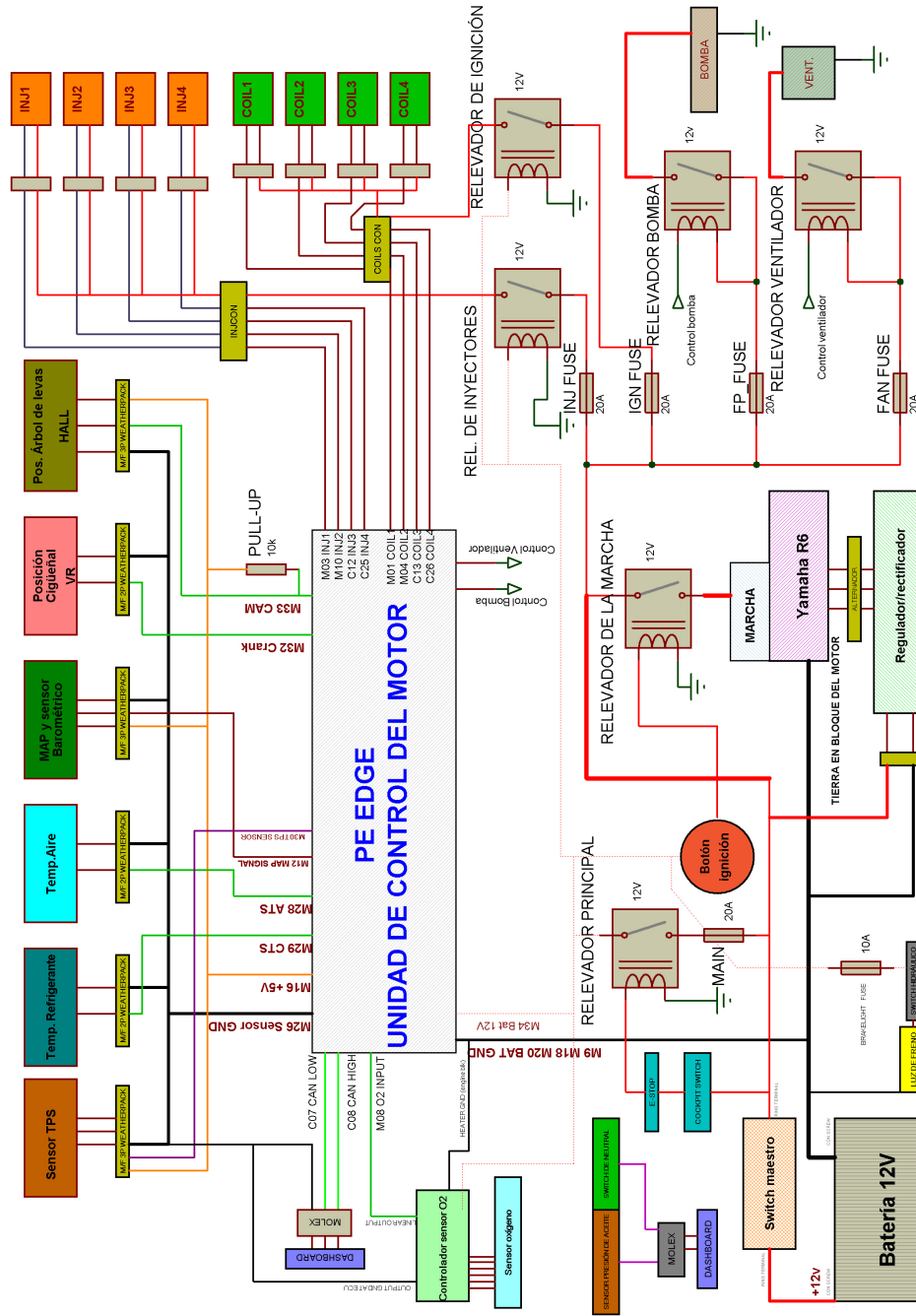


Figura 4.29: Esquema del sistema completo de control

Capítulo 5

Desarrollo experimental y pruebas

5.1. Plan de pruebas

Se desarrolló un plan de pruebas que permitiera llevar a cabo el desarrollo experimental de manera ordenada y documentada para poder lograr la mejor configuración y afinación del motor con el equipo y tiempo disponibles. Los instrumentos utilizados para ajustar la configuración de un motor son una computadora con conexión a la UCM, un sensor de oxígeno montado en el escape y de preferencia acceso a un dinamómetro.

El sensor de oxígeno es un instrumento fundamental en la creación de tablas de inyección y afinación de los parámetros del motor ya que la información que proporciona permite ajustar los valores inicialmente calculados hasta llegar a la mezcla deseada. El método más efectivo y común para afinar un motor comenzando desde cero involucra utilizar un dinamómetro que permita llevar al motor a diferentes puntos de carga y revoluciones y ajustar la mezcla y avance en cada punto. Existen dos tipos de dinamómetros principalmente, de motor y de chasis. En un dinamómetro de motor se acopla directamente la flecha del motor a la unidad que provee resistencia mecánica variable que puede ser un freno de agua o eléctrico. Un dinamómetro de chasis es un rodillo montado en rodamientos que es movido por las ruedas del vehículo a probarse. Los dinamómetros de chasis pueden incluir un mecanismo de carga variable o solo medir la potencia del motor utilizando la inercia del rodillo sin poder regular la carga.

Inicialmente se contemplaba el uso de un dinamómetro para afinar el motor pero debido a problemas de disponibilidad y falta de tiempo se tuvo que

desarrollar un plan de afinación que no incluyera dinamómetro. Utilizando la función de adquisición de datos de la UCM, el sensor de oxígeno y la conexión inalámbrica junto con pruebas en pista fue posible afinar el motor de forma adecuada.

En la figura 5.1 se muestra el plan de pruebas ideado con las diferentes etapas y actividades a realizarse.

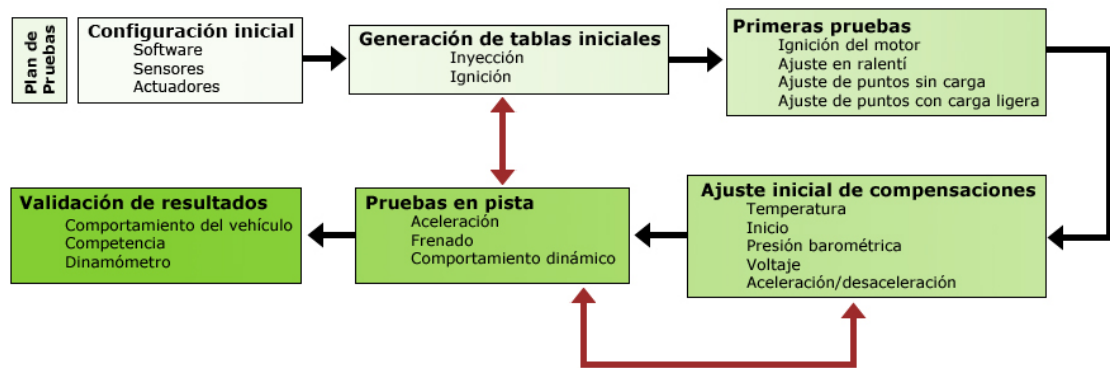


Figura 5.1: Esquema del plan de pruebas

5.2. Software y configuración inicial

Una vez que se tiene el sistema cableado y armado con los componentes del vehículo se puede proceder a la configuración y programación de la unidad de control del motor. La UCM adquirida incluye su propio programa propietario de configuración y programación el cual sirve para monitorear el estado del motor y definir las tablas y variables que se utilizan para modificar el comportamiento del motor. El programa utilizado se llama peMonitor y es proporcionado por Performance Electronics al momento de adquirir la computadora del motor ya que está diseñado específicamente para trabajar con el modelo EDGE.

En la figura 5.2 se muestra una vista general del programa peMonitor con algunas ventanas importantes abiertas. Se pueden ver las tablas de inyección e ignición, el monitoreo de variables, la ventana de configuración general y algunas ventanas relacionadas con compensaciones.

Desde este software se realiza el trabajo de configuración y afinación del

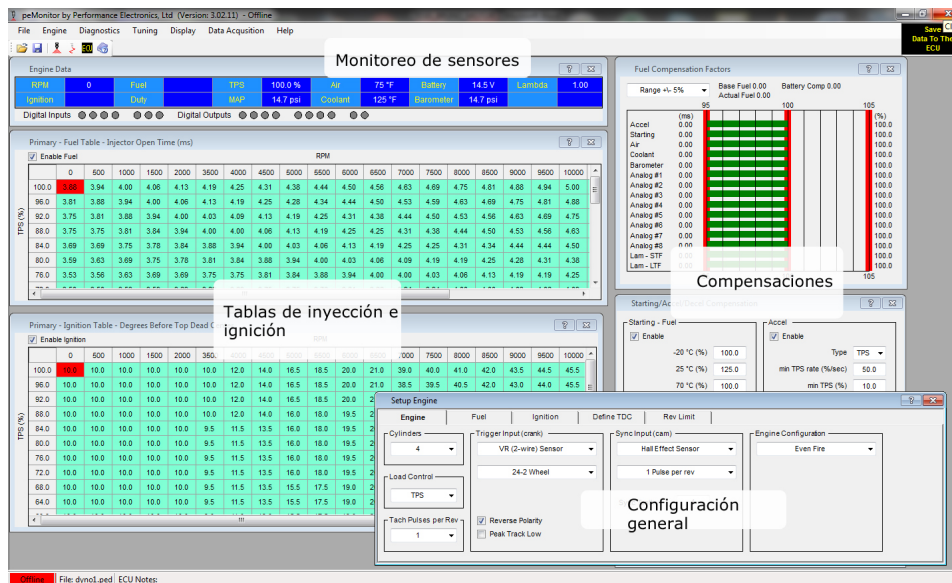


Figura 5.2: Vista general del software peMonitor

motor a través de una conexión entre una computadora con el software instalado y la unidad de control del motor. En la figura 5.3 se muestra el tipo de conexión utilizado para comunicarse con la UCM. La UCM utilizada es capaz de conectarse a través de un cable de Ethernet a la computadora directamente pero para incrementar la capacidad de diagnóstico, monitoreo y facilidad de uso se implementó un sistema de conexión inalámbrica con el cual fue posible configurar y monitorear la UCM sin conexiones físicas. Este sistema permite conectarse a la UCM desde largas distancias lo cual junto con la habilidad de la UCM de guardar datos fue fundamental en la afinación del motor en el vehículo en movimiento bajo condiciones de competencia.

5.2.1. Configuración inicial

El primer paso del proceso de afinación consiste en configurar la UCM para que sea capaz de trabajar con los sensores usados y las propiedades físicas del motor utilizado, así como definir el tipo de control de carga, inyección e ignición a utilizar. En la figura 5.4 se muestran los parámetros mínimos necesarios para configurar el motor con los valores utilizados para el vehículo. A continuación se explica cómo se eligió cada parámetro y la importancia que tiene dentro del sistema de control.

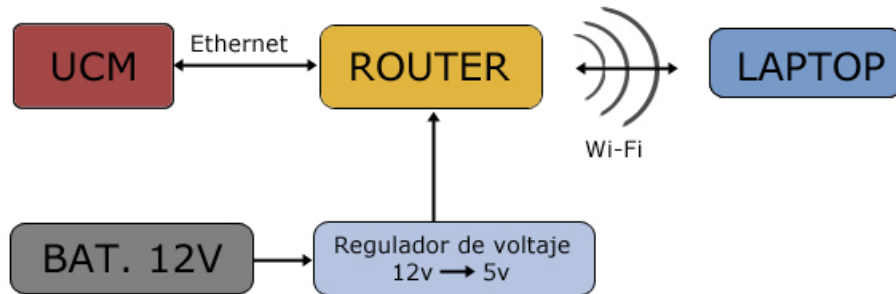


Figura 5.3: Esquema de conexión inalámbrica a la UCM

La primera pestaña 5.4(a) muestra la configuración general del motor donde se indica que cuenta con 4 cilindros, sensor de posición del cigüeñal de reluctancia variable con una rueda 24-2 y sensor del árbol de levas de efecto hall de un pulso por revolución. Se indica que los cilindros se encuentran equidistantes en cuanto a su accionamiento y el control de la carga se realiza con el sensor TPS del acelerador. Las opciones posibles para determinar la carga son utilizar el sensor TPS o el sensor MAP, lo cual decide el tipo de algoritmo de control. Cada tipo de control tiene beneficios y desventajas diferentes las cuales se deben de tomar en cuenta al momento de elegir que tipo de algoritmo se usará.

a) *Alpha-N*: Se conoce como Alpha-N al tipo de control que utiliza el sensor TPS y las revoluciones del motor para estimar la carga. Al incrementarse el ángulo de apertura del cuerpo de aceleración se remueve la restricción e incrementa el llenado de los cilindros por lo que se tiene una relación directa entre el ángulo del papalote del cuerpo de aceleración y la cantidad de aire que puede entrar al motor.

Ventajas:

- Simplicidad, facilidad de configuración y afinación
- Requiere menor cantidad de sensores
- Velocidad de respuesta rápida
- Facilidad de programar compensación de aceleración rápida

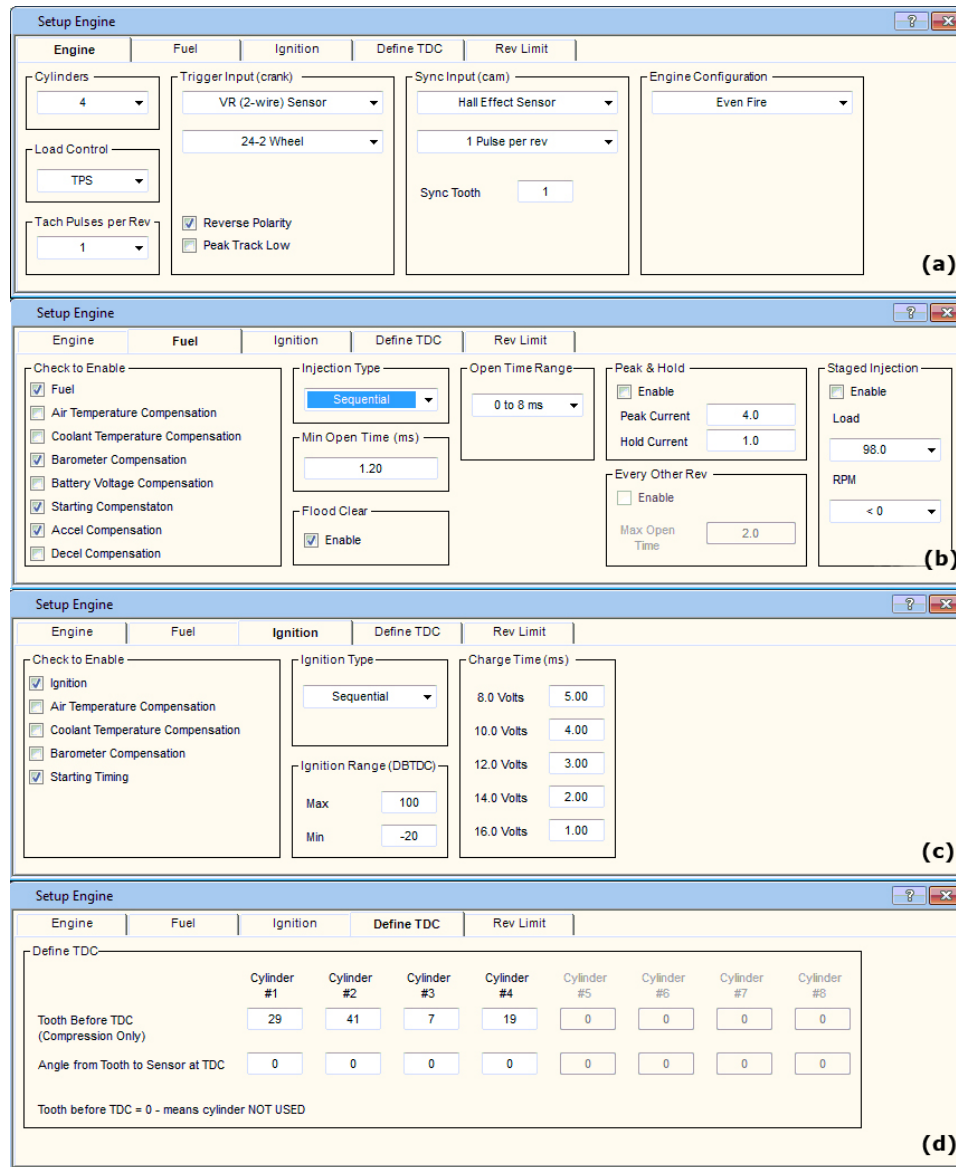


Figura 5.4: Configuración de la UCM

- Menor dependencia a la forma del múltiple de admisión

Desventajas:

- Menor resolución comparando con un sistema que utiliza el sensor MAP ya que pequeñas variaciones en el ángulo del papalote pueden causar grandes cambios en cuanto al aire admitido
- No incluye compensación por cambios en la presión barométrica
- Menor adaptabilidad del sistema a cambios en condiciones atmosféricas o componentes del sistema

b) Velocidad-Densidad: Se conoce así al método de estimación de carga que utiliza las revoluciones del motor junto con el valor de la presión del aire dentro del múltiple de admisión para estimar la cantidad de aire admitida. Junto con el sensor de temperatura del aire e información de la eficiencia volumétrica del motor este algoritmo puede estimar con mayor precisión la carga admitida pero a cambio de mayor complejidad y sensibilidad a ruido externo.

Ventajas:

- Al usar el valor de la presión en el múltiple incluye inherentemente la compensación barométrica
- La relación entre la presión en el múltiple y la carga es más precisa que la relación entre el ángulo del papalote y la carga
- Es un sistema muy robusto cuando se implementa y afina de manera correcta

Desventajas:

- Mayor complejidad del sistema
- El valor leído por el sensor MAP depende mucho de la forma del múltiple y del posicionamiento del sensor dentro de este
- Requiere información del sensor TPS para reaccionar de manera rápida a aceleraciones bruscas
- La calibración de un sistema que utiliza este esquema es mas tardada y complicada [11]

Aunque los dos tipos de control de la carga presentan desventajas y ventajas únicas, una vez evaluadas sus diferencias se decidió utilizar el esquema Alpha-N por considerarse que permite tener un sistema de alto desempeño con menor complejidad y mejor velocidad de respuesta. Estas características hacen que sea ideal para autos de competencia por lo que es usado generalmente en la mayoría de los autos de carreras inclusive en la categoría de FSAE en la que se compete. Utilizando el sensor MAP para compensar cambios en la presión atmosférica se llega a un sistema robusto y adaptable. La pestaña 5.4(b) muestra la configuración en cuanto a la inyección de combustible. Se especifican la compensaciones a usar, el tiempo mínimo de apertura encontrado experimentalmente y el tipo de inyección. La inyección puede ser en grupos o secuencial como se explica a continuación.

Inyección en grupos: La inyección en grupos es la más fácil y sencilla de implementar en cuanto a las necesidades de hardware y software. En este esquema se disparan los inyectores en grupos que pueden ir desde todos los cilindros al mismo tiempo o en grupos de cilindros opuestos. Los eventos de inyección no se sincronizan con la apertura de las válvulas de admisión por lo que no se requiere información de la posición del árbol de levas y se tiene una menor demanda de procesamiento por parte de la UCM. En la figura 5.5 se muestran gráficamente los disparos por ciclo. Al tener dos disparos por ciclo la UCM calcula la cantidad de gasolina requerida y lo divide en dos para cumplir con la cantidad. La mayor desventaja de este método es que al no sincronizarse con la apertura de la válvula se tiene gasolina que se colecta en las paredes del múltiple y la válvula hasta que se abren las válvulas. Esto causa mayor consumo de combustible y un comportamiento transitorio deficiente.

Inyección secuencial: En un sistema de inyección secuencial se calcula un solo pulso por cilindro cada ciclo el cual es aplicado de manera que se termina de inyectar justo cuando abre la válvula de admisión del cilindro. Esto permite mayor control sobre la cantidad de gasolina inyectada a cada cilindro lo cual permite mejoras en consumo de combustible y comportamiento transitorio. Este esquema de inyección requiere la señal de sincronización del sensor del árbol de levas y mayor capacidad de procesamiento de la UCM. Ya que la UCM seleccionada soporta la inyección secuencial y se cuenta con el sensor del árbol de levas se utilizó este esquema con el fin de tener mayor control sobre la dosificación de gasolina de tal forma que se obtengan beneficios especialmente en cuanto al rendimiento de combustible. Otro beneficio de este método es la posibilidad de ajustar individualmente la cantidad in-

yectada cilindro por cilindro en caso de contar con un múltiple de admisión con flujo asimétrico.

La figura 5.4c) muestra las posibles configuraciones del sistema de ignición.

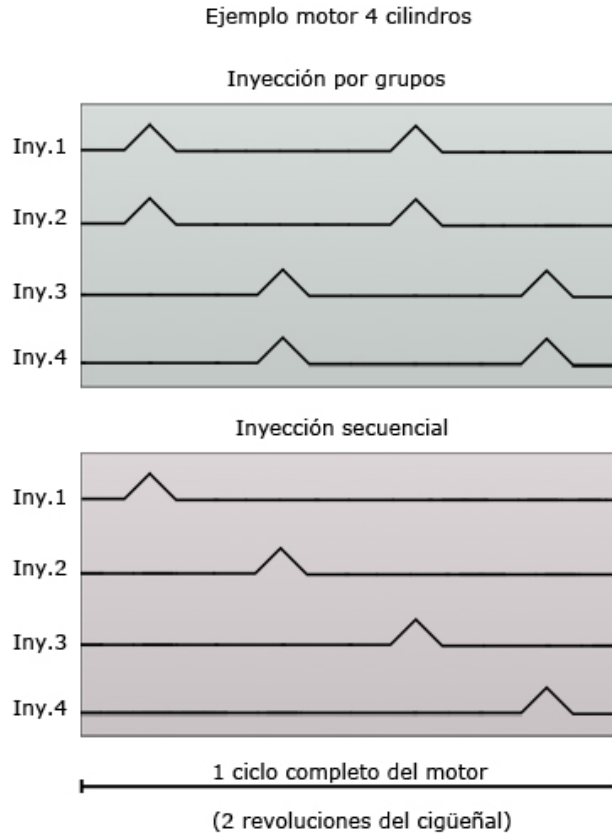


Figura 5.5: Esquema de los tipos de inyección en un motor de cuatro cilindros

Se especifica el rango de ignición en grados, los diferentes tiempos de carga de la bobina a diferentes voltajes y el esquema de inyección. Las opciones son secuencial o chispa perdida lo cual es análogo al caso de inyección donde en el esquema secuencial se tiene una chispa por cilindro por ciclo y en el de chispa perdida se utilizan dos ya que no se conoce en que parte del ciclo se encuentra cada pistón. Si se está utilizando inyección secuencial es lógico utilizar la ignición también secuencial ya que al usar una sola chispa por ciclo en el momento adecuado permite mayor durabilidad de las bobinas y bujías así como mayor tiempo de carga de cada bobina para lograr tener

chispas con el nivel de energía adecuada.

En la figura 5.4d) se muestra la configuración de la posición del punto muerto superior de cada pistón referenciado a los sensores del cigüeñal y árbol de levas. Esta configuración es lo que le permite a la UCM conocer la posición de cada pistón dentro del ciclo con el fin de administrar las inyecciones y chispas. El entendimiento y configuración correcta de estos parámetros determina el funcionamiento base del motor bajo todas condiciones. El primer paso para determinar la configuración correcta es encontrar la posición de la rueda dentada cuando el pistón número uno se encuentra en el punto muerto superior ya sea en escape o admisión. Utilizando marcas en la rueda dentada y el motor se puede posicionar manualmente el cigüeñal en la posición con el cilindro número uno en TDC en compresión. La figura 5.6 muestra la posición de ambas ruedas respecto a los sensores en este caso.

Una vez teniendo la información de la relación entre las ruedas y los senso-

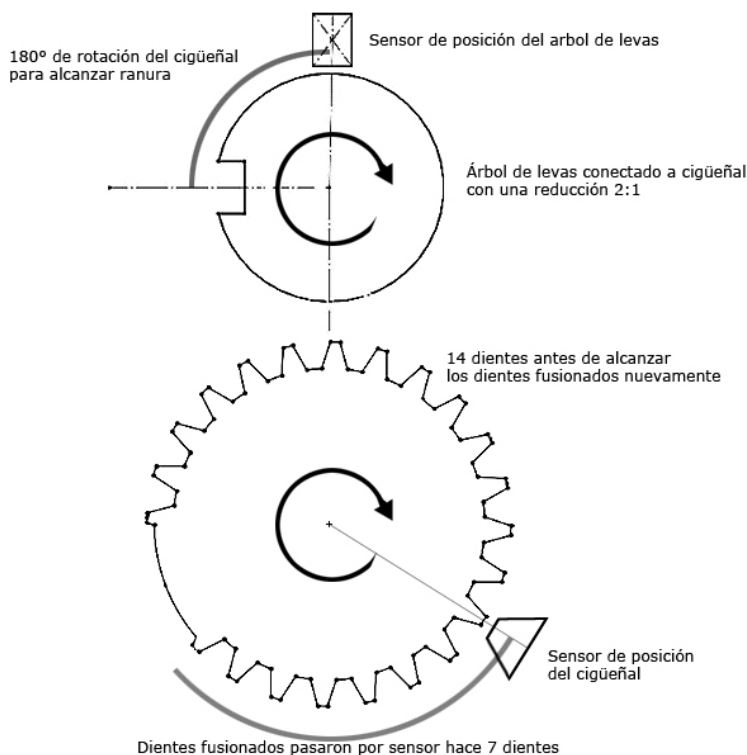


Figura 5.6: Posición de las ruedas dentadas con el cilindro #1 en TDC en compresión

res en la posición requerida se conectó la computadora a la UCM y se le dio marcha al motor por unos segundos. Esto permite la captura de los datos de los sensores tanto en su estado análogo como después de ser procesados por la UCM. La figura 5.7 muestra las señales de ambos sensores durante un ciclo completo del motor así como la manera de la UCM de llevar la cuenta de dientes relacionados a la posición del cigüeñal. Cada vez que recibe la señal del sensor del árbol de levas comienza a contar dientes desde el 1 al 44 lo cual corresponde a dos vueltas del cigüeñal o un ciclo completo del motor, regresando a 1 cada dos vueltas.

Se busca que número de diente de la cuenta corresponde al diente que se muestra alineado al sensor en la figura 5.6. De la figura podemos ver que el diente fusionado pasó por el sensor siete dientes atrás lo cual indica que el diente buscado puede ser el diente 7 o el diente 29. El diagrama también indica que el inicio de la señal del sensor del árbol de levas se encuentra a 180° de rotación del cigüeñal lo que corresponde a 12 dientes individuales. Con esta información se puede determinar que el diente buscado tiene que ser el #29 ya que cumple ambas condiciones. A partir de este diente se definen las posiciones de los puntos muertos superiores de los demás cilindros considerando que se encuentran equidistantes entre si cada 180° . Cada 12 dientes individuales equivalen a 180° al igual que cada 10 dientes cuando se incluye el diente fusionado en el intervalo (Al ser una rueda 24-2 cuando se incluye el diente fusionado se suman los 12 pero se restan 2). Por lo que:

- Cilindro 1= **Diente 29**

- Cilindro 2=Diente 29+12=**Diente 41**

- Cilindro 3=Diente 41+12=53 pero como aquí ocurre el diente largo se restan 2, por lo que $53-2=51$ y como se inicia la cuenta de nuevo restamos el número total de la cuenta para tener el valor correcto $51-44=$ **Diente 7**

- Cilindro 4=Diente 7+12=**Diente 19**

Con estas configuraciones iniciales se puede proceder a establecer un plan de pruebas y generación de los valores iniciales que se cargarán a las tablas de inyección, ignición y compensaciones.

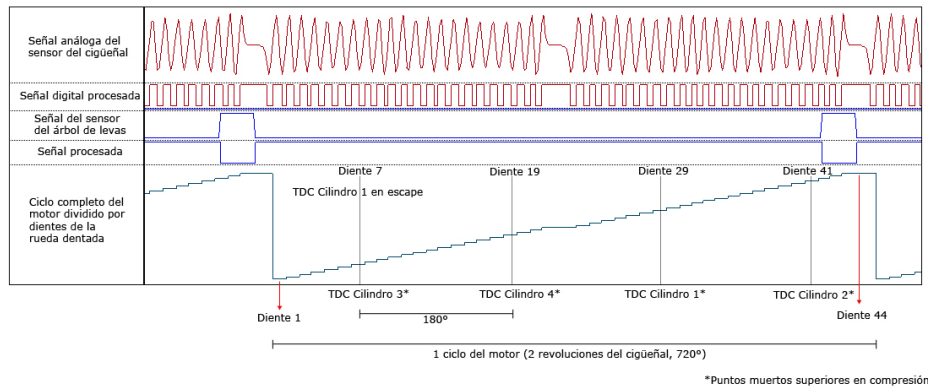


Figura 5.7: Diagrama que muestra la manera en que la UCM calcula la posición del cigüeñal

5.3. Generación de tablas de control iniciales

Cada ciclo del motor la UCM debe calcular el pulso de inyección y el ángulo de avance de la ignición según las condiciones actuales. Para esto utiliza los valores base de dos tablas y los ajusta dependiendo de las compensaciones activas. En la figura 5.8 se muestra el ejemplo de las tablas usadas dividida en las zonas más utilizadas. Por el tipo de esquema de control que se decidió usar (Alpha-N) el eje X representa la carga del motor relacionada al sensor TPS y el eje Y las revoluciones del motor. Las tablas utilizadas por la UCM son de 26x25 por lo que se tienen 650 valores por tabla que se deben llenar. La tabla de inyección trabaja con valores de apertura en milisegundos y la de ignición en grados antes del punto muerto superior. Uno de los parámetros de configuración de las tablas son los pasos en los que se dividen las escalas de RPM y TPS. La escala de RPM se puede ajustar para contar con mayor resolución en las zonas requeridas. Un efecto del Restrictor de aire en el motor utilizado es que las revoluciones máximas a las que puede llegar el motor se limitan a aproximadamente 13000, cuando en su configuración original el motor es capaz de alcanzar hasta 16500. Por lo tanto se fijó como límite superior de las tablas 13500 y se dividieron los demás puntos de forma equidistante.

Una vez que se tiene la tabla llenada con valores la UCM simplemente realiza el siguiente cálculo para determinar los valores requeridos.

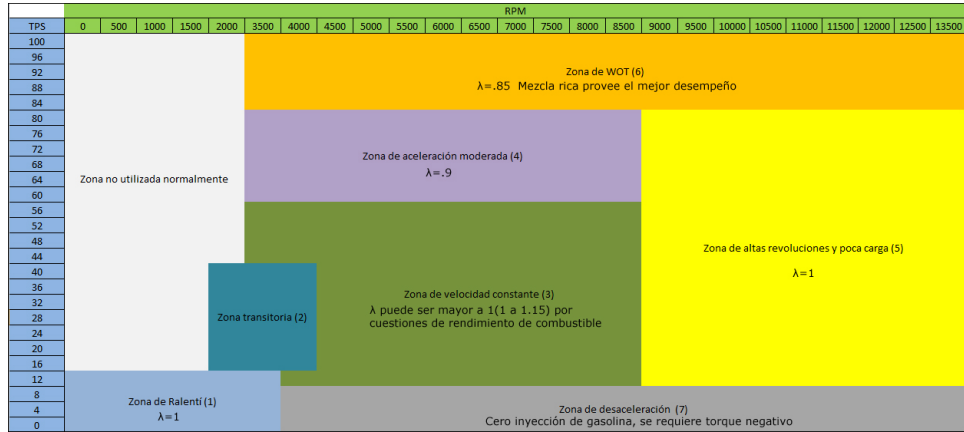


Figura 5.8: Ejemplo de tabla de inyección con las zonas más utilizadas marcadas

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de apertura del inyector(ms)} &= \text{Tiempo base de tabla} \times \\ &\text{Compensaciones activas}(\%) + \text{Compensación por voltaje(ms)} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Ángulo de ignición} &= \text{Ángulo base de tablas} + \text{Compensaciones activas}(\text{°}) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Las compensaciones del inyector modifican en cierto porcentaje el tiempo del pulso mientras que la compensación de batería agrega tiempo cuando el voltaje se encuentra bajo para compensar la menor velocidad de apertura del inyector a menores voltajes.

Crear las tablas empezando desde cero es posible pero requiere un proceso más largo donde se comienza con una tabla plana y se ajustan algunos puntos con base en el sensor de oxígeno para obtener valores correctos de partida. Lo más recomendable es buscar las tablas de un motor con las mismas características o al menos ciertas similitudes. El fabricante de la UCM provee un mapa base para motores de 600cc con entrada de aire restringida lo cual es un muy buen punto de partida. En la figura 5.3.2 se muestra la tabla inicial y después de ajustarla para el motor utilizado. Se usaron los pulsos de inyección calculados en ralenti y WOT para ajustar la tabla a que correspondiera a estos puntos y por lo tanto de mejor manera al motor y los inyectores. La tabla de ignición suministrada por Performance Electronics tiene las características requeridas para un motor de este tipo por lo es un buen punto de partida sin requerir modificaciones.

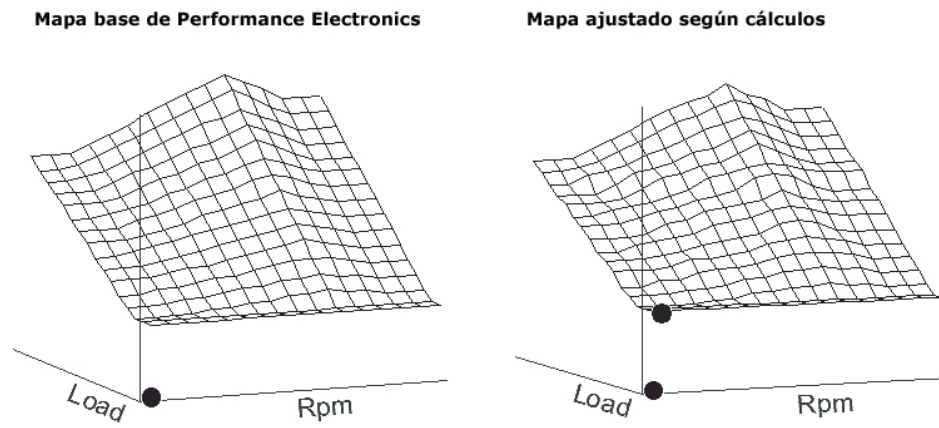


Figura 5.9: Tablas iniciales de inyección representadas en 3d

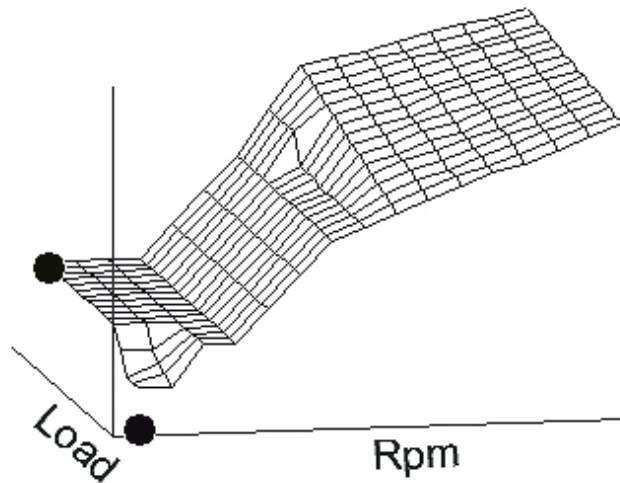
Tabla base de ignición

Figura 5.10: Tabla inicial de ignición

5.4. Calibración

Teniendo las configuraciones y tablas iniciales listas se puede comenzar con la calibración del motor en diferentes puntos y rangos de operación. El ajuste del encendido inicial del motor y el ralentí es el primer paso. El motor en su configuración original tiene un ralentí de aproximadamente 1500RPM pero para esta aplicación se decidió utilizar un ralentí entre las 3000 y 3500 RPM. Tener el ralentí en este rango permite que el motor alcance su temperatura de operación de manera más rápida y a estas revoluciones se carga la batería en menor tiempo lo cual son beneficios en un vehículo de competencia. El ralentí alto también ayuda al piloto al momento de arrancar ya que reduce la posibilidad de que se apague el motor. Con la tabla inicial cargada en la UCM se enciende el motor y se permite que alcance la temperatura de trabajo ya que no se ha configurado la compensación por temperatura. Una vez que el motor alcanza su temperatura de trabajo se comienza con el proceso de calibración de ralentí y toma de datos.

En la figura 5.11 se muestra la captura de datos mientras se ajustaba el ra-

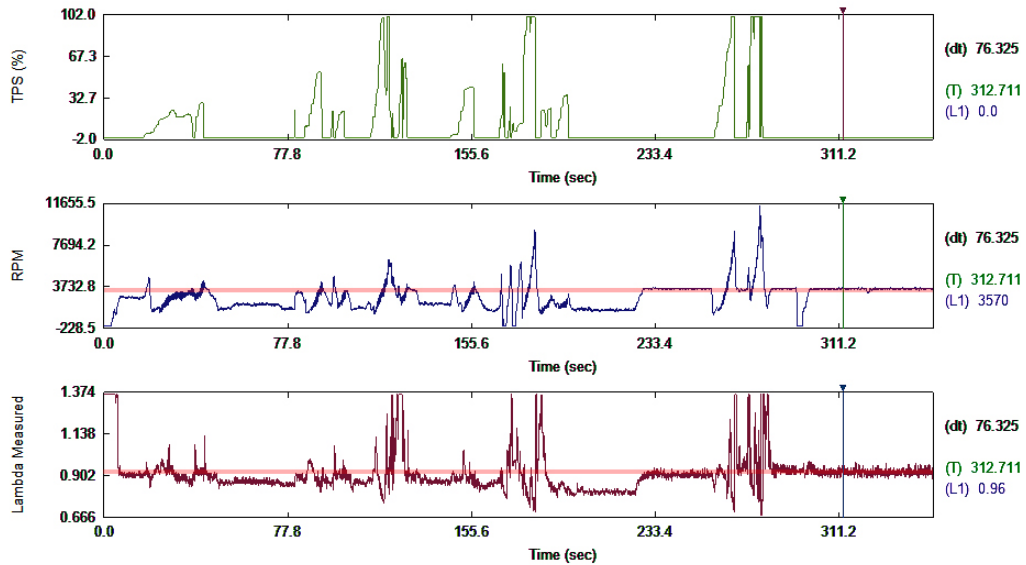


Figura 5.11: Captura de datos al ajustar ralentí

lentí con el motor en su temperatura operativa. Los objetivos buscados eran revoluciones del motor de 3500 con $\lambda = 1$, los cuales están marcados con líneas rojas en la gráfica. El ralentí se puede apreciar cada vez que el

TPS cae a 0%, las primeras veces se encontraba debajo de 3000RPM por lo que ajustando tanto los pulsos de inyección como la apertura inicial del papalote se configuró a las revoluciones y RAC deseada. En la figura podemos ver el marcador en el punto $t=312s$ indica un TPS=0%, RPM=3570 y $\lambda = 0,96$ lo cual es suficientemente cercano a nuestro objetivo. Cuando se mueve bruscamente el acelerador se aprecia una desviación considerable de la RAC hacia una mezcla pobre lo cual nos indica que hacen falta las compensaciones por aceleración, lo cual se realiza después de calibrar varios puntos en estado estacionario.

Una vez que se ajusta el ralentí se puede continuar en la calibración de diferentes puntos en las tablas. Sin tener manera de aplicarle carga al motor los puntos que se pueden calibrar de esta manera son únicamente una diagonal que comienza en la zona de ralentí y cruza en una diagonal hasta llegar a las revoluciones máximas del motor con TPS=100%. Utilizando el acelerador para poner el motor en cada uno de estos puntos se realiza el mismo procedimiento de calibración utilizando la información del sensor de oxígeno en tiempo real para ajustar los pulsos de combustible hasta alcanzar la RAC deseada para la zona en consideración dependiendo de la RAC deseada. La tabla 5.12 muestra los factores de calibración y los parámetros importantes a ajustar en las condiciones de operación del motor más comunes.

La compensación relacionada al voltaje de la batería agrega cierto tiempo al

| Factores de calibración--> Condición operativa | RAC deseado | Avance de ignición | Parámetros de control principales | |
|---|--------------------------|--|---|---|
| | | | Gasolina | Chispa |
| Encendido | Muy rico | Poco avance | Configuración de pulso inicial | Compensación por encendido |
| Calentamiento | Rico | Ligero avance | Compensación de calentamiento Compensación por temperatura de refrigerante | Compensación por temperatura del refrigerante |
| Ralentí | Cerca de estequiométrico | 5° a 15° BTDC | Tabla de inyección | Tabla de avance |
| Crucero | Pobre (14.8 a 16) | Moderado | Tabla de inyección | Tabla de avance |
| Emisiones mínimas | Estequiométrico | Moderado | Tabla de inyección | Tabla de avance |
| Aceleración | Rico | Alto, incrementando con las revoluciones | Enriquecimientos por aceleración | Tabla de avance |
| Desaceleración | Pobre | Dependiendo de las revoluciones | Compensación por desaceleración | Tabla de avance |
| WOT | Rico (12 a 13) | Alto, dependiente de las características del motor | Tabla de inyección | Tabla de avance |

Figura 5.12: Consideraciones de calibración

pulso de la tabla de inyección cuando el voltaje de la batería baja se encuen-

tra en menos de 12v para compensar que con el menor voltaje el inyector tarda más en abrir, idealmente esta compensación no se utiliza mas que en casos de emergencia si falla el alternador. La compensación barométrica utiliza el sensor MAP localizado en el múltiple de admisión para leer la presión atmosférica antes de que se encienda el motor. Con el valor de la presión atmosférica local donde se calibra el motor se puede generar la tabla de compensación. La tabla de la figura 5.13 está compensada únicamente para altitudes menores a la Ciudad de México donde la presión atmosférica es de 78kPa, considerando que la competencia se realiza a nivel del mar se toma el dato de la presión ahí para calcular el porcentaje de compensación requerido.

$$\text{Compensación barométrica a nivel del mar: } \frac{101KPa}{78KPa} * 100 = 133\% \quad (5.3)$$

Cuando se enciende el motor se requiere un pulso inicial mayor al propuesto

| Battery/Barometer Compensation | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Enable | | | | | | | | | |
| Battery Voltage Compensation - Fuel | | | | | | | | | |
| Volts | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10.0 | 10.5 | 11.0 | 11.5 | 12.0 |
| ms | 0.65 | 0.59 | 0.52 | 0.46 | 0.40 | 0.34 | 0.28 | 0.21 | 0.15 |
| Volts | 12.5 | 13.0 | 13.5 | 14.0 | 14.5 | 15.0 | 15.5 | 16.0 | |
| ms | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Enable | | | | | | | | | |
| Barometer Compensation - Fuel | | | | | | | | | |
| kPa | 0.0 | 6.5 | 13.0 | 19.5 | 26.0 | 32.5 | 39.0 | 45.5 | 52.0 |
| % | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| kPa | 58.5 | 65.0 | 71.5 | 78.0 | 84.5 | 91.0 | 97.5 | 104.0 | |
| % | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 108.8 | 117.5 | 126.2 | 135.0 | |

Figura 5.13: Compensación por voltaje de la batería y presión barométrica

por la tabla para iniciar la combustión aún con el motor frío donde una cantidad pequeña de gasolina se condensa en las paredes sin llegar a las cámaras de combustión. Entre más frío se encuentre el motor mayor tiene que ser el pulso inicial el cual disminuye durante una cantidad de revoluciones especificadas. La compensación de encendido para la ignición agrega cierto avance mientras está prendiendo el motor para facilitar la combustión.

La compensación por aceleración es sumamente importante para el correcto funcionamiento transitorio del motor. Cuando el motor se encuentra operando en un estado estable se genera una delgada película de gasolina en las paredes de los puertos, la cual continuamente se evapora y contribuye al llenado del cilindro. La computadora controla los inyectores pero no tiene

control directo sobre esta película. Durante un evento de aceleración donde se abre súbitamente el papalote del cuerpo de aceleración e incrementa rápidamente el flujo de aire se tiene a evaporar rápidamente la película y se reduce su contribución al suministro de los cilindros lo que cause un estado pobre temporalmente mientras se estabiliza el sistema nuevamente. Este estado pobre significa que se reduce el par generado lo cual es lo opuesto a lo requerido por el piloto al acelerar bruscamente, por lo que se debe de inyectar más gasolina durante estos eventos para balancear este efecto. [11] Como se puede ver en la figura 5.16 se utiliza el porcentaje de cambio en el TPS (%/s) para determinar cuando se presenta este fenómeno y poder activar la compensación requerida. Cuando se cumplen las condiciones se incrementan en cierto porcentaje los pulsos de la tabla de inyección por cierto tiempo con el objetivo de mantener la RAC dentro del rango deseado.

Para determinar los parámetros de esta compensación se realizan varias pruebas de aceleración donde se tiene el motor en un estado estable y súbitamente se pasa a otro mientras se toman datos de la RAC y su variación. Se tienen que ajustar los parámetros hasta lograr la menor variación y mayor velocidad de restablecimiento en cada evento transitorio.

Para poder calibrar los puntos de las tablas en todas las zonas sin el uso

The screenshot shows a software window titled "Starting/Accel/Decel Compensation". It contains four main sections for configuring engine compensation parameters:

- Starting - Fuel:**
 - Enable
 - 20 °C (%) 140.0
 - 25 °C (%) 125.0
 - 70 °C (%) 100.0
 - 115 °C (%) 100.0
 - Duration (revs) 1000
 - Fuel Starting RPM 1000
 - Initial Fuel Pulse (ms) 10.0
- Starting - Ignition:**
 - Enable
 - Timing (deg) 10.0
 - Ignition Starting RPM 1000
- Accel:**
 - Enable
 - Type TPS
 - min TPS rate (%/sec) 50.0
 - min TPS (%) 10.0
 - Max Factor (%) 130.0
 - Duration (sec) 2.0
 - Max RPM 10000
- Decel:**
 - Enable
 - min TPS (%) 10.0
 - max RPM 5000
 - RPM Delta 100

Figura 5.14: Compensaciones de encendido y aceleración

de un dinamómetro se utilizó la capacidad de la UCM de guardar en su memoria los datos de operación del motor los cuales pueden ser transferidos a la computadora y analizados. Una vez que el vehículo se encontraba en condiciones de ser probado en pista se pudieron realizar varias pruebas donde el vehículo realizaba pequeños circuitos con condiciones parecidas a la competencia con el fin de mejorar la calibración del motor utilizando los datos guardados y la retroalimentación suministrada por los pilotos.

En la figura 5.15 se muestra un ejemplo de algunos de los datos tomados. Las gráficas muestran aproximadamente 35 segundos de manejo en la pista simulando condiciones de competencia con frenados y aceleraciones constantes. En la gráfica de la relación de aire combustible podemos ver que λ se mantiene generalmente entre 1 y 0.80 lo cual es la zona rica y es la relación deseada para la mayoría de las zonas de trabajo que se presentan en condiciones de competencia. En la gráfica se aprecian todavía comportamientos transitorios indeseados, como por ejemplo cuando la razón de cambio del TPS es grande tenemos picos hacia una mezcla pobre antes de estabilizarse en la zona deseada lo que indica que la compensación por aceleración requiere cambios.

Utilizando gráficas y datos recolectados de esta manera es posible calibrar de manera gradual las tablas y compensaciones hasta llegar a una calibración adecuada que cumpla con los objetivos deseados y se adapte al estilo de manejo de los pilotos. La figura 5.4.6 muestra la compensación activándose lo cual amortigua el pico hacia una RAC pobre aunque por los parámetros seleccionados se pasa la mezcla ahora a un estado muy rico lo cual nos indica que se debe de utilizar con menor porcentaje o tiempo de activación. Los datos también indican que la condición para la activación de la compensación se encuentra muy alta ya que solo dos veces la velocidad de cambio del TPS llega a activarla.

La figura 5.17 muestra el comportamiento del control on-off utilizado para mantener la temperatura del motor dentro del rango deseado. Controlando el accionamiento del ventilador del radiador desde la UCM se mantiene la temperatura entre 95° y 100° bajo todas las condiciones de operación del motor. En la misma serie de gráficas se puede apreciar el avance del ángulo de ignición con las revoluciones del motor. El ángulo máximo de avance se configuró utilizando datos de avance recomendado para el motor suministrados tanto por Yamaha como por Performance Electronics, junto con pruebas en estado estable para asegurar que nunca se tenga el fenómeno de detonación el cual puede dañar el motor. La calibración del avance de la chispa no se hizo de la misma manera que la calibración de la inyección ya que este parámetro afecta directamente el par producido lo cual con el

equipo disponible no se podía medir tan fácilmente. Con los datos que cada corrida suministraban gradualmente se ajustó el motor hasta cumplir con los objetivos de la mejor manera posible considerando el método de calibración.

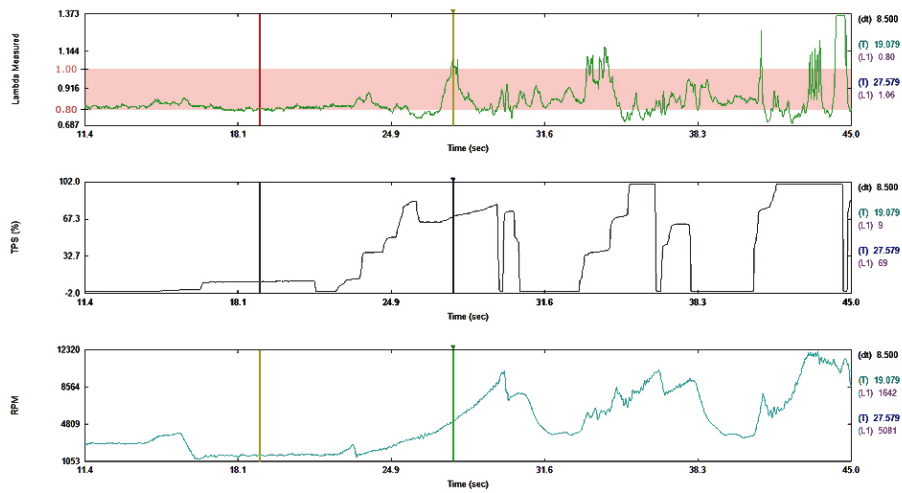


Figura 5.15: Datos en pista

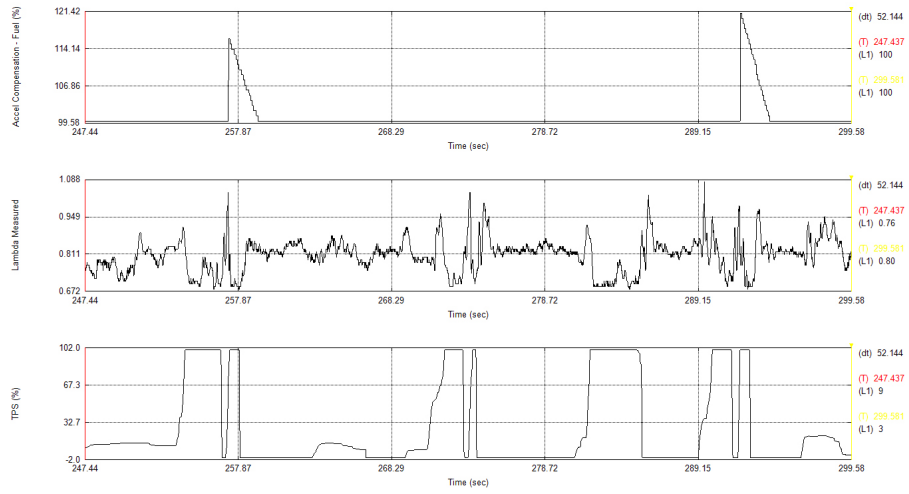


Figura 5.16: RAC y compensación por aceleración

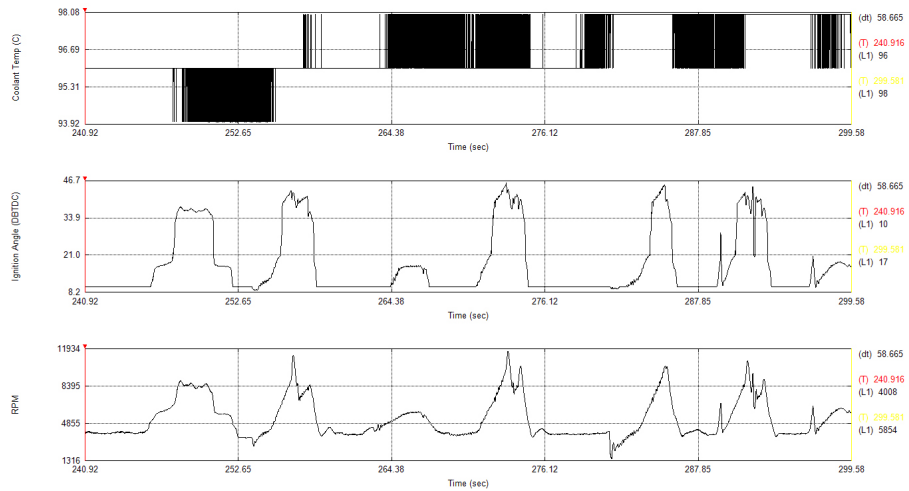


Figura 5.17: Temperatura del refrigerante y ángulo de ignición

Capítulo 6

Resultados

Para determinar cuáles fueron los resultados finales del trabajo y la manera en que se cumplieron los objetivos fijados se pueden utilizar varios parámetros. La selección de componentes e integración del sistema se realizó siguiendo las métricas establecidas en cuanto a disponibilidad, rendimiento y precio y se integró un sistema completo capaz de administrar todas las funciones requeridas del motor. Durante la competencia el sistema fue confiable y permitió un buen desempeño del motor adecuado a lo esperado. En la competencia fue posible poner el vehículo en un dinamómetro inercial de rodillos por lo que se pudo cuantificar de manera técnica la eficacia del trabajo realizado. En la figura 6.2 se muestra la gráfica de potencia y par producidos por el motor en todo su rango de revoluciones. La potencia máxima desarrollada fue de 85HP a 11400 RPM con un par máximo de 40 lb-ft a 11000RPM. Estos datos por si mismos no proporcionan información sobre la calidad y efectividad de la calibración ya que se necesita comparar con resultados de otros motores similares o el mismo motor. Cuando se probó en la competencia fue uno de los vehículos más potentes lo cual fue muy buen resultado. En la figura 6.1 se muestran las curvas de potencia y par del mismo motor Yamaha R6 2007 y 2008 en sus configuraciones originales sin restricción y con los sistemas de control de Yamaha. El restrictor causa que no se pueda llegar a más de 13000 RPM por lo que el poder pico de un motor sin restrictor es mucho mayor pero comparando hasta las 12000RPM podemos ver las similitudes y zonas que requieren mayor trabajo. El motor Yamaha R6 2007 físicamente es igual al usado en este trabajo, siendo en el 2008 el mayor cambio la adición del sistema de runners de admisión de longitud variable lo que proporciona mayor desempeño como se muestra en la gráfica en comparación del 2007. Comparando con esta gráfica a las

11500RPM un motor en estado original proporciona alrededor de 90HP lo cual es muy cercano a lo conseguido. En la parte media de la gráfica de potencia de nuestro motor se tienen ciertas ondulaciones indeseadas que indican que falta un mejor trabajo de calibración en esa zona para llegar a tener una mejor curva de par lo mas plana posible que proporcione mejor respuesta al vehículo, lo cual si la comparamos con la curva del motor sin modificaciones vemos que es posible.

El uso de este dinamómetro nos proporcionó datos muy útiles para cuantificar los resultados y es un punto de partida para determinar las zonas que requieren mayor trabajo para aumentar el desempeño del motor.

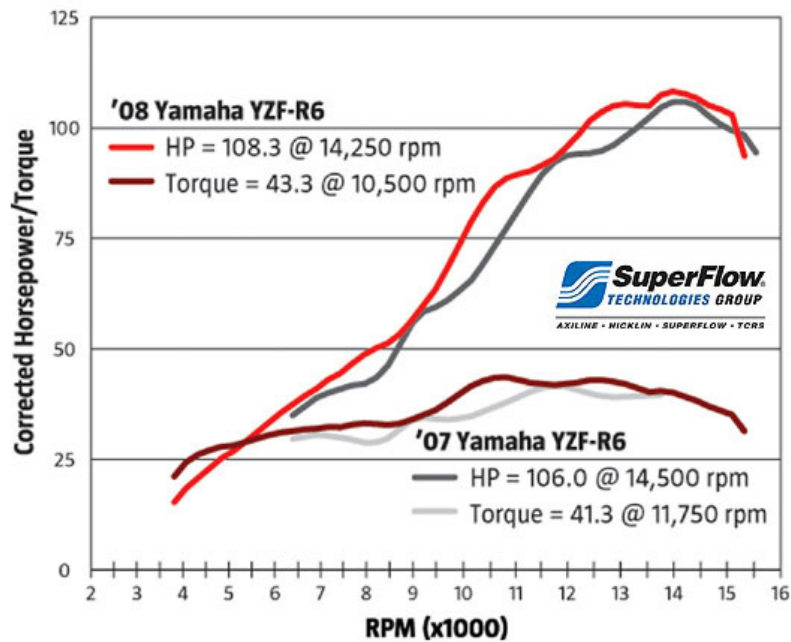


Figura 6.1: Curvas de potencia y par de torsión de motores Yamaha R6 2007 y 2008 estándar sin restricción [9]

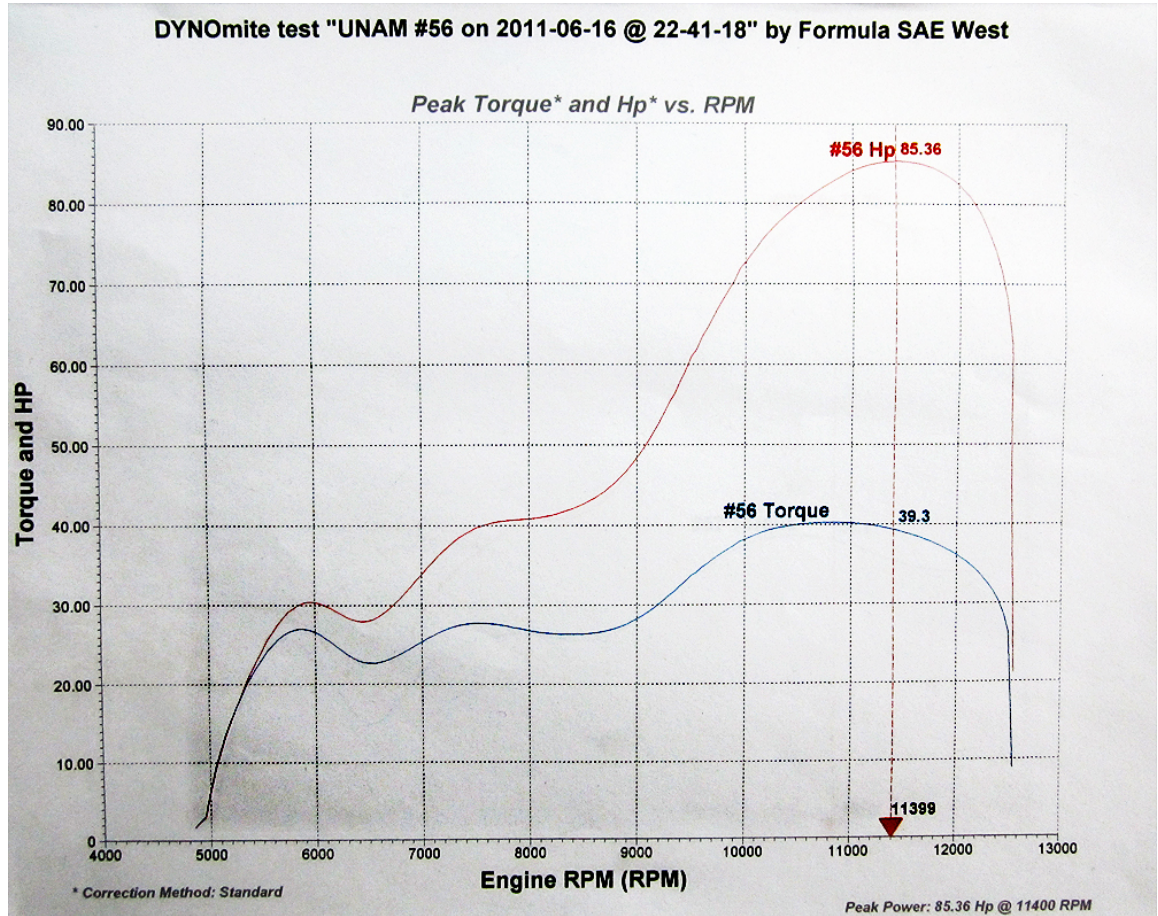


Figura 6.2: Curvas de potencia y par de torsión del motor

Capítulo 7

Recomendaciones y trabajo futuro

El labor de la implementación del sistema de control del motor y su calibración se realizaron de manera satisfactoria considerando las limitantes de tiempo y conocimiento, por lo que con lo aprendido en el desarrollo de este trabajo se pueden hacer ciertas recomendaciones que sirvan como punto de partida y guía para el desarrollo del sistema en los vehículos futuros FSAE de la UNAM.

- Un entendimiento sólido sobre motores de combustión interna y su funcionamiento es clave para implementar de buena manera el sistema que lo controle, lo que permite la correcta selección y aplicación de sensores y actuadores necesarios.
- La caracterización de los inyectores es muy importante ya que si se trabajara con datos erróneos desde un principio se tiene un error que se propaga a todos los demás cálculos y tablas.
- La integración del sistema en el vehículo se debe de realizar de manera que facilite el diagnóstico e incrementa la confiabilidad del sistema lo cual significa que cada conexión y cable del arnés debe de ser checada cuidadosamente ya que una sola conexión suelta puede ser la culpable de la descalificación del equipo de algún evento de la competencia como suele pasarle a muchos equipos.
- La realización y seguimiento de un plan de pruebas estructurado que contemple los tiempos asignados para la calibración dentro del plan global del vehículo es vital para un correcto funcionamiento. Se debe

de seguir un método rígido de pruebas para la calibración si se desea llegar a resultados repetibles y confiables.

Trabajo futuro:

- Utilizar los datos recopilados este año para determinar los puntos que más trabajo requieran y planear de acuerdo a esto los cambios requeridos.
- El uso de un dinamómetro para la calibración del motor aunque no sea estrictamente requerido es una herramienta muy poderosa que provee información muy útil por lo que se recomienda integrarlo al plan de pruebas.
- El énfasis no debe de ser en la potencia máxima desarrollada sino en obtener una curva de par con la mayor área bajo ella con el fin de lograr un comportamiento dinámico efectivo durante todo el rango de revoluciones.
- Se debe de trabajar más el comportamiento del motor en estados transitorios con el fin de mejorar el desempeño general del vehículo en circuitos como los utilizados en la competencia con muchos cambios súbitos.
- La UCM utilizada incluye provisiones para control de tracción y control de lazo cerrado utilizando el sensor de oxígeno las cuales pueden ser útiles para ciertos casos.
- La capacidad inalámbrica del sistema puede ser utilizada de manera más extendida para monitorear los sistemas no solo del motor sino de todo el vehículo.

Capítulo 8

Conclusiones

A lo largo del trabajo realizado se usaron conocimientos de diferentes ramas de la ingeniería con el objetivo de integrarlos en un sistema multi-propósito capaz de administrar las funciones de control de motor en diferentes condiciones y rangos de trabajo. El correcto entendimiento del principio de funcionamiento tanto del motor como de los sensores y actuadores utilizados fue fundamental en su uso y selección correctos para lograr el desempeño deseado y cumplir los objetivos fijados.

Utilizando un sistema relativamente económico y con menos equipo de calibración del utilizado normalmente se llegó a un resultado final bastante satisfactorio medido en la competencia tanto en las pruebas dinámicas como en la prueba realizada en el dinamómetro. La calibración del motor se realizó de manera estructurada y en diferentes etapas lo cual permitió ajustar cada parámetro que interviene en el funcionamiento del motor de manera ordenada y tomando en cuenta conocimientos teóricos de funcionamiento y experiencias pasadas. Se documentó de forma completa el proceso de selección de cada componente así como todo el método de calibración y pruebas de los diferentes componentes con el fin de justificar las decisiones tomadas y dejar una memoria completa que le permita a los siguientes equipos de FSAE de la UNAM tomar este trabajo como punto de partida en el desarrollo e implementación de los siguientes sistemas de control. Uno de los propósitos principales de escribir este documento fue dejar una documentación completa ya que comenzando desde un punto de desarrollo mas avanzado es posible llegar a un alto nivel de desarrollo comparativo con los equipos con mayor experiencia y recursos.

Bibliografía

- [1] John Heywood. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, 1988.
- [2] Pulkrabek W Willard. *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Prentice Hall, 1997.
- [3] Yamaha Motor Corporation. *Yamaha R6 2008 Service manual*, 2007.
- [4] Lino Guzzela. *Introduction to modeling and control of internal combustion engines*. Springer, 2010.
- [5] Brian Lewis. Performance electronics edge data. Consultado Marzo 2011, <http://www.pe-ltd.com>.
- [6] Bowling and Grippo. *Megamanual*. Megasquirt, www.megamanual.com. Consultado Mayo 2011.
- [7] Diagrama de un inyector electrónico de gasolina. Consultado Octubre 2011.
- [8] Allan Bonnick. *Automotive Computer controlled systems*. Butterworth Heinemann, 2001.
- [9] Gráficas de potencia de un motor yamaha r6 2007 y 2008. Consultado Octubre 2011.
- [10] SAE International. Formula sae 2001 rules. 2011.
- [11] Greg Banish. *Designing and tuning high-performance fuel injection systems*. Car Tech Books, 2009.
- [12] Jeff Hartman. *How to tune and modify engine management systems*. Motorbooks, 2003.