



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Implementación de una Unidad de Control de Motor para un  
vehículo Formula SAE con un sistema en tiempo real

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA:

Diego de la Cabada de la Fuente

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Eléctrico y Electrónico

PRESENTA:

Alejandro Lozada Salas



DIRECTOR DE TESIS  
M.I. Serafín Castañeda Cedeño

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

# Implementación de una Unidad de Control de Motor para un vehículo Formula SAE con un sistema en tiempo real

Diego de la Cabada de la Fuente  
Alejandro Lozada Salas

Marzo 2017

**Parte I**

**Agradecimientos**

---

## Diego

*A Dios, quien me enseñó el camino y me dio todas las oportunidades para lograr mis objetivos.*

*A mi familia, especialmente a mi abuela Margarita, mis padres Gustavo y Susana y a mis hermanos Gustavo, Susana y Santiago. Gracias por sus brillantes consejos y por apoyarme en todo momento.*

*A Andrea, mi compañera, amiga e inspiración para seguir adelante, quien me impulsó a no rendirme cuando más necesité palabras de aliento.*

*A mis amigos dentro y fuera de la facultad. Ustedes convirtieron este trayecto en un cúmulo de incontables recuerdos.*

*Al equipo Formula SAE, el cual depositó toda su confianza en mí para desarrollar mis ideas y me enseñó lo que es la verdadera entrega.*

*A Alejandro, no podría nombrar otro ingeniero mejor para haber realizado este arduo trabajo de largos desvelos.*

---

## Alejandro

*A mi papá Alejandro, por su apoyo incondicional en todas las actividades que decidí hacer y por su constante sacrificio para que yo pudiera salir adelante.*

*A mi mamá Gabriela, quien siempre ha estado al pendiente de mí y de lo que necesito.*

*A mis hermanos David y Gabriela, por su constante apoyo.*

*A mis amigos dentro y fuera de la escuela, quienes han convertido estos momentos tan importantes en una experiencia más amena.*

*Al equipo Formula SAE, el cual nos brindó las herramientas y nos apoyó en todo momento durante el desarrollo de este proyecto.*

*A Diego, un ingeniero excepcional y gran amigo, quien me impulsó en todo momento y me ayudó a superarme día con día.*

**Parte II**  
**Glosario**

---

ECU	Unidad de control de motor por sus siglas en inglés <i>Engine Control Unit</i>
PMS	Punto muerto superior
PMI	Punto muerto inferior
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedad de ingenieros automotrices)
Crank	Del inglés <i>Crankshaft</i> , cigüeñal
Cam	Del inglés <i>Camshaft</i> , Árbol de Levas
MAP	Del inglés, <i>Mainfold Absolute Pressure</i> , presión en la cámara principal del múltiple de admisión
IAT	Del inglés, <i>Intake Air Temperature</i> , temperatura de admisión de aire
RPM	Revoluciones por minuto
ADC	Del inglés <i>Analog to Digital Converter</i> , convertidor analógico digital
TPU	Del inglés <i>Time Processing Unit</i> , unidad de proceso de tiempo
NI	National Instruments
CAN	<i>Controller Area Network</i>
EGO	Del inglés <i>Exhaust Gas Oxygen</i>

# Índice general

<b>I</b>	<b>Agradecimientos</b>	<b>I</b>
<b>II</b>	<b>Glosario</b>	<b>IV</b>
<b>1.</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1.	Formula SAE . . . . .	1
1.2.	Estado del Arte . . . . .	1
1.3.	Planteamiento del problema . . . . .	2
1.4.	Objetivo . . . . .	3
<b>2.</b>	<b>Antecedentes</b>	<b>4</b>
2.1.	Motor de combustión interna . . . . .	4
2.2.	Mezcla de combustible . . . . .	6
2.3.	Encendido de un motor de combustión . . . . .	7
2.4.	Tipos de inyección . . . . .	8
2.5.	Especificaciones del motor Yamaha YZFR6R . . . . .	9
2.6.	Control Electrónico . . . . .	10
2.6.1.	Computadoras en Sistemas de Control . . . . .	10
2.6.2.	Control del motor . . . . .	11
2.7.	ECU . . . . .	12
2.8.	Actuadores del motor . . . . .	12
2.8.1.	Inyectores . . . . .	12
2.8.2.	Bobinas . . . . .	13
2.8.3.	Relevadores . . . . .	13
2.9.	Sensores en un Motor de Combustión Interna . . . . .	14
2.10.	Sensores básicos para el análisis dinámico de un vehículo . . . . .	15
2.10.1.	Acelerómetro . . . . .	15
2.10.2.	Giroscopio . . . . .	16
2.10.3.	Desplazamiento de suspensión . . . . .	17
2.10.4.	RPM de llantas . . . . .	17
2.10.5.	Presión en línea de frenos . . . . .	17
2.10.6.	Sensores de interacción directa con piloto . . . . .	17
<b>3.</b>	<b>Variables a monitorear y controlar del vehículo</b>	<b>19</b>
3.1.	Descripción de la tarjeta de adquisición de datos . . . . .	19
3.2.	Adquisición de datos . . . . .	20
3.3.	Definición de variables a medir . . . . .	21



3.4.	Resolución y frecuencia . . . . .	23
3.5.	Relación mecánica <i>Crank</i> y <i>Cam</i> . . . . .	24
3.6.	Acondicionamiento de <i>Crank</i> . . . . .	26
3.7.	Acondicionamiento de salidas . . . . .	27
3.7.1.	Inyectores . . . . .	28
3.7.2.	Bobinas . . . . .	29
3.7.3.	Relevadores . . . . .	30
3.8.	Alimentación . . . . .	31
3.9.	Diagrama eléctrico . . . . .	34
<b>4.</b>	<b>Diseño de la ECU</b> . . . . .	<b>35</b>
4.1.	Diagramas de flujo . . . . .	35
4.2.	Procesamiento de señales <i>Crank</i> y <i>CAM</i> . . . . .	38
4.3.	Modos de operación . . . . .	38
4.4.	Tabla de tiempos de inyección . . . . .	39
4.5.	Tabla de avance de chispa . . . . .	40
4.6.	Comportamiento de inyectores y bobinas . . . . .	41
4.7.	Telemetría . . . . .	42
4.8.	Compensaciones . . . . .	43
4.9.	Tiempo de procesamiento . . . . .	44
<b>5.</b>	<b>Interfaz</b> . . . . .	<b>46</b>
5.1.	Interfaz de usuario . . . . .	46
5.1.1.	Inicialización . . . . .	47
5.1.2.	Procesamiento de datos . . . . .	47
5.1.3.	Telemetría . . . . .	48
5.1.4.	Visualización . . . . .	48
5.1.5.	Mapas . . . . .	49
5.1.6.	Interfaz de programación . . . . .	50
<b>6.</b>	<b>Manufactura e Implementación</b> . . . . .	<b>51</b>
6.1.	Implementación en UM467 . . . . .	51
6.1.1.	Comparativa <i>ECU</i> comercial . . . . .	53
6.2.	Pruebas en banco . . . . .	53
6.3.	Competencia . . . . .	55

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Formula SAE

Formula SAE es una competencia de diseño estudiantil organizada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE por sus siglas en inglés)<sup>1</sup>. El concepto detrás de Formula SAE es el de una empresa de manufactura que contacta a un grupo de diseño para desarrollar un pequeño vehículo estilo formula. El prototipo permite evaluar el potencial del equipo de producción, donde su mercado se compone de corredores no profesionales de fin de semana. Cada equipo de estudiantes diseña, construye y prueba el prototipo basado en una serie de reglas cuyo propósito es promover la resolución de problemas, siempre tomando en cuenta la seguridad de los estudiantes.

Al ser una competencia internacional, cuenta con nueve sedes a nivel mundial, las cuales se encuentran repartidas en ocho países: Alemania, Australia, Austria, Italia, Reino Unido, Brasil, Japón y dos en Estados Unidos (EEUU) donde participan más de 500 de las mejores universidades del mundo.

La competencia consta de dos tipos de pruebas: las estáticas y las dinámicas. En las primeras, se califica un análisis de costos, una presentación de negocios y una presentación de diseño; mientras tanto, en las dinámicas se evalúa el rendimiento del vehículo mediante varias pruebas que llevan al automóvil al límite de sus capacidades.

### 1.2. Estado del Arte

Actualmente existen diferentes marcas y tipos de Unidad de Control de Motor (*ECU*, por sus siglas en inglés) para vehículos de altas prestaciones. Estas computadoras se enfocan en el rendimiento en pista, por lo que el ahorro de combustible y las emisiones del motor no se toman en cuenta. En cuanto al control, se utilizan tablas para la inyección y la chispa, con la finalidad de que el usuario pueda determinar el comportamiento óptimo según las diferentes condiciones que se podrían presentar.

En los vehículos de altas prestaciones, el objetivo es reducir tiempos en cada vuelta que se da dentro de un circuito determinado. La realización de pruebas físicas constantes para mejorar el rendimiento de vehículos es demasiado costosa y genera desgaste, lo que altera el funcionamiento del vehículo. Para sustituir estas pruebas, nacen los sistemas de adquisición de datos, con los cuales se obtienen lecturas de variables esenciales del comportamiento general del coche.

---

<sup>1</sup> *Society of Automotive Engineers*

Las computadoras comerciales actuales cuentan con el control de motor y un sistema de adquisición de datos integrado. Éstas ofrecen cierto número de entradas y salidas, así como la flexibilidad para la modificación de parámetros según el precio y la marca. Asimismo, se fabrican de forma genérica para poder cubrir el mayor mercado posible con tan sólo un producto. En consecuencia, se puede controlar desde un motor de moto de uno o dos cilindros hasta uno grande de hasta ocho o diez cilindros según la *ECU*.

### 1.3. Planteamiento del problema

Actualmente el equipo cuenta con una *ECU* comercial la cual, debido al crecimiento del equipo y la necesidad de mejorar su diseño cada temporada, cuenta ya con algunas limitaciones. Entre las principales problemáticas se encuentran sus pocas entradas y salidas para la lectura de sensores y actuadores, una interfaz con muchas restricciones en cuanto a declaración y acondicionamiento de sensores para la adquisición de datos, así como una resolución y un tiempo de lectura ineficientes, además, de no poder utilizar modelos matemáticos para el control del motor.

En competencias anteriores se optó por implementar la adquisición de datos con una tarjeta *Single board RIO 9631* (sbRIO) de *National Instruments* y comunicar la *ECU* mediante un bus *Controller Area Network* (CAN). Al trabajar con un voltaje mayor al de la *ECU*, dicha tarjeta ocasionó que el sistema aumentara de peso debido al incremento de baterías para su alimentación.

Junto con la tarjeta de NI se implementó un sistema de telemetría cuyas variables fueron monitoreadas mediante una red Wi-Fi y se modificaron parámetros cuando era necesario. A diferencia de la tarjeta de NI, la *ECU* no permite siempre la modificación de variables, por la inconsistencia de la comunicación Ethernet.

Durante las pruebas dinámicas, el equipo puede modificar ciertas variables para obtener un mejor rendimiento en cada una de ellas. En el caso de la *ECU* comercial, la modificación de variables se reduce a lo que fue diseñada, por lo que limita las posibilidades del equipo en cuanto a parámetros preestablecidos dentro de la unidad.

Por lo tanto, es posible realizar las mismas funciones de la *ECU* y la adquisición de datos con una sbRIO. Así, es posible reducir el peso dentro del vehículo, dar una mayor flexibilidad de manejo a los parámetros de la *ECU* y la posibilidad de generar modelos de control dentro del vehículo, todo ello, considerando las variables dentro del mismo motor y de las variables dinámicas del vehículo en tiempo real.

## 1.4. Objetivo

◆ Diseñar e implementar una *Engine Control Unit (ECU)* para el control de un motor de combustión interna Yamaha YZFR6R, así como la instrumentación del vehículo mediante un sistema embebido en tiempo real junto con una interfaz gráfica para la visualización de las variables dinámicas.

### Objetivos secundarios

→ Utilizar una *single board RIO*™ montada en un vehículo de altas prestaciones para la competencia Formula SAE.

→ Realizar una interfaz gráfica para la manipulación, ajuste fino del motor y obtención de las variables que permitan encontrar puntos de mejora en la operación y diseño del vehículo.

## Capítulo 2

# Antecedentes

### 2.1. Motor de combustión interna

Dentro de todo vehículo motorizado, el motor se encarga de entregar toda la energía de movimiento a éste. Actualmente, se produce una gran variedad de motores. En el caso de los vehículos de competencia, el más utilizado hoy en día es el de combustión interna recíprocante, a gasolina de cuatro tiempos con ignición electrónica y enfriamiento líquido.

A pesar del rápido crecimiento tecnológico en el control de los motores, el funcionamiento mecánico se ha mantenido sin grandes cambios desde que éstos fueron inventados.

La operación de un motor de cuatro tiempos puede entenderse a partir de considerar las acciones en uno de los cilindros a lo largo de un ciclo completo del motor. Un ciclo entero en un motor de cuatro tiempos requiere dos vueltas completas del cigüeñal, donde cada etapa recibe un nombre:

- 1.-Admisión
- 2.-Compresión
- 3.-Expansión
- 4.-Escape

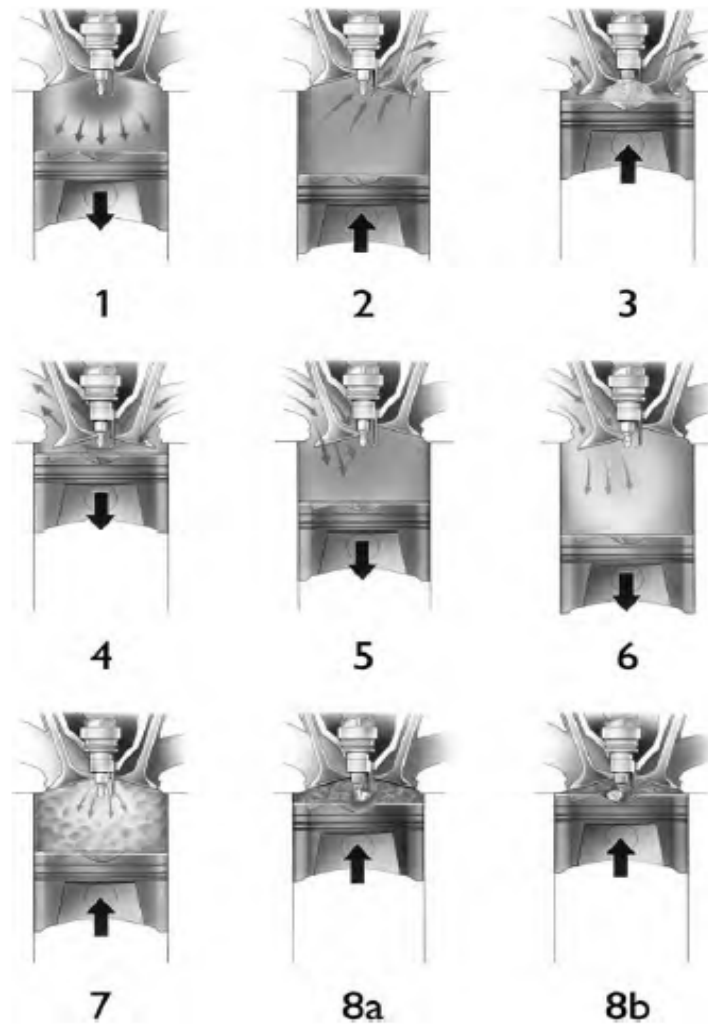


Figura 2.1: Cuatro tiempos del motor de combustión interna [2]

### Expansión

En la carrera de expansión, la alta presión generada por la combustión de la mezcla obliga al pistón a descender. Únicamente durante esta corrida el motor genera la potencia que puede ser aprovechada (Figura 2.1, ilustraciones 8b y 1).

### Escape

En la carrera de escape, el pistón se mueve nuevamente hacia arriba y la válvula de escape se abre, lo que obliga a los gases quemados a salir del cilindro a través del escape hacia la atmósfera (Figura 2.1, ilustración 2).

## Admisión

En la carrera de admisión, el pistón se mueve del PMS<sup>1</sup> al PMI<sup>2</sup>, mientras que la válvula de admisión se encuentra abierta. Cuando el pistón se mueve hacia abajo se genera una presión de vacío, la cual succiona la mezcla de aire-combustible desde el múltiple de admisión hacia el cilindro (véase figura 2.1, ilustraciones 3, 4, 5 y 6).

## Compresión

En la carrera de compresión, el pistón realiza un recorrido hacia el PMS, comprimiendo la mezcla aire-combustible contra la cabeza del cilindro. Cuando está cerca del PMS, el sistema de ignición genera una chispa eléctrica, esta combustiona la mezcla y genera un rápido aumento de presión dentro del cilindro. (véase figura 2.1, ilustraciones 7 y 8a).

## 2.2. Mezcla de combustible

El efecto que se produce al variar la mezcla aire-gasolina mientras se mantiene se muestra en la figura 2.2.

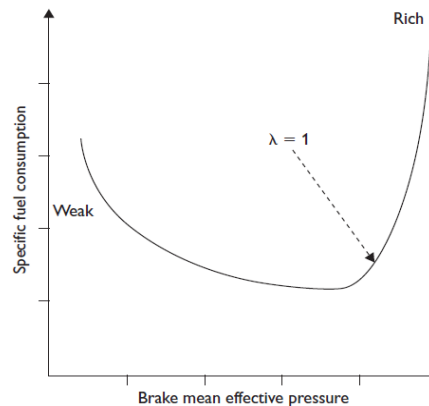


Figura 2.2: Efecto que se genera al variar una mezcla de aire combustible al mantener constante acelerador, velocidad del motor y tiempo de ignición [2]

Desde el punto de vista de la química, una mezcla estequiométrica correcta es 14,7 : 1 la cual se encuentra entre el rango de máxima potencia (12 : 1) y el consumo mínimo de gasolina (16 : 1), por lo que la relación estequiométrica de 14,7 es conocida como el valor de  $\lambda$  de 1, donde se puede observar en la figura 2.3 el cambio que produce en la potencia del motor un cambio en la mezcla aire-combustible. [2]

<sup>1</sup>Punto Muerto Superior

<sup>2</sup>Punto Muerto Inferior

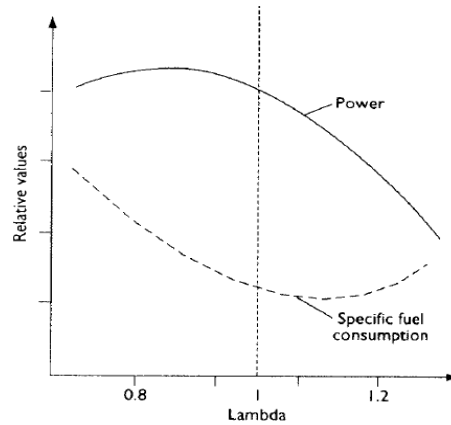


Figura 2.3: Comparación de la potencia del motor y consumo de gasolina, con cambios en relación aire-combustible [2]

### 2.3. Encendido de un motor de combustión

Un motor de combustión interna requiere de los siguientes criterios para poder encender y mantenerse en funcionamiento: [2]

- ◆ Mezcla de combustible
- ◆ Compresión en la cámara de combustión
- ◆ Una forma de ignición
- ◆ Una velocidad mínima de arranque (cerca de las 100[RPM])

Para poder producir los primeros tres efectos mencionados, se debe alcanzar la velocidad mínima de arranque. Aquí es donde el arrancador eléctrico entra para poder alcanzar la velocidad mínima, donde esta depende de diversos factores como:

- ◆ Una temperatura mínima para el arranque del motor, entre  $-18[^\circ C]$  y  $-25[^\circ C]$
- ◆ En los motores de cuatro cilindros, el par mínimo para iniciar el giro en el cigüeñal del motor es aproximadamente de  $8,0[Nm]$  por litro
- ◆ La caída que genera el arrancador en la batería

Al no poderse considerar la marcha como un componente aislado dentro del sistema eléctrico, se deben considerar otros elementos, tal como se puede ver en la figura 2.4, donde se observa que la batería es de gran importancia.



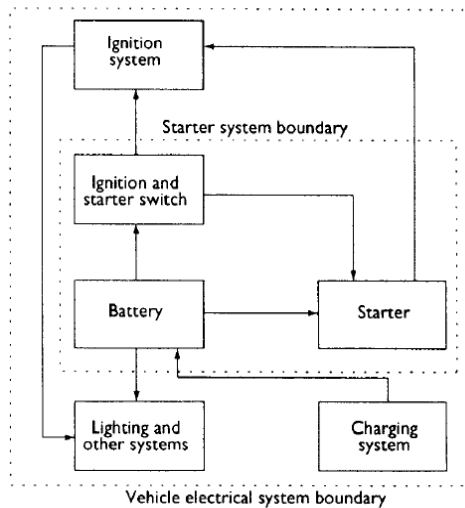


Figura 2.4: Sistema de arranque eléctrico [2]

## 2.4. Tipos de inyección

La tarea de un sistema de inyección es monitorear las variables del motor para transferirlas a la *ECU*, y que, a su vez, ésta atomice el combustible al sistema de admisión de aire. La posición donde se inyecte el aire afecta considerablemente el *performance* del motor, por lo que se clasifican en diferentes grupos. [7]

### Inyección Directa

En esta configuración los inyectores se posicionan en la cabeza del cilindro para que el combustible se descargue directamente en la cámara de combustión. En esta configuración, la inyección debe ocurrir cerca de los  $60^\circ$  después del PMS de la admisión. Debido a que un periodo menor de tiempo para la atomización del combustible con el aire entrante aumenta la turbulencia necesaria. Para compensar el menor tiempo permitido para la inyección, la presión en la línea de combustible debe ser mayor que en la de inyección indirecta, como se puede observar en la figura 2.5.

### Inyección Indirecta

El combustible se inyecta en el flujo de aire antes de entrar a la cámara de combustión. La atomización del combustible puede ser de un solo punto o *SPI*<sup>3</sup>. Usualmente se utiliza esta configuración cuando se encuentra encima de la válvula mariposa, o puede ser inyectada en múltiples puntos o *MPI*<sup>4</sup> donde los inyectores se posicionan en el múltiple de admisión justo enfrente de la admisión al motor, como se puede observar en la figura 2.5.

<sup>3</sup>Single-point injection

<sup>4</sup>multi-point injection

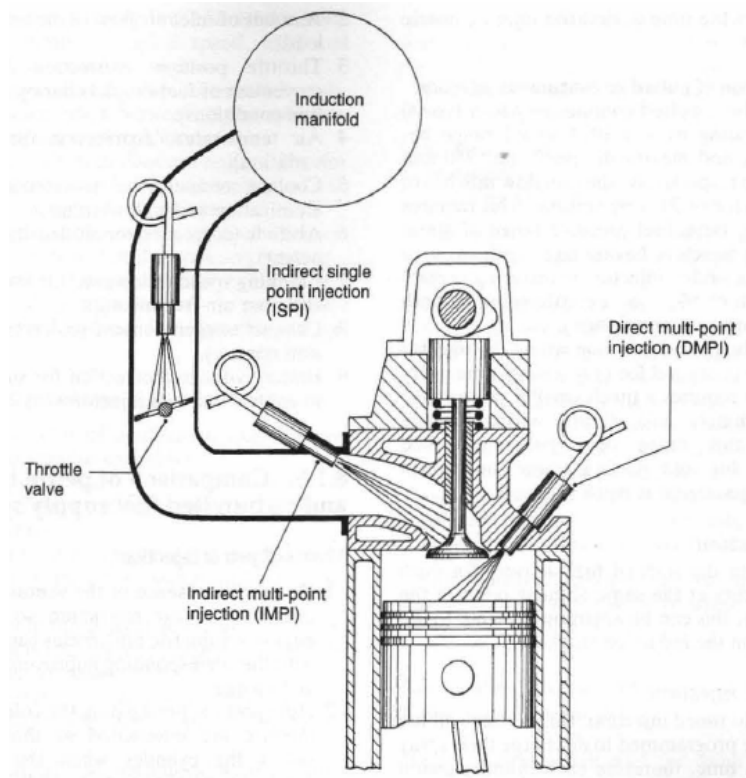


Figura 2.5: Clasificación de los tipos de inyección [7]

## 2.5. Especificaciones del motor Yamaha YZFR6R

Actualmente el equipo cuenta con un motor recíprocante normalmente aspirado, con configuración de encendido 1-2-4-3, lo cual hace referencia a la numeración en que los pistones actúan dentro del ciclo, con las siguientes características técnicas:

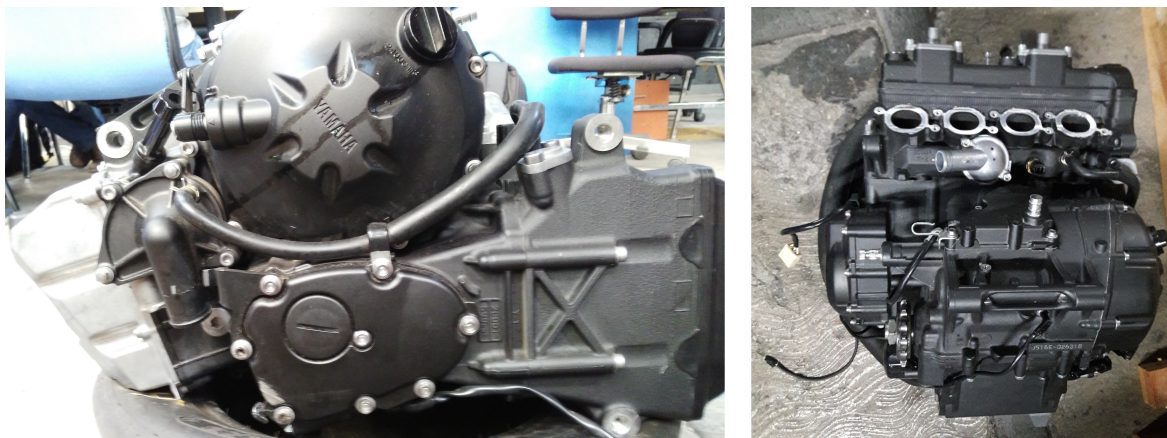


Figura 2.6: Fotografía del motor Yamaha YZFR6R

Tabla 2.1: Motor Yamaha YZFR6R

Yamaha YZF-R6R	
Tipo de motor	Enfriamiento líquido 4-Tiempos con doble árbol de levas
Desplazamiento	599 $cm^3$ (36.55 cu.in)
Arreglo de los cilindros	Inclinado hacia adelante en línea de 4 cilindros
Diámetro x Recorrido	67.0 x 42.5 mm
Relación de compresión	12.8:1
Presión de compresión estándar (a nivel del mar)	1550 $kPa$ a 400 $rev/min$
Sistema de encendido	Encendido eléctrico
Tiempo válvulas de admisión	
Apertura antes de punto muerto superior	39°
Cierre después del punto muerto inferior	65°
Duración	284°
Tiempo de válvulas de escape	
Apertura antes de punto muerto inferior	64°
Cierre después del punto muerto superior	24°
Duración	268°

## 2.6. Control Electrónico

En esta clase de motores, la electrónica nace por necesidad de regular las emisiones de escape y la economía de la gasolina. Hoy en día la electrónica y el control de los motores tienen mucho en común, ya que juegan un rol directo en el control de los sistemas de combustible, ignición y escape.

Con la evolución de los sistemas electrónicos, surgió la necesidad de instalar circuitos integrados de alto desempeño dentro de los automóviles. Así nació la electrónica de estado sólido.

Un sistema es un grupo de componentes que trabajan en conjunto para la realización de una tarea específica. Los sistemas electrónicos controlan, miden y comunican los diferentes componentes integrados dentro de un vehículo.

### 2.6.1. Computadoras en Sistemas de Control

#### Microprocesador

Los microprocesadores son capaces de realizar operaciones a grandes velocidades para la toma de decisiones en cuanto al control de los actuadores, éstos al no poder realizar procesos en paralelo se apoyan de otros procesadores o *PLD's*<sup>5</sup>. Usualmente se opta por los procesadores lógicos debido a la alta velocidad que

<sup>5</sup> *Programmable Logic Devices*

poseen.

Para un sistema que controla un motor de combustión interna, el accionamiento eficaz de salidas digitales es muy importante, dado que la velocidad a la que se trabaja es muy alta y un fallo puede dañar el motor.

### ***PLD's***

Como su nombre lo indica, los *PLD's* son dispositivos de lógica programable por lo que a diferencia de los microprocesadores, éstos no leen líneas de código, sino que su programación se quema directamente dentro del dispositivo por medio de fusibles electrónicos que realizan las operaciones de las compuertas lógicas. Esto otorga al dispositivo una velocidad mucho mayor que la del microprocesador, al no tener que interpretar las operaciones y, al mismo tiempo, es más fiable, con la desventaja de que sólo puede realizar operaciones básicas.

Por ello, los *PLD's* se encargan de las tareas críticas y de alta velocidad, mientras que los microprocesadores utilizan las señales para la tomar de decisiones e informar a los *PLD's*.

### **Sistema de control en Lazo Abierto**

En estos sistemas, la salida no afecta la acción de control. Esto quiere decir que la salida no se mide ni realimenta para comparar con la entrada que se tiene.

### **Sistema de control en Lazo Cerrado**

Son aquellos que poseen una realimentación. El controlador es alimentado con la señal de error de actuación. Éste error se calcula con la diferencia entre la señal de entrada y la de salida. Además, se realiza para reducir el error y llevar la salida a un valor deseado con el cual se necesita trabajar.

## **2.6.2. Control del motor**

El control del motor hace referencia a la potencia que éste produce en cualquier momento, en concordancia con las necesidades del piloto. Se controla la potencia del motor mediante el pedal del acelerador, el cual, al momento de accionarse, determina la posición de una válvula tipo mariposa mediante una conexión mecánica o electrónica. Esta es la encargada de mediar cuánto aire ingresa al múltiple de admisión durante cada tiempo de admisión, por lo que la potencia del motor es proporcional al flujo de aire que ingresa al motor, sin descuidar que la potencia del motor depende de una buena mezcla aire-combustible en buenas proporciones. Anteriormente, dicha función era realizada por el carburador, el cual hoy en día es obsoleto.

La electrónica en los motores de combustión interna nace por la necesidad de regular las emisiones de escape y la economía de la gasolina. Actualmente, la electrónica y el control de los motores tienen mucho en común, ya que juegan un rol directo en el control de los sistemas de combustible, ignición y escape.

## 2.7. ECU

En el presente, el equipo utiliza una *ECU*<sup>6</sup>, la cual, por medio de la inyección electrónica de gasolina, rige el comportamiento de la gran mayoría de los vehículos.

Usualmente la unidad de control incluye un microprocesador (interfaz de procesos, RAM/ROM, CPU, etc.) y al menos una pieza adicional de hardware, diseñado con una unidad de procesamiento de tiempo o TPU<sup>7</sup>, el cual es un *PLD* que sincroniza los comandos de control del motor con la acción recíproca del motor.

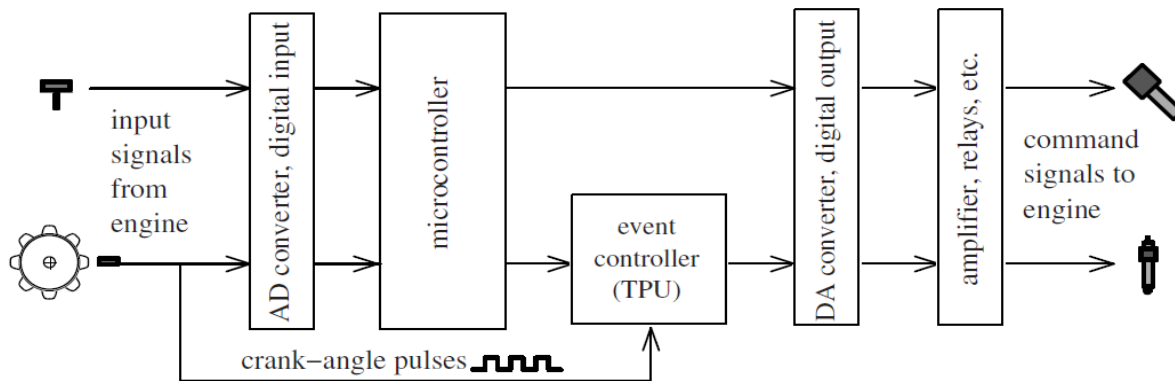


Figura 2.7: Estructura interna de una Unidad de Control de Motor [6]

## 2.8. Actuadores del motor

El mantenimiento de los cuatro tiempos dentro del motor requiere del cumplimiento de diversas condiciones, las cuales son generadas por una serie de actuadores. Los inyectores y las bobinas se encuentran entre los más importantes.

### 2.8.1. Inyectores

En los vehículos modernos, los inyectores electrónicos realizan la tarea que anteriormente correspondía al carburador. De acuerdo con el flujo de aire, éstos determinan la cantidad de gasolina que debe ser inyectada de tal manera que se minimice la contaminación de los gases de escape, se obtenga un mayor rendimiento o se adquiera la mayor potencia posible del motor, según sea el caso.

<sup>6</sup>UCM

<sup>7</sup>Time Processing Unit

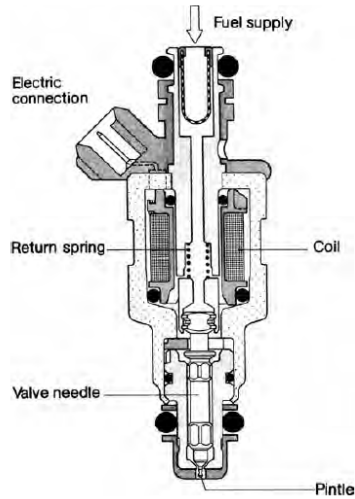


Figura 2.8: Diagrama Interno de un inyector [2]

### 2.8.2. Bobinas

En un motor de gasolina, la producción de potencia no solo requiere la mezcla correcta de aire- combustible, sino también, de algún medio de inicializar la combustión de la mezcla. El medio mas práctico consiste en generar una chispa eléctrica a través de un espacio entre dos electrodos de una bujía, donde se provee suficiente energía para causar la combustión, generando el fenómeno de ignición. Como se puede observar en la figura 2.9, la bujía se conecta directamente a la bobina para la descarga de la corriente.

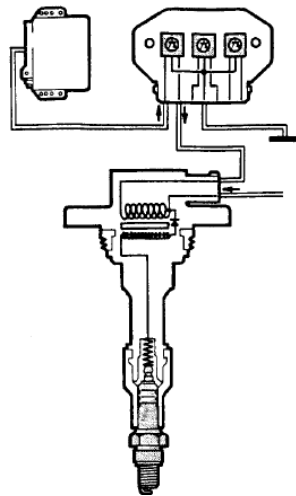


Figura 2.9: Diagrama de un sistema de ignición [2]

### 2.8.3. Relevadores

Un relevador es un switch electromagnético compuesto por una bobina y un contactor. Éste permite controlar señales de más alta corriente con una señal de control de baja corriente, sin necesidad de que interactúen

directamente. La mayoría de los sistemas eléctricos dentro de los automóviles son controlados con relevadores, ya que son relativamente de bajo costo y facilitan el mantenimiento.

## 2.9. Sensores en un Motor de Combustión Interna

### Sensor *Crank*

Este sensor es el encargado de leer la velocidad y posición del cigüeñal con ayuda de un encoder montado directamente a éste. Con ayuda del Crank, la *ECU* puede calcular ángulos y tiempos de inyección e ignición así como las RPM del motor. Puede ser de dos tipos: sensor de reluctancia variable o sensor de efecto *hall*, donde se obtiene una diferente señal de salida, tal como se observa en la figura 2.10.

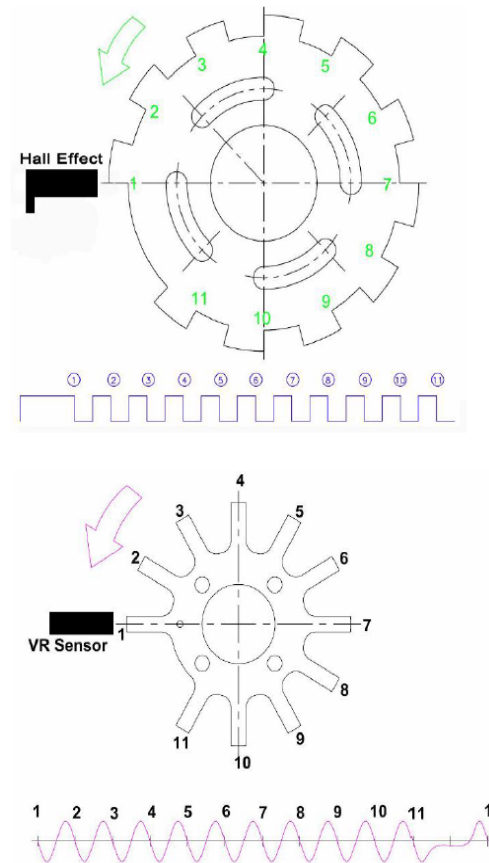


Figura 2.10: Salida de un sensor *Hall* vs Reluctancia variable [5]

### Sensor *Cam*

Es el sensor encargado de la lectura de la posición del árbol de levas. También conocido como el de sincronización, junto con el Crank ayuda a la *ECU* a determinar si el motor se encuentra sincronizado con el cigüeñal y el árbol de levas. Según configuración de cada fabricante, el número de dientes en el encoder varía. Existe una relación entre este sensor y el de posición del cigüeñal por lo que puede significar diferentes tiempos dentro del motor o el término del ciclo. El Cam puede ser de reluctancia variable o de efecto hall.

**Sensor MAP**

Este sensor se encarga de medir la presión dentro del múltiple de admisión. Funciona mediante una galga extensiométrica. Es regularmente utilizado como sensor de control o de carga con el cual trabaja la computadora para determinar los tiempos de inyección e ignición.

**Sensor TPS**

Es el sensor a cargo de medir la posición en la que se encuentra el acelerador. Está montado directamente a la entrada del múltiple de admisión justo detrás del filtro de aire. Este sensor está montado directamente a la válvula mariposa, la cual es accionada por medio del pedal de acelerador. También puede ser utilizado como sensor de control o carga, pero tiende a ser ineficiente puesto que la resolución y exactitud de éste es muy pobre, generalmente, de tipo resistivo rotativo.

**Sensor EGO**

Este sensor mide la cantidad de oxígeno a la salida del motor. Generalmente, está montado justo antes de la entrada al silenciador. Comúnmente, es denominado sensor lambda ya que es una medida indirecta de la relación de aire/combustible. Este sensor es uno de los más importantes en un vehículo de combustión interna ya que dicta si el sistema de control es de lazo cerrado o abierto para los inyectores.

Existen dos tipos de sensor *EGO*, los cuales se basan en el uso de óxidos activos de diferentes materiales, uno utiliza dióxido de circonio y el otro dióxido de titanio. El sensor que utiliza dióxido de circonio consiste en una sección cilíndrica de este material, con pequeños electrodos de platino en su interior y exterior. El electrodo interior está expuesto al aire y el exterior a los gases de escape. Esto genera una pequeña diferencia de potencial entre los platos, la cual se acondiciona antes de que la *ECU* la reciba.

**Sensor Knock**

Sirve para detectar vibraciones inusuales dentro de las cámaras de combustión generadas por una preignición. Al igual que el sensor *EGO*, éste dicta si se tiene un control de lazo cerrado o abierto para la ignición.

**2.10. Sensores básicos para el análisis dinámico de un vehículo****2.10.1. Acelerómetro**

El sensor se encarga de medir las aceleraciones en los tres ejes del vehículo, así como las vibraciones dentro de él. Esto permite conocer las cargas a las que se está sometiendo por su dinámica intrínseca de éste en todo momento, su funcionamiento es muy variado. La mayoría de estos sensores son de tipo capacitivo, su funcionamiento varía dependiendo de las condiciones a las que va a ser expuesto. Como se observa en la figura 2.11, su funcionamiento básico consiste en una pequeña masa móvil la cual genera un cambio en la capacitancia al acercarse o alejarse de los electrodos. Su capacidad se mide en  $[G]^8$ .

---

<sup>8</sup> Aceleración en SI =  $9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$



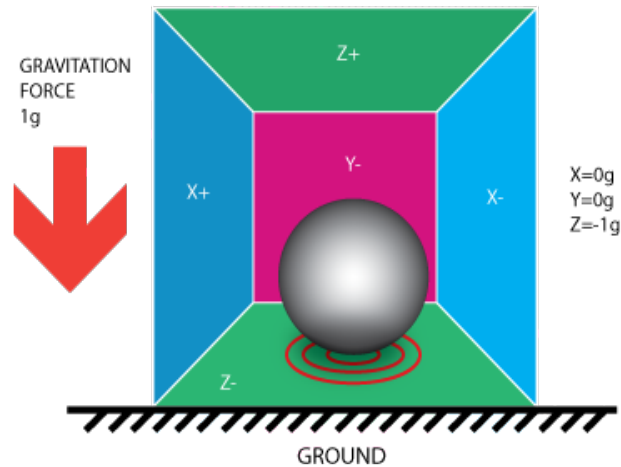


Figura 2.11: Funcionamiento básico de un acelerómetro capacitivo, <http://www.starlino.com/>

### 2.10.2. Giroscopio

Éste sensor mide los giros en los tres ejes del vehículo, lo que permite conocer las transferencias de masa que se presentan dentro del vehículo en movimiento. Su funcionamiento es similar al del acelerómetro, su capacidad se mide  $\left[\frac{o}{s}\right]^9$ .

#### Ejes coordenados SAE

SAE define los ejes coordenados y los ejes de giro para la estandarización de estos parámetros, donde las direcciones mantienen los nombres 'x', 'y' y 'z' mientras que los giros reciben el nombre de *Roll*, *Pitch* y *Yaw*.

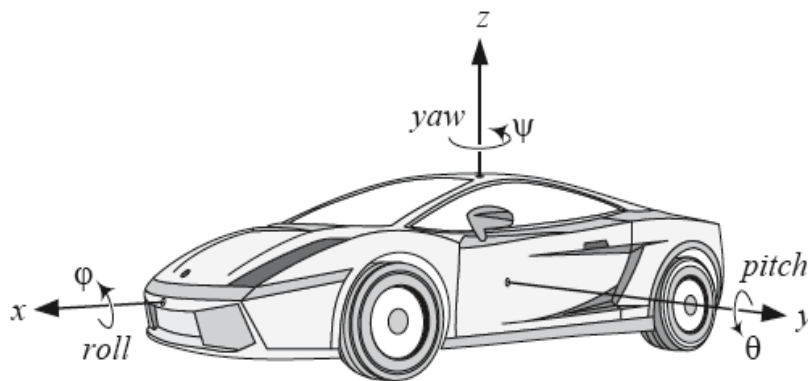


Figura 2.12: Ejes coordenados de un vehículo[4]

Cabe destacar que, de acuerdo con los ejes SAE, el eje coordenado 'z' está invertido, ya que debería apuntar hacia la parte inferior del vehículo. Ello se ilustra en la figura 2.12

<sup>9</sup>Grados sobre segundo

### 2.10.3. Desplazamiento de suspensión

La suspensión es uno de los elementos más importantes que rigen la dinámica del vehículo, debido a que se encarga de mantener en todo momento la llanta en contacto con el piso y transfiere las cargas del piso al vehículo. Su medición es de suma importancia si se quiere conocer la dinámica del auto.

Debido a que el desplazamiento de la suspensión es un movimiento lineal, su medición se realiza, ya sea utilizando un potenciómetro rotatorio en el eje del balancín o un potenciómetro lineal paralelo al resorte de la suspensión. De esta manera, se obtiene el desplazamiento y la frecuencia del movimiento.

### 2.10.4. RPM de llantas

Al ser un vehículo en movimiento uno de los parámetros más importantes es la velocidad a la que se encuentra en todo momento. La opción lógica es medirla directamente en las llantas, por lo que en ellas se implementa un *encoder*, junto con un sensor de efecto Hall, el cual permite conocer las revoluciones a las que está girando la llanta y la velocidad del vehículo, así como la tracción en todo momento de las cuatro llantas.

### 2.10.5. Presión en línea de frenos

Este sensor es usualmente de tipo piezoeléctrico. Ayuda a detectar las pérdidas en la línea de frenos, así como la fuerza que imprime el piloto al pedal de frenos. El sensor cuenta con una configuración similar a la mostrada en la figura 2.13, donde la presión actúa sobre el diafragma, generando un cambio de resistencia.

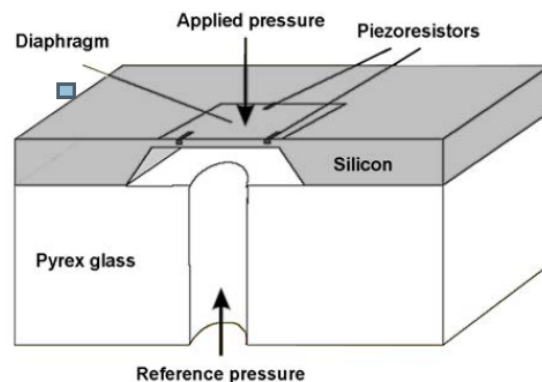


Figura 2.13: Diagrama de funcionamiento para un sensor de presión piezoeléctrico

### 2.10.6. Sensores de interacción directa con piloto

El comportamiento dentro de un vehículo no depende exclusivamente del sistema de tren motriz o del comportamiento dinámico que tenga, el piloto juega también un rol importante en el desempeño del vehículo por lo que resulta relevante el instrumentar los sensores de interacción directa entre el piloto y el vehículo.

### **Posición de pedales**

Debido a que ya se cuentan con sensores en la línea de frenos y en la válvula mariposa, es posible conocer la interacción que presentó el piloto con los pedales. Esto permite conocer el tiempo muerto en el cual el piloto no se encuentra presionando ningún pedal.

### **Posición de volante**

Al igual que el pedal de acelerador y freno, el volante influye en la dinámica del vehículo, por lo que requiere que el piloto ejecute cierto grado de fluidez para no ocasionar cargas que afecten al chasis. El volante le entrega al piloto cierta retroalimentación de lo que sucede en las llantas delanteras y provee una idea de cuánto agarre está disponible en el eje delantero. Por ello, es importante instrumentar el eje de dirección y tener un punto de comparación entre las señales medidas y el movimiento del vehículo.

## Capítulo 3

# Variables a monitorear y controlar del vehículo

En lo que respecta al *performance* dentro de las competencias de carreras, lo más importante es el tiempo. Todo se reduce a minimizar el tiempo de vueltas, o a cubrir la mayor distancia en el menor tiempo posible, por lo que una actividad que no es medida no puede ser controlada ni administrada. Este es un sistema que adquiere los datos del vehículo el cual los almacena a través de una memoria electrónica, grabando los parámetros definidos por el usuario en función del tiempo, donde la información puede ser descargada y analizada.

### 3.1. Descripción de la tarjeta de adquisición de datos

Debido a que la competencia de Formula SAE es cada año, el desarrollo de la *ECU* debía llevarse a cabo en este lapso de tiempo, por lo tanto una de las primeras consideraciones era la tarjeta a utilizar para el desarrollo de la *ECU*, ya que se necesita una tarjeta especializada con la capacidad de manejar una gran cantidad de señales tanto digitales como analógicas en tiempo real. Para ello, se eligió trabajar con la *sbRIO 9631*, ya que, a pesar de contar con un bajo peso, fácil accesibilidad y un factor de forma compacto, su fiabilidad en comparación con otro tipo de soluciones permite enfocar el trabajo al desarrollo de la *ECU*.

### 3.2. Adquisición de datos

La *sbRIO 9631* cuenta con la capacidad de leer los voltajes analógicos de tres maneras diferentes, *DMC*<sup>1</sup>, *RSE*<sup>2</sup> y *NRSE*<sup>3</sup>. Como se puede observar en la figura 3.1, lo que varía entre los tipos de medición es la referencia que toma como tierra. La *DMC* reduce en mayor medida el ruido en la lectura de los sensores debido a que no le afecta la variación de voltaje existente en las tierras, la razón por la cual no se implementa esta clase de conexión es debido a la gran cantidad de sensores dentro del vehículo, ya que por la conexión diferencial se necesitan dos entradas por sensor, una para el voltaje (*AI+*) y otra para la tierra (*AI-*).

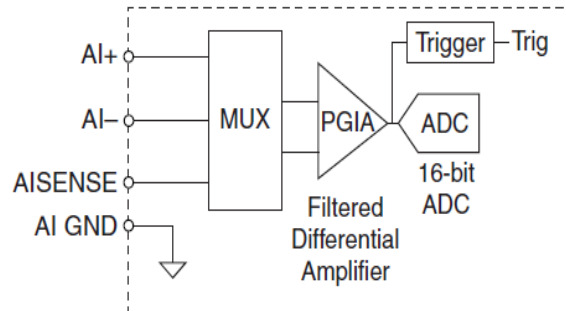


Figura 3.1: Circuito de entrada por un canal de señal analógica [3]

La *RSE* se utiliza cuando los sensores comparten la misma tierra. El sensor se conecta a cualquier (*AI*) y la tierra de los sensores se conecta con (*AI GND*). Este tipo de señal es la más ruidosa, ya que deben ser señales flotantes no referenciadas a tierra para no generar una diferencia de potencial entre la tierra física y la de los sensores.

Por ello, en el presente trabajo se optó por emplear la *NRSE*, ya que funciona similar a la *RSE* permitiendo utilizar las 32 entradas analógicas de la tarjeta, solo que esta reduce el ruido utilizando un amplificador operacional de ganancia programable *PGIA*<sup>4</sup> para la lectura de la tierra (*AISENSE*). La conexión se observa en la figura 3.2.

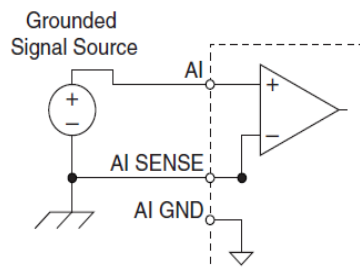


Figura 3.2: Circuito de conexión NRSE de la *sbRIO 9631* para una señal referenciada [3]

<sup>1</sup>Differential Measurement Configurations

<sup>2</sup>Referenced Single-Ended

<sup>3</sup>Non-Referenced, Single-Ended

<sup>4</sup>Programmable Gain Instrumentation Amplifier

La *sbRIO* realiza la lectura de las señales por medio del *FPGA*, por lo que se aprovecha la capacidad de éste de realizar procesos independientes en paralelo, entre los cuales uno es encargado de leer las señales analógicas que son relativamente mas lentas y otro encargado de realizar la lectura de los sensores digitales, eliminando el atraso en la señal ocasionado por los distintos tipos de señales. Gracias a las capacidades que ofrece la *sbRIO* programada mediante *LabVIEW* es posible realizar la simplificación de operaciones de tal manera que el ciclo completo de instrucciones se realice en un simple ciclo de reloj, siempre y cuando se realicen únicamente operaciones lógicas que no dependan de más de un ciclo, como las lecturas analógicas.

El fenómeno más rápido que ocurre dentro del vehículo es el del *Crank* a 13500[RPM], por lo que la frecuencia mínima de lectura se obtiene mediante el principio de aliasing.

$$13500 \left[ \frac{rev}{min} \right] \left( \frac{1}{60} \left[ \frac{min}{s} \right] \right) \left( \frac{48}{1} \left[ \frac{dientes}{rev} \right] \right) (2) = 21,6[kHz] \quad (3.1)$$

Mediante pruebas dentro de la *sbRIO* se observó que el periodo entre muestreo de señales analógicas tenía un lapso alrededor de los 300[μs], por lo que se obtuvo una frecuencia máxima de muestreo de 3,333[kHz], la cual no era suficiente para las lecturas que se deseaban obtener.

$$(300[\mu s])^{-1} \left( \frac{1}{1 \times 10^6} \left[ \frac{\mu s}{s} \right] \right) = 3,333[kHz] \quad (3.2)$$

Una vez conocida esta frecuencia de muestreo analógico, se busca que la *sbRIO* haga el muestreo de las señales digitales que no presentan las limitaciones de velocidad de las analógicas. Dentro de la programación, trabajar con señales digitales permite realizar el proceso de lectura y procesamiento en cada ciclo de reloj; al trabajar con una frecuencia del *FPGA* en modo síncrono con una frecuencia de 40[MHz], se garantiza que no se presente el fenómeno de *aliasing*, obteniendo una lectura correcta de los dientes y el periodo de la señal.

### **3.3. Definición de variables a medir**

Dentro de un vehículo existe una gran cantidad de variables que determinan el comportamiento general. Al ser un automóvil de altas prestaciones, existen ciertas prioridades en cuanto a sensores, por lo que se eligen ciertos parámetros a medir debido a su importancia para el funcionamiento y desempeño de este.

Los criterios de decisión para la elección de sensores se basan en factores como la seguridad, el funcionamiento óptimo motor, el análisis dinámico del vehículo e interacción del piloto con éste. A partir de las variables mencionadas anteriormente, en la tabla 3.1 se puede observar el criterio de selección que se realizó para el prototipo.

De los sensores mencionados en la tabla 3.1 once son analógicos, lo que genera un total de 19 señales, considerando cuatro potenciómetros lineales que se ubican uno por llanta, tres ejes por acelerómetro, tres por giroscopio y dos en la línea de frenos para la línea delantera y trasera, los cuales deben ser medidos en tiempo real.

Cuenta con dos sensores digitales, generando un total de cinco señales que deben de ser muestreadas a una velocidad mucho mayor que la analógica, ya que éstos son los que dictan las RPM de llantas y la posición en todo momento del motor. La lectura de estas señales debe contar con al menos un aliasing de dos, lo que implica que se debe leer al menos el doble de rápido de lo que ocurre el fenómeno para que no se pierda la lectura de los dientes dentro del motor, o se estime una velocidad errónea en las llantas.

Tabla 3.1: Tabla de elección de variables a medir para la ECU con capacidad en tiempo real

Sensor	Tipo de sensor	Variable a medir	Seguridad del piloto	Estándar	Análisis dinámico	Interacción piloto vehículo
<i>Crank</i>	Reluctancia variable	RPM cigüeñal		x		
<i>CAM</i>	Hall Efect	RPM arbol de levas		x		
<i>TPS</i>	Potenciómetro radial	Apertura válvula mariposa		x		x
MAP	Piezoeléctrico	Presión en el múltiple de admisión		x		
<i>IAT</i>	Termistor	Temperatura en el múltiple de admisión		x		
<i>EGO</i>	Químico	Cantidad de oxígeno a la salida del motor		x		
<i>Coolant temp</i>	Termistor	Temperatura del refrigerante en las líneas de refrigeración	x	x		
Acelerómetro	Capacitivo	Mide aceleraciones en los tres ejes del vehículo			x	
Giroscopio	Capacitivo	Mide los giros en los tres ejes del vehículo			x	
Desplazamiento suspensión	Potenciómetro lineal	Desplazamiento en la suspensión y frecuencia de oscilación			x	x
Velocidad de llantas	Inductivo	RPM en llantas			x	
Línea de frenos	Piezoeléctrico	Presión en la línea de frenos	x			x
Volante	Potenciómetro radial	Angulo del volante			x	x

### 3.4. Resolución y frecuencia

Debido a que se trabaja con un microprocesador, el cual funciona con base en señales digitales, las analógicas deben de pasar por un convertidor Analógico a Digital o *ADC*<sup>5</sup>. La *sbRIO* cuenta con uno de 16 bits de  $\pm 10[V]$ ,  $\pm 5[V]$ ,  $\pm 1[V]$  y  $\pm 0,2[V]$  con la capacidad de hacer  $250[kS/s]$ , permitiendo un total de  $2^{16}$  valores de lectura mínima donde al leer en el rango de  $\pm 10$  variaciones de voltaje hasta de  $0,00030517578125[V]$ , se obtiene una exactitud de lectura de hasta  $0,03052[\%]$ .

$$R_s = \frac{10[V] - (-10[V])}{2^{16}} = 0,00030517578125[V] \quad (3.3)$$

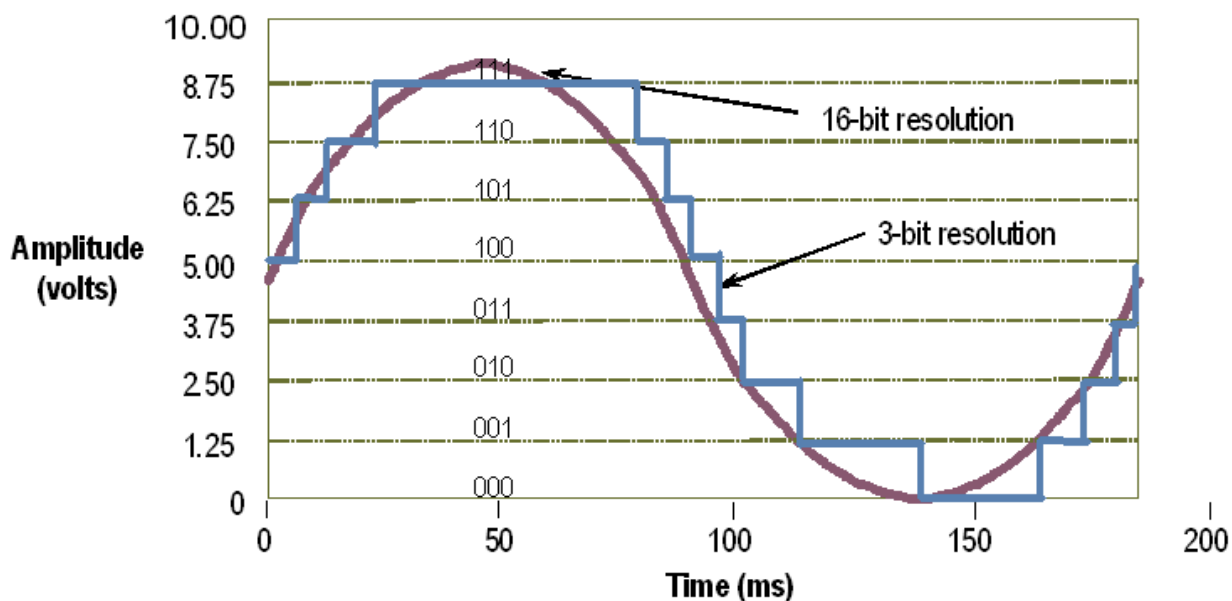


Figura 3.3: Señal sinusoidal de  $5[kHz]$  muestreada por un *ADC* de 3 bit vs 16 bit, [www.ni.com](http://www.ni.com).

En la figura 3.3 se muestra la pérdida de información que ocurre al digitalizar una señal analógica por medio de un *ADC*.

Para evitar el *aliasing*, el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon dice que la frecuencia a la que una señal debe ser medida debe ser más del doble que la mayor frecuencia encontrada en la señal. Esto significa que para digitalizar una señal sinusoidal con una frecuencia de  $20[Hz]$ , el muestreo debe ser al menos de  $40[Hz]$ .

<sup>5</sup>Analog to Digital Converter



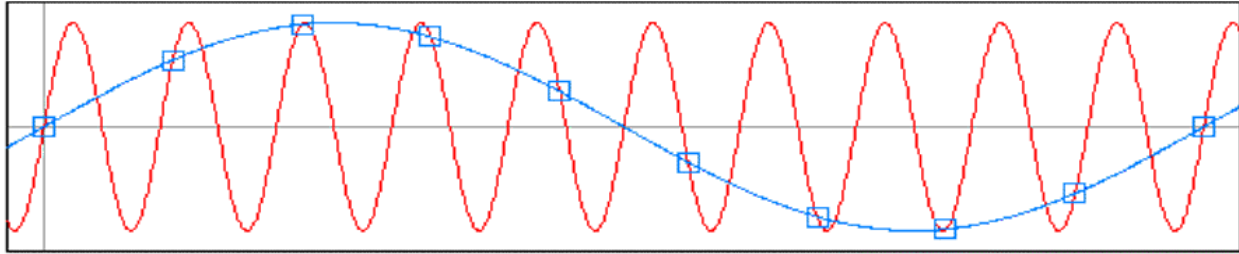


Figura 3.4: Fenómeno de Aliasing presente en una señal sinusoidal[10]

Una frecuencia de muestreo demasiado baja no registra eventos importantes. La mayoría de los sistemas permiten modificar las frecuencias de muestreo de acuerdo a sus necesidades. Un tiempo de muestreo bajo aumenta la exactitud, pero requiere una mayor cantidad de memoria, disminuyendo la capacidad de almacenamiento de datos. Por lo que se recomiendan los siguientes tiempos de muestreo como guía[10].

- ◆ Temperatura de fluidos  $1 - 5 [Hz]$
- ◆ Presión de fluidos  $10 [Hz]$
- ◆ Comportamiento del piloto  $50 [Hz]$
- ◆ Movimientos y cargas de suspensión  $200 - 500 [Hz]$
- ◆ Posición de GPS  $5 - 20 [Hz]$

En este proyecto se eligió una frecuencia de muestreo de  $100 [Hz]$ , ya que este tiempo de muestreo permite un comportamiento estable dentro de la *sbRIO* además de almacenar suficiente información durante la prueba más larga de *endurance* ( $22 [km]$ ). A pesar de que se muestrea a una velocidad más lenta que la recomendada para suspensión, el fenómeno de interés a estudiar es el de baja frecuencia ya que éste nos entrega la información de transferencia de masa mientras que el de alta frecuencia, como el mencionado anteriormente, entrega las irregularidades de la pista.

### 3.5. Relación mecánica *Crank* y *Cam*

El motor cuenta con dos elementos para indicar en todo momento la posición en la que se encuentra para que la *ECU* pueda determinar en qué parte del ciclo se encuentra el motor, siendo el primero un encoder acoplado al eje del *crank* y el segundo al *cam*.

El *encoder* del *crank* como se observa en la figura 3.5 cuenta con un diente más largo que los demás para indicar las revoluciones a las que gira, mientras que el del *cam*, figura 3.6, indica el final del ciclo del motor. Por ello, debe haber siempre una relación mecánica entre ambos movimientos para conocer que acción debe de realizar la *ECU* para el control del motor, ya que no se puede controlar un motor correctamente sin la información de ambos elementos.

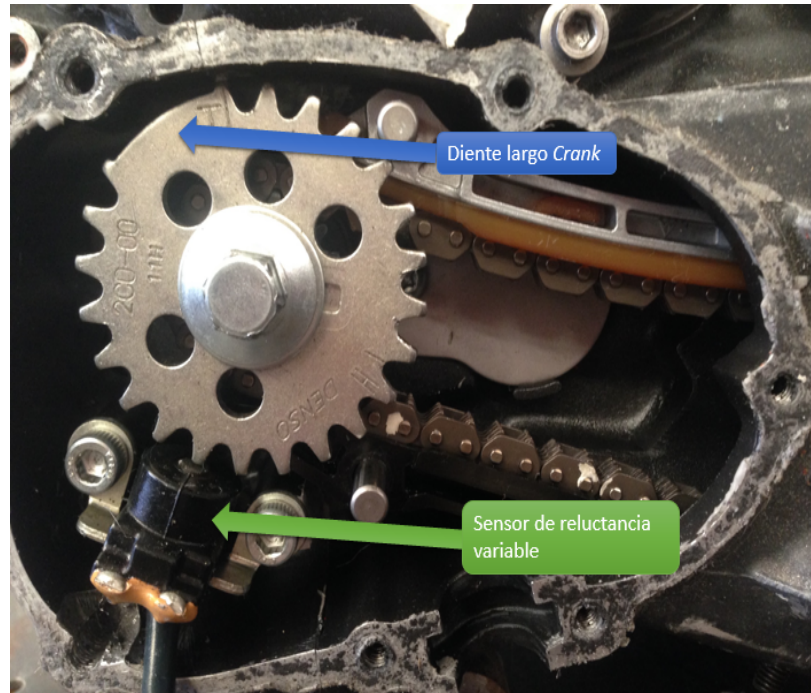


Figura 3.5: Fotografía de encoder del *crank* ensamblado en el cigüeñal del motor Yamaha YZFR6R

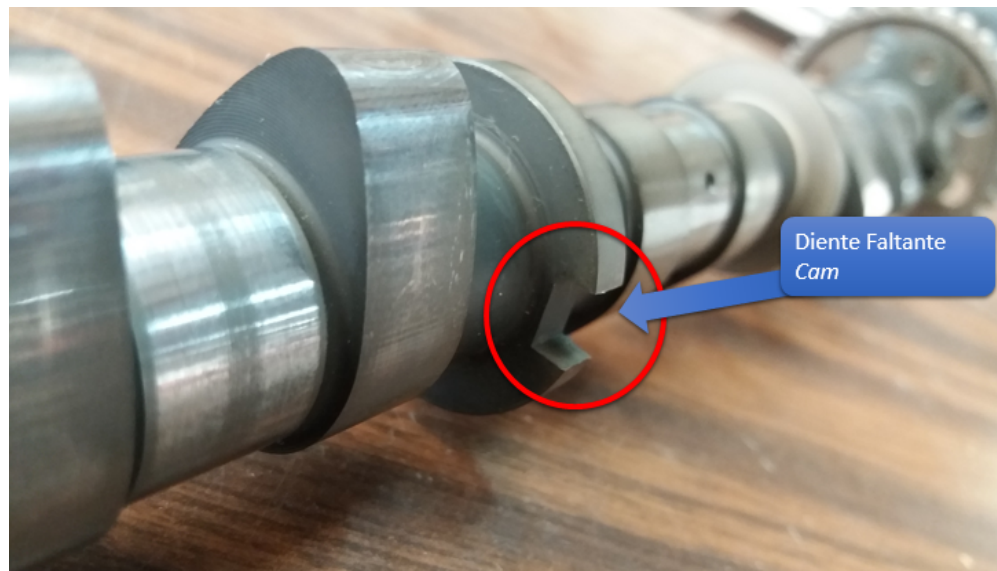


Figura 3.6: Fotografía del diente faltante en el arbol de levas del motor Yamaha YZFR6R

Existen diversas configuraciones de la relación entre ambos elementos, dependiendo del motor con el que se trabaje, ya que cada configuración se interpreta de manera distinta para el propio manejo del motor.

Gracias a la combinación de ambas señales, la *ECU* puede saber en qué momento actuar donde el *crank* se usa para conocer cuándo los pistones se encuentren en PMS, en cuál debe inyectar la gasolina para la admisión y dónde debe de arrojar la chispa para la expansión, mientras tanto, el de *cam* se utiliza para indicar el término del ciclo. Ambas señales son las más importantes al momento de controlar un motor, donde

el salto de lectura de un sólo diente puede ocasionar una mala interpretación de la *ECU* ocasionando que trabaje desfasado entre lo que realmente está ocurriendo dentro del motor y lo que la *ECU* cree que ocurre, por ello, a la señal del *cam* se le conoce como señal de sincronización, ya que si la *ECU* no recibe esta señal en el momento exacto, reconoce que no se encuentra sincronizado mecánicamente el motor por lo que no realiza acción alguna para no dañarlo.

En la figura 3.7 que el *crank*, al estar en el cigüeñal, realiza dos vueltas enteras para la realización de un sólo ciclo, mientras que el *cam*, al estar acoplado al árbol de levas sólo da una revolución. De esta manera, la *ECU* puede estar al tanto de la posición en la que se debe encontrar cada pistón.

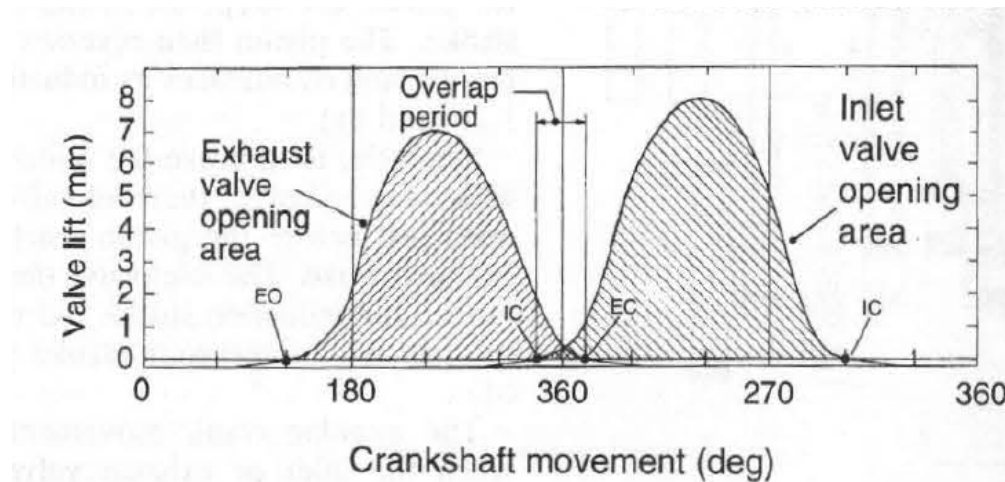


Figura 3.7: Operación de válvulas contra ángulo del crank

### 3.6. Acondicionamiento de *Crank*

Como se mencionó previamente, el encargado de medir las revoluciones del *Crank* dentro del motor Yamaha YZF R6R es el sensor de reluctancia variable, el cual es de tipo analógico. Este sensor genera una señal sinusoidal por lo que su lectura dentro de la *sbRIO* no cumple el fenómeno de aliasing definido anteriormente debido al tiempo que le toma a la *sbRIO* leer esta clase de señales. Es por eso que se realiza un acondicionamiento a la señal antes de ser leída, donde la señal sinusoidal se transforma en un tren de pulsos digital, permitiendo considerarla como una entrada digital en lugar de una analógica.

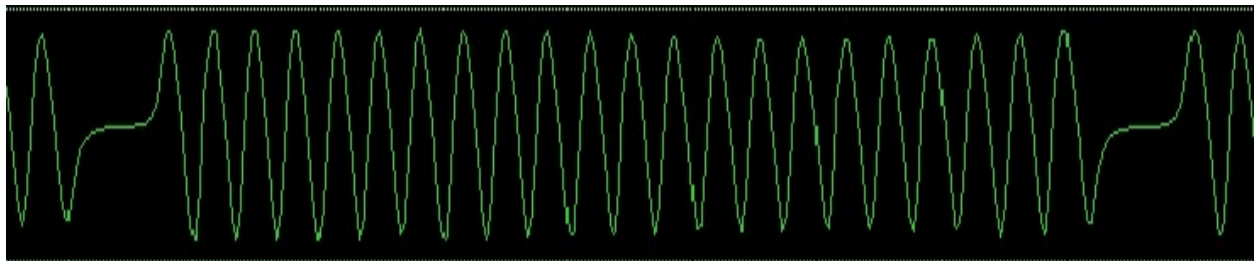


Figura 3.8: Señal de sensor crank obtenida con el software *Performance Electronics*

En la figura 3.8 se observa que la señal obtenida va de 12 a -12 volts con una cresta más amplia la cual es generada por el diente largo. Para el acondicionamiento de este sensor, se aprovecha que es una señal de punto flotante, ya que a ella se puede utilizar un amplificador operacional en configuración diferencial. Este se satura a 5[V] para que la señal de salida sea un tren de pulsos.

Se eligió un amplificador operacional LM358. Esta decisión se tomó ya que se necesitaba uno de bajo costo, que funcionara a la frecuencia máxima de nuestro crank  $10,8[kHz]$ <sup>6</sup> y aceptara alimentación de 5[V] para la saturación. Al ser un amplificador operacional de propósito general, la configuración diferencial se tiene que hacer con resistencias. Se eligieron los valores de  $1[M\Omega]$  y  $100[\Omega]$  ya que se buscó una ganancia infinita pero sin comprometer el voltaje debido a la corriente.

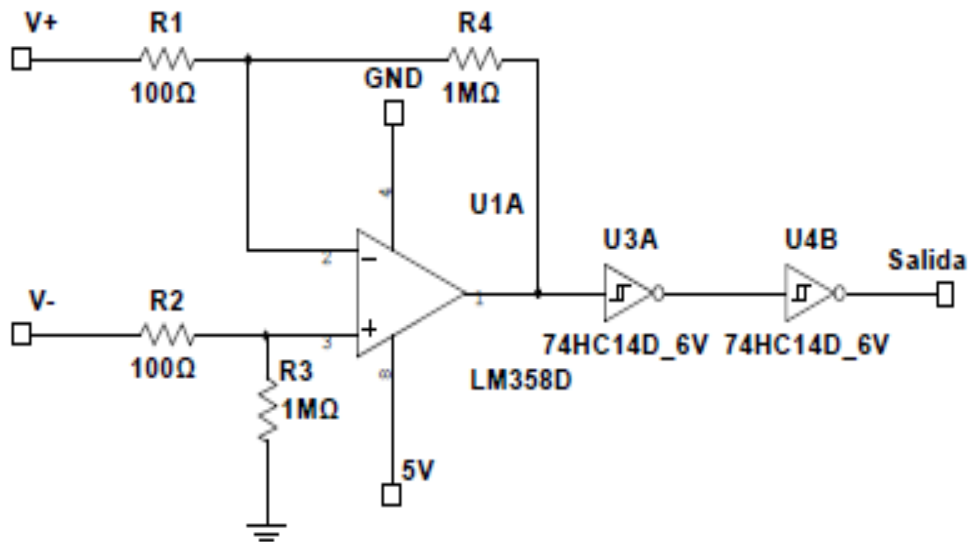


Figura 3.9: Circuito de acondicionamiento de señal del *crank*

### 3.7. Acondicionamiento de salidas

Los cuatro conectores de 50 pines con los que cuenta la *sbRIO*, tienen la capacidad de proveer la conexión de 110 DIO<sup>7</sup> y ocho salidas a +5[V], con una configuración como se muestra en la imagen 3.10.

<sup>6</sup>De la eq. (3.1) sin el factor de aliasing

<sup>7</sup>Digital Input Output

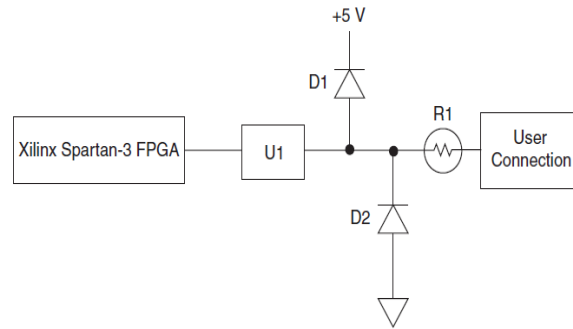


Figura 3.10: Circuito de entrada-salida para un canal de señal digital [3]

Como se muestra en la imagen 3.10 el *FPGA*<sup>8</sup> es el encargado de entregar las señales de salida, por lo que cada canal tiene la capacidad de entregar hasta  $3[mA]$ , por ello, es necesario un acondicionamiento de las salidas para el control de los actuadores.

Dentro de un motor de combustión es necesario activar y desactivar los inyectores junto con las bobinas en el momento óptimo del ciclo, por lo que se requiere una solución fiable y con un tiempo de respuesta bajo. Para esta configuración se descartó el uso de relevadores mecánicos debido al alto tiempo de reacción con el que trabajan estos dispositivos y su ciclo de vida al estar sometido a conmutaciones continuas. Existen controladores especializados para que las *ECU* comerciales realicen esta tarea en específico.

### Tipos de inyectores

Existen diferentes tipos de inyectores en la industria automotriz, los cuales se pueden clasificar según la impedancia interna de la bobina:

- ◆ Saturados: también se les denomina de alta impedancia la cual es mayor a  $10[\Omega]$ . No necesitan acondicionamiento ya que la corriente que consumen es muy baja y se pueden controlar simplemente cerrando el circuito a  $12[V]$ .
- ◆ *Peak and Hold*: este tipo de inyectores se caracteriza por su baja impedancia, la cual es menor a  $3[\Omega]$ . Estos son más difíciles de controlar, ya que requieren un pico de corriente de aproximadamente  $4[A]$  para abrir y después reducir la corriente para mantenerlo sin dañarlo.

#### 3.7.1. Inyectores

Para el control de inyectores, se utilizó un LM1949. Este integrado trabaja en el rango de 3 a 5.5 volts. Su voltaje de activación es de 1.4 volts y la corriente que consume es de máximo  $25[\mu A]$ . Este controlador está diseñado para controlar un transistor darlington NPN. Como la corriente para accionar un solenoide es mucho mayor que la que se necesita para mantenerlo, el controlador se satura hasta que la corriente pico del inyector es cuatro veces la corriente para mantenerlo. Con se garantizó que el inyector se activara sin problemas. Gracias a esta configuración, se pueden controlar los dos tipos de inyectores mencionados anteriormente lo cual nos da una amplia gama de inyectores que se pueden utilizar.

<sup>8</sup>Field Programmable Gate Arrays

El transistor que se utiliza para controlar IRF530 es un MOSFET de alto voltaje con una capacidad de disipar  $50[W]$  y una corriente máxima continua de  $14[A]$ . Se utiliza un diodo zener en paralelo con el transistor para descargar la bobina del inyector cuando no está accionado.

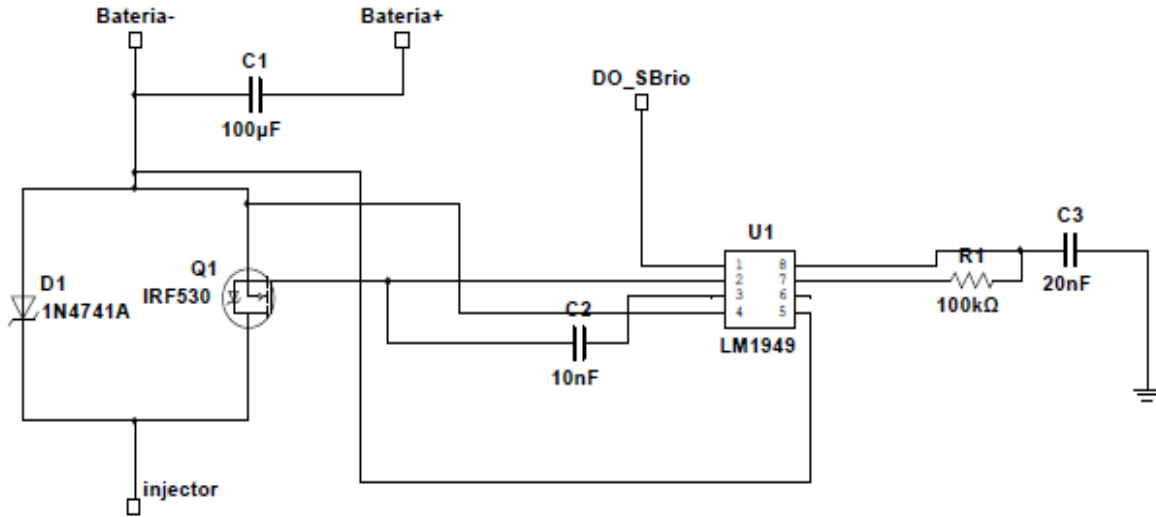


Figura 3.11: Circuito de acondicionamiento para el control de cada uno de los inyectores

### 3.7.2. Bobinas

Para controlar las bobinas, se decidió utilizar un transistor ISL9V3040 de tipo IGBT. Éste tiene una capacidad máxima de  $400[V]$  y una corriente continua de  $21[A]$ . En comparación con el IRF530, la corriente necesaria para saturar la base es muy pequeña, y el voltaje está en el intervalo de 1.3 a 2.2 volts, por lo que no necesita de un controlador externo para poder controlarlo. Esto permite conectar directamente la base a la salida digital de la *sBRIO*.

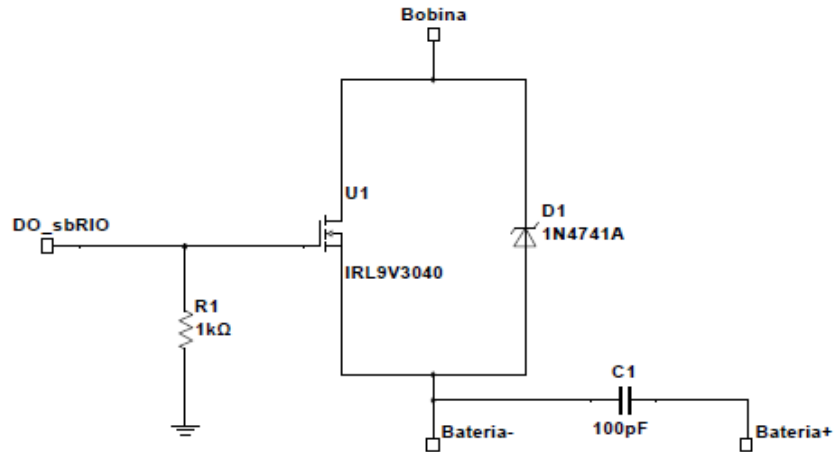


Figura 3.12: Circuito de acondicionamiento para el control de cada una de las bobinas

### 3.7.3. Relevadores

Para un control óptimo del motor, se necesitan ciertos componentes periféricos que igualmente deben activarse mediante la computadora. Para fines del proyecto, se tienen cinco elementos extras que necesitan activarse: bomba de gasolina, ventilador, luz de freno y el sistema de cambios semiautomáticos. Todos estos sistemas funcionan a 12[V] y requieren de altos consumos de corriente para funcionar.

Para controlar estos dispositivos periféricos, se utilizan relevadores a 12[V], por lo cual se necesita un circuito de potencia intermedio para su accionamiento mediante la *sbRIO*. Para este caso se utilizaron microrelevadores de la marca *TE connectivity* con picos de corriente de hasta 70[A] por intervalos de tiempo muy pequeños. La corriente de activación de la bobina es de 150[*mA*].

El circuito de potencia estuvo constituido por un transistor BC337 de tipo NPN y una resistencia en la base de este para limitar la corriente que entrega nuestro controlador.

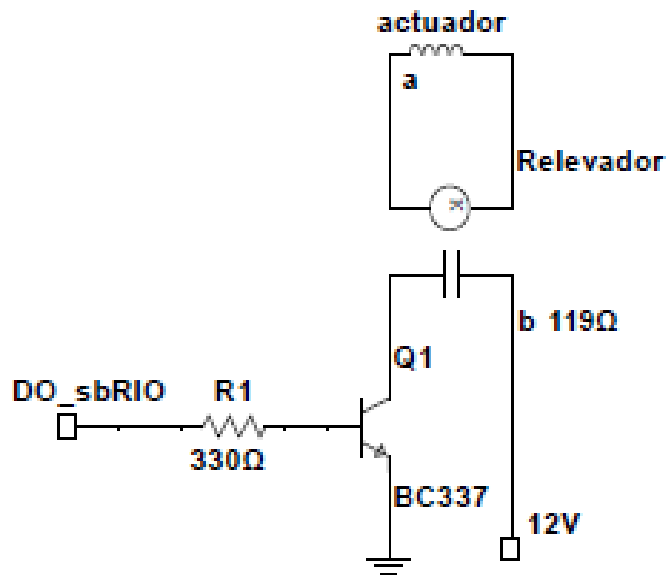


Figura 3.13: Circuito de acondicionamiento para el control de componentes externos a 12[V]

### 3.8. Alimentación

La *sbRIO* funciona en un rango de 19 a 30[V]. Dado el alternador dentro del motor y los actuadores utilizados, se requiere una batería a 12[V] para la alimentación de éstos. Se buscó una forma sencilla de elevar el voltaje para la alimentación de la *sbRIO* sin aumentar el número de baterías.

Se eligió un convertidor DC-DC con una potencia de 150[W]. Éste tiene la capacidad de elevar el voltaje. Otra de las ventajas de utilizar dicho componente es que sirve como un filtro para estabilizar el voltaje, evitando la variación generada por el alternador cuando carga la batería.



Figura 3.14: Circuito convertidor DC-DC para elevar el voltaje de 12[V] a 24[V]

Debido al espacio dentro del vehículo y al tipo de manufactura para los circuitos, el acondicionamiento se separó en dos PCBs. El primero contiene todo lo relacionado con los sensores para la parte dinámica así co-



mo la protección y alimentación de la *sbRIO*. Este circuito es alimentado mediante el convertidor DC-DC, donde a la salida se tienen 24[V]. Para simplificar la forma de alimentación de este, se optó por utilizar los 24[V] de que la *sbRIO* y con ayuda de reguladores de voltaje, alimentar todos los sensores para la dinámica del vehículo.

Dado que el sistema completo funcionando con todos los sensores, *sbRIO* y red Wi-Fi, consume al rededor de 600[mA], la potencia que entrega el convertidor DC-DC es suficiente.

La selección de sensores se basa en su resolución y exactitud, por lo que el voltaje de alimentación es diferente dependiendo de cada uno. Para los potenciómetros lineales y el potenciómetro radial, se tomo un voltaje de referencia de 10[V] ya que el desplazamiento de éstos es muy pequeño, en consecuencia al tener un voltaje mayor se presenta mayor variación. Los sensores inductivos funcionan en un rango de 10[V] a 30[V] y su voltaje de salida depende del de alimentación. Se decidió alimentarlos a 10[V] para utilizar el mismo regulador, ya que la señal, independientemente del voltaje al que éste, se tiene que reducir hasta 5[V] para las entradas digitales de la *sbRIO*.

Para los sensores de presión de frenos, su máximo voltaje de alimentación es de 5[V]. Dadas estas condiciones se incluyó un regulador de este voltaje. Como el acelerómetro y el giroscopio pueden funcionar desde los 5[V] hasta 16[V] y la salida siempre será constante sin importar la alimentación, se decidió utilizar el regulador de los sensores de presión de frenos.

Con esta configuración de alimentación para sensores, se utilizaron solamente dos voltajes para todos. Se optó por implementar los reguladores de voltaje positivo LM7805 y LM7810, ya que el consumo de corriente fue menor a 1[A] en cada uno de estos. Para la implementación de éstos, se utilizo una configuración con un capacitor de 100[μF] a la entrada para evitar la caída de voltaje, y una capacitor de 1[μF] a la salida.

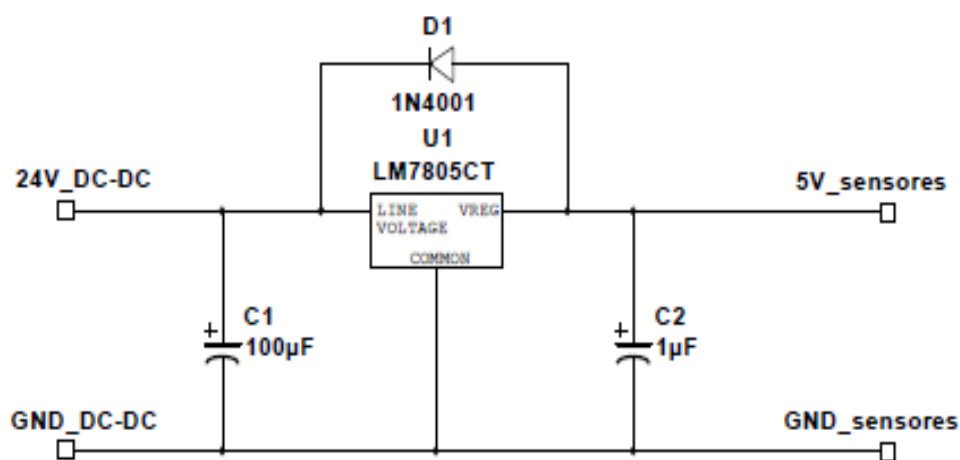


Figura 3.15: Circuito basico para un regulador de votaje

El segundo PCB contiene todo lo relacionado con el control de motor. Esto incluye los ocho circuitos para el control de bobinas e inyectores, así como la alimentación de *CAM*, *MAP* y amplificadores operacionales LM1949 y el voltaje de referencia para *TPS*. Este circuito también incluye la conexión entre ambos PCBs, ya que la *sBRIO* únicamente cuenta con un módulo de entradas análogas. El conector de la *sBRIO* de 50 pines va directamente conectado al circuito de adquisición de datos. Con ayuda de un conector de diez pines para cable plano, se conectó el circuito de control de motor al de adquisición de datos para poder leer las señales análogas de los sensores del motor.

El rango de alimentación para los amplificadores operacionales LM1949 va desde los 3[V], hasta los 5,5[V]. La alimentación de *CAM* y *MAP* es de 5[V] para todos los diferentes sensores utilizados en la industria automotriz. Dadas estas condiciones, se decidió utilizar un regulador de voltaje positivo LM7805 a 5[V] Para satisfacer las necesidades de alimentación únicamente con un solo componente. En esta PCB, también se incluyó el acondicionamiento de las salidas digitales para el control de los relevadores.

### 3.9. Diagrama eléctrico

El diagrama general se realizó a partir de la configuración de todos los sistemas eléctricos dentro del vehículo.

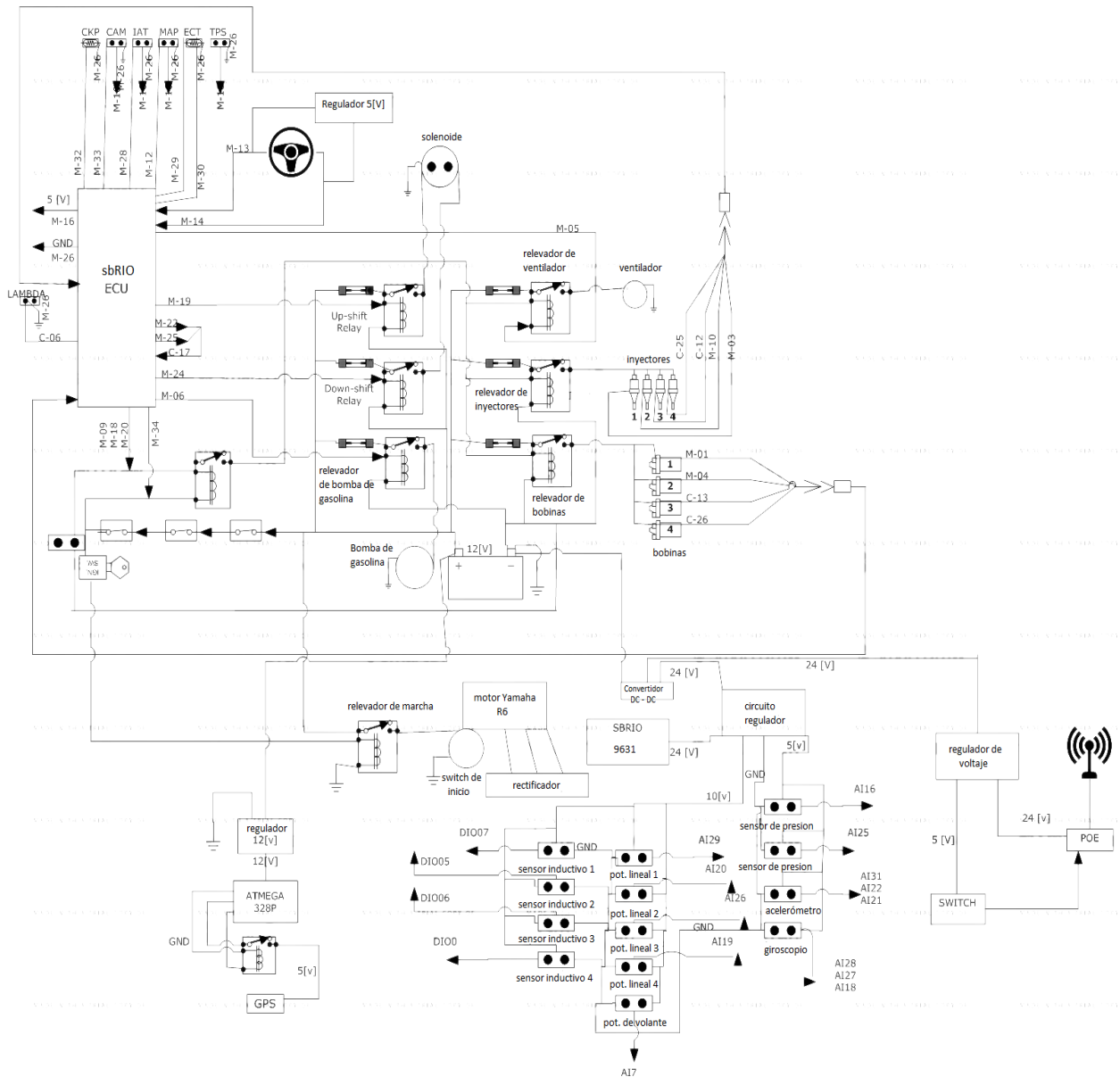


Figura 3.16: Circuito general

## Capítulo 4

# Diseño de la ECU

La función principal de las ECU es garantizar un tiempo de inyección de combustible en el ángulo de *crank* deseado y tener una ignición de esta mezcla en el punto donde la combustión sea lo más eficiente dentro del cilindro, para obtener la mayor potencia del motor en todos sus rangos de RPM. Estas condiciones están dadas por el ángulo del cigueñal.

### 4.1. Diagramas de flujo

A continuación en las figuras 4.1 y 4.2 se presentan los diagrama de flujo que se programaron dentro de la *sbRIO 9631*, donde se puede observar que el *FPGA* se utiliza para procesos críticos en paralelo de alta velocidad, donde la lectura y escritura de datos debe ser de alta fiabilidad, mientras que el procesador en tiempo real es capaz de realizar operaciones de mayor complejidad, donde el tiempo sigue siendo un factor importante, sin embargo, un retraso en los ciclos no llega a ser fatal para el funcionamiento de la *ECU*.

En consecuencia, a partir del *FPGA* se realizan las tareas de inyección y chispa así como la lectura de los sensores, mientras que el procesador en tiempo real es el encargado de procesar la información para determinar los tiempos necesarios para su funcionamiento.

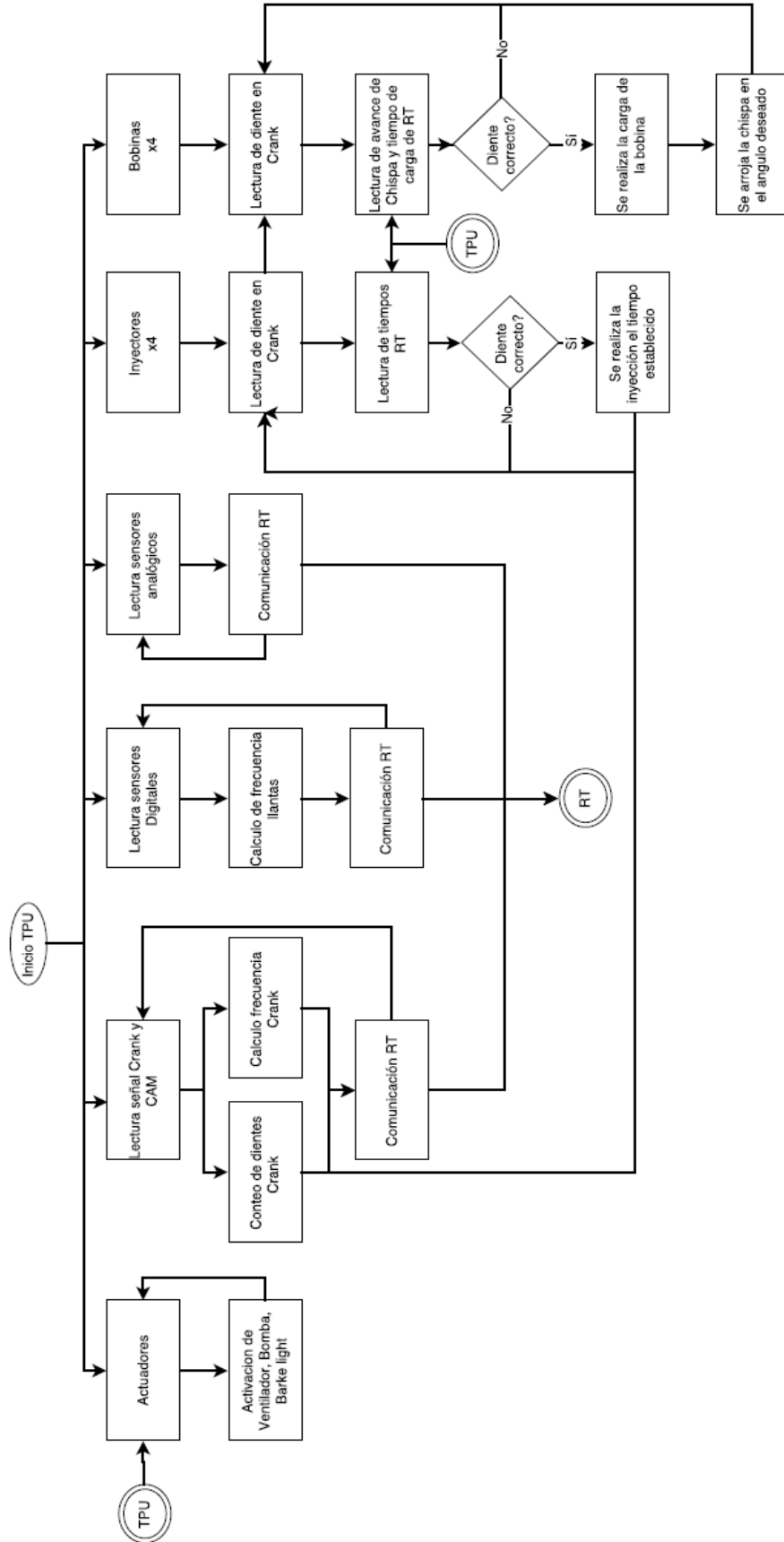


Figura 4.1: Diagrama de flujo TPU

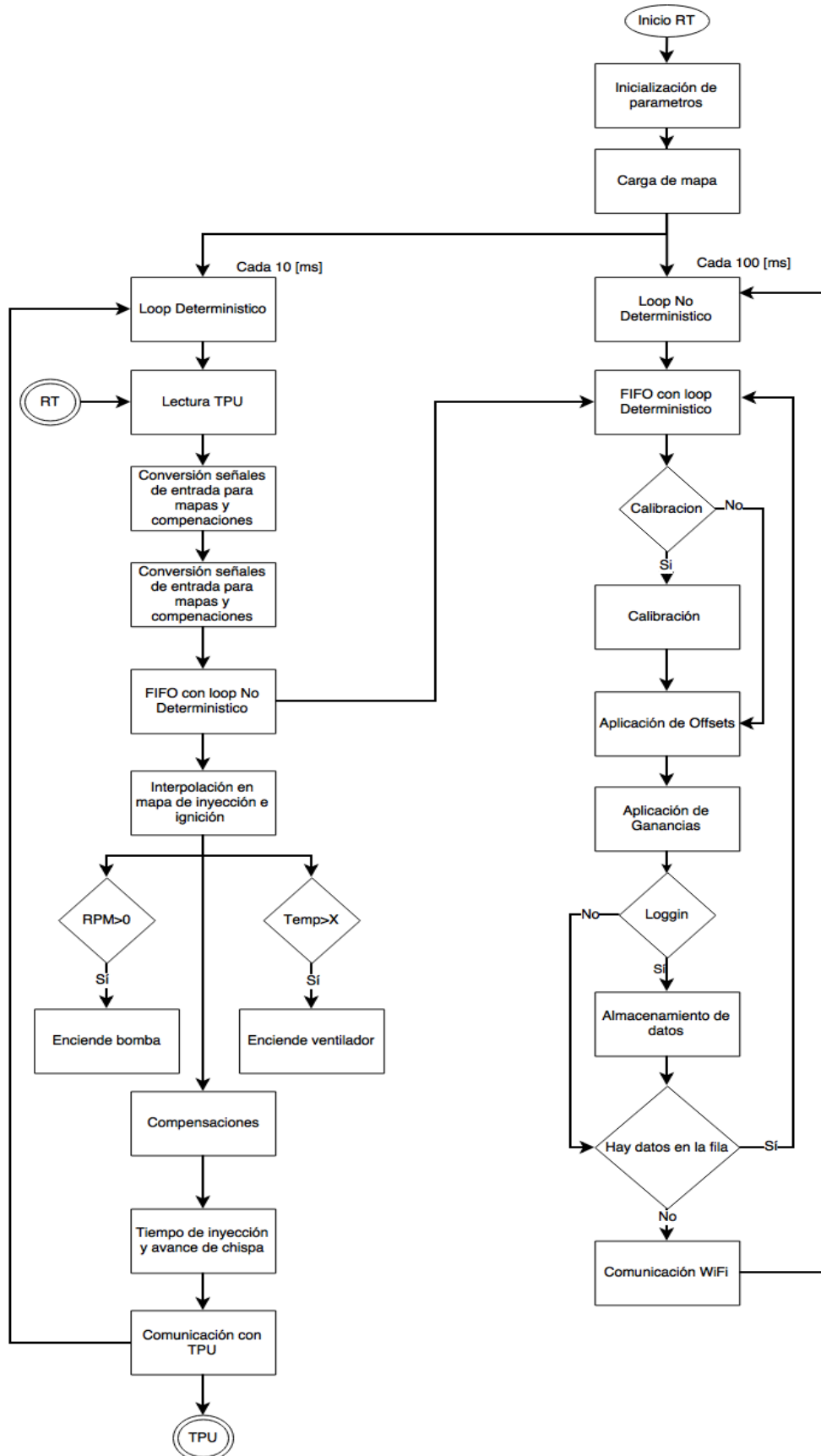


Figura 4.2: Diagrama de flujo RT

## 4.2. Procesamiento de señales *Crank* y *CAM*

Como se mencionó anteriormente, las señales de Crank y de CAM son las más importantes para el funcionamiento del motor, ya que indican a la ECU en que punto se encuentra mecánicamente, así como la velocidad a la que está el motor. Por ello, es importante conocer no sólo el diente del encoder que se está leyendo, sino la frecuencia de los pulsos que generan estas señales.

Cada configuración de estos dientes es distinta dependiendo del motor con el que se este trabajando, en el caso del motor Yamaha R6R, se contó con un Crank 24-2, por lo que el encoder estaba compuesto por 22 dientes cortos y uno largo equivalente a dos cortos, mientras que el CAM cuenta únicamente con un diente.

Debido a la relación de giro dos a uno entre cigüeñal y árbol de levas del motor, en un ciclo hay 48 dientes de crank por uno de CAM, por lo que idealmente cada  $180^\circ$  o 12 dientes el pistón se traslada del PMS al PMI o viceversa, según el punto de partida, de este, ya que los 4 pistones operan de tal manera que siempre haya un pistón realizando la expansión dentro del motor.

Otra consideración a tomar fue el orden de encendido, el cual variaba según motor con el que se esta trabajando, el motor Yamaha YZFR6R cuenta con un orden de encendido 1-2-4-3 lo que significa que los pistones deben trabajar en ese orden para realizar el ciclo completo del motor, tal como se observa en la tabla 4.1, donde se conserva el orden mencionado.

Tabla 4.1: Estado ideal de cada pistón en un motor de cuatro tiempos

Ángulo ideal	Pistón 1	Pistón 2	Pistón 3	Pistón 4
$0^\circ$ a $180^\circ$	Admisión	Escape	Compresión	Expansión
$180^\circ$ a $360^\circ$	Compresión	Admisión	Expansión	Escape
$360^\circ$ a $540^\circ$	Expansión	Compresión	Escape	Admisión
$540^\circ$ a $0^\circ$	Escape	Expansión	Admisión	Compresión

## 4.3. Modos de operación

El centro de toda ECU es un microprocesador. Este sistema corre en un modo discreto no continuo, el cual realiza alguna de sus tareas repetidamente en intervalos constantes del cigüeñal, donde existen dos modos posibles para la operación de la ECU.

### *Full Synchronized Operating Mode*

El procesador se encuentra contando continuamente los pulsos del cigüeñal, y compara los valores demandados de inyección y de ignición con los valores actuales del ángulo del crank, por lo que este tipo de operación garantiza que los retrasos sean mínimos. Por otra parte, una gran cantidad del procesador se utiliza en el conteo de pulsos, por lo que las ECU actuales evitan este modo de operación.

### *Asynchronous Operation Mode*

El microprocesador de la ECU cuenta con un procesador esclavo, referido como un TPU, el cual se encarga de las funciones de conteo mencionadas en el modo operativo anterior. El microprocesador se encarga de

mandar los nuevos valores para la inyección e ignición de manera asíncrona al TPU. El TPU obtiene los ángulos del cigueñal y del árbol de levas del motor y desencadena los eventos de inyección e ignición en los ángulos correctos. Este tipo de operación permite un mayor tiempo para procesos inteligentes que son realizados por el microprocesador. Las ECU con un alto grado de flexibilidad han sido diseñadas usando FPGA's.

#### 4.4. Tabla de tiempos de inyección

El motor al funcionar con la mezcla de aire gasolina, la ECU busca que esta tenga las proporciones adecuadas entre ambas sustancias para que el motor se desempeñe de la mejor manera posible, consumiendo el menor combustible.

Para ello la ECU se basa en una tabla denominada mapa, donde se encuentran los valores para determinar el tiempo de inyección, donde los parámetros de entrada son las revoluciones a las que gira el motor y un sensor de carga ya sea el TPS o el MAP donde realiza una interpolación bilineal para determinar el tiempo de inyección para cada pistón. Junto con esta tabla la ECU se apoya de las compensaciones que aumentan o disminuyen el tiempo obtenido por medio del mapa de inyección, el cual otorga una mejor respuesta del motor.

$$f(x,y) \approx \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} (f(Q_{11})(x_2 - x)(y_2 - y) + f(Q_{21})(x - x_1)(y_2 - y) + f(Q_{12})(x_2 - x)(y - y_1) + f(Q_{22})(x - x_1)(y - y_1)) \quad (4.1)$$

Donde

- $x$  = Revoluciones por minuto
- $y$  = Sensor de carga (TPS o MAP)

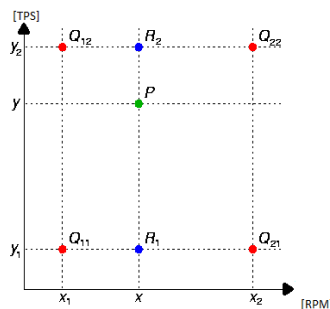


Figura 4.3: Interpolación Bilineal realizada por la ECU para la obtención de valores de inyección

Debido a la gran cantidad de valores presentes en la tabla, graficarla es de gran ayuda, así es como se puede observar en la figura 4.4. Se busca una sabana de comportamiento continuo con pendiente positiva dentro de los valores ingresados, por lo que se pueden detectar valles de una manera mas sencilla ya que éstos generan incongruencias en el mapeo y se reflejan en una pérdida de potencia dentro del motor.



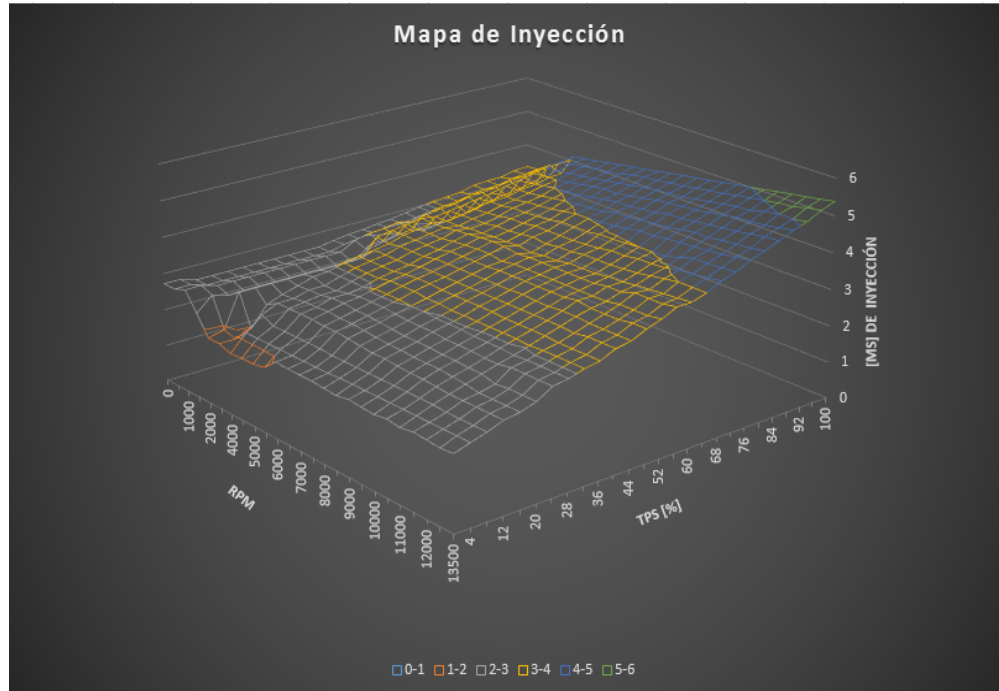


Figura 4.4: Mapa de inyección graficado con Excel

A pesar de los tiempos ingresados en el mapa, la ECU debe determinar un tiempo mínimo, así como un tiempo máximo de inyección dentro de cada pistón, de acuerdo con las revoluciones a las que se encuentre girando el motor.

El tiempo mínimo es determinado por los inyectores, ya que por debajo de ese tiempo no se acciona el inyector debido a la presión de la línea de inyección donde se encuentra montado, por lo que se busca que no se tenga un tiempo menor a  $1,2[ms]$  [1]. En tal sentido, el tiempo máximo es determinado por las revoluciones a las que se encuentra girando el motor. Debido a que en ningún momento dentro del ciclo se puede inyectar en más de un pistón a la vez, se busca que el ciclo de trabajo de los pistones no sea mayor al 80[%].

#### 4.5. Tabla de avance de chispa

Debido a que el fenómeno de combustión no se puede acelerar dentro de la cámara de combustión, la ECU debe adelantar el proceso de la chispa para que se ejerza la presión en el momento correcto, para esto, la ECU se basa en un mapa (como se observa en la figura 4.5) que cuenta con las mismas entradas de carga y RPM, el cual funciona de igual manera que el de inyección. Este mapa debe estar configurado de tal manera para que se realice la combustión en el momento óptimo y no se genere el efecto de *knock*, en el cual la mezcla en lugar de combustionarse de manera adecuada, explota dentro del motor dañando las paredes internas y generando un daño al motor a largo plazo.

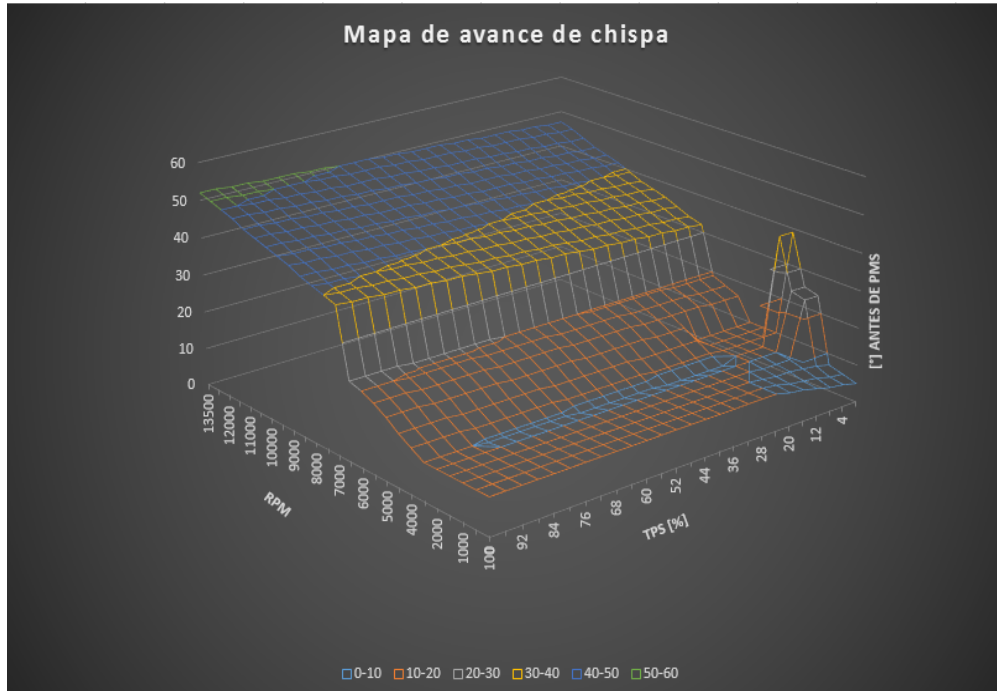


Figura 4.5: Mapa de avance de chispa graficado con Excel

#### 4.6. Comportamiento de inyectores y bobinas

En la figura 4.6 se muestran las acciones que ocurren en un pistón durante un ciclo del motor graficado contra el ángulo del *crank*. Como se puede observar, la *ECU* debe de ser capaz de realizar las acciones justo en el ángulo correcto.

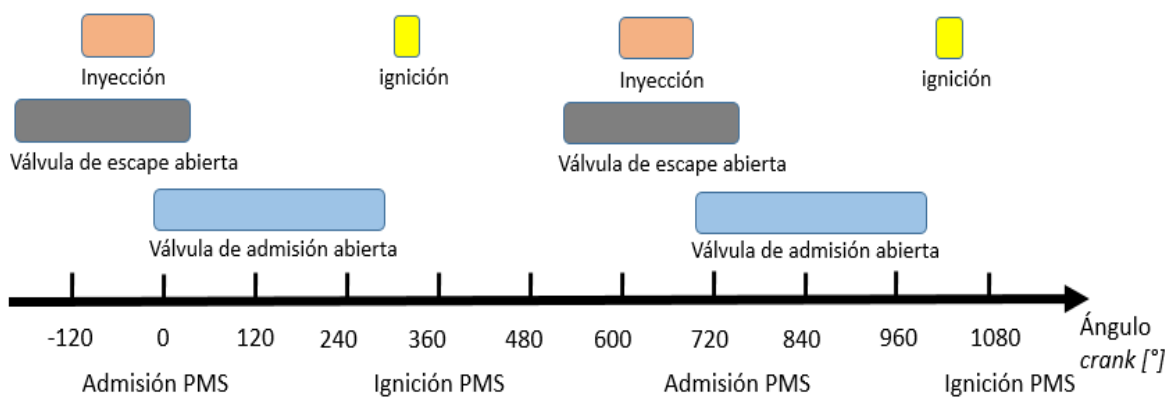


Figura 4.6: Eventos dentro un motor de cuatro tiempos

Tanto la inyección como la chispa son eventos que requieren una velocidad de accionamiento muy alto. El rango de inyección y accionamiento de chispa dentro de los cilindros depende de las RPM del motor, por lo que se generan diferentes efectos en cada uno de ellos. La apertura de las válvulas de admisión y escape, se da en ciertos intervalos solamente. Teóricamente, en un motor de combustión interna, la apertura de la válvula de inyección se da en el ciclo de admisión desde que el pistón está en PMS hasta que llega a PMI. Tomando como ejemplo al primer cilindro, el ángulo donde se inyecta depende de la distancia del inyector a la válvula. El ángulo de inyección siempre será el mismo en cada cilindro. Si la inyección se adelanta se tendrá un gasto de gasolina mayor, ya que el tiempo de inyección aumenta, y si se llega a atrasar esto generara una mala combustión por falta de gasolina dentro de la cámara del cilindro.

El ángulo de accionamiento de la chispa varía según las RPM a las que se encuentre el motor. El adelanto de este fenómeno es muy importante para compensar el tiempo que tarda la combustión con respecto de la velocidad del motor. Si la chispa se adelanta en exceso, lo cual puede ser causado por diferentes factores, se crea el efecto Knock, el cual genera un sonido parecido a un golpe por la combustión temprana dentro de los cilindros. Si se atrasa, la combustión puede no generarse o simplemente ser ineficiente, ello implicaría un pérdida de potencia.

## 4.7. Telemetría

Uno de los requerimientos para la ECU es que se tenga la capacidad de estar conectado a ella en todo momento, por lo tanto se optó por una comunicación *Wi-Fi* para la comunicación entre operador y *ECU* mientras el vehículo está en movimiento.

Gracias a que la *sbRIO* cuenta con la capacidad de comunicarse por medio de ethernet, se generó una red por medio de un *switch* y una antena la cual permitió generar una señal *Wi-Fi* con capacidad de hasta 500[m] sin obstrucciones, por medio del protocolo *UDP*<sup>1</sup>. Así fue posible generar la comunicación entre emisor y receptor, utilizando la menor cantidad de recursos dentro de la *sbRIO*, ya que este protocolo emite los datos sin importar si se están recibiendo éstos a diferencia de un *TCP* el cual es un protocolo de comunicación más fiable pero ineficiente ya que se le añade información a los paquetes enviados para robustecer la comunicación, utilizando una mayor cantidad de recursos dentro de la *sbRIO*.

---

<sup>1</sup>User Datagram Protocol

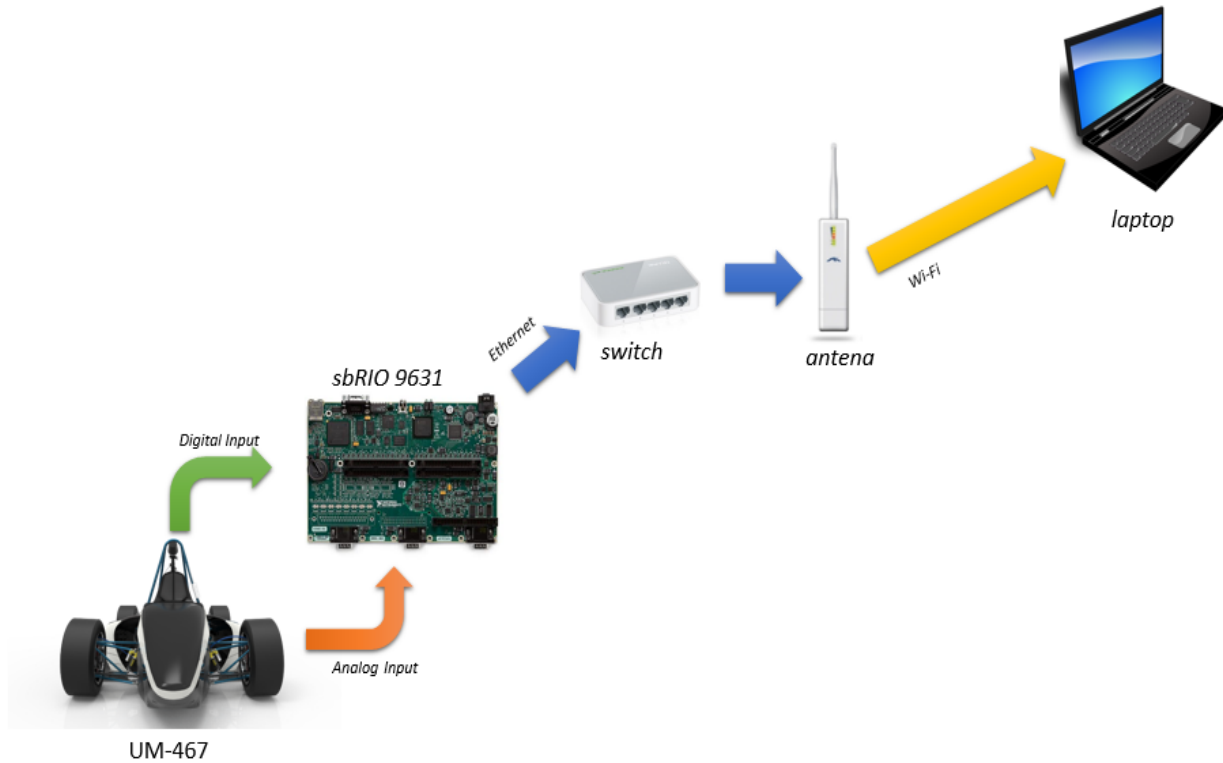


Figura 4.7: Diagrama de telemetría

La *sbRIO* actualiza la información por medio de la telemetría cada  $100[ms]$ , donde se puede observar de manera continua la información obtenida dentro del vehículo, sin su retraso o la saturación de los datos.

## 4.8. Compensaciones

Debido a que dentro de un vehículo se presentan una gran cantidad de fenómenos, la *ECU* no puede realizar un control tan eficiente utilizando exclusivamente los mapas de inyección e ignición, es por eso que la *ECU* se apoya en las compensaciones, las cuales toman consideraciones extras como voltaje de batería, temperatura del refrigerante del motor, temperatura del aire, presión del múltiple de admisión entre otras. Estas toman el valor obtenido por los mapas y los multiplican por un factor porcentual el cual aumenta o disminuye el valor obtenido, debido a que se presentan gran cantidad de variaciones dentro de la determinación de los valores, estos pueden salirse de rango, por lo que se determina un valor mínimo y uno máximo.

Tanto la chispa como la inyección se le aplican compensaciones dependiendo de los parámetros a considerar, donde en la ecuación 4.2 se observan las compensaciones que se aplican al tiempo de inyección mientras que en la ecuación 4.3 se observan las compensaciones al adelanto de chispa.

$$T_{apertura} = (BOT \times AT \times CT \times ST \times AC \times BP \times MP \times CC) + BA \quad (4.2)$$

$$Grados_{Ignicion} = BIT + AT + CT + BP + MP + CC + UI \quad (4.3)$$

Donde:

*BOT* = Tiempo base de apertura del mapa de inyección  
*BIT* = Tiempo base de apertura del mapa de ignición  
*AT* = Compensación por temperatura del aire  
*CT* = Compensación por temperatura de refrigerante  
*ST* = Compensación de arranque  
*AC* = Compensación por aceleración  
*BP* = Compensación por presión barométrica  
*MP* = Compensación por MAP  
*CC* = Compensación individual por cilindro  
*BA* = Compensación por voltaje de batería

## 4.9. Tiempo de procesamiento

El valor mínimo en los  $[ms]$  de inyección esta determinado por los inyectores a utilizar, ya que debajo de este tiempo el inyector no realiza su acción, por lo que en nuestro caso se consideran  $1,2[ms][1]$ , mientras que el tiempo máximo lo determina las revoluciones a la que se encuentra el motor y el tiempo que la válvula de admisión se encuentra abierta, en un motor ideal durante la admisión se encuentra abierta desde PMS a PMI, mientras que en un motor real se presenta el fenómeno de traslape valvular donde la válvula de admisión y escape se encuentran abiertas simultáneamente durante un corto periodo como se puede observar en la tabla 2.1, por lo que a  $13500[RPM]$  que es el caso máximo tiene un tiempo de  $1,753[ms]$  como se ve en la ecuación 4.4.

$$t_{min_{inyeccion}} = \left( \frac{\left(13500 \left[\frac{rev}{min}\right]\right) \left(\frac{1}{60000} \left[\frac{min}{ms}\right]\right) \left(720 \left[\frac{o}{rev}\right]\right)}{284 [o]} \right)^{-1} = 1,753[ms] \quad (4.4)$$

Por lo que la *ECU* en un caso crítico como el de  $13500[RPM]$  debe de ser capaz de realizar el proceso de inyección e ignición en  $1,753[ms]$  como se ve en la ecuación 4.5 para los cuatro cilindros en el momento adecuado. La *ECU* al estar trabajando en modo asíncrono, el *TPU* es el encargado de estar monitoreando el momento en el que se deben activar las salidas, por lo que el microprocesador en tiempo real realiza las operaciones para la determinación de los mapas y compensaciones.

El poder computacional esta limitado a que cada tarea se haga en el momento que es requerido por las restricciones físicas, pero no mas rápido.[6]

$$t_{rev} = \left( \left(13500 \left[\frac{rev}{min}\right]\right) \left(\frac{1}{60000} \left[\frac{min}{ms}\right]\right) \right)^{-1} = 4,444 \left[\frac{ms}{rev}\right] \quad (4.5)$$

En modelos de eventos discretos, la velocidad promedio del motor comúnmente se asume como constante durante cerca de 10 ciclos o 20 revoluciones, para que el modelo de eventos discretos pueda ser aproximado como modelo de tiempo discreto donde el angulo del *crank* y del *cam* evolucionan en paralelo<sup>2</sup>. Por lo que

<sup>2</sup>Analizar el sistema de motor como un sistema de eventos discretos se requiere un sistema sofisticado de análisis matemático[6]

para que esta suposición pueda considerarse realista, la velocidad dinámica del motor debe ser mas lenta que otros efectos dinámicos de interés.

Para un motor normalmente aspirado, una de las variables mas importantes es el par a la salida, el cual depende principalmente de la presión en el múltiple de admision, todas las demás variables que llegan a ser mucho mas rápidas están ligadas a la presión del múltiple de admision.[6]

Por lo que el tiempo mínimo de procesamiento que necesitaría la *ECU* de acuerdo a la ecuación 4.5 para manejar adecuadamente en un caso critico seria de 44,44[ms]. Como se puede observar en la figura 4.2 el procesamiento para los mapas y compensaciones al ser de alta prioridad se realiza en el proceso deterministico del ciclo en el procesador del tiempo real por lo que la duración de este ciclo altera el tiempo que tarda en obtener la información del *FPGA* el cual debe comunicarse con el no deterministico para realizar el resto de las tareas para el sistema en tiempo real, es por eso que se realizan las tareas necesarias para el funcionamiento de la *ECU* cada 10[ms] cubriendo de esa manera el tiempo necesario para el procesamiento de la información para el control del motor.

# Capítulo 5

## Interfaz

Debido a que la *ECU* desarrollada será utilizada por futuros integrantes del equipo Formula SAE, fue necesario el desarrollo de una interfaz amigable para su uso, así como la capacidad de realizar el tuneo del motor y la supervisión de las variables medidas en tiempo real, con la capacidad de estudiar a detalle los datos tanto del motor como de las variables dinámicas almacenadas.

### 5.1. Interfaz de usuario

Para esto se desarrolló una interfaz principal como se ve en la figura 5.1 con la cual el usuario debería ser capaz de acceder tanto a la información de las variables medidas como la de los parámetros iniciales que necesita la *ECU* para su funcionamiento, la cual donde se divide en cinco rubros:

- ◆ Inicialización.
- ◆ Procesamiento de datos.
- ◆ Telemetría.
- ◆ Visualización.
- ◆ Mapas.

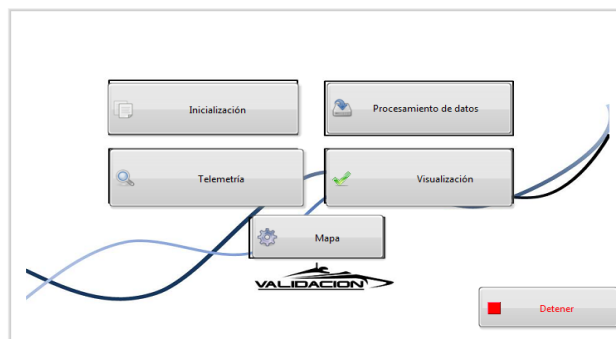


Figura 5.1: Interfaz principal desarrollada mediante LabView™

### 5.1.1. Inicialización

Esta parte de la interfaz contiene todos los parámetros básicos que se requieren para el funcionamiento de la ECU como los offset, las ganancias, los parámetros de la telemetría e inicialización del almacenamiento de datos, según se ilustra en la figura 5.2.

En la interfaz mencionada se generan los archivos .xml, los cuales son descargados dentro de la ECU para que esta pueda leer los parámetros al encender y no sea necesario reconfigurarse cada que se enciende.

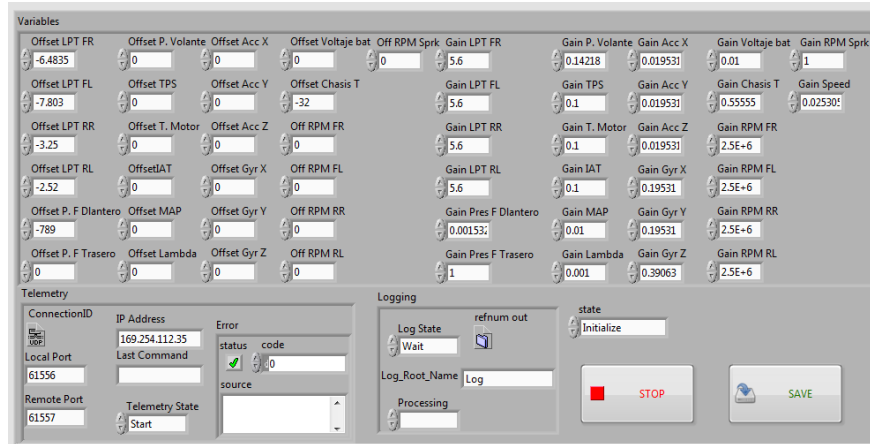


Figura 5.2: Interfaz de inicialización desarrollada mediante LabView™

### 5.1.2. Procesamiento de datos

Una vez almacenados los datos dentro de la ECU, éstos se encuentran en formato .dat para ahorrar espacio dentro y poder de procesamiento, lo que significa que se encuentran en binario sin procesar y necesitan de un postprocesamiento de los datos para poder trabajar con ellos. Para obtener resultados, se realizó una programación mediante LabView™ según se observa en la figura 5.3, para transformar estos archivos al formato .tdms, los cuales ya poseen todas las propiedades necesarias para el estudio de la información, ya sea en DIAdem, Excel™ u otro procesador de datos.

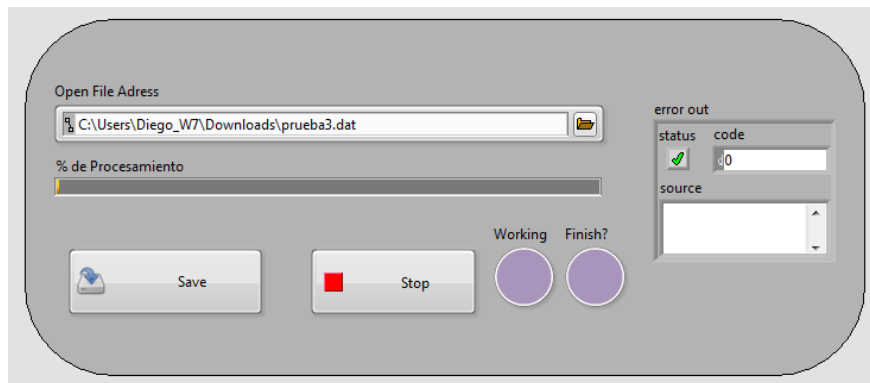


Figura 5.3: Interfaz de procesamiento desarrollada mediante LabView™



### 5.1.3. Telemetría

Para poder realizar la conexión entre la *ECU* y la computadora, se debe contar con una comunicación Wi-Fi con protocolo UDP , y establecer la conexión entre ambas. Para realiza el procedimiento se necesita contar con el IP de la *ECU*, así como el de la computadora con la cual se realiza la comunicación (véase figura 5.4), para recibir los datos en tiempo real de la *ECU* y a la vez, enviar instrucciones que permitan iniciar el almacenamiento de los datos, calibrar sensores, ingresar información de vueltas y detenerla esta en caso de que sea necesario.

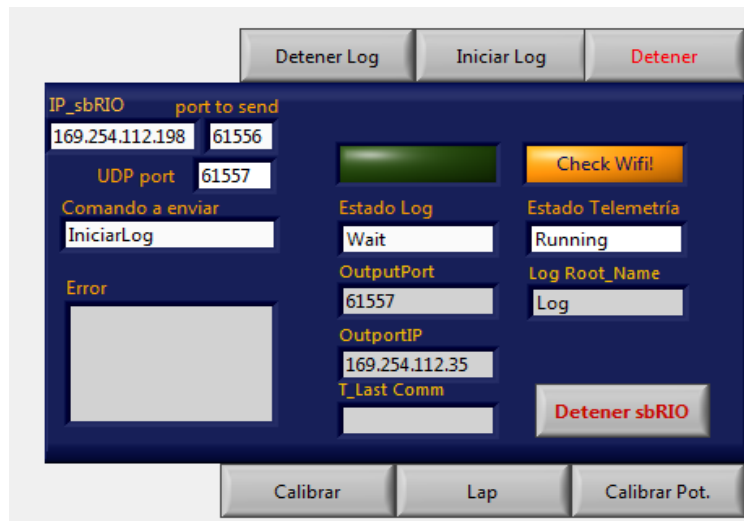


Figura 5.4: Interfaz de telemetría mediante LabView™

### 5.1.4. Visualización

Una vez establecida la comunicación por medio de la telemetría, la interfaz permite observar todos los parámetros que se están midiendo dentro del vehículo, para observar que los sensores se encuentren trabajando de manera correcta, así como para el monitoreo de las variables de seguridad (véase figura 5.5). En caso de ser necesario, se pueden detener las pruebas o informar al piloto de lo que está sucediendo para que tome acciones preventivas.

La interfaz también permite realizar un estudio rápido del comportamiento del prototipo en pruebas específicas, donde se busca llevar al prototipo a condiciones límite para la validación del diseño de los sistemas instrumentados.

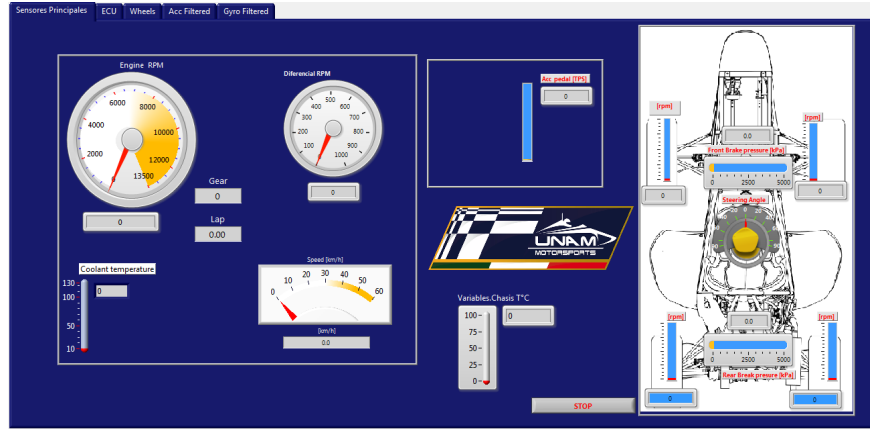


Figura 5.5: Interfaz de visualización desarrollada mediante LabView™

### 5.1.5. Mapas

Como se mencionó anteriormente, al desarrollar un mapa es de suma importancia contar con la capacidad de visualizar la sabana que representa los valores ingresados en las tablas, es por eso que en lugar de desarrollar una interfaz que permitiera la visualización de estos datos, se optó por utilizar Excel™, (figura 5.6) el cual, al ser una hoja de cálculo, permite realizar los cambios de las tablas de una manera fácil e intuitiva. Además, cuenta con la capacidad de trabajar con valores dinámicos y con fórmulas. Una vez terminado el proceso de mapeo, estos datos se descargan dentro de la ECU para que trabaje con la nueva configuración.

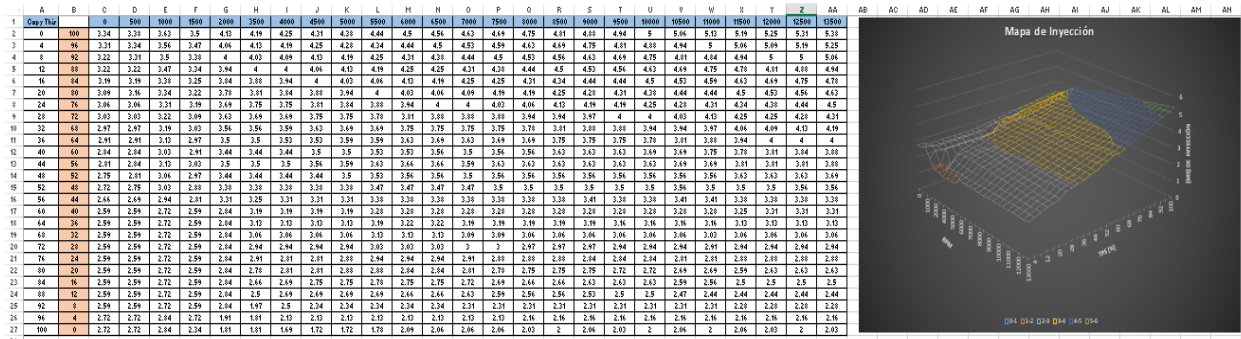


Figura 5.6: Interfaz de Mapa desarrollada mediante Excel™

### 5.1.6. Interfaz de programación

A diferencia de la programación de usuario, esta interfaz es con la que el programador interactúa, la cual está diseñada para desplegar toda la información que se está leyendo y con la que trabaja la ECU en el procesador de tiempo real para una mejor detección de fallas. En ella se despliegan los parámetros de voltaje leído, offsets, ganancias, variables, periodos de variables digitales y actuadores, lo que permite seguir la falla. Esta interfaz también despliega información del tiempo en el que se están ejecutando y si se están presentando retrasos en el procesamiento o en la lectura de los datos.

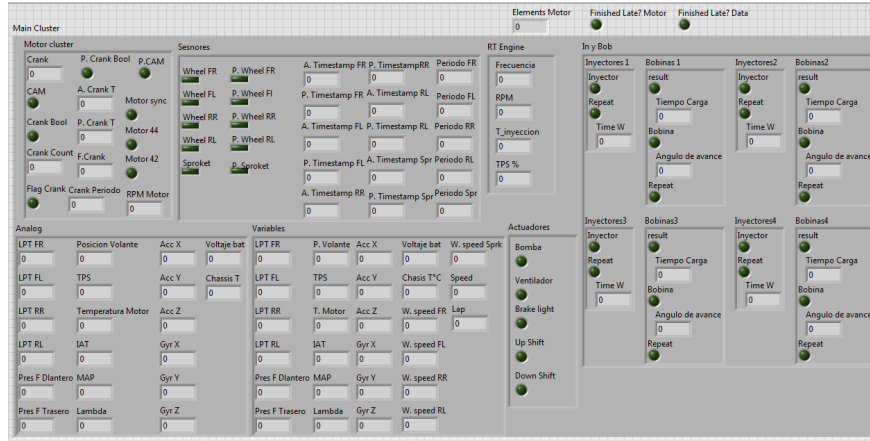


Figura 5.7: Interfaz de programación

Este proceso es posible gracias a la interfaz de LabView<sup>TM</sup> la cual permite el monitoreo de las variables de forma individual en tiempo real ya sea del loop determinístico o no determinístico, para conocer si el problema que se está presentando es por una falta de lectura dentro del FPGA o una mala aplicación del procesamiento de los voltajes y periodos leídos.

Dentro de la ECU se cuenta con un manejo de errores para que, si se presente un problema dentro del loop determinístico o no determinístico, la programación sea capaz de detenerse para no entrar en un estado de error, el cual podría generar comportamiento indeseado o un daño dentro de los actuadores.

## Capítulo 6

# Manufactura e Implementación

### 6.1. Implementación en UM467

La implementación de la *ECU* con adquisición de datos se hizo enfocada en un prototipo tipo Formula para la competencia de Formula *SAE*. También se realizó el diseño mecánico del sistema como su posición dentro del vehículo, rutas de cableado, circuitos impresos, empaquetamiento, etcétera. Se eligió el calibre de cable con base a las corrientes que se utilizaban y tomando en consideración el factor peso.

Tabla 6.1: Tabla de elección de calibres

Nombre	Descripción	Calibre [AWG]	Corriente actual [A]
Señales	Señal analógica digital y tierra de sensores	22	<1
Actuadores	Inyectores y bobinas	20	3
Actuadores	Bomba gasolina y ventilador	16	10
Switch	<i>Master switch</i>	8	40
Actuador	Marcha	4	70
Tierra	Tierra general batería a motor	4	70

A su vez, la ruta que éstos recorrían se buscó que fuera de la menor longitud posible y no interfiriera con otros sistemas o estuviese cerca de componentes que irradian calor, a su vez se utilizó un mallado de los cables para que estos tuvieran un montaje en menos tiempo y estuviesen ocultos.

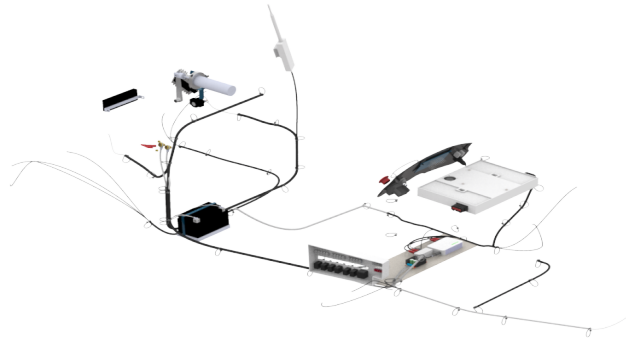


Figura 6.1: Cableado general del prototipo Fórmula

Dadas las características del chasis del vehículo, la posición de la *ECU* se eligió en la parte frontal, alejada del motor. Esta decisión se tomó debido a que está alejada del motor, así, la temperatura y las vibraciones no afectan en el funcionamiento. También nos da un acceso fácil si es necesario realizar alguna reparación o configuración.

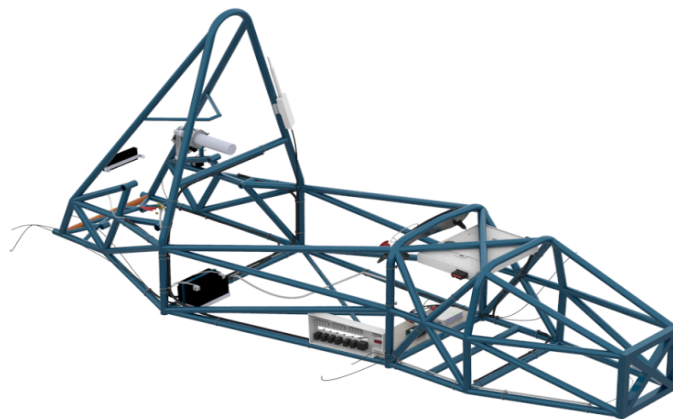


Figura 6.2: Cableado montado en chasis general del prototipo Fórmula

Su buscó que el material con el que fueran manufacturadas las cajas fuera de un material no conductor, ligero, de bajo costo y de fácil manejo. Por ello, se eligió utilizar la fibra de vidrio y el PVC espumado, lo que dio como resultado un sistema de  $8[kg]$ , a diferencia de  $11[kg]$  de la temporada anterior, considerando todos los elementos que involucran al sistema eléctrico.

Debido a que en la competencia el tiempo es un factor importante, uno de los parámetros que se evalúan es la facilidad de servicio. En tal sentido se optó por implementar un código de colores, donde cada señal tenía su propio color, lo mismo para el caso de los diagramas de circuitos generales.

### 6.1.1. Comparativa ECU comercial

Como se mencionó en capítulos anteriores, el equipo utilizó una ECU de la marca *Performance Electronics* modelo PE3. Ésta cuenta con entradas para los sensores TPS, MAP, Cam, Crank, IAT, Temperatura de refrigerante y sensor de oxígeno. Complementando estas entradas, se tienen siete digitales y ocho analógicas. También se emplearon 10 salidas digitales. Al comparar la cantidad de entradas y salidas disponibles, es posible observar que se tiene una gran diferencia, ya que la *sbRIO* tiene 110 canales que se pueden configurar como entrada o como salida dependiendo de las necesidades que se tengan. También cuenta con 32 entradas análogas de 16 bits con un tiempo de conversión de cuatro micro segundos.

A grandes rasgos, la tarjeta utilizada fue superior en cuanto a rendimiento y número de entradas y salidas. Aunado a ello, la interfaz contenía, además de la parte de configuración de motor, una pestaña para adquisición de datos y telemetría. la ECU comparada no cuenta con un sistema de telemetría, y su sistema de adquisición de datos es muy limitado.

La comparación directa con respecto de la ECU que tuvo el equipo fue un buen inicio, pero se buscó hacer una comparación con otras computadoras comerciales. Esto se hizo para poder ver que tan viable era la ECU del proyecto en comparación con lo que se ofrece en el mercado que tengan una capacidad de funcionamiento parecido. Se eligieron dos ECU's diferentes, la primera de la marca *AEM Performance Electronics* modelo *Infinity series 708* y la segunda de la marca *MoTeC* modelo *GPRP-M150*. La selección para la comparación, se dio ya que estas dos computadoras son las mas comunes dentro de la competencia. A continuación se muestra una tabla comparativa con las principales características.

Tabla 6.2: Comparativa

Características	<i>MoTeC M150</i>	<i>GPRP-</i>	<i>AEM Infinity 708</i>	<i>sbRIO 9631</i>
Memoria de almacenamiento	256MB		64GB	128MB
Protocolos de comunicación	CAN, LIN, RS 232, Ethernet		CAN, RS 232, Ethernet	CAN(Aparte), Ethernet
Entradas digitales totales	20		8	110
Salidas digitales totales	40		12	110
Entradas análogas totales	23		23	32

## 6.2. Pruebas en banco

### Banco de pruebas sin motor

Por el proceso de diseño que se llevo, se realizaron diferentes pasos dentro de las pruebas, para garantizar un buen funcionamiento de todos los componentes. Esto debido a que el control de un motor de combustión interna debe ser preciso para evitar daños internos por mal funcionamiento.

Después de elegir la configuración de integrados a utilizar, se procedió a probar con uno de los inyectores que actualmente se manejan. El circuito se implementó en una *protoboard*, y con ayuda de una fuente independiente. La primera prueba fue encender el inyector con un cierto tiempo de activación. Esto se realizó para rectificar que la configuración para el control de inyectores funcionara adecuadamente cuando la

excitación venía de la *sbRIO*.

Con ayuda de un micro controlador Atmega 328, se implementó un simulador de señales *crank* y *cam*. Esto nos ayudó a probar el inyector, implementando los tiempos de activación en los ángulos deseados sin necesidad de utilizar un motor de combustión interna. Las señales generadas eran leídas por la *sbRIO*, y, con esto, se podía decidir cuándo activar el inyector. Debido a las limitantes del microcontrolador, la frecuencia de las señales no alcanzaba los valores necesarios para simular el motor a altas revoluciones, donde la activación era muy rápida. Se cambió el simulador por dos generadores de funciones, los cuales se sincronizaron. La prueba simulando altas revoluciones era muy importante, para poder validar que nuestra configuración tuviera la capacidad de activar los inyectores en el caso más crítico a 13500 [RPM].

El comportamiento de los inyectores varía cuando están en vacío y cuando se tiene presión en la línea de gasolina. La corriente consumida por los inyectores aumenta cuando existe mayor presión, y, entre más rápido gira el motor, ésta también aumenta. El tipo de inyectores utilizados es saturado, por lo que la corriente máxima de cada uno es de aproximadamente 1[A]. Con ayuda de un banco de pruebas para inyectores, se implementaron los cuatro circuitos de control para los inyectores. Utilizando los generadores de señales, y con la presión a la que funciona la línea dentro del formula, se realizó la prueba con los cuatro inyectores funcionando en el orden de encendido del motor Yamaha YZFR6R.



Figura 6.3: Banco para pruebas de flujo de inyectores

Para las pruebas del control de las bobinas, se realizó un proceso muy parecido al que se utilizó con los inyectores para poder validar el uso del circuito de control. El circuito de control se implementó en una protoboard para rectificar que esta configuración se puede utilizar junto con la *sbRIO*. La diferencia de las pruebas con los inyectores, las bobinas utilizan una bujía, la cual crea la chispa dentro de la cámara de combustión. Ésta tiene que estar aterrizada físicamente a tierra para poder generar la chispa. Para ello, se utilizó una placa de acero conectada a la tierra del circuito para simular que la bujía estaba empotrada a la cabeza del motor. A diferencia de los inyectores, las bobinas llevaron un tiempo de carga para poder generar la chispa, este depende del voltaje que se tenga en la batería.

Con ayuda de una fuente de 30[A], se conectaron las cuatro bobinas con sus respectivos circuitos de

control y, utilizando los generadores de funciones para simular el comportamiento de los sensores *crank* y *cam*, se probó la configuración a *RPMs* constantes. Para la prueba final con los circuitos de control montados en la protoboard, se conectaron las cuatro bobinas y los cuatro inyectores. Igualmente, se simuló el comportamiento de los sensores de motor con los generadores de funciones.

### 6.3. Competencia

Dentro de la competencia en las pruebas estáticas, se realizó un evento de diseño donde los jueces calificaron no solo el vehículo en sí, sino también el conocimiento, entendimiento, desarrollo y performance del equipo. El evento de diseño se divide en diferentes categorías dentro del vehículo (suspensión, chasis/carrocería/aerodinámica, tren motriz y cabina/controles/frenos/seguridad) donde los jueces evalúan también el proceso de desarrollo, haciendo énfasis en el diseño (25%), manufactura (25%), refinamiento y validación (25%) y entendimiento (25%).

El evento de diseño otorga un total de 150pts dentro de la competencia, , donde la evaluación es realizada por un juez experto en el sistema. En este caso, por ser relacionado con electrónica, e evaluado en el *System Management & Integration*, el cual otorga un máximo de 20pts y los jueces buscan principalmente que los sistemas electrónicos como *ECU* y sistemas de adquisición de datos, se encuentran en lugares protegidos, la utilización de la información recabada por el sistema de adquisición de datos, el aprovechamiento de la información para mejorar el performance del vehículo en competencia, el manejo de un cableado seguro, con código de colores y marcado de acuerdo a su funcionalidad y si el equipo fue capaz de producir un diagrama de cableado así como planos del vehículo.

En esta categoría, el equipo obtuvo un total de 17/20 pts, el más alto en su historia, del equipo donde se remarcó el entendimiento de los subsistemas, un buen diagrama del cableado interno del vehículo, así como el modelado completo del harness y un buen entendimiento de la electrónica del vehículo.

Es importante resaltar que durante la competencia no se presentó la *ECU* física durante la competencia, debido a que la *sbRIO* dejó de funcionar una semana previa a la competencia debido a fallas de fabrica. Aun así el diseño, manufactura, cableado y datos previos a la competencia se presentaron durante el evento.



# Conclusiones

El trabajo presentado fue realizado durante la temporada Formula SAE 2015-2016, a lo largo de una temporada anual que consta de un periodo de dos semestres escolares. En ella se logró realizar el diseño de la *ECU* demostrando su factibilidad de realización, con el inconveniente de que no se logró la implementación a tiempo para la competencia Formula SAE.

Durante el evento, la *sBRIO* programada mediante LabView™ si fue capaz de contar con ambas funciones de control del motor de combustión y el sistema de adquisición de datos. A pesar de que esta no es la computadora más rápida y de mayor capacidad, puede compararse con una computadora comercial en cuanto a rendimiento y funcionalidad dentro de la competencia. Una de sus grandes ventajas es la gran flexibilidad con la que cuenta, ya que no se encuentra limitada en uso por tamaño, alimentación, o por entradas y salidas analógicas y digitales.

La implementación de los circuitos, tanto de sensores como actuadores, no representó un impedimento en cuanto a disponibilidad de piezas, ya que son elementos comerciales de bajo costo y fácil acceso, donde el mayor impedimento es el tamaño de los circuitos en su conjunto.

Una de las mayores ventajas que arrojó el trabajo, debido a que es una competencia de ingeniería, fue el entendimiento a profundidad del funcionamiento del motor, visto a través de los actuadores electrónicos, los cuales afectaron al performance en competencias y generan un ahorro en combustible y contaminación en los vehículos de calle. Asimismo, se facilitó la comprensión de las *ECU* actuales que se componen usualmente de dos controladores uno de lógica programable y otro de programación de alto nivel.

Si bien no es posible establecer una comparación precisa entre la *ECU* comercial y la descrita en el trabajo presente, se logró la realización de pruebas exitosas en banco de todos los actuadores necesarios para su funcionamiento, así como la implementación del sistema en tiempo real para las variables dinámicas.

Finalmente, el diseño final de la *ECU*, aún contaba con la capacidad de implementar un mayor número de funciones, las cuales al momento de su realización no eran esenciales para su funcionamiento pero pueden otorgar una amplia gama de funciones nuevas para complementar el diseño y lograr un coche más competitivo con los datos que se puedan obtener.

# Bibliografía

- [1] Arregoitia, Bruno Patricio Verde: *Implementación del sistema de control del motor para el vehículo Formula SAE UNAM 2011*. U.N.A.M., 2011.
- [2] Denton, Tom: *Automobile Electrical and Electronics Systems*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 3ra edición, 2004.
- [3] Instruments, National: *USER GUIDE NI sbRIO-961x/963x/964x and NI sbRIO-9612XT/9632XT/9642XT*. National Instruments, 2010.
- [4] Jazar, Reza N.: *Vehicle Dynamics Theory and Application*. Springer, 3ra edición, 2009.
- [5] Krummen, Jeff: *ECUs and Engine Calibration 201*. Performance Electronics, Ltd, 2011.
- [6] Lino Guzzella, Christopher H. Onder: *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer, 2a edición, 2010.
- [7] MSc, Heinz Heisler: *Advanced Engine Technology*. Butterworth-Heinemann, 1ra edición, 2002.
- [8] Ramón, Pallás Areny: *Sensores y Acondicionadores de señal*. Marcboombo, 4ta edición, 2004.
- [9] Ruiz, Samuel López: *Adquisición y procesamiento de datos para el análisis dinámico de un vehículo Formula SAE*. U.N.A.M., 2014.
- [10] Segers, Jorge: *Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition*. SAE International, 2da edición, 2014.
- [11] William B. Ribbens, Ph.D.: *Understanding Automotive Electronics*. Butterworth-Heinemann, 5a edición, 1998.

# Lista de Tablas

2.1. Motor Yamaha YZFR6R . . . . .	10
3.1. Tabla de elección de variables a medir para la ECU con capacidad en tiempo real . . . . .	22
4.1. Estado ideal de cada pistón en un motor de cuatro tiempos . . . . .	38
6.1. Tabla de elección de calibres . . . . .	51
6.2. Comparativa . . . . .	53

# Índice de figuras

2.1. Cuatro tiempos del motor de combustión interna . . . . .	5
2.2. Efecto que se genera al variar una mezcla de aire combustible . . . . .	6
2.3. Comparación de la potencia del motor y consumo de gasolina . . . . .	7
2.4. Sistema de arranque eléctrico . . . . .	8
2.5. Clasificación de los tipos de inyección . . . . .	9
2.6. Fotografía del motor Yamaha YZF6R . . . . .	9
2.7. Estructura interna ECU . . . . .	12
2.8. Diagrama Interno de un inyector . . . . .	13
2.9. Diagrama de un sistema de ignición . . . . .	13
2.10. Salida de un sensor <i>Hall</i> vs Reluctancia variable . . . . .	14
2.11. Diagrama de un Acelerómetro . . . . .	16
2.12. Ejes en un vehículo . . . . .	16
2.13. Diagrama sensor piezoeléctrico . . . . .	17
3.1. Circuito de entrada por un canal de señal analógica . . . . .	20
3.2. Circuito de conexión NRSE . . . . .	20
3.3. Resolución de una señal analógica . . . . .	23
3.4. Fenómeno de Aliasing de una señal . . . . .	24
3.5. Fotografía del encoder del <i>crank</i> . . . . .	25
3.6. Fotografía del diente faltante del cam . . . . .	25
3.7. Operación de válvulas contra ángulo del <i>crank</i> . . . . .	26
3.8. Relevador . . . . .	26
3.9. Relevador . . . . .	27
3.10. Circuito de entrada-salida para señales digitales . . . . .	28
3.11. Circuito de control para los inyectores . . . . .	29
3.12. Circuito de control para las bobinas . . . . .	30
3.13. Circuito de control para componentes externos . . . . .	31
3.14. Convertidor DC-DC . . . . .	31
3.15. Regulador de voltaje . . . . .	32
3.16. Circuito General . . . . .	34
4.1. Diagrama de flujo TPU . . . . .	36
4.2. Diagrama de flujo RT . . . . .	37
4.3. Interpolación Bilineal . . . . .	39
4.4. Mapa de inyección . . . . .	40
4.5. Mapa de avance de chispa . . . . .	41
4.6. Eventos dentro un motor de cuatro tiempos . . . . .	41

4.7. Diagrama de telemetría . . . . .	43
5.1. Interfaz principal desarrollada en LabView™ . . . . .	46
5.2. Interfaz de inicialización desarrollada mediante LabView™ . . . . .	47
5.3. Interfaz de procesamiento desarrollada mediante LabView™ . . . . .	47
5.4. Interfaz de telemetría mediante LabView™ . . . . .	48
5.5. Interfaz de visualización desarrollada mediante LabView™ . . . . .	49
5.6. Interfaz de Mapa desarrollada mediante Excel™ . . . . .	49
5.7. Interfaz de programación . . . . .	50
6.1. Cableado general del prototipo Fórmula . . . . .	52
6.2. Cableado montado en chasis general del prototipo Fórmula . . . . .	52
6.3. Banco de pruebas para inyectores . . . . .	54