



**UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR  
DECANATO DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL DE UN MOTOR DE COMBUSTION  
INTERNA**

Por:  
Ramiro López

**PROYECTO DE GRADO**  
Presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar  
Como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

**Sartenejas, Septiembre de 2015**



**UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR  
DECANATO DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL DE UN MOTOR DE COMBUSTION  
INTERNA**

Por:  
Ramiro López

Realizado con la asesoría de:

Nathaly Moreno

**PROYECTO DE GRADO**  
Presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar  
Como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

**Sartenejas, Septiembre de 2015**



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR  
VICERRECTORADO ACADÉMICO  
DECANATO DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
Coordinación de INGENIERIA MECANICA

### ACTA DE EVALUACIÓN DE PROYECTO DE GRADO

CÓDIGO DE LA ASIGNATURA: EP 5202

FECHA: 11/09/15

TÍTULO DEL TRABAJO: DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: RAMIRO LOPEZ LOBO CARNÉ: 06-39814

TUTOR: Prof.: NATHALY MORENO

JURADO: Profes. JESÚS HIDALGO

APROBADO: ☒

REPROBADO: ☐

INCOMPLETO ☐

OBSERVACIONES: NO HAY

El jurado considera **por unanimidad** que el trabajo es EXCEPCIONALMENTE BUENO:

SI: ☐ NO: ☒ En caso positivo, justificar razonadamente:

Jurado

Tutor Académico

Co-tutor

Jurado

**Notas:** Colocar los sellos de los respectivos Departamentos Académicos. Para jurados externos usar el sello de la Coordinación. Este documento debe ir sin enmiendas

## RESUMEN

El Laboratorio de Conversión de Energía Mecánica de la Universidad Simón Bolívar dispone de un Motor Ricardo para ilustrar el comportamiento de motores de combustión interna, sin embargo, dada la antigüedad del mismo y las dificultades que se presentan para conseguir los repuestos de éste, se presenta la situación de que dicho motor no se encuentra disponible para la realización de prácticas de laboratorio en momentos oportunos para todos los grupos de estudiantes. Dada esta problemática, se propone el desarrollo de un Laboratorio Virtual que permita que todos los grupos de estudiantes dispongan de una herramienta con la cual puedan desarrollar la experiencia que representa la realización de la práctica de laboratorio para un motor de combustión interna.

Dicho Laboratorio Virtual, sería un programa de computadora que presente un entorno en el cual los distintos grupos de estudiantes puedan aplicar y ampliar los conocimientos teóricos adquiridos en clase, realizando prácticas de laboratorio las cuales actualmente se encuentran condicionadas por las circunstancias expuestas anteriormente. Actualmente el Laboratorio de Conversión de Energía Mecánica cuenta con un Laboratorio Virtual para la realización de la práctica de Turbina a Gas, dicho Laboratorio presenta la limitación de que es necesario que la computadora en la cual se realice la práctica disponga de otros programas instalados previamente para que el mismo pueda funcionar, se desea que el Laboratorio Virtual desarrollado para el Motor de Combustión Interna no presente esta limitación, y el mismo pueda ser utilizado en cualquier computadora sin la necesidad de tener previamente instalado otros programas.

El prototipo de Laboratorio Virtual de Motor de Combustión Interna planteado en este proyecto fue desarrollado utilizando el entorno de programación LabView, el mismo consiste un modelo matemático que representa el comportamiento del motor y una interfaz gráfica que permite al usuario variar ciertos parámetros de prueba (Posición Válvula del acelerador, Relación aire combustible, torque del freno acoplado al motor) y observar el comportamiento presentado por otros parámetros dada la variación de los primeros (Velocidad de giro, Torque, Potencia y Eficiencia del motor).

Para la realización de la simulación de los datos expuestos anteriormente se realizó una revisión bibliográfica de diversos métodos de simulación matemática de los distintos componentes de un Motor de Combustión Interna.

Dedico el esfuerzo plasmado en la realización de este libro a mi familia.

## **AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS**

A mi madre quien siempre ha sido ese apoyo fundamental para mí en buenos y malos momentos, quien ha sabido siempre como guiarme por mis mejores intereses, quien ha tenido la sabiduría de poner carácter o cariño en el momento en que han sido necesarios y quien siempre se ha mostrado paciente durante los años de desarrollo de mi carrera profesional.

A mis hermanos que siempre han sabido colaborarme cuando han sido necesarios y quienes con sus ejemplos han ayudado a formarme como persona a lo largo de toda mi vida.

A mis grandes amigos: Armando, Cachetes, Oscar, Adrian, Largo y Kary, quienes son como esa segunda familia que uno forma durante la vida, esas personas con las que compartes tantos buenos momentos y quienes también han sabido como apoyarme y dar un consejo cuando han sido necesarios.

A la profesora Nathaly Moreno por haber inspirado el desarrollo de este proyecto y guiarme durante el desarrollo del mismo.

Al equipo Formula SAE USB por permitirme formar parte de un proyecto tan gratificante y estimulante, en el que se pierden incontables horas de sueño con una gran sonrisa de satisfacción.

Y a todas esas personas con las que uno se topa durante los años de carrera, con las que se comparten horas de estudio, prácticas de laboratorio, desarrollos de proyecto, quienes en su momento supieron colaborar para la consecución de este gran objetivo.

# INDICE GENERAL

RESUMEN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
Símbolos en castellano .....	xii
Símbolos griegos .....	xiv
Subíndices generales .....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS .....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
CÁPITULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
1.1. Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC).....	4
1.1.1. Laboratorios Virtuales.....	4
1.1.2. Ejemplos de aplicación de LV a nivel mundial.....	5
1.1.2.1. “Virtual Labs” Ministerio de desarrollo de recursos humanos de India .....	6
1.1.2.2. Instituto Real de Tecnología KTH (Estocolmo, Suecia).....	7
1.1.2.3. Laboratorio de Conversión de Energía Mecánica USB, Turbina a Gas.....	7
1.2. Motores de Combustión Interna (MCI).....	8
1.3. Colector de Admisión.....	10
1.4. Modelado de MCI .....	13
1.4.1. Modelo Cuerpo Aceleración .....	14
1.4.2. Modelo del Múltiple de Admisión.....	15
1.4.3. Modelo del Rendimiento Volumétrico.....	16
1.4.4. Modelo mezcla Aire/Combustible.....	17
1.4.5. Modelo de Generación de Torque.....	18
1.4.6. Modelo para estimación de la Velocidad de giro.....	21
1.5. Algoritmo .....	21
1.6. Diagramas de Flujo .....	22
CAPÍTULO 2 PROGRAMACIÓN .....	23
2.1. Revisión de los entornos de programación disponibles .....	23
CAPÍTULO 3 PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DEL MODELO DEL MOTOR .....	28
3.1. Planteamiento del modelo del motor.....	28
3.1.1. Modelo desarrollado .....	29

3.1.1.1. Características .....	29
3.1.1.2. Estructura del modelo .....	29
3.2. Desarrollo del modelo de motor.....	32
3.2.1. Cuerpo de Aceleración.....	32
3.2.2. Colector de Admisión.....	34
3.2.3. Modelo del Rendimiento Volumétrico.....	35
3.2.4. Modelo Combustible .....	39
3.2.5. Modelo de Generación de Torque.....	39
3.2.6. Modelo de Cargas Externas.....	43
CAPÍTULO 4 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN EN LABVIEW .....	44
4.1. Desarrollo de la interfaz gráfica.....	46
CAPÍTULO 5 VALIDACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO.....	51
5.1 Obtención de las curvas para el modelo corregido. ....	56
CONCLUSIONES .....	65
Recomendaciones .....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
APENDICE A .....	68



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Longitudes de trompetas propuestas por Rivas y Viera. ....	12
<b>Tabla 1.2.</b> Coeficientes para la ecuación de Stöckli <sup>(10)</sup> para motores de encendido por chispa. ....	19
<b>Tabla 1.3.</b> Coeficientes para la estimación de la eficiencia en función de la relación arie-combustible, Guzella y Honder <sup>(8)</sup> . ....	21
<b>Tabla 3.1.</b> Características técnicas del motor estudiado. ....	28
<b>Tabla 3.2.</b> Datos obtenidos a partir de los resultados presentados por Engleman <sup>(9)</sup> .....	37
<b>Tabla 3.3.</b> Ecuaciones para realizar la interpolación lineal segmentaria del rendimiento volumétrico en función de la velocidad de giro. ....	37
<b>Tabla 3.4.</b> Datos para la realización de la curva eficiencia vs velocidad de giro. ....	40
<b>Tabla 5.1.</b> Valores de Torque y Potencia generados por el modelo desarrollado y presentados por Rivas y Viera. ....	52
<b>Tabla 5.2.</b> Coeficientes de la ecuación de Stöckli <sup>(10)</sup> para la corrección del modelo.....	53
<b>Tabla 5.3.</b> Valores de Torque y Potencia generados por el modelo corregido y presentados por Rivas y Viera. ....	55
<b>Tabla 5.4.</b> Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 0,7. ....	57
<b>Tabla 5.5.</b> Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 0,8. ....	57
<b>Tabla 5.6.</b> Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 0,9. ....	58
<b>Tabla 5.7.</b> Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 1. ....	58
<b>Tabla 5.8.</b> Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 1,1. ....	59
<b>Tabla 5.9.</b> Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 1,2. ....	59
<b>Tabla 5.10.</b> Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 1,3. ....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Diagrama P-V Ciclo Otto. ....	9
<b>Figura 1.2.</b> Carreras del pistón durante el ciclo Otto. ....	10
<b>Figura 1.3.</b> Comparación de curvas Torque vs RPM, para distintos modelos de admisión. ....	11
<b>Figura 1.4.</b> Curva Torque vs RPM, Resultados presentados por Rivas y Viera. ....	12
<b>Figura 1.5.</b> Eficiencia Volumétrica vs RPM para distintas longitudes de trompeta, resultados presentados por Engleman. ....	17
<b>Figura 1.6.</b> Curva de Eficiencia vs RPM propuesta por Guzella y Honder <sup>(8)</sup> .....	20
<b>Figura 1.7.</b> Curva Eficiencia vs Relación aire combustible, por Guzella y Honder <sup>(8)</sup> .....	21
<b>Figura 1.8.</b> Simbología para la realización de diagramas de flujo. <sup>(11)</sup> .....	22
<b>Figura 3.1.</b> Estructura del modelo general. ....	29
<b>Figura 3.2.</b> Estructura del modelo del bloque que representa el motor. ....	30
<b>Figura 3.3.</b> Estructura del modelo del bloque de Aire. ....	30
<b>Figura 3.4.</b> Estructura del modelo del bloque de combustible. ....	31
<b>Figura 3.5.</b> Estructura del modelo del bloque de combustión. ....	32
<b>Figura 3.6.</b> Estructura del modelo del bloque de cargas externas. ....	32
<b>Figura 3.7.</b> Diagrama del modelo del cuerpo de aceleración. ....	34
<b>Figura 3.8.</b> Diagrama del modelo del colector de Admisión.....	35
<b>Figura 3.9.</b> Curva de rendimiento volumétrico vs RPM obtenido a partir de la interpolación linear segmentaria. ....	38
<b>Figura 3.10.</b> Diagrama para el modelo del rendimiento volumétrico. ....	39
<b>Figura 3.11.</b> Curva Eficiencia vs Velocidad de giro obtenida a partir de los datos de la tabla 4.3. ....	41
<b>Figura 3.12.</b> Diagrama del modelo para la estimación de la eficiencia.....	42
<b>Figura 3.13.</b> Diagrama para la estimación de la corrección de la eficiencia. ....	42
<b>Figura 3.14.</b> Diagrama del modelo de combustión. ....	43
<b>Figura 4.1.</b> Panel de controladores. ....	46
<b>Figura 4.2.</b> Estructura del archivo del mapa de inyección. ....	47
<b>Figura 4.3.</b> Condiciones ambientales ....	47
<b>Figura 4.4.</b> Panel de indicadores. ....	48
<b>Figura 4.5.</b> Panel de indicadores del colector de Admisión. ....	49
<b>Figura 4.6.</b> Panel con botones para guardar los datos generados y detener el programa. ....	49
<b>Figura 4.7.</b> Interfaz gráfica de la aplicación.....	50
<b>Figura 5.1.</b> Comparación de curvas de Torque vs Velocidad de giro. ....	52

<b>Figura 5.2.</b> Comparación de curvas Potencia vs Velocidad de giro.....	53
<b>Figura 5.3.</b> Comparación de curvas de Torque vs Velocidad de giro para el modelo corregido. ....	55
<b>Figura 5.4.</b> Comparación de curvas Potencia vs Velocidad de giro para el modelo corregido.....	56
<b>Figura 5.5.</b> Curvas Torque vs Velocidad de giro para distintas relaciones Aire-Combustible. ....	60
<b>Figura 5.6.</b> Curvas Potencia vs Velocidad de giro para distintas relaciones Aire-Combustible. ....	61
<b>Figura 5.7.</b> Curvas Eficiencia vs Velocidad de giro para distintas relaciones Aire-Combustible.....	62
<b>Figura 5.8.</b> Curva Potencia máxima vs Relación Aire-Combustible. ....	63
<b>Figura 5.9.</b> Curva Eficiencia Máxima vs Relación Aire-Combustible.....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos en castellano:

$a$	Diámetro eje válvula del acelerador. $[0,005m]$
$B$	Diámetro de los pistones. $[m]$
$C_d$	Coefficiente de descarga de la válvula del acelerado.
$D_{mar}$	Diámetro de la válvula del acelerador. $[m]$
$d_{trom}$	Diámetro de las trompetas. $[m]$
$e$	Coefficiente de eficiencia.
$e_\lambda$	Término correspondiente a la relación aire combustible del coeficiente de eficiencias.
$e_\omega$	Término correspondiente a la velocidad de giro del coeficiente de eficiencia.
$f(\alpha)$	Factor de sección.
$f(\phi)$	Factor de presión.
$H_l$	Potencial calorífico inferior del combustible. $[41,2 \frac{MJ}{kg}]$
$L_{trom}$	Longitud de las trompetas. $[m]$
$\dot{m}_{en}$	Flujo másico de aire que entra al colector de admisión. $[\frac{kg}{s}]$
$m_{gas}$	Masa de combustible. $[kg]$
$\dot{m}_{gas}$	Flujo másico de combustible hacia los cilindros. $[\frac{kg}{s}]$
$\dot{m}_{sal}$	Flujo másico de aire que sale del colector de admisión. $[\frac{kg}{s}]$
$\dot{m}_{mar}$	Flujo másico válvula acelerador. $[\frac{kg}{s}]$
$\dot{m}_{mar}^{max}$	Flujo másico máximo permitido por la válvula de acelerador. $[\frac{kg}{s}]$
$p_{adm}$	Presión en el colector de admisión. $[Pa]$
$p_{amb}$	Presión ambiental. $[Pa]$
$p_{esc}$	Presión del colector de escape. $[Pa]$

$p_{me}$	Presión media efectiva.
$p_{me0}$	Pérdidas por fricción e intercambio de gases.
$p_{me0f}$	Pérdidas por fricción.
$p_{me0g}$	Pérdidas por intercambio de gases.
$p_{mgas}$	Presión media efectiva al combustible.
$R$	Constante universal de los gases. $[\frac{kJ}{Kg \cdot K}]$
$S$	Carrera de los pistones. $[m]$
$t$	Tiempo. $[s]$
$T_{adm}$	Temperatura en el colector de admisión. $[^{\circ}K]$
$T_{amb}$	Temperatura ambiente. $[^{\circ}K]$
$T_c$	Torque de la carga. $[N \cdot m]$
$T_m$	Torque generado por el motor. $[N \cdot m]$
$V_{adm}$	Volumen del colector de admisión. $[m^3]$
$V_c$	Volumen de compresión. $[m^3]$
$V_d$	Volumen desplazado por el motor. $[m^3]$
$V_{plenum}$	Volumen del plenum del colector de admisión. $[m^3]$
$V_{trom}$	Volumen de las trompetas. $[m^3]$

#### **Símbolos griegos:**

$\alpha$	Ángulo de apertura válvula acelerador.
$\alpha_0$	Ángulo posición ralenti válvula del acelerador.
$\gamma$	Relación de calores específicos.
$\eta_m$	Eficiencia del motor.
$\eta_v$	Rendimiento volumétrico.
$\eta_{vp}$	Componente del rendimiento volumétrico dependiente de las presiones.

$\eta_{v\omega}$	Componente del rendimiento volumétrico dependiente de la velocidad de giro.
$\theta_m$	Inercia rotacional del motor. $[kg \cdot m^2]$
$\lambda$	Relación aire combustible.
$\sigma_0$	Relación aire combustible estequiométrica.
$\phi$	Relación de presiones.
$\phi^*$	Presión crítica de Laval.
$\omega_m$	Velocidad de giro del motor. $[\frac{rad}{s}]$

**Subíndices generales:**

<i>adm</i>	Condición en el colector de Admisión.
<i>amb</i>	Condición Ambiental.
<i>c</i>	Carga.
<i>en</i>	Entrada al colector de admisión.
<i>esc</i>	Condición en el colector de Escape.
<i>m</i>	Motor.
<i>mar</i>	Válvula mariposa.
<i>sal</i>	Salida del colector de admisión.

## LISTA DE ABREVIATURAS

MCI	Motores de combustión interna.
SAE	Siglas en ingles para “Sociedad de Ingenieros Automotrices.”
USB	Universidad Simón Bolívar.
LV	Laboratorio Virtual.
TIC	Tecnologías de la información y comunicación.
LC	Laboratorio Convencional.
IIT	Instituto Indio de Tecnología.
GUIDE	Siglas en ingles para “Herramienta de Edición de Interfaces Gráficas de Usuario.”
PMI	Punto muerto inferior.
PMS	Punto Muerto Superior.
MVM	Modelo de Valores Medios.
MVD	Modelo de valores discretos.

## INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Conversión de Energía Mecánica de la Universidad Simón Bolívar no ha podido brindar a los estudiantes una herramienta confiable que les permita realizar la práctica de laboratorio de Motores de Combustión Interna (MCI), esto se debe a que el equipo destinado para la realización de dicha práctica no se encuentra operativo por la dificultad que se presenta para disponer de los repuestos necesarios para el correcto funcionamiento de éste. Dado éste hecho surge la necesidad de disponer de una herramienta alternativa que permita a los estudiantes realizar las prácticas de laboratorios, con la finalidad de que se les permita aplicar y ampliar los conocimientos teóricos obtenidos en clase, para esto se plantea el desarrollo de un Laboratorio Virtual (LV) que permita la realización de la práctica superando la limitación de que el equipo dispuesto por el laboratorio se encuentre operativo.

### **Antecedentes:**

El laboratorio de conversión de energía mecánica cuenta con un banco de pruebas de motor Ricardo en el cual se realizaban las prácticas de motores de combustión interna, por diversas circunstancias el mismo no se encuentra operativo actualmente. El banco de prueba está compuesto por un motor mono cilindro el cual permite la modificación de ciertos parámetros de manera de observar la forma en la que la variación de los mismos afecta el comportamiento del motor estudiado. Los parámetros modificables para el estudio del comportamiento del motor son: relación de compresión, tiempo de encendido de la chispa y relación aire combustible; de igual forma se puede variar el torque del freno acoplado al motor de manera de conocer el torque generado por el mismo.

Durante la realización de la práctica con este banco de pruebas se realizan diversas experimentaciones, se obtienen las curvas de torque y potencia para el motor; se varia el tiempo de encendido de la chispa de manera de encontrar el punto de máxima potencia; de igual forma se observa como la variación de la relación de compresión del motor afecta el comportamiento que este presenta.

Existe dentro del laboratorio otro banco desarrollado por el equipo Formula SAE USB, dicho banco consta de un motor Honda CBR 600 f4i acoplado a un freno hidráulico, con su respectiva unidad de control del motor. Este banco es utilizado por el equipo Formula SAE USB de manera de obtener las curvas características del motor para mejorar el desempeño del mismo y obtener



mejores resultados en su participación en la competencia anual de Formula SAE. Con la utilización de la unidad de control del motor se pueden modificar los tiempos de inyección de manera de establecer la relación aire combustible deseada y de igual forma se puede modificar el tiempo en que se produce el encendido de la chispa durante el tiempo de combustión del motor.

Este banco presenta las mismas limitaciones que el banco del motor Ricardo, el mismo no se encuentra operativo por limitaciones económicas para la obtención de ciertos componentes necesarios para el funcionamiento del mismo.

En cuanto al desarrollo de laboratorios virtuales existen también antecedentes dentro del laboratorio de conversión de energía mecánica, Dagnino <sup>(1)</sup> realizó un trabajo en el que desarrollo un prototipo de laboratorio virtual para la realización de la práctica de turbina a gas del laboratorio ya que por circunstancias similares a las de la práctica de motores de combustión interna, la misma no se encuentra operativa durante todos los trimestres.

Para el desarrollo del prototipo de laboratorio virtual Dagnino trabajo con datos experimentales obtenidos durante la realización de las prácticas y desarrollo un modelo matemático que permite simular el comportamiento presentado por la turbina del laboratorio. La aplicación desarrollada por Dagnino permite recrear la experiencia de la práctica realizada con la turbina del laboratorio.

### **Justificación del proyecto:**

Entre los objetivos de las universidades esta el capacitar a los estudiantes para obtener profesionales que se encuentren preparados para las exigencias del mundo laboral, dentro de este objetivo los laboratorios representan una de las principales herramientas con las que cuentan las universidades a la hora de preparar a los estudiantes. En los laboratorios los futuros profesionales tienen la oportunidad de observar los equipos, estudiados teóricamente en clase, en funcionamiento, de manera que se les permite tener una interacción directa con los mismos para poder aplicar y ampliar los conocimientos previamente adquiridos en las aulas.

Los laboratorios virtuales representan una nueva herramienta con la que pueden contar los laboratorios de la Universidad Simón Bolívar para continuar con su tradición formando profesionales de alta calidad; los mismos permiten el desarrollo de prácticas que bajo las actuales circunstancias no se garantiza que todos los grupos de estudiantes puedan llevar a cabo.

El estudio de los motores de combustión interna es de gran importancia ya que los mismos presentan múltiples aplicaciones en el mundo de la ingeniería, sobre todo en las áreas de

transporte y generación de energía, por esto resulta necesario que los estudiantes dispongan de herramientas que les permitan tener una mayor familiaridad con estos equipos y sus conocimientos no se limiten a los adquiridos en las clases.

De esta manera surge la necesidad del desarrollo de un modelo que permita simular el comportamiento de un MCI y que el mismo pueda ser utilizado para el desarrollo de un LV que permita a los estudiantes aplicar los conocimientos adquiridos.

### **Planteamiento del problema:**

Es necesario el desarrollo de un laboratorio virtual que permita a los estudiantes llevar a cabo la práctica de laboratorio de motores de combustión interna, de manera que funcione como una herramienta alternativa de la cual disponga el Laboratorio de Conversión de Energía para capacitar a los estudiantes en el caso de que el equipo dispuesto para este fin no se encuentre operativo. De igual forma se desea que la aplicación desarrollada no presente la limitación que se presenta con las aplicaciones desarrolladas para el laboratorio en el pasado, las cuales necesitan que las computadoras en las cuales sean utilizadas dispongan de otros software instalados previamente.

### **Objetivo General:**

Desarrollo de un laboratorio virtual que permita llevar a cabo la práctica para un motor de combustión interna; y que el mismo pueda ser utilizado en cualquier computadora sin la necesidad de otro software.

### **Objetivos Específicos:**

- Investigar métodos de simulación por computadora de comportamiento de motores de combustión interna.
- Desarrollo de un modelo de motor de combustión interna que sea fácilmente manipulable de manera que permita el estudio de motores de distintas características.
- Desarrollo de prototipo de laboratorio virtual de motor de combustión interna que sea fácilmente manipulable por los estudiantes de ingeniería mecánica. El mismo debe poder ser fácilmente ejecutable en cualquier computadora.

## CAPITULO 1

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 1.1. Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC)

Los profesionales de la educación buscan constantemente formas para mejorar la experiencia de los estudiantes a la hora de adquirir nuevos conocimientos, en esta constante búsqueda por avanzar en la forma de educar a los estudiantes surgió la utilización de las denominadas Tecnologías de la información y comunicación (en adelante TIC), estas buscan aplicarse en la educación de forma de crear nuevas herramientas que faciliten y complementen las formas tradicionales de impartir conocimientos.

Se entiende por TIC al conjunto de tecnologías que permiten la gestión y transmisión de información en diversos formatos, estos pueden ser: texto, audio, video, software, etc.

Dentro de las ventajas que supone la utilización de las TIC en la educación Cebrián <sup>(2)</sup> propone las siguientes:

- Mejoran la calidad de los aprendizajes.
- Permiten la adaptación y el conocimiento de un mundo laboral en el que se usan las tecnologías.
- Amplían el acceso a la educación.
- Responden al imperativo tecnológico.
- Reducen los costos de enseñanza.
- Mejoran la relación entre costos y la eficiencia de la enseñanza.

##### 1.1.1. Laboratorios Virtuales

Los laboratorios convencionales (LC) representan una importante herramienta dentro de la educación dado que permiten a los estudiantes poner en práctica los conocimientos adquiridos en las aulas de clases.

Sobre los LC, Lorandi *et al.* <sup>(3)</sup> señala que dentro de las principales ventajas que presentan los LC destaca su interactividad, ya que permiten a los estudiantes entrar en contacto con equipos reales. De esta misma forma es importante destacar los inconvenientes que pueden presentar los LC entre los cuales se pueden resaltar los costos iniciales para su implementación, la necesidad de mantenimiento y los costos del mismo, consumo energético por parte de los equipos y las

restricciones espaciales. Además de estos inconvenientes presentados por los LC es importante destacar la necesidad de supervisión por parte de los profesores y encargados del LC.

En cuanto a los Laboratorios Virtuales (LV) se pueden destacar las siguientes ventajas en relación a los LC <sup>(3)</sup>:

- Presenta la posibilidad de atender a mayor cantidad de estudiantes sin limitaciones de espacio.
- Se reducen significativamente de los costos de instalación y mantenimiento, resultando en una alternativa económica frente a los LC.
- El estudiante tiene la libertad de realizar la práctica de laboratorio en cualquier momento, evitando de esta manera el solapamiento con otros compromisos académicos que pueda tener el estudiante.
- El usuario puede realizar la experiencia libremente las veces que lo considere necesario sin temor a sufrir algún accidente ni producir malfuncionamiento en el equipo.
- Se brinda un ambiente propicio para el auto aprendizaje, el estudiante tiene libertad plena de modificar las variables de entrada y la configuración del sistema a analizar.

De igual manera, Lorandi *et al.* <sup>(3)</sup>, señala las posibles desventajas que podrían presentar los LV sobre los LC:

- No pueden sustituir totalmente a los LC, existen situaciones y prácticas que solo pueden realizarse en un equipo físico en un laboratorio.
- Dado que no se dispone de la guía de un profesor, es necesario que las actividades estén cuidadosamente planificadas, con procesos ordenados y progresivos.
- Como en todos los sistemas de enseñanza a distancia es necesario que las actividades del LV vengán acompañadas de un manual de prácticas y un proceso de evaluación que permitan verificar que el estudiante adquiera los conocimientos requeridos.
- Por ser una virtualización de la realidad se corre el riesgo de que el estudiante presente una pérdida parcial de la visión de la realidad que estudia.

### **1.1.2. Ejemplos de aplicación de LV a nivel mundial**

Existen en la actualidad instituciones que brindan este tipo de herramientas para permitir a los estudiantes obtener la experiencia de la realización de prácticas de laboratorio de forma remota, a continuación se presentaran algunos de los casos más relevantes.

### 1.1.2.1. “Virtual Labs” Ministerio de Desarrollo De Recursos Humanos de India

Este portal surge como una iniciativa por parte del Ministerio de Desarrollo de Recursos Humanos de India, nace dadas las limitaciones presentadas por las casas de estudio de dicho país, las mismas restringen la capacidad de realizar experimentos en todas las universidades. Los objetivos propuestos con la creación de este portal son <sup>(4)</sup>:

- Promover acceso remoto a laboratorios en múltiples disciplinas de las ciencias e ingeniería.
- Estimular a los estudiantes a realizar experimentos que los ayuden a obtener conocimientos básicos y avanzados a través de experimentación remota.
- Proveer un sistema de manejo del conocimiento a través de los laboratorios virtuales que permita que los estudiantes saquen provecho de múltiples herramientas para el aprendizaje como pueden ser recursos web, clases en video, demostraciones animadas y autoevaluación.
- Permitir que las universidades puedan compartir recursos y equipos que de otra forma estarían limitados a un número reducido de usuarios debido a limitaciones geográficas.

Entre las casas de estudio de este país que participan dentro de este programa se pueden destacar: el Instituto Indio de Tecnología (IIT) de Delhi, el IIT de Bombay, el IIT de Kanpur, el IIT de Kharagpur, la Universidad de Amrita, entre otras casas de estudio.

El portal presenta múltiples áreas de estudio en la que se pueden realizar prácticas de LV las mismas se organizan de la siguiente forma:

- Electrónica y Comunicaciones
- Ciencias y Ingeniería de computación.
- Ingeniería Eléctrica
- Ingeniería Mecánica
- Ingeniería Química
- Biotecnología e Ingeniería Biomédica
- Ingeniería Civil
- Ciencias de la Física
- Ciencias de la Química

### **1.1.2.2. Instituto Real de Tecnología KTH (Estocolmo, Suecia)**

El Instituto Real de Tecnología de Suecia KTH es una de las principales instituciones de educación superior en Europa en lo que respecta áreas técnicas, la misma fue fundada en 1827 y en su larga historia se ha destacado en las áreas de investigación y desarrollo de tecnología.

El instituto Real de Tecnología KTH es bastante reconocido a nivel internacional, tiene una orientación global y ha desarrollado numerosos programas de cooperación con universidades en todo el mundo.

Esta Universidad ha desarrollado numerosas estrategias para la implementación de las TIC en la formación de profesionales, entre ellas se puede destacar la implementación de programas de educación a distancia con la utilización de sistemas basados en el uso de internet.

En el área de LV puede destacarse el laboratorio de combustión, el mismo fue desarrollado con la intención de “trascender los horizontes de la educación en línea hacia una escala global”. Este laboratorio forma parte del curso de Teoría de Combustión impartido en esta casa de estudio.<sup>(5)</sup>

### **1.1.2.3. Laboratorio de Conversión de Energía Mecánica USB, Turbina a Gas.**

Dagnino<sup>(1)</sup> desarrollo un prototipo de laboratorio virtual en el cual realizar las prácticas para la turbina Deutz T216 del Laboratorio de Energía Mecánica de la USB, para esto utilizo el entorno de programación Matlab, realizo un modelos de Simulink y realizo la interfaz gráfica de usuario utilizando GUIDE.

El prototipo desarrollado permite a los estudiantes modificar los parámetros de funcionamiento manipulables en el banco de prueba real para la turbina: fuerza del freno y flujo de combustible, con estos valores de entrada el programa entrega los valores de salida: temperatura a la salida del compresor, temperatura de los gases de escape, pérdida de presión a la entrada del compresor, pérdida de presión en una tobera de medición de caudal de aire, diferencia de presión en el compresor y velocidad de giro.

Con estos datos los estudiantes pueden proceder a realizar los cálculos requeridos en la práctica los cuales permiten que se afiancen los conocimientos impartidos en las aulas de clase.

La principal limitación del prototipo de LV desarrollado por Dagnino<sup>(1)</sup> viene dada por la necesidad que presenta el mismo de que en la computadora en la que se ejecute debe a su vez disponer con el software Matlab previamente instalado para su funcionamiento.

## 1.2. Motores de Combustión Interna (MCI)

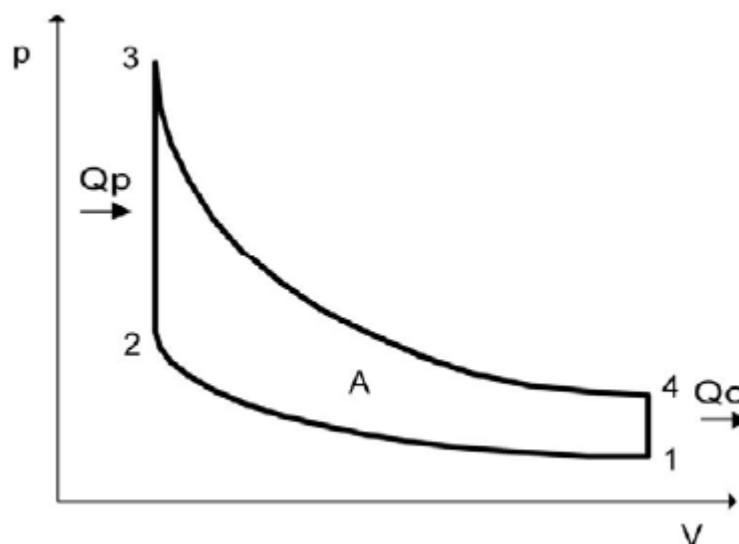
El propósito de los MCI es la producción de energía mecánica a partir de energía química contenida en el combustible. La energía es liberada quemando el combustible dentro del motor. La mezcla aire/combustible (antes de la combustión), al igual que los gases producidos después de la combustión (gases de escape) son los fluidos de trabajo. La transferencia de trabajo que genera la salida de potencia deseada ocurre directamente entre los fluidos de trabajo y los componentes mecánicos del motor. <sup>(6)</sup>

Para la realización de este estudio se pretende trabajar con un motor de 4 tiempos de encendido por chispa. El modelo de motor utilizado para el desarrollo del estudio es un motor Honda CBR 600 F4i que representa el motor que se ha utilizado en los prototipos FSAE-USB durante los últimos años.

El comportamiento de este motor se puede caracterizar mediante el ciclo Otto, el comportamiento de este ciclo se modela como un pistón que se mueve en línea recta dentro de un cilindro, este ciclo se caracteriza por que el pistón realiza 4 carreras para cumplir todo el recorrido del ciclo. Las 4 carreras realizadas por el pistón se pueden representar de la siguiente forma:

- 4 a 1 Carrera de Admisión.
- 1 a 2 Carrera de Compresión.
- 2 a 3 Carrera de Combustión.
- 3 a 4 Carrera de Escape.

El desarrollo del ciclo puede observarse más fácilmente mediante el diagrama P-V presentado en la figura 1.1.



**Figura 1.1.** Diagrama P-V Ciclo Otto.

En la figura 1.1. Se presenta la representación del diagrama P-V del Ciclo Otto, en este se puede observar claramente el recorrido que realiza el pistón para obtener los distintos estados del fluido. Resalta a simple vista que todo el recorrido del ciclo ocurre entre dos niveles distintos de Volumen para el fluido de trabajo, el volumen máximo, que se tiene para los estados 1 y 4 representa el volumen del fluido cuando el pistón se encuentra en el Punto Muerto Inferior (PMI), para los estados 3 y 2 se presenta el menor valor del volumen, el mismo ocurre cuando el pistón se encuentra en el Punto Muerto Superior (PMS).

Entre los estados 4 y 1 se lleva a cabo la carrera de Admisión, durante este proceso el pistón se desplaza desde el PMS hacia el PMI, a medida que se va produciendo el desplazamiento del pistón se genera una disminución de presión dentro del cilindro que causa un flujo de mezcla aire/combustible a través de las válvulas de admisión.

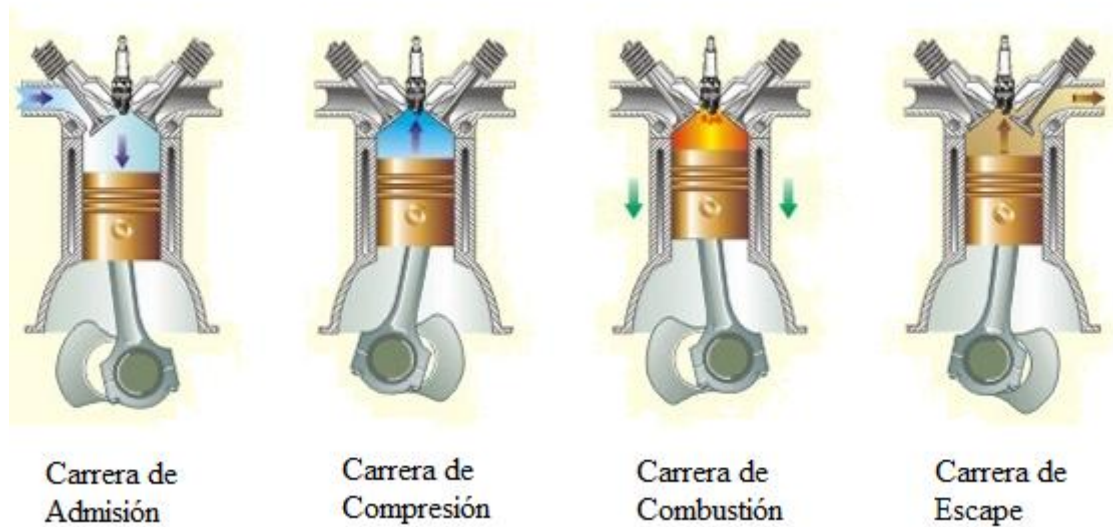
Entre los estados 1 y 2 ocurre la carrera de Compresión, durante este proceso el pistón se desplaza desde el PMI hasta el PMS, esto produce un aumento en la presión del fluido dada la disminución del volumen del mismo (se debe tener en cuenta que este proceso ocurre manteniendo las válvulas tanto de admisión como escape cerradas de manera que se mantiene constante la masa de fluido durante todo el proceso).

La carrera de Combustión ocurre entre los estados 2 y 3, en este caso el pistón se desplaza desde el PMS hacia el PMI, durante este proceso se induce una chispa que produce la combustión de la mezcla aire/combustible, esto produce un súbito aumento de presión dentro del cilindro,



causando la expansión de los gases de combustión, esta expansión es la que produce la potencia mecánica generada por el motor. Al igual que para el caso de la carrera de compresión, durante todo el proceso de la combustión las válvulas de admisión y escape se mantienen cerradas durante todo el proceso.

Para finalizar entre los estados 3 y 4 se produce la carrera de Escape, durante este proceso el pistón se desplaza desde el PMI hasta el PMS, las válvulas de escape se abren de manera de permitir que los gases de combustión sean expulsados del cilindro, una vez que el pistón alcanza el PMS se cierran las válvulas de escape y se abren las válvulas de admisión de manera que se pueda reiniciar el ciclo con la carrera de Admisión.



**Figura 1.2.** Carreras del pistón durante el ciclo Otto.

La Figura 1.2 permite ilustrar como se producen las distintas carreras que realiza el pistón durante el ciclo Otto, en la misma se observa como las válvulas de admisión y escape se mantienen cerradas durante los ciclos de compresión y combustión, de igual forma se puede observar como las mismas se abren durante sus respectivas carreras correspondientes.

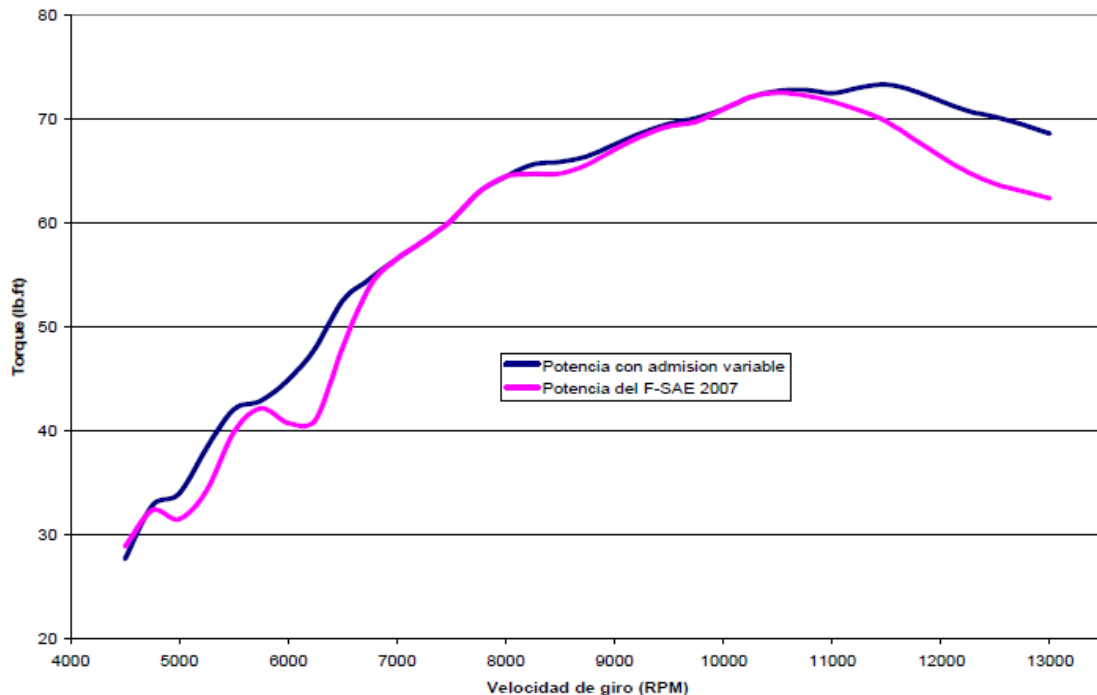
### 1.3. Colector de Admisión.

Uno de los componentes del motor de estudio que es importante destacar es el colector de admisión, el mismo ha sido desarrollado dentro del equipo FSAE-USB a lo largo de los años de manera sacar el máximo provecho del motor, dadas las restricciones impuestas por la normativa de la competencia para la entrada de aire del motor, la misma impone que todo el aire que ingrese al motor debe pasar a través de un orificio con una sección de 20mm de diámetro.

El múltiple de admisión es la parte del motor que se encarga de proveer, de manera equitativa, la mezcla aire/combustible (o solo aire en el caso de los motores de inyección directa) hacia los cilindros del motor. La distribución de equitativa de la mezcla hacia los cilindros tiene gran importancia para obtener un buen desempeño del motor.

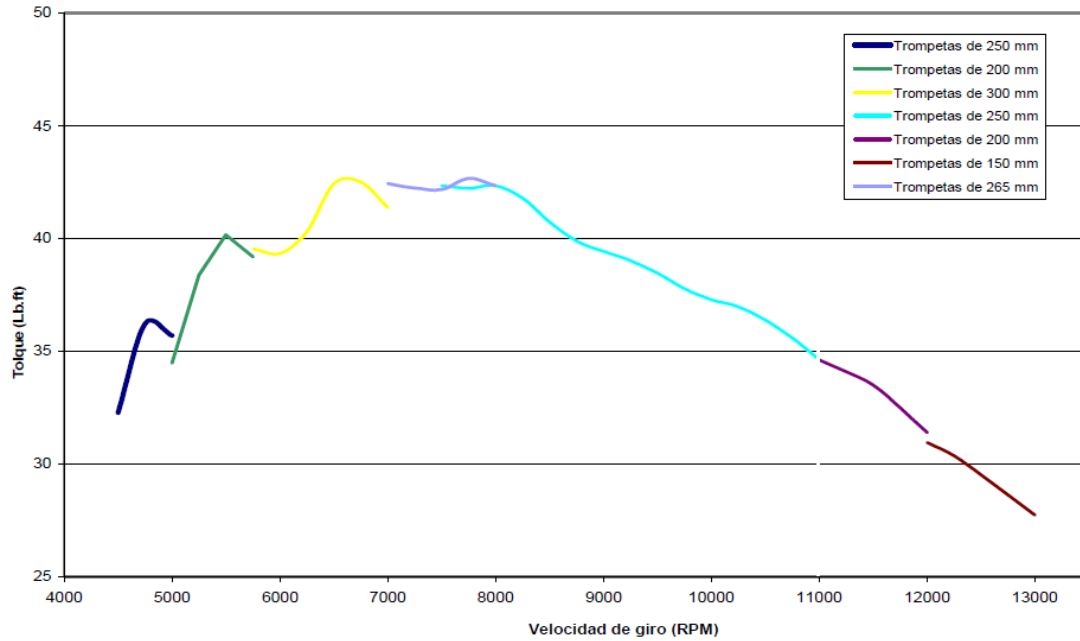
Dada la importancia que tiene este elemento dentro del desempeño del motor se han desarrollado varios trabajos dentro del equipo FSAE-USB para obtener un diseño de colector de admisión que permita obtener la máxima potencia del motor, dadas las limitaciones impuestas por la normativa de la competencia. En este sentido el último desarrollo presentado por el equipo viene del trabajo de grado: “Diseño y construcción de un sistema de longitud de trompetas variable para un carro tipo formula” realizado por Rivas, Manuel y Viera, Juan en el año 2008.

En su trabajo Rivas y Viera <sup>(7)</sup> proponen un diseño de colector de admisión que presente una longitud de trompetas variables, esto con el fin de aprovechar las ondas de choque que se producen a lo largo de las trompetas producto del súbito cambio de velocidad que se produce en el flujo de aire una vez que alcanza las válvulas de admisión y esta se encuentran cerradas, de esta forma se busca obtener una mayor eficiencia volumétrica del motor y con esto mejorar el desempeño del mismo.



**Figura 1.3.** Comparación de curvas Torque vs RPM, para distintos modelos de admisión.

En la figura 1.3 se puede observar que con el modelo de colector de admisión propuesto por Rivas y Viera se logra obtener mayores valores del torque del motor para ciertos intervalos de velocidades de giro del mismo.



**Figura 1.4.** Curva Torque vs RPM, Resultados presentados por Rivas y Viera.

La figura 1.3 presenta los resultados obtenidos por Rivas y Viera <sup>(7)</sup> para la curva Torque vs RPM para el modelo de colector de admisión propuesto, de esta figura se pueden determinar las distintas longitudes de trompetas que proponen de manera de obtener el mayor rendimiento del motor.

**Tabla 1.1.** Longitudes de trompetas propuestas por Rivas y Viera.

Desde-Hasta [RPM]	$L_{\text{trom}}$ [m]
0-5000	0,250
5000-6000	0,200
6000-7000	0,300
7000-8000	0,265
8000-11000	0,250
11000-12000	0,200
12000-13000	0,150

#### 1.4. Modelado de MCI

No existe ningún modelo matemático que describa completamente el comportamiento de todos los componentes de un MCI, sin embargo, si existen representaciones matemáticas que describen el comportamiento que presentan los distintos subcomponentes de un MCI, estas ecuaciones son derivadas a partir de simplificaciones realizadas a los fenómenos físicos que se presentan en cada uno de estos componentes, el alcance de las simplificaciones realizadas para cada una viene determinado a partir del objetivo que se pretende alcanzar con el modelo de estudio. De esta forma podemos establecer dos principales grupos en los cuales podríamos clasificar los modelos existentes para los distintos componentes de un MCI.

En primer lugar podemos mencionar los modelos matemáticos orientados al diseño de los diversos componentes, la principal característica de este tipo de modelos es que buscan ser una representación fiel de los fenómenos que están ocurriendo dentro del componente de estudio, estos modelos se desarrollan con el fin de diseñar o modificar algún elemento del componente estudiado. Generalmente las variables utilizadas para el desarrollo de estos modelos son del tipo geométrico físico, se desea observar como modificando físicamente algún elemento del componente se puede variar el desempeño del mismo. Este tipo de modelo se utiliza para determinar un número limitado de variantes a estudiar a la hora de realizar la experimentación con los componentes reales.

Por otro lado se puede destacar los modelos orientados al control, estos se caracterizan por ser modelos un poco más sencillos que los orientados al diseño, esto debido a que los mismos no buscan reflejar cabalmente todas las características del fenómeno que se hasta llevando a cabo, sino que se limitan a reflejar el comportamiento de las partes que guardan relación con la variable que se pretende controlar. Los parámetros utilizados para representar estos modelos suelen ser los que estén orientados al control de estas variables.

Para el desarrollo de éste estudio se decidió trabajar con modelos de MCI orientados al control, esto debido a que no se pretende modificar ni realizar el diseño de ninguno de los componentes del modelo de motor estudiado, los objetivos que se plantean para la realización del laboratorio virtual son el ingresar ciertos parámetros de entrada y observar cómo se comportan la variables de estudio al modificar estos parámetros. De igual forma este tipo de modelos presenta un menor costo computacional ya que las ecuaciones utilizadas para caracterizarlos presentan un menor grado de complejidad que los modelos orientados al diseño.

Guzella y Onder<sup>(8)</sup> proponen dos subdivisiones dentro de los modelos de MCI orientados al control, ellos diferencian los *Mean-Value Models* o Modelos de Valor Medio en español (MVM en adelante) y los *Discrete-Event Models* o Modelos de Eventos Discretos (MED en adelante).

Esta subdivisión dentro de los modelos orientados al control surge como producto del comportamiento recíprocante de los motores; los MVM no toman en consideración el comportamiento recíprocante de los motores, estos asumen que todos los procesos ocurren a lo largo del ciclo del motor, los MED si toman en consideración explícitamente este comportamiento.

Para los MVM la variable independiente de trabajo es el tiempo  $t$ , por su parte para los MED la variable independiente es el ángulo de giro del cigüeñal  $\phi$ . Para los MVM se logra capturar el comportamiento recíprocante del motor introduciendo retrasos entre los efectos a la entrada y salida de los cilindros.

A continuación se presentan los modelos orientados al control encontrados que se consideran más relevantes para el caso de estudio planteado:

#### 1.4.1. Modelo Cuerpo Aceleración

El cuerpo de aceleración es el elemento del motor que controla el flujo de aire que entra al múltiple de admisión, el mismo funciona con una válvula que restringe el flujo de aire, esta permite controlar la cantidad de aire que circula hacia la admisión.

El modelo de motor estudiado cuenta con una válvula mariposa para su cuerpo de aceleración, este es el tipo de válvulas más comúnmente utilizada para estos elementos.

Heywood<sup>(6)</sup> propone la siguiente ecuación para representar el comportamiento del flujo de aire a través de la válvula mariposa.

$$\dot{m}_{mar} = \dot{m}_{mar}^{max} \cdot C_d \cdot f(\alpha) \cdot f(\phi) \quad 1.1$$

$$\dot{m}_{mar}^{max} = \frac{\pi \cdot D_{mar}^2}{4} \frac{p_{adm}}{\sqrt{R \cdot T_{adm}}} \quad 1.2$$

Donde  $\dot{m}_{mar}^{max}$  representa el máximo caudal de aire posible,  $C_d$  el coeficiente de descarga de la válvula,  $D_{mar}$  el diámetro de la mariposa,  $p_{adm}$  y  $T_{adm}$  respectivamente la presión y la temperatura en el colector de admisión.

El término  $f(\phi)$  que se presenta en la ecuación representa el factor de presión, el mismo depende del valor del cociente de presiones aguas arriba y aguas debajo de la válvula ( $\phi$ ), este término se obtiene a partir de la expresión de Saint Venant de la siguiente manera:

$$\phi = \frac{p_{adm}}{p_{amb}} \quad 1.3$$

$$f(\phi) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} (\phi^{\frac{2}{\gamma}} - \phi^{\frac{\gamma+1}{\gamma}})}, & \phi^* \leq \phi \leq 1 \\ \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}, & \phi < \phi^* \end{cases} \quad 1.4$$

El término  $\phi^*$  representa la presión crítica de Laval, y corresponde al caudal máximo alcanzable una vez el gas se encuentra a la velocidad del sonido, este se obtiene a partir de:

$$\phi^* = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad 1.5$$

Por último es necesario identificar el término  $f(\alpha)$  este representa el factor de sección de paso de la válvula, este depende del ángulo de la válvula ( $\alpha$ ), para la geometría de la válvula utilizada por el prototipo de referencia, tubo cilíndrico con una mariposa articulada por su diámetro, se tiene la siguiente expresión:

$$f(\alpha) = \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0}\right) + \frac{2}{\pi} \left(\frac{a}{\cos \alpha} \sqrt{\cos^2 \alpha - a^2 \cos^2 \alpha_0} - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \sin^{-1} \left(a \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}\right) - a \sqrt{1 - a^2} + \sin^{-1} a\right) \quad 1.6$$

En esta expresión el término  $a$  representa el diámetro del eje de la mariposa, mientras que el término  $\alpha_0$  corresponde con el valor del ángulo para el cual la válvula se encuentra en la posición de ralenti.

#### 1.4.2. Modelo del Múltiple de Admisión

Anteriormente se explico en mayor detalle la finalidad del múltiple de admisión. La expresión que se presenta a continuación describe el comportamiento del colector de admisión, esta expresión se obtiene al suponer que el fluido se comporta como gas ideal y que no se presentas variaciones en la temperatura del mismo o las variaciones se producen muy lentamente, esta

expresión se deriva a partir del planteamiento de las ecuaciones de conservación de masa y energía:

$$\frac{d}{dt} p_{adm}(t) = \frac{R \cdot T_{amb}}{V_{adm}(\omega_m)} \cdot [\dot{m}_{en}(t) - \dot{m}_{sal}(t)] \quad 1.7$$

#### 1.4.3. Modelo del Rendimiento Volumétrico

El rendimiento volumétrico representa la relación entre el flujo de aire que entra realmente al cilindro para la combustión y el flujo de aire teórico que podría entrar al cilindro.

Guzella y Onder<sup>(8)</sup> proponen la siguiente expresión para la estimación del rendimiento volumétrico del motor, la misma representa una formulación multilineal cuya dependencia viene dada por la presión de la admisión y la velocidad de giro del motor.

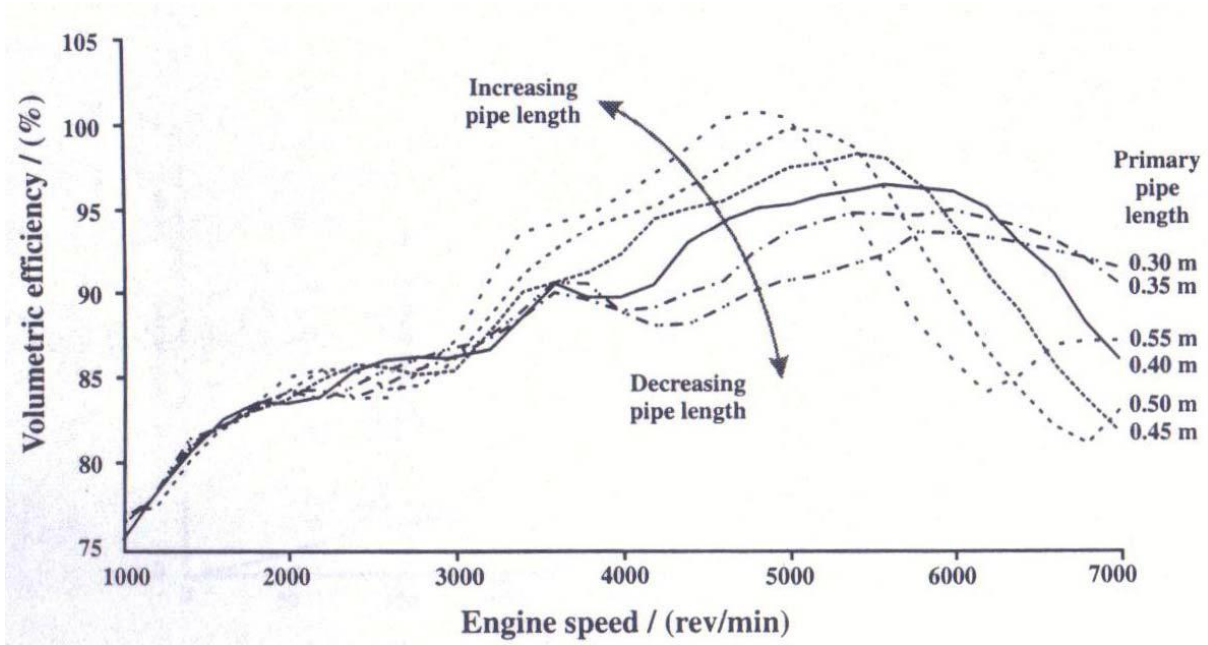
$$\eta_v(p_{adm}, \omega_m) = \eta_{vp}(p_{adm}) \cdot \eta_{v\omega}(\omega_m) \quad 1.8$$

De esta manera se puede determinar la parte dependiente de la presión, asumiendo gases perfectos manteniendo valor de  $\gamma$  constante y procesos isentrópicos, a partir de la expresión:

$$\eta_{vp}(p_{adm}) = \frac{V_c + V_d}{V_d} - \left( \frac{p_{esc}}{p_{adm}} \right)^{1/\gamma} \cdot \frac{V_c}{V_d} \quad 1.9$$

El término  $p_{sal}$  representa el valor de la presión en el colector de escape el cual es asumido constante  $V_c$  representa el volumen de compresión.

Para la estimación del término del rendimiento volumétrico dependiente de la velocidad de giro del motor se decidió utilizar los resultados presentados por Engelman<sup>(9)</sup> los mismos también toman en consideración los cambios en las longitudes de las trompetas del colector de admisión, esto es de gran importancia dado que el modelo de motor utilizado como referencia para la realización de este trabajo utiliza un colector de admisión con longitud de trompetas variables.



**Figura 1.5.** Eficiencia Volumétrica vs RPM para distintas longitudes de trompeta, resultados presentados por Engleman<sup>(9)</sup>.

A partir de esta definición del rendimiento volumétrico, se puede obtener el valor del flujo de aire hacia los cilindros del motor a partir de la siguiente expresión propuesta por Guzella y Onder<sup>(8)</sup>

$$\dot{m}_{sal} = \frac{p_{adm}(t)}{T_{adm} \cdot R_{aire}} \cdot \eta_v(p_{adm}, \omega_m) \cdot \frac{V_d}{N} \cdot \frac{\omega_m(t)}{2\pi} \quad 1.10$$

#### 1.4.4. Modelo mezcla Aire/Combustible.

El valor de la relación aire combustible  $\lambda$  se puede determinar a partir de la ecuación:

$$\lambda(t) = \frac{\dot{m}_{sal}(t)}{\dot{m}_{gas}(t)} \cdot \frac{1}{\sigma_0} \quad 1.13$$

Esta ecuación es aplicable si no se toman en consideración los efectos de intercambios de gases de escape, se asume que ninguna fracción de los gases consumidos durante la combustión permanece dentro del cilindro, de manera que la próxima combustión se producirá solo con mezcla fresca. Se realiza esta suposición de manera de simplificar el modelo y no obtener ecuaciones muy complejas para la descripción del mismo.



### 1.4.5. Modelo de Generación de Torque.

Para presentar el modelo utilizado para definir la generación de torque del motor es necesario que primero presentemos las definiciones de lo que son los términos de presión media efectiva al freno  $p_{me}$ , esta representa la presión que debe actuar sobre el pistón durante el tiempo de expansión para producir la misma cantidad de trabajo que el motor real produce en dos revoluciones. Y la presión media efectiva al combustible  $p_{mgas}$ , esta representa el valor de  $p_{me}$  que un motor con una eficiencia de 1 produciría para la cantidad de masa de combustible  $m_{gas}$  consumida por ciclo del motor (para una perfecta conversión de la energía térmica del combustible en energía mecánica).

$$p_{me} = \frac{T_m \cdot 4\pi}{V_d} \quad 1.14$$

$$p_{mgas} = \frac{H_l \cdot m_{gas}}{V_d} \quad 1.15$$

Donde la masa de combustible  $m_{gas}$  se relaciona con el flujo másico de combustible a través de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{gas}(t) = m_{gas}(t) \cdot \frac{\omega_m(t)}{4\pi} \quad 1.16$$

De esta forma la eficiencia del motor puede ser descrita como:

$$\eta_m = \frac{p_{me}}{p_{mgas}} \quad 1.17$$

Esta última ecuación se puede reescribir de la siguiente forma de manera de obtener una expresión que permita realizar el cálculo de  $p_{me}$ .

$$p_{me} = \eta_m \cdot p_{mgas} \quad 1.18$$

De esta manera Guzella y Honder<sup>(8)</sup> proponen la utilización de la aproximación de Willans de manera de realizar la estimación del valor de  $p_{me}$

$$p_{me} = e(\omega_m, \lambda) \cdot p_{mgas}(\dot{m}_{gas}, \omega_m) - p_{me0}(\lambda, \dot{m}_{sal}, p_{mgas}) \quad 1.19$$

Donde el término  $e$  representa un coeficiente de eficiencia, el cual abarca las propiedades termodinámicas del motor (las diferencias con respecto a una conversión perfecta de la energía

térmica del combustible en energía mecánica); y el segundo termino de la ecuación  $p_{me0}$  abarca las pérdidas por fricción e intercambio de gases.

Para el cálculo de las pérdidas por fricción e intercambio de gases se tienen las expresiones:

$$p_{me0}(\lambda, \omega_m, p_{mgas}, \dot{m}_{sal}) = p_{me0f}(\omega_m) + p_{me0g}(\lambda, \dot{m}_{sal}, p_{mgas}) \quad 1.20$$

$$p_{me0g}(\lambda, \dot{m}_{sal}, p_{mgas}) = p_{me0g}(0) \cdot \left[ 1 - 0.85 \cdot \frac{\lambda \cdot \sigma_0 \cdot V_d / H_l}{\dot{m}_{sal}} \cdot p_{mgas} \right] \quad 1.21$$

La ecuación 1.21 permite realizar la estimación de las pérdidas por intercambio de gases. El valor de  $p_{me0g}(0)$  que represente el valor para cuando el motor se encuentra encendido pero la válvula del cuerpo de aceleración se encuentra cerrada y no hay inyección de combustible puede estimarse  $p_{me0g}(0) \approx 0.7 \text{ bar}^{(8)}$ . Se puede observar que el segundo término es lineal con respecto a  $p_{m\phi}$  de manera que puede ser agregado al término  $e$  y así obtener un nuevo valor para el coeficiente de eficiencia

$$e^* = e + 0.85 \cdot \frac{\lambda \cdot \sigma_0 \cdot V_d / H_l}{\dot{m}_{sal}} \cdot p_{me0g}(0) \quad 1.22$$

El modelo para la estimación de las pérdidas por fricción se presenta a continuación, se utilizó el modelo desarrollado por Stöckli<sup>(10)</sup>:

$$p_{me0f}(\omega_m) = k_1 \cdot (k_2 + k_3 \cdot S^2 \cdot \omega_m^2) \cdot \sqrt{\frac{k_4}{B}} \quad 1.23$$

En la siguiente tabla se expresan valores típicamente utilizados para los diferentes términos introducidos para esta ecuación para un motor de encendido por chispa.

**Tabla 1.2.** Coeficientes típicos para la ecuación de Stöckli<sup>(10)</sup> para motores de encendido por chispa.

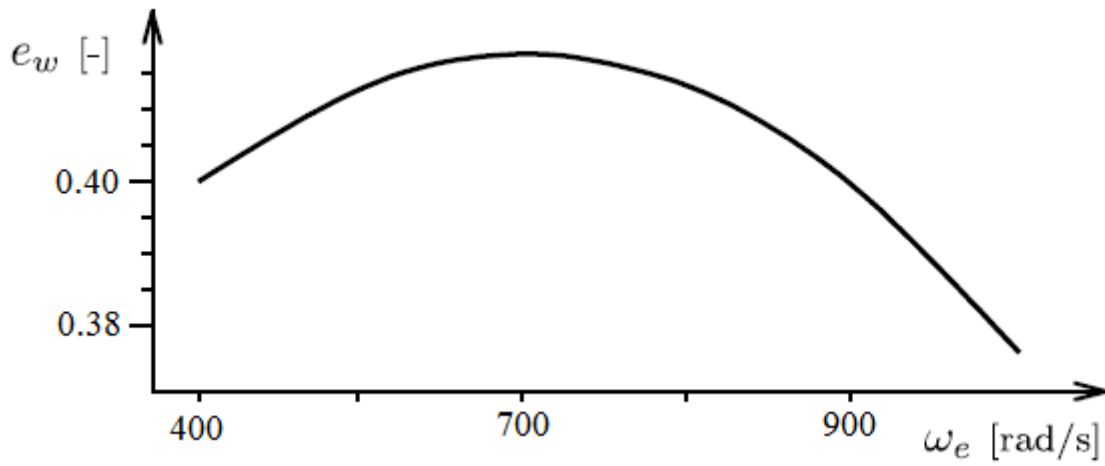
Término	Valor
$k_1$	$1,44 \cdot 10^5 \text{ [Pa]}$
$k_2$	0,46
$k_3$	$9,1 \cdot 10^{-4} \text{ [s}^2/\text{m}^2\text{]}$
$k_4$	0,075 [m]

Para la realización de la estimación del valor para el factor de eficiencia se propone utilizar la siguiente formulación:

$$e = e_{\omega}(\omega_m) \cdot e_{\lambda}(\lambda) \quad 1.24$$

De esta forma es necesario presentar en detalle como estimar los distintos componentes para la eficiencia.

Para la estimación del término de la eficiencia dependiente de la velocidad de giro del motor se propone<sup>(8)</sup> la utilización de la siguiente gráfica que refleja el comportamiento de la misma (figura 1.6)



**Figura 1.6.** Curva de Eficiencia vs RPM propuesta por Guzella y Honder<sup>(8)</sup>.

En cuanto a la estimación del componente de la eficiencia dependiente de la relación de la mezcla aire/combustible, se propone<sup>(8)</sup> la siguiente formulación:

$$e_{\lambda}(\lambda) = \begin{cases} \gamma_1 \cdot \lambda - \gamma_0, & \lambda_{min} < \lambda < \lambda_1 \\ e_{\lambda,1} + (1 - e_{\lambda,1}) \cdot \text{sen} \left( \frac{\lambda - \lambda_1}{1 - \lambda_1} \right), & \lambda_1 < \lambda < \lambda_2 \\ 1, & \lambda_2 < \lambda < \lambda_{max} \end{cases} \quad 1.25$$

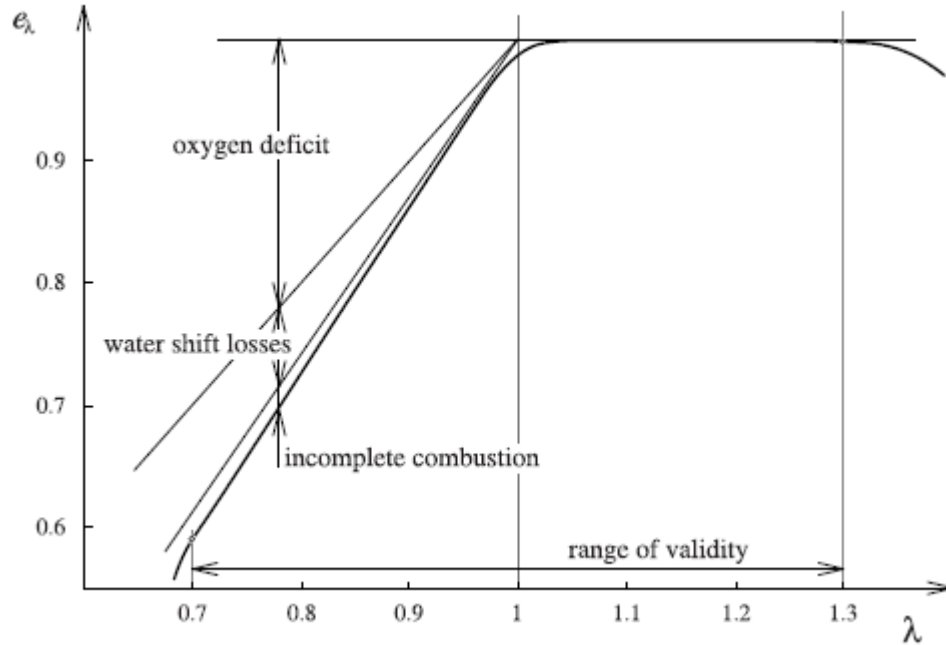
Para determinar el valor correspondiente al término  $e_{\lambda,1}$  se utiliza la ecuación:

$$e_{\lambda,1} = \gamma_1 \cdot \lambda_1 - \gamma_0 \quad 1.26$$

Los valores de los términos  $\lambda_{min}, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_{max}, \gamma_0, \gamma_1$  se determinan a partir de la tabla presentada a continuación.

**Tabla 1.3.** Coeficientes para la estimación de la eficiencia en función de la relación arie-combustible, Guzella y Honder<sup>(8)</sup>.

$\lambda_{min}$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_{max}$	$\gamma_0$	$\gamma_1$
0,7	0,95	1,0285	1,3	0,373	1,373



**Figura 1.7.** Curva Eficiencia vs Relación aire combustible, por Guzella y Honder<sup>(8)</sup>.

#### 1.4.6. Modelo para estimación de la Velocidad de giro

Para la estimación del valor de la velocidad de giro del motor es necesario establecer la ecuación de balanceo dinámico para el sistema, la misma permite determinar el valor de la velocidad de giro partiendo de los valores de los torques de la carga y del motor, así como del valor del momento de inercia del motor.

$$\Theta_m \cdot \frac{d}{dt} \omega_m(t) = T_m(t) - T_c(t) \quad 1.27$$

### 1.5. Algoritmo

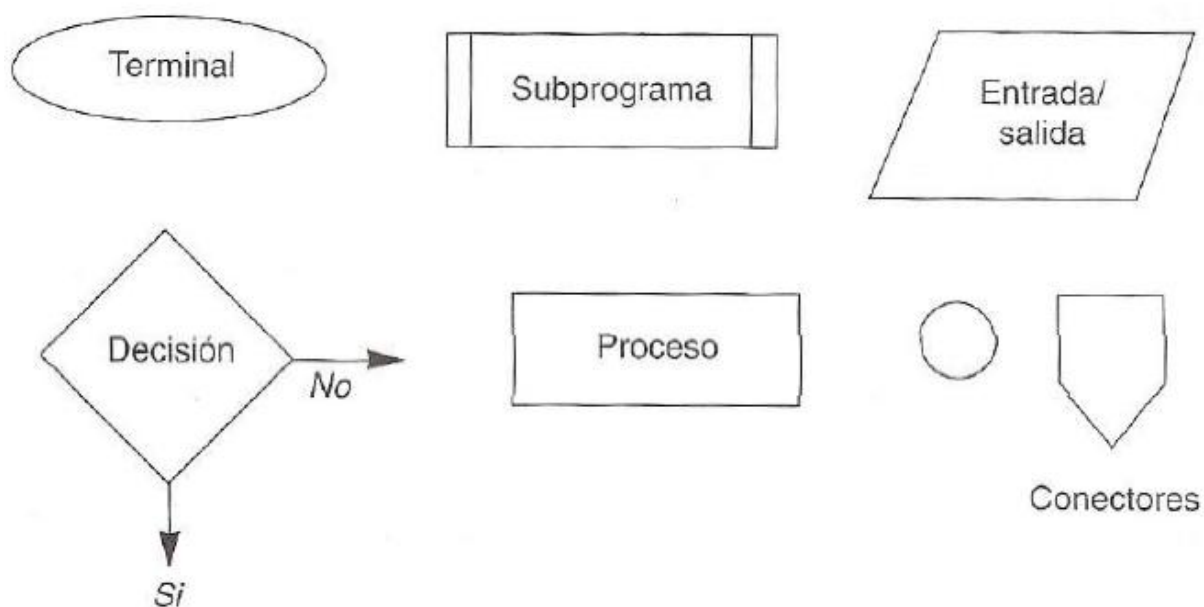
Se entiende por algoritmo a un conjunto de instrucciones claras que funcionan como guía en la que se van presentando los pasos necesarios para la resolución de un problema. Los algoritmos pueden ser presentados de diversas formas, entre ellas se destacan los diagramas de flujo ya que

estos son formas estructuradas de representar los algoritmos que evitan las ambigüedades de la utilización del lenguaje natural para la descripción de un algoritmo.

### 1.6. Diagramas de Flujo

Los diagramas de flujo son representaciones gráficas de los algoritmos, estos permiten describirlos de forma clara de manera de evitar posibles imprecisiones presentadas a la hora de utilizar el lenguaje natural para la descripción de algoritmos.

La simbología utilizada para la realización de estos diagramas se encuentra estandarizada, los símbolos se encuentran unidos a través de líneas de flujo, el sentido indicado en ellas determina la secuencia en la que se deben realizar las operaciones. <sup>(11)</sup>



**Figura 1.8.** Simbología para la realización de diagramas de flujo. <sup>(11)</sup>

## CAPÍTULO 2

### PROGRAMACIÓN

#### 2.1. Revisión de los entornos de programación disponibles

Dagnino<sup>(1)</sup> realizó una recopilación de los entornos de programación disponibles para la realización de cálculos de equipos mecánicos y la realización del LV, así mismo realizó una comparación entre los entornos estudiados destacando las ventajas y desventajas presentados por los mismos, a continuación se presenta un resumen de los entornos estudiados en su investigación:

FORTRAN: destaca por ser el primer lenguaje de programación de alto nivel desarrollado, las ventajas presentadas por este lenguaje son:

- Es altamente aceptado en la comunidad científica, permite la revisión de programas anteriormente desarrollados de manera de ser utilizados como base para propios desarrollos.
- Fue diseñado para la resolución de problemas científicos, por esto cuenta con gran cantidad de funciones matemáticas, científicas y estadísticas entre sus librerías.

De igual manera, de este entorno se pueden destacar las siguientes desventajas:

- Los comandos deben ser inscritos en líneas menores a 132 caracteres.
- Se requiere que toda la programación se realice por comandos en un editor de texto para su posterior compilación. Esto dificulta la detección de errores en el código.

Lenguaje C: las ventajas destacadas para este lenguaje son:

- Es poderoso y flexible, posee una amplia biblioteca que permite la incorporación de órdenes, funciones y operaciones de alta complejidad.
- Presenta el mismo comportamiento en diferentes sistemas operativos, esto lo hace altamente portátil.

Entre las desventajas para este lenguaje se tienen:

- Las bibliotecas no están dirigidas a la resolución de problemas científicos, esto causa la falta de funciones y operadores matemáticos.
- Dada la falta de funciones matemáticas, es necesario definir gran cantidad de funciones para la realización del código.

- Se requiere la utilización de técnicas avanzadas para la realización de la interfaz gráfica de usuario.

Microsoft Excel: entorno de cálculo desarrollado por Microsoft. Se basa en la utilización de hojas de cálculo divididas en celdas en las cuales se pueden introducir valores estáticos o programar funciones que se calcularán automáticamente. Entre las ventajas presentadas por este entorno se tienen:

- Fue diseñado para la resolución de problemas matemáticos, presenta gran cantidad de funciones matemáticas que facilitan la programación de las hojas de cálculo.
- La resolución de los cálculos se realiza de forma casi inmediata.
- Aunque no presente un lenguaje de programación propio, permite la incorporación de programación por medio de macros para automatizar los cálculos.

Las principales desventajas presentadas por este entorno son:

- Al no poseer un lenguaje de programación propio, no permite realizar programación, esto causa que las celdas deban ser llenadas manualmente, ya sea con valores o fórmulas.
- Es necesario poseer conocimientos de Java para la realización de una interfaz gráfica de usuario y un programa que funcione automáticamente.

MathCad: es un entorno de programación y cálculo que permite realizar cálculos rápidos, posee un lenguaje de programación propio que permite la realización de programas de lógica simple. Entre sus ventajas se destacan:

- Al resultar un entorno desarrollado para la resolución de problemas matemáticos, presenta una amplia librería de funciones.
- Es un lenguaje de programación simple que utiliza instrucciones comunes a los demás lenguajes, no se requieren vastos conocimientos de programación para su utilización.

De igual forma presenta las siguientes desventajas:

- Solo permite la programación de cálculos con lógica simple.
- La resolución de problemas no es tan rápida como otros entornos de programación.
- No permite el desarrollo de aplicaciones ejecutables, limita la utilización de los programas desarrollados en este lenguaje a computadoras que dispongan de MathCad instalado en ellas.

MatLab: este es un entorno que presenta su propio lenguaje de programación, el mismo fue desarrollado para resolver problemas matemáticos a través del cálculo de matrices. Las principales ventajas presentadas por este entorno son:

- Fue desarrollado para la resolución de problemas matemáticos, cuenta con una amplia librería de funciones.
- El lenguaje de programación utilizado en este entorno es simple y no requiere de grandes conocimientos de programación.
- Se dispone de muchas herramientas para facilitar la resolución de problemas a través de MatLab.
- Este entorno puede funcionar en múltiples sistemas operativos.

Entre las desventajas de este entorno destacan:

- Este entorno requiere bastante memoria RAM para funcionar fluidamente.
- Aunque permite crear aplicaciones ejecutables que funcionen en computadoras sin la necesidad de que estas tengan MatLab previamente instalado, se requiere la instalación de un compilador de MatLab en la computadora a utilizar.

MatLab y Simulink: Simulink es una de las principales herramientas desarrolladas para MatLab, permite modelar, simular y analizar sistemas lineales o no lineales. En esta herramienta otorga una interfaz en la cual se realiza la programación mediante la utilización de bloques que representarían un diagrama de flujos, a su vez, realiza automáticamente la traducción de la programación al código “m” utilizado por MatLab.

La principal ventaja que presenta la utilización de esta herramienta es que permite la programación a través de bloques como si se tratara de un diagrama de flujos, esto sustituye la utilización del lenguaje de programación para la formulación de funciones. A su vez esta herramienta provee una amplia librería con funciones que simplifican la realización de la programación.

Luego de analizar las ventajas y desventajas de los diferente entornos presentados por Dagnino<sup>(1)</sup> se puede llegar a la conclusión de que para la realización del proyecto el entorno que resultaría más adecuado a utilizar sería MatLab en conjunto con su herramienta Simulink, dicha combinación presenta la mejor relación entre las ventajas y desventajas para la realización del proyecto, y al no requerir de amplios conocimientos de programación es adecuado para el alcance



del proyecto, sin embargo, entre los objetivos de este proyecto destaca el superar la limitación presentada por el laboratorio virtual de turbina a gas desarrollada por Dagnino<sup>(1)</sup>, de manera que se desea que la aplicación desarrollado no presente la necesidad de que la computadora en la que se utilice disponga de un compilador de MatLab previamente instalado en la misma.

De esta forma es necesario disponer de una nueva herramienta o entorno de programación que nos permita superar dicha limitación, para esto se decidió utilizar el entorno de programación LabView.

LabView es un entorno de programación que utiliza un lenguaje de programación gráfico “lengua G” muy similar al utilizado con la herramienta Simulink de MatLab, este lenguaje está dirigido al desarrollo de aplicaciones para el control de instrumentación, sin embargo presenta amplias librerías en las cuales se disponen múltiples funciones matemáticas, y de otras áreas, lo cual permite la resolución de problemas científicos sin la necesidad definir funciones matemáticas.

Este entorno presenta a su vez dos partes bien diferenciadas para la realización de la programación:

Panel frontal: este básicamente representa la interfaz gráfica con el usuario para el programa que se desea ejecutar, en el se puede observar en tiempo real la actualización de los datos manejados por el programa. En el panel frontal se definen los controles, estos representarían las variables de entradas las cuales se desean manipular (pueden ser botones, perillas, marcadores, etc.); a su vez en el panel frontal deben definirse los indicadores, estos representan las salidas del programas, las variables de las cuales se pretende observar el comportamiento al manipular las entradas.

Diagrama de bloques: esta es la parte del entorno donde se realiza la programación propiamente dicha con la utilización del lenguaje gráfico característico de este entorno, el mismo resulta bastante intuitivo dada la similitud de este tipo de programación con la realización de un diagrama de flujos, no se requieren amplios conocimientos de programación para el desarrollo de aplicaciones.

La principal ventaja que presenta este entorno frente a MatLab/Simulink es que el mismo permite el desarrollo de aplicaciones ejecutables las cuales pueden ser utilizadas en cualquier computadora sin la necesidad de la instalación de herramientas previas, la cual es la principal

limitación presentada por MatLab/Simulink. De igual forma LabView simplifica el desarrollo de la interfaz gráfica con el usuario al proveer el panel de control donde se realiza la misma fácilmente sin la necesidad de la utilización de otras herramientas para este fin.

Debido a que el entorno de programación de LabView provee todas las herramientas necesarias para la realización del proyecto de Laboratorio Virtual para Motores de Combustión Interna, se decidió utilizar este entorno para el desarrollo de la aplicación planteada en el mismo.

## CAPÍTULO 3

### PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DEL MODELO DEL MOTOR

#### 3.1. Planteamiento del modelo del motor.

Para la realización del LV para la práctica de un motor de combustión interna se requiere desarrollar un modelo que permita simular el funcionamiento del mismo. Se desea trabajar en base al motor Honda CBR6000 F4i utilizado por el equipo FSAE-USB dado que este es el motor del que se dispone para comparar los datos obtenidos a partir del modelo con datos experimentales posteriormente recolectados, el mismo es un motor de 4 tiempos de 600 cc.

**Tabla 3.1.** Características técnicas del motor estudiado.

<b>Características Motor CBR600F4i</b>		
<b>Diámetro Cilindros</b>	<b>[m]</b>	0,067
<b>Carrera</b>	<b>[m]</b>	0,0425
<b>Volumen de Desplazamiento</b>	<b>[m<sup>3</sup>]</b>	0,000599
<b>Volumen de Compresión</b>	<b>[m<sup>3</sup>]</b>	1,36218E-05
<b>Relación de compresión</b>		12,0:1
<b>Momento de Inercia</b>	<b>[kg·m<sup>2</sup>]</b>	0,09

La tabla 3.1 presenta los datos técnicos del motor utilizado para el desarrollo del modelo para la aplicación del LV.

Se desea que el modelo desarrollado sea lo más fiel posible al modelo de motor estudiado, por esto se toman en cuenta los desarrollos realizados por el equipo FSAE-USB de manera de mejorar el comportamiento del mismo, dentro de ellos destaca el desarrollo de un colector de admisión con longitud de trompetas variables.

El desarrollo del modelo se realizó siguiendo el esquema planteado a continuación, el mismo se encuentra dividido en 3 fases:

1. Selección y definición de la estructura del modelo: Se describe a lo largo de este capítulo.
2. Ajuste de parámetros: Para lo cual se utilizan valores reales que representan ciertas características propias del motor utilizado.
3. Validación del modelo: Lo cual se realiza comparando los valores obtenidos con la utilización del modelo desarrollado con valores obtenidos experimentalmente.

### 3.1.1. Modelo desarrollado

#### 3.1.1.1. Características

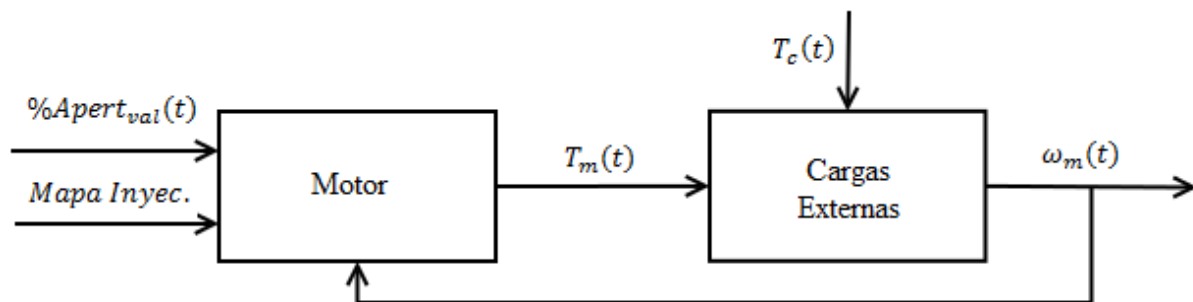
Como referencia se utilizó el prototipo F-SAE USB 2014 el mismo dispone de un sistema de admisión variable en el cual utiliza un rotor de manera de modificar las longitudes de la trompetas en función del régimen de giro.

De acuerdo con las clasificaciones expuestas en el segmento 3.2 del capítulo, el modelo desarrollado presenta las siguientes características:

- Orientado al control: no se pretende utilizar el modelo para realizar o modificar el diseño de ninguno de los componentes del sistema bajo estudio, si en cambio observar como la modificación de ciertos parámetros (relación aire combustible, posición válvula del cuerpo de aceleración, etc.) afecta el comportamiento del mismo.
- En el dominio temporal: la variable utilizada para la sincronización del modelo es el tiempo.
- Promediado: las variables de estado no varían durante un ciclo termodinámico.

#### 3.1.1.2. Estructura del modelo

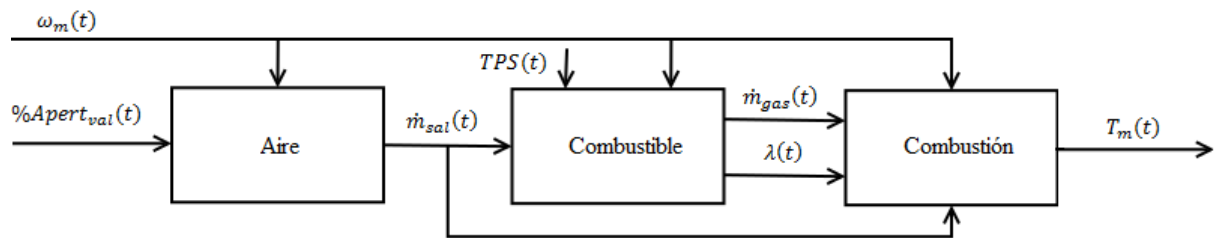
En principio el modelo se puede separar en dos bloques los cuales serían el motor, y las cargas externas impuestas al mismo. En el bloque del motor entrarían como señales, la posición de la válvula mariposa, el mapa de inyección (para determinar la relación aire/combustible) y el régimen de giro del mismo, como señal de salida tendría el torque generado por el motor. Para el bloque de las cargas externas se tendrían como señales el torque generado por el motor y el torque impuesto por el freno acoplado al motor, como señal de salida tendría la velocidad de giro del motor.



**Figura 3.1.** Estructura del modelo general.

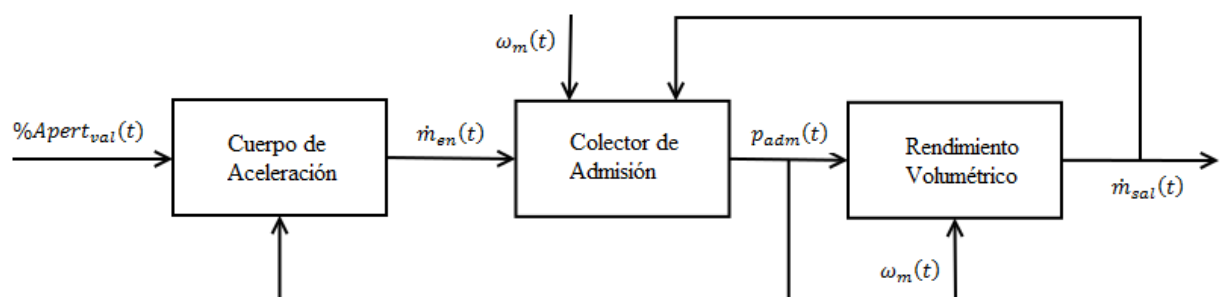
El modelo del motor esta a su vez comprendido por 3 sub modelos, los cuales corresponden a diferentes fenómenos físicos que intervienen dentro del motor. De esta forma quedan determinados los sub modelos que conforman el modelo del motor:

- Aire: comprende los modelos formados por el cuerpo del acelerador, el colector de admisión y la eficiencia volumétrica.
- Combustible: representada por los modelos de aportación de combustible a la mezcla.
- Combustión: abarca las ecuaciones de generación de par del motor.



**Figura 3.2.** Estructura del modelo del bloque que representa el motor.

El sub-modelo que representa el comportamiento del flujo de aire del motor toma como señales de entrada la posición de la válvula mariposa en el cuerpo de aceleración y la velocidad de giro del motor, y genera como señal de salida el flujo de aire hacia los cilindros. Éste modelo está a su vez compuesto por 3 sub-modelos que representarían el comportamiento del cuerpo de aceleración, el colector de admisión y el rendimiento volumétrico. La figura 3.3 presenta la estructura de este sub-modelo.



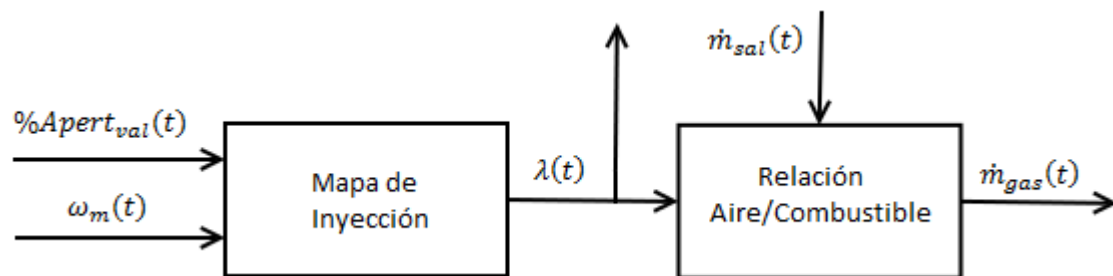
**Figura 3.3.** Estructura del modelo del bloque de Aire.

El modelo que describe el comportamiento del cuerpo de aceleración recibe como señales de entrada la posición de la válvula mariposa y la presión en el colector de admisión, este modelo genera como señal de salida el flujo de aire que entra al colector de admisión.

La señal generada por el modelo del cuerpo de aceleración conforma junto a las señales de la velocidad de giro del motor y el flujo de aire de salida las entradas para el modelo del colector de admisión, el cual genera como señal de salida el valor de la presión dentro del colector.

El modelo del rendimiento volumétrico toma como señales de entrada el valor de la presión en el colector de admisión y la velocidad de giro del motor y genera como señal de salida el flujo de aire hacia los cilindros del motor.

Para el sub-modelo que representa el comportamiento del combustible en el motor (Figura 3.4) se tienen como señales de entrada la posición de la válvula del acelerador, la velocidad de giro del motor y el flujo de aire hacia los cilindros. El sub-modelo está compuesto a su vez por dos bloques los cuales son el mapa de inyección y el modelo de la relación Aire/Combustible.

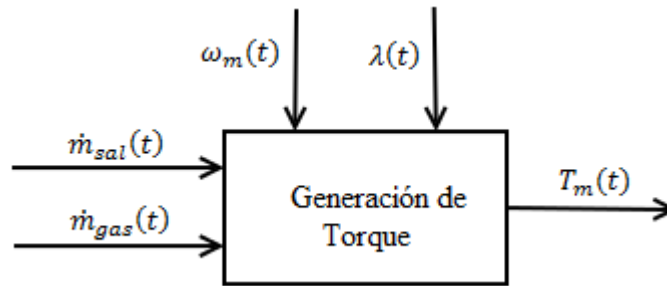


**Figura 3.4.** Estructura del modelo del bloque de combustible.

El bloque representado por el mapa de inyección toma como señales de entrada los valores de la velocidad de giro del motor y la posición de la válvula mariposa de manera de leer en el mapa de inyección el valor de la relación Aire/Combustible que entrega como señal de salida.

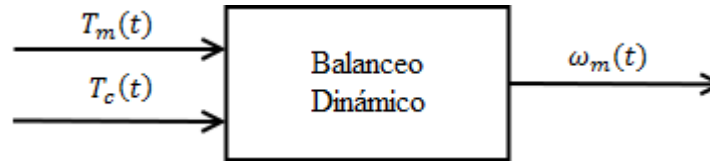
El modelo de la relación aire combustible tiene como señales de entrada la relación aire combustible a partir del bloque del mapa de inyección y el flujo de aire hacia los cilindros, con estos valores genera como señal de salida el flujo de gasolina hacia los cilindros del motor.

Por último el sub-modelo que representa la combustión, representado en la figura 3.5, toma como señales de entrada las señales generadas por los otros dos sub-modelos del motor (flujo de aire y gasolina hacia los cilindros) y las señales de la velocidad de giro y la relación aire combustible, de manera de realizar los cálculos necesarios para obtener el valor del torque generado por el motor, el cual será la señal de salida de éste sub-modelo.



**Figura 3.5.** Estructura del modelo del bloque de combustión.

La parte del modelo que representaría el bloque correspondiente a las cargas externas quedaría compuesto por el modelo de balanceo dinámico de las cargas, representado en la figura 3.6, este modelo tendría como señales de entrada el torque generado por el motor y el torque impuesto por el freno acoplado al mismo; como señal de salida este bloque generaría la señal del régimen de giro al que estaría sujeto el motor.



**Figura 3.6.** Estructura del modelo del bloque de cargas externas.

### 3.2. Desarrollo del modelo de motor.

A continuación se presentan con mayor detalle la manera en que fueron desarrollados los modelos planteados.

#### 3.2.1. Cuerpo de Aceleración

Para determinar el flujo de aire que entra al colector de admisión es necesario representar el comportamiento que presenta la válvula mariposa, la Ecuación 1.1 describe el comportamiento de la misma, dentro de ésta ecuación destaca el término  $\dot{m}_{mar}^{max}$  que representa el máximo flujo de aire que puede pasar a través del cuerpo de aceleración, una expresión para el cálculo de este término se presenta en la Ecuación 1.2 sin embargo, para nuestro caso de estudio el flujo máximo de aire hacia el colector de admisión viene limitado por la restricción impuesta por la sección de

20 mm de diámetro por la que debe pasar todo el aire, de manera que es necesario realizar otro tipo de estimación para el flujo máximo de aire a través del cuerpo de aceleración.

Angulo<sup>(12)</sup> realizó una estimación para el flujo máximo de aire a través de la restricción del orificio con 20 mm de diámetro para el colector de admisión, para realizar la misma, supuso un flujo isentrópico con condiciones de estrangulamiento ( $Ma=1$  en la garganta), a su vez supuso condiciones de estancamiento para entrada de aire al colector (caso real para el vehículo estacionado o a bajas velocidades) con  $P_{amb}=101325$  Pa y  $T_{amb}=25^{\circ}C$ , para estas condiciones obtuvo:

$$\dot{m}_{max} = 0,07418 kg/s$$

Para el cálculo de la presión crítica de Laval, necesario para realizar el cálculo del factor de presión se utiliza el valor para  $P_{amb}$  impuesto por el usuario del programa de acuerdo a las condiciones a las que se desee realizar el estudio.

El cálculo del factor de área requiere que se especifiquen los valores del diámetro del eje de la mariposa “a” y el ángulo para la posición del mínimo del motor, para estos valores se tienen:

$$a = 0,005 m$$

$$\alpha_0 = 25^{\circ}$$

Por último para motores aspirados, el coeficiente de descarga del cuerpo de aceleración puede ser estimado como función del ángulo de la válvula, en mediciones realizadas por Pursifull *et al.* <sup>(13)</sup> determina que el valor del coeficiente de descarga varia en un rango entre 0.7 y 1.05, el valor de 1.05 resalta por estar fuera de lo teóricamente esperado sin embargo se ajusta a la experimentación realizada. Lamentablemente no se tiene total acceso a la información del trabajo desarrollada por Pursifull, *et al* <sup>(13)</sup>, por lo que se decide utilizar una relación lineal obtenida a partir del rango de valores de coeficientes de descargas propuestos y el porcentaje de apertura de la válvula mariposa.

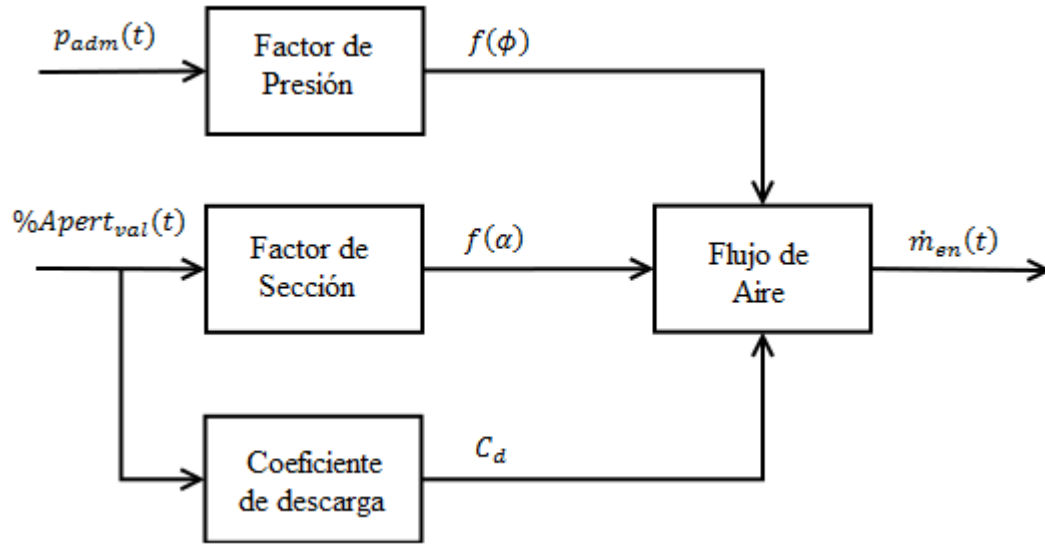
De esta manera se propone la utilización de la siguiente ecuación para la estimación del coeficiente de descarga para el cuerpo de aceleración.

$$C_d = 0.0035 \cdot (\%Apertura Mariposa) + 0.7 \quad 3.1$$

Para la programación del modelo se usan como señales de entrada los valores del ángulo de la posición de la válvula mariposa y el valor de la presión en el colector de admisión, de manera de



tener como señal de salida el flujo másico de aire que ingresa al colector. En la figura 3.7 se muestra el diagrama que representa la estructura del modelo para el cuerpo de aceleración.



**Figura 3.7.** Diagrama del modelo del cuerpo de aceleración.

### 3.2.2. Colector de Admisión

La Ecuación 1.7 describe el comportamiento para un colector de admisión, se puede observar que la misma presenta una dependencia con respecto al volumen de la admisión, dado que el colector de admisión utilizado para el modelo de motor de estudios presenta un sistema de longitudes de trompetas variable, el valor del volumen del colector varia de igual forma al variar la longitud de las trompetas, de esta forma es necesario definir una función que nos permite obtener el volumen de la admisión en función del régimen de giro del motor.

El volumen del colector puede ser calculado sumando el volumen del plenum (volumen fijo) con el volumen de las trompetas (variable), de esta forma se tiene:

$$V_{adm}(\omega_m) = V_{plenum} + 4 \cdot V_{trom}(\omega_m) \quad 3.2$$

El volumen del plenum se mantiene constante, y su valor es igual a:

$$V_{plenum} = 0,00268 \text{ m}^3$$

Para obtener el volumen de las trompetas es necesario definir una función que nos permita calcularlo, esto lo logramos suponiendo el volumen de las mismas como el de un cilindro de esta forma se tiene:

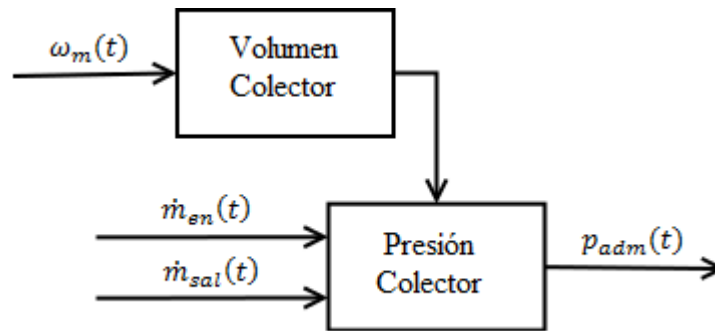
$$V_{trom}(\omega_m) = L_{trom}(\omega_m) \cdot \frac{\pi \cdot d_{trom}^2}{4} \quad 3.3$$

El valor del diámetro de las trompetas es un valor constante, para este tenemos:

$$d_{trom} = 0.035 \text{ m}$$

El valor de la longitud de las trompetas depende del régimen de giro del motor, los distintos valores de las longitudes para los diversos intervalos de velocidades de giro del motor se presentan en la tabla 1.1.

Para la programación de este modelo, se utilizan como señales de entrada la velocidad de giro del motor, el flujo de aire que ingresa al colector al igual que el flujo de aire que sale del colector hacia los cilindros, como señal de salida se obtiene el valor de la presión en la admisión. La figura 3.8 presenta el diagrama que describe la formulación del modelo para el colector de admisión.



**Figura 3.8.** Diagrama del modelo del colector de Admisión

### 3.2.3. Modelo del Rendimiento Volumétrico.

La ecuación 1.8 propone una forma de estimar el rendimiento volumétrico en función de la presión de la admisión y la velocidad de giro en el motor.

Para determinar la componente dependiente de la presión de la admisión se utiliza la Ecuación 1.9, la misma requiere que se definan los valores para el volumen de desplazamiento del motor al igual que el volumen de compresión, para estos se tienen los valores, los mismos se presentan en la tabla 3.1:

$$V_d = 0,00599 \text{ m}^3$$

$$V_c = 1,36218 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

De igual manera se requiere definir el valor para la presión de salida de los cilindros, esta representa el valor de la presión en el colector de escape, el mismo se supone constante para simplificación de los cálculos y el valor utilizado es, este valor se tomó por ser un valor típico para la presión en los colectores de escape a 5000 rpm:

$$p_{esc} = 40 \text{ kPa}$$

El término de la eficiencia volumétrica dependiente del régimen de giro se estimó a partir de los resultados presentados por Engleman<sup>(9)</sup> el mismo nos otorga una dependencia de la longitud de las trompetas del colector de admisión.

La figura 1.5 exhibe los resultados presentados por Engleman<sup>(9)</sup> en esta se puede observar la dependencia de la eficiencia volumétrica respecto a la velocidad de giro para diferentes longitudes de trompeta, aquí se presentan estos valores para longitudes entre 0,3 y 0,45 m, sin embargo en la tabla 1.1 observamos que las longitudes propuestas por Rivas y Viera<sup>(7)</sup> oscilan entre 0,15 y 0,3 m de manera que se decidió trabajar con la curva presentada por Engleman<sup>(9)</sup> para 0,3 m ya que es la longitud más aproximada a las longitudes propuestas por Rivas y Viera<sup>(7)</sup>.

A partir de la curva Eficiencia Volumétrica vs Velocidad de giro presentada por Engleman<sup>(9)</sup> para una longitud de 0,3 m se tomaron valores de la misma de manera de realizar una interpolación segmentaria lineal que permita obtener ecuaciones que describan el comportamiento de estos datos. Cuando se dispone de un conjunto de datos de este tipo se acostumbra realizar interpolaciones segmentarias cúbicas ya que estas presentan curvas mas suavizadas que se ajustan mejor al conjunto de datos que se pretende representar, sin embargo, dado que en este caso no se dispone de un amplio conjunto de datos para realizar las mismas, y los datos de los que se disponen fueron leídos directamente de la grafica presentada (esto acarrea un error), se decidió trabajar con una interpolación lineal segmentada que otorgara ecuaciones que presentan variación con respecto a los valores reales dentro de un rango aceptable.

**Tabla 3.2.** Datos obtenidos a partir de los resultados presentados por Engleman<sup>(9)</sup>

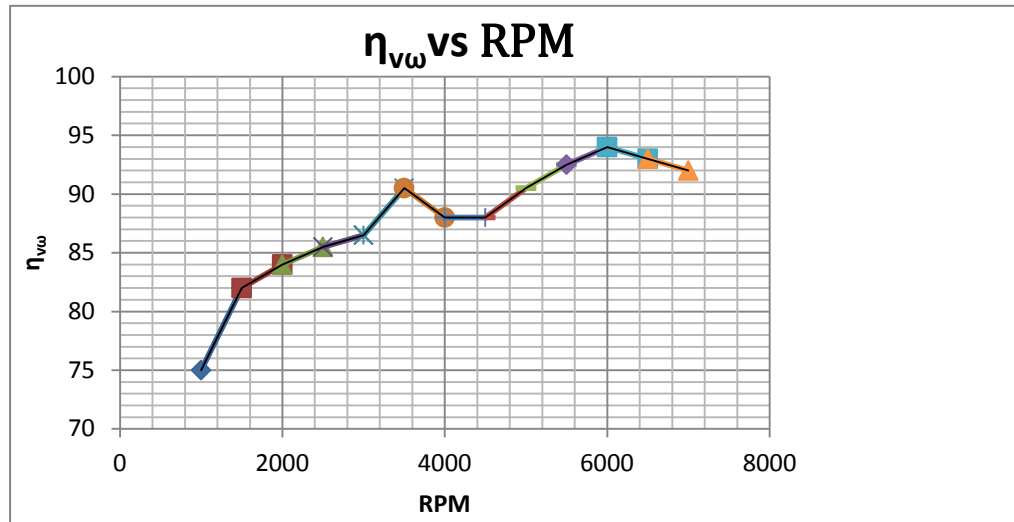
<b>RPM</b>	<b><math>\eta_{v\omega}</math></b>
1000	75,0
1500	82,0
2000	84,0
2500	85,5
3000	86,5
3500	90,5
4000	88,0
4500	88,0
5000	90,5
5500	92,5
6000	94,0
6500	93,0
7000	92,0

Con estos datos se procedió a realizar el cálculo de las ecuaciones lineales para cada par de puntos de manera de obtener la interpolación lineal segmentaria que permita describir el comportamiento del conjunto de datos. La tabla 3.3 presenta las ecuaciones obtenidas para cada par de puntos.

**Tabla 3.3.** Ecuaciones para realizar la interpolación lineal segmentaria del rendimiento volumétrico en función de la velocidad de giro.

<b>Intervalo [RPM]</b>	<b>Ecuación</b>	
1000-1500	$y=0,014x+61$	3.3
1500-2000	$y=0,004x+76$	3.4
2000-2500	$y=0,003x+78$	3.5
2500-3000	$y=0,002x+80,5$	3.6
3000-3500	$y=0,008x+62,5$	3.7
3500-4000	$y=-0,005x+108$	3.8
4000-4500	$y=88$	3.9
4500-5000	$y=0,005x+65,5$	3.10
5000-5500	$y=0,004x+70,5$	3.11
5500-6000	$y=0,003x+76$	3.12
6000-6500	$y=-0,002x+106$	3.13
6500-7000	$y=-0,002x+106$	3.14

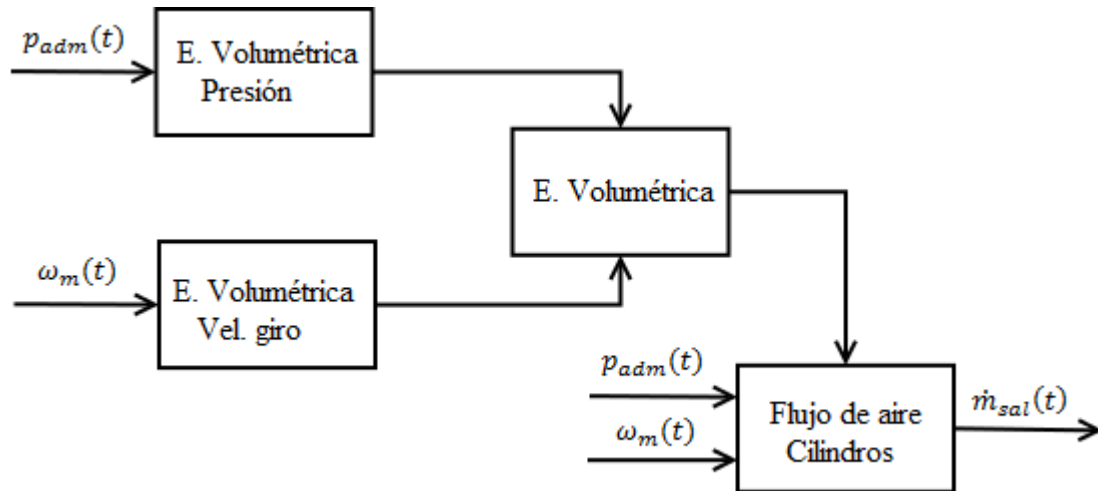
Con las ecuaciones obtenidas se procedió a realizar el gráfico de las mismas de manera de observar el comportamiento de la curva generada a partir de la interpolación lineal segmentaria. La figura 3.9 muestra la curva obtenida.



**Figura 3.9.** Curva de rendimiento volumétrico vs RPM obtenido a partir de la interpolación lineal segmentaria.

Se puede observar que no se disponen de datos para los valores de la eficiencia volumétrica en función de la velocidad de giro para regímenes menores a 1000 rpm o mayores a 7000 rpm, para estos valores se decidió tomar los valores de la eficiencia correspondiente a velocidades de giro más cercanos a la velocidad deseada, de esta manera para valores menores a 1000 rpm se tiene una eficiencia del 75% y para valores mayores a 7000 rpm se tomara una eficiencia del 92%.

En la figura 3.10 se muestra el diagrama que presenta la estructura propuesta para el modelo para la eficiencia volumétrica. Al realizar la programación de este modelo se utilizan como señales de entrada para el mismo la presión del colector de admisión y la velocidad de giro del motor y el flujo de gasolina hacia los cilindros, de esta manera, se obtiene como señal de salida el flujo de aire hacia los cilindros.



**Figura 3.10.** Diagrama para el modelo del rendimiento volumétrico.

### 3.2.4. Modelo Combustible

Para este modelo es necesaria la realización de un mapa de inyección que permita leer los valores de relación aire/combustible para diferentes rangos de velocidades de giro y posiciones de la válvula del acelerador, dicho mapa fue generado en un archivo de Excel creando una tabla que presenta rangos de velocidades de giro que va desde 0 a 13000 rpm aumentando con un paso de 500 rpm, y para las posiciones de la válvula del acelerador presenta el rango de 0 a 100 % de apertura con un paso de 4% de apertura.

Con el valor de la relación aire/combustible leída del mapa de inyección se realiza el cálculo del flujo de gasolina hacia los cilindros a partir de la ecuación 1.13. En la figura 3.4 se presentó el diagrama de bloques correspondiente.

### 3.2.5. Modelo de Generación de Torque

La Ecuación 1.14 permite obtener el valor del torque generado por el motor a partir del valor de  $p_{me}$  y el valor del volumen de desplazamiento (este fue presentado anteriormente en la Tabla 3.1).

El valor de  $p_{me}$  puede ser estimado a partir de la Ecuación 1.19, sin embargo, para poder resolver esta ecuación es necesario primero realizar estimaciones para las pérdidas por fricción e intercambio de gases, para dicha estimación se utiliza la ecuación 1.20.

La resolución de la ecuación 1.20 puede realizarse a partir de la ecuación 1.21 que permite estimar las pérdidas por intercambio de gases y la ecuación 1.23 que permite la estimación de las pérdidas por fricción.

Los coeficientes necesarios para la resolución de la ecuación 1.23 son presentados en la Tabla 1.2. Para la resolución de la ecuación 1.22 es necesario realizar la estimación para los valores de la eficiencia del motor, para esto se propone la utilización de la ecuación 1.24.

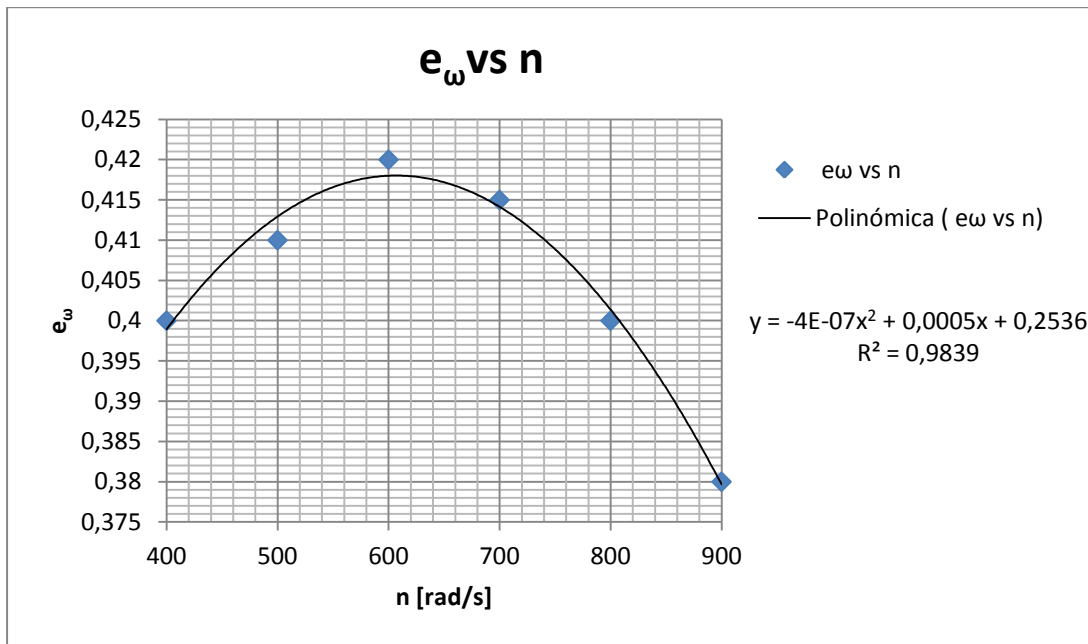
En la ecuación 1.24 se propone una formulación multilineal para la estimación de la eficiencia, de esta forma es necesario definir un término dependiente de la velocidad de giro y otro dependiente de la relación aire combustible.

Para estimar el término de la eficiencia dependiente de la velocidad de giro Guzella y Honder<sup>(8)</sup> proponen la utilización de la gráfica presentada en la figura 1.6, para esto se tomaron datos de esta gráfica y realizar un ajuste cuadrático con los datos obtenidos de manera de obtener una ecuación que permita representar el comportamiento presentado en la gráfica, la tabla 3.4 presenta los datos utilizados para la obtención de la ecuación correspondiente.

**Tabla 3.4.** Datos para la realización de la curva eficiencia vs velocidad de giro.

<b>n</b>	<b><math>\eta_{\omega}</math></b>
<b>[rad/s]</b>	
400	0,400
500	0,410
600	0,420
700	0,415
800	0,400
900	0,380

Con estos datos se procedió a construir la gráfica de los mismos de manera de manera de realizar un ajuste cuadrático y obtener la ecuación que represente el comportamiento de estos datos, la figura 3.11 muestra el gráfico realizado al igual que la ecuación obtenida.

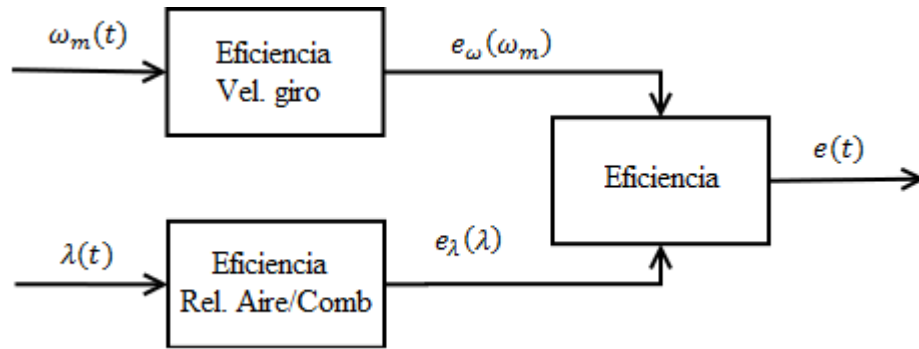


**Figura 3.11.** Curva Eficiencia vs Velocidad de giro obtenida a partir de los datos de la tabla 4.3.

En la figura podemos observar que el valor obtenido para el coeficiente de determinación  $R^2$  es 0.9839 al ser tan aproximado al valor 1 nos da seguridad de que la ecuación utilizada es una buena aproximación al comportamiento presentado por los puntos utilizados para la obtención de la misma. Es importante destacar que la gráfica presentada por Guzella y Honder<sup>(8)</sup> solo presenta valores para velocidades de giro entre 400 y 900 radianes por segundo, de manera que no se disponen datos para los valores de esta eficiencia si nos encontramos fuera de este rango, de esta manera, se decidió trabajar con un valor para la eficiencia igual a 0.38 (menor valor presentado dentro del gráfico) para los intervalos de velocidades de giro no incluidos dentro de los datos presentados.

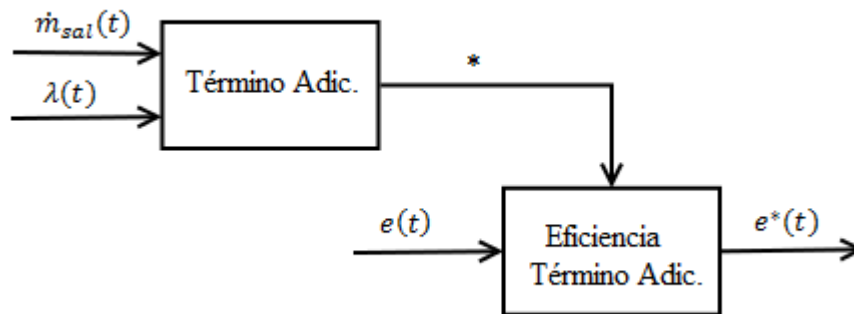
Para la estimación del componente de la eficiencia dependiente de la relación aire/combustible se utilizó la ecuación 1.25, para el cálculo de la misma se obtienen los coeficientes necesarios a partir de la ecuación 1.26 y los valores presentados en la tabla 1.3.





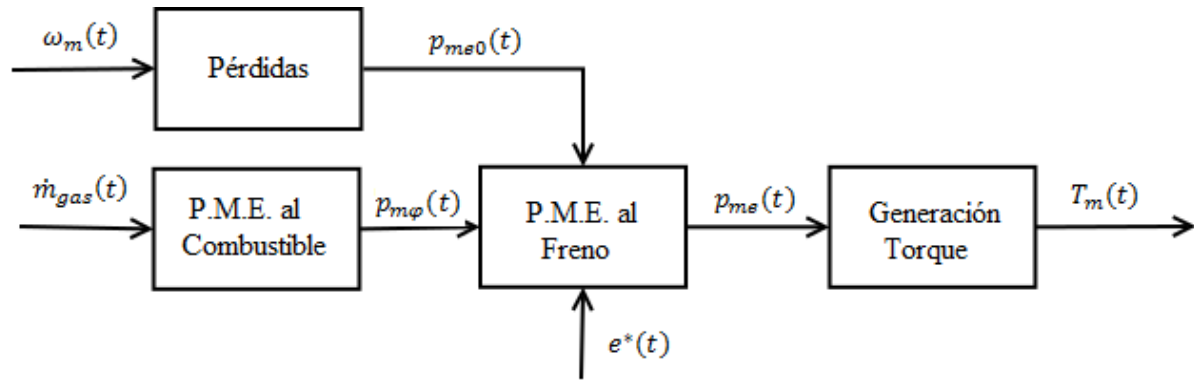
**Figura 3.12.** Diagrama del modelo para la estimación de la eficiencia.

La figura 3.12 muestra la estructura del modelo utilizado para la estimación de la eficiencia para el cálculo de  $p_{me}$  sin embargo, es necesario corregir el mismo al incluir el término dependiente de  $p_{gas}$  proveniente de la ecuación 1.21 de manera de mostrar la formulación para obtener la eficiencia mostrada en la ecuación 1.22, dicha diagrama se muestra en la figura 3.13.



**Figura 3.13.** Diagrama para la estimación de la corrección de la eficiencia.

La figura 3.14 presenta el diagrama con la estructura utilizada para realizar los cálculos necesarios para la generación de la señal del torque del motor, el mismo muestra la estructura para la estimación de las pérdidas por fricción e intercambio de gases, y la estimación de  $p_{gas}$ . Dentro de este diagrama se tienen como señales de entrada la velocidad de giro del motor, el flujo de combustible hacia los cilindros y la señal de la eficiencia corregida, hay que tomar en cuenta que para obtener la señal de la eficiencia corregida son necesarias a su vez las señales de la relación aire/combustible y el flujo de aire hacia los cilindros.



**Figura 3.14.** Diagrama del modelo de combustión.

### 3.2.6. Modelo de Cargas Externas

La Ecuación 1.27 permite realizar una estimación para la velocidad de giro del motor, para la resolución de esta ecuación es necesario definir el valor de la inercia del motor, dicho valor es presentado en la Tabla 3.1:

$$\theta_m = 0,09 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Al programar este modelo se utiliza como señales de entrada el torque generado por el motor y el torque de la carga que tiene el motor, como señal de salida se obtiene el valor de la velocidad de giro del motor. En la figura 3.6 se ilustra la formulación para la estructura del modelo de cargas externas.

## CAPÍTULO 4

### DESARROLLO DE LA APLICACIÓN EN LABVIEW

Partiendo del modelo desarrollado en el capítulo anterior se procedió a realizar la programación del mismo en el software LabView de manera de generar la aplicación que cumplirá la tarea de funcionar como el LV para el motor de combustión interna.

Una de las cosas más importantes para el desarrollo del LV es la realización de la interfaz gráfica de usuario para la aplicación, para esto es necesario definir que parámetros se desean que sean manipulados por el usuario y que otros parámetros se desea que la aplicación presente de manera que los usuarios obtengan la información necesaria para la realización de la práctica de laboratorio.

Para definir estos parámetros se decidió partir de la base de la práctica realizada a partir del banco de prueba del motor Ricardo del Laboratorio de Conversión de Energía Mecánica, durante la realización de esta práctica los parámetros que los estudiantes pueden modificar son: torque de freno, relación aire combustible, relación de compresión y tiempo de encendido de la chispa.

El modelo de motor desarrollado en este trabajo no permite la manipulación de la relación de compresión, ni del avance de la chispa, ya que no se disponen de ecuaciones que permitan describir como la variación de estos parámetros afecta el comportamiento del mismo, de igual forma sería necesario replantear el modelo para pasar de uno promediado en el tiempo a uno dependiente del ángulo de giro del cigüeñal; de igual forma, aunque el modelo de motor con el que se está desarrollando el LV (Honda CBR600 F4i) permite la modificación de su relación de compresión (al modificar los pistones del mismo), dicha experiencia no ha sido realizada ya no se dispone de los distintos juegos de pistones necesarios para su realización, por lo que no existe disponibilidad de datos para validar una posible incorporación de esta experiencia al LV.

De esta forma se decidió que los parámetros a ser manipulados por los usuarios en el LV sean el torque del freno acoplado al motor, la relación aire combustible y la posición de la válvula mariposa.

De similar forma es necesario definir los parámetros que la aplicación otorgara a los usuarios para la realización de la práctica. En principio con la realización de estos experimentos lo que se busca es obtener las curvas de funcionamiento de los motores, estas son representadas por las curvas de Torque y Potencias vs Velocidad de giro; sin embargo, para ampliar la experiencia de

los estudiantes, partiendo de los parámetros calculados por el modelo se podrían obtener otras curvas de interés, de esta forma se podrían obtener curvas para observar el comportamiento de la eficiencia del motor vs RPM, las cuales serían unas simplificaciones de los efectos reales, pero que ayudarían a ampliar la experiencia de los estudiantes.

De esta forma para determinar los parámetros a presentar a los usuarios se necesita determinar cuáles son necesarios para la realización de estas curvas.

Para el caso de la curva Torque vs Velocidad de giro, solo sería necesario el valor del torque del freno y la velocidad de giro del motor para obtener dicha curva, de igual forma, para obtener la curva Potencia vs Velocidad de giro solo sería necesario obtener el valor de la potencia del motor para las diferentes velocidades de giro, esto se logra a partir de la ecuación:

$$P_m = T_m \cdot \omega_m \quad 5.1$$

Así solo sería necesario para la obtención de estas dos curvas el valor del torque del freno, que es igual al del motor para una velocidad de giro estable, y la velocidad de giro del motor.

Para la obtención de la curva de la eficiencia del motor sería necesario partir de la ecuación 1.17, para esto son necesarios los valores de la presión media efectiva y presión media efectiva al combustible los mismos se obtienen de las ecuaciones 1.14 y 1.15; para la obtención de la presión media efectiva solo sería necesario el valor del torque del motor y para la presión media al combustible la masa de combustible, sin embargo esta se puede relacionar con el flujo másico de combustible a partir de la ecuación 1.16. De esta forma el único nuevo parámetro necesario a presentar sería el flujo másico de combustible.

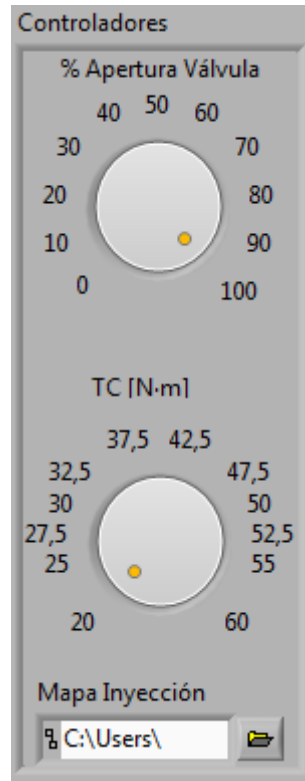
De esta manera se tiene para la realización de la práctica los parámetros necesarios a presentar al usuario serían los manipulados por el usuario: Torque del freno, relación aire combustible y posición de la válvula mariposa del acelerador; y el flujo másico de combustible.

De igual forma si se deseara realizar la curva de eficiencia volumétrica vs RPM, sería necesario partir de la ecuación 1.10, para la utilización de la misma son necesarios los valores de la velocidad de giro del motor, la presión en el colector de admisión y el flujo másico de aire hacia los cilindros; para obtener el valor del flujo másico de aire hacia los cilindros se puede partir de la ecuación 1.13, de esta forma conociendo el valor de la relación aire combustible (uno de los parámetros manipulado por los usuarios) y el flujo másico de combustible se puede obtener el

valor del flujo másico de aire hacia los cilindros. Así se tiene como único nuevo parámetros a presentar para la obtención de esta curva la presión en el colector de admisión.

#### 4.1. Desarrollo de la interfaz gráfica.

Una vez definidos los parámetros a manipularse y presentarse dentro de la aplicación del LV es necesario establecer una interfaz gráfica de usuario que presente los mismos de una manera atractiva y que resulte de fácil comprensión y manipulación por parte de los usuarios.



**Figura 4.1.** Panel de controladores.

Se decidió utilizar perillas para controlar la posición de la válvula del acelerador y el torque del freno acoplado al motor. Para la válvula del acelerador se varía el porcentaje de apertura de la misma entre 0 y 100%, es importante tomar en cuenta que la posición con 0% de apertura representa la posición del mínimo del motor. Para el torque de la carga la perilla permite variar de 20 a 60 N·m.

Para establecer la relación aire-combustible se decidió utilizar un archivo de Excel en el cual se define un mapa de inyección como los utilizados normalmente por las unidades de control de motor. El mapa de inyección propuesto presenta valores de relación aire combustible en función de la velocidad de giro del motor y la posición de la válvula de aceleración; los mismos valores

son presentados para intervalos de 500 rpm variando el mapa desde 0 hasta 13000 rpm, para el caso de la posición de la válvula de aceleración los intervalos de incremento son de 4 % de apertura y varía desde 0 hasta 100% de apertura de la válvula. Dentro de la aplicación del LV se coloca una barra dentro de la cual se coloca el directorio del archivo de Excel que se desea utilizar como mapa de inyección, dicha barra dispone además de un botón que permite navegar los diferentes directorios de manera de localizar el archivo deseado.

		RPM								
		500	1000	1500	2000	..	11500	12000	12500	13000
Apertura Válvula Mariposa	4	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	8	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	12	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	16	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	88	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	92	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	96	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	100	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3

**Figura 4.2.** Estructura del archivo del mapa de inyección.

Se decidió colocar una ventana donde se pueden modificar las condiciones ambientales para la realización del estudio, de manera de observar el efecto que las mismas tienen sobre el comportamiento del motor.

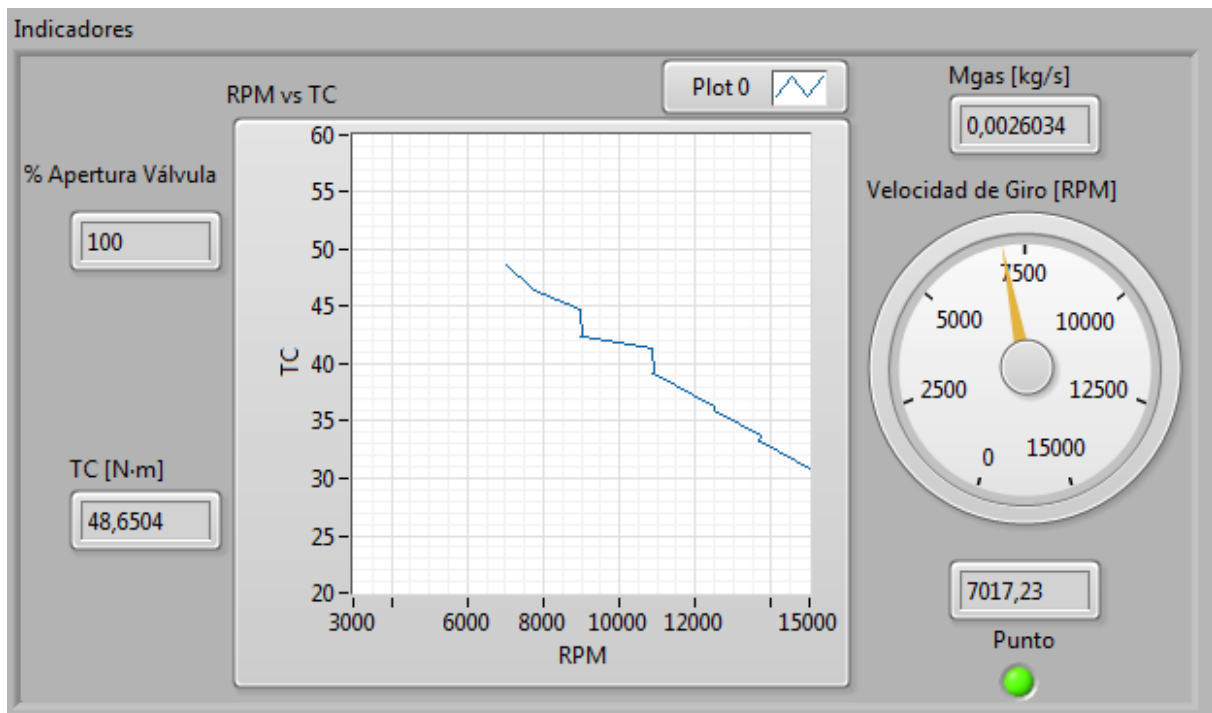
**Figura 4.3.** Condiciones ambientales

Para mostrar el valor de la velocidad de giro del motor se decidió utilizar un medidor que simule el funcionamiento de un tacómetro, mostrando con una aguja como va variando el valor de la velocidad de giro del motor, de igual forma se coloca un indicador debajo del mismo en el cual se observe reflejado numéricamente el valor de la velocidad de giro del motor de manera que resulte más sencillo leer el valor deseado.

Se colocó una ventana dentro de la cual se va realizando el gráfico Torque vs Velocidad de giro a medida que se va realizando la práctica, de manera que se pueda observar más intuitivamente la dependencia que presentan dichos valores.

Para mostrar el valor del flujo de combustible hacia los cilindros se decidió colocar un indicador numérico de manera que el mismo se pueda observar claramente.

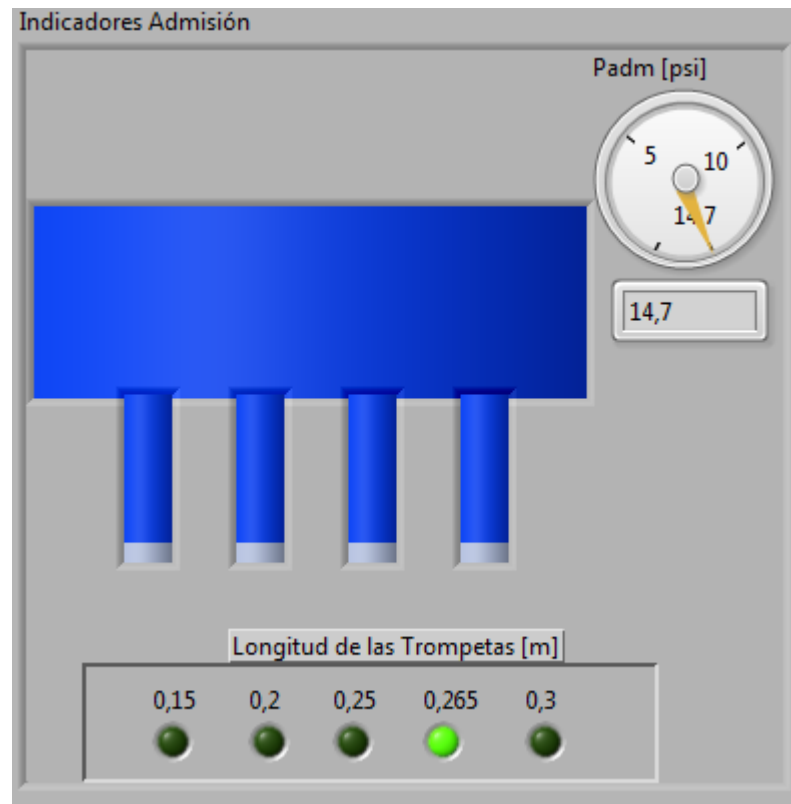
De igual forma se colocó una luz que indica cuando el programa logra converger para un valor de velocidad de giro de manera de conocer el “punto” de estudio que va a ser guardado y proceder a modificar el valor del torque de la carga para la obtención de un nuevo punto de estudio.



**Figura 4.4.** Panel de indicadores.

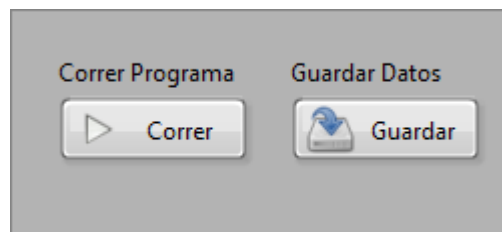
Para el valor de la presión en el colector de admisión se decidió utilizar un tanque que sirva para representar gráficamente el colector, a dicho tanque se le colocó un medidor que muestra como varía la presión dentro del colector, de igual forma se colocó un indicador numérico que muestre de forma más clara el valor de dicha presión. También resultó atractivo que los tanques utilizados para representar el colector de admisión mostraran la forma en que varían las longitudes de las trompetas del mismo para los distintos rangos de velocidad de giro del motor,

también se decidió colocar un tablero de luces que indique la longitud que presentan las trompetas del colector para la velocidad de giro presentada.



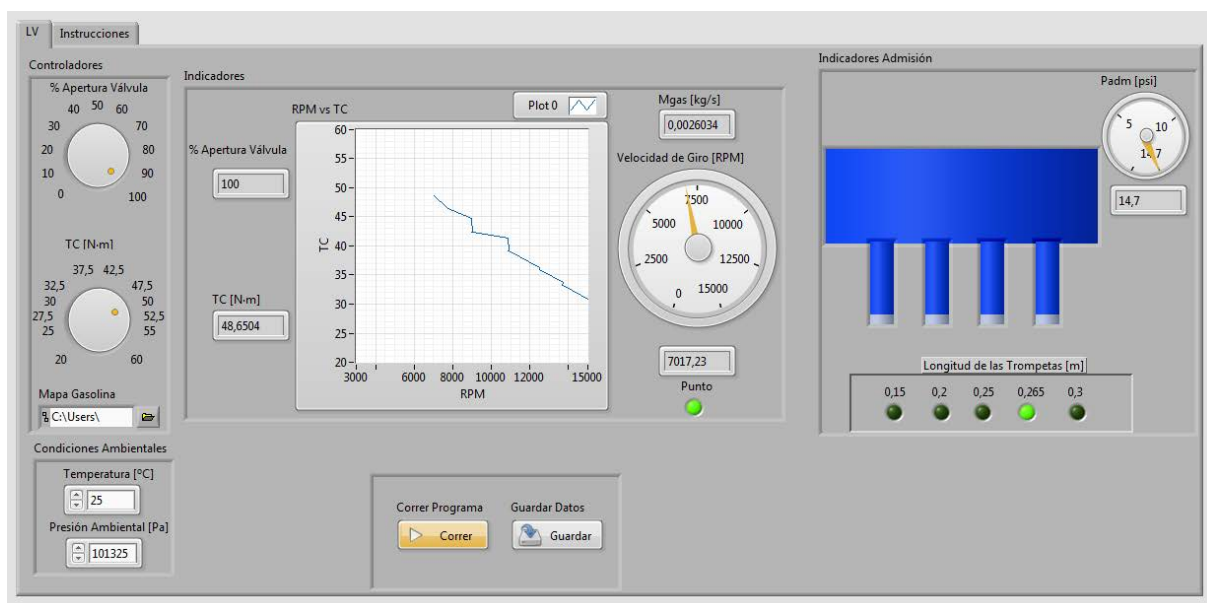
**Figura 4.5.** Panel de indicadores del colector de Admisión.

Para finalizar, se colocó un botón el cual permite grabar un archivo de Excel en el que se registran los datos generados durante la realización de la práctica, de manera de disponer de los mismos en un formato fácil de utilizar para la realización de los cálculos necesarios. Los datos presentados en el archivo de Excel: Torque de la carga, Velocidad de giro del motor, Presión en el colector de admisión y flujo másico de gasolina hacia los cilindros. De igual forma se colocó un botón con el cual se pone en marcha el programa, al presionar el botón correr el programa comienza su funcionamiento, si se vuelve a presionar el mismo el programa se detiene.



**Figura 4.6.** Panel con botones para guardar los datos generados y correr el programa.





**Figura 4.7.** Interfaz gráfica de la aplicación.

La figura 4.6 muestra la disposición de los distintos paneles dentro de la interfaz gráfica de la aplicación, de esta forma se dispusieron los controladores al lado izquierdo de la ventana de la aplicación, en el centro de la ventana se colocó el panel de los indicadores donde se muestran los datos de mayor interés para el desarrollo de la práctica, del lado derecho se colocó el panel de la admisión, por último el panel con los botones para guardar los datos generados y detener el programa se colocaron en la parte inferior de la pantalla. También se colocó una segunda pestaña en la ventana de la aplicación donde se presentan las instrucciones para utilizar el programa.

## CAPÍTULO 5

### VALIDACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO

Una vez desarrollada la aplicación del laboratorio virtual es necesario es necesario realizar la práctica propuesta de manera de obtener los datos generados por la aplicación para así proceder a comparar los mismos con los datos disponibles de otros trabajos y verificar la validez de los mismos.

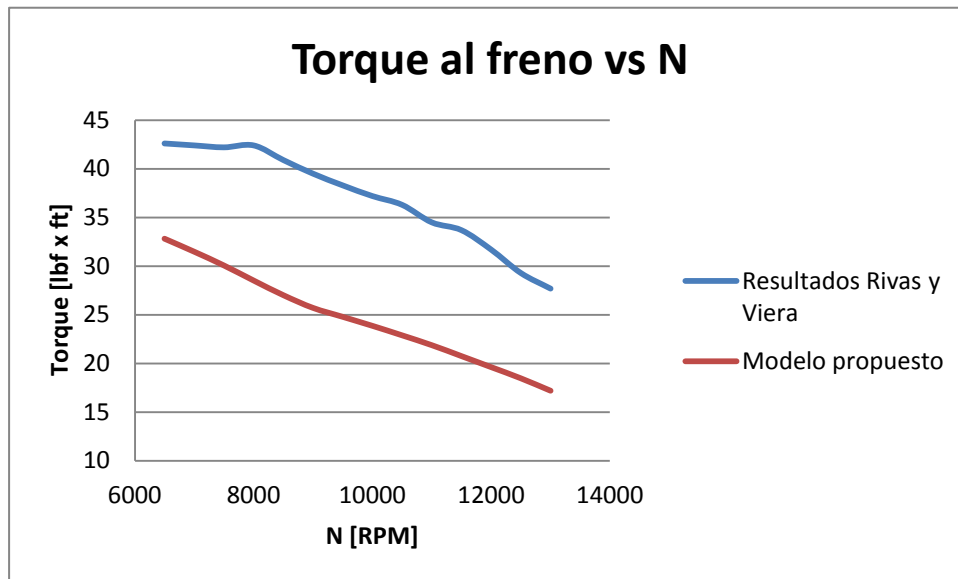
De esta forma, es necesario generar las curvas de Torque vs Velocidad de giro y Potencia vs Velocidad de giro, que son las curvas disponibles a partir de trabajos anteriores, para así proceder a realizar la comparación de las mismas.

La tabla 5.1 presenta los valores de potencia y torque obtenidos a través de la aplicación del LV para diferentes valores de velocidad de giro del motor, de igual forma en esta tabla se presentan para los mismos valores de velocidad de giro los valores de potencia y torque presentados como resultados por Rivas y Viera<sup>(7)</sup>. Cabe destacar que para la obtención de los datos generados por la aplicación se utilizó un valor de  $\lambda$  igual a 1, valor que presentaría el mayor rendimiento del motor de acuerdo a lo teóricamente esperado, no se posee información del valor de  $\lambda$  utilizado por Rivas y Viera para la generación de sus datos dado que su trabajo no abarcaba el estudio del efecto de dicho parámetro, sin embargo, es razonable asumir la utilización de los parámetros que generarían el mayor desempeño del motor.

Se puede observar en la tabla que se realizó el cálculo de los errores porcentuales presentados por los datos generados por la aplicación con respecto a los resultados obtenidos por Rivas y Viera<sup>(7)</sup>, los mismos errores se encuentran entre el 18 y 40 % de manera que presentan una desviación importante a partir de lo esperado de los resultados obtenidos por Rivas y Viera, de esta manera queda claro que es necesario modificar ciertos parámetros del modelo de manera que el mismo presente un comportamiento más parecido a lo esperado a partir de los resultados de Rivas y Viera<sup>(7)</sup>.

**Tabla 5.1.** Valores de Torque y Potencia generados por el modelo desarrollado y presentados por Rivas y Viera.

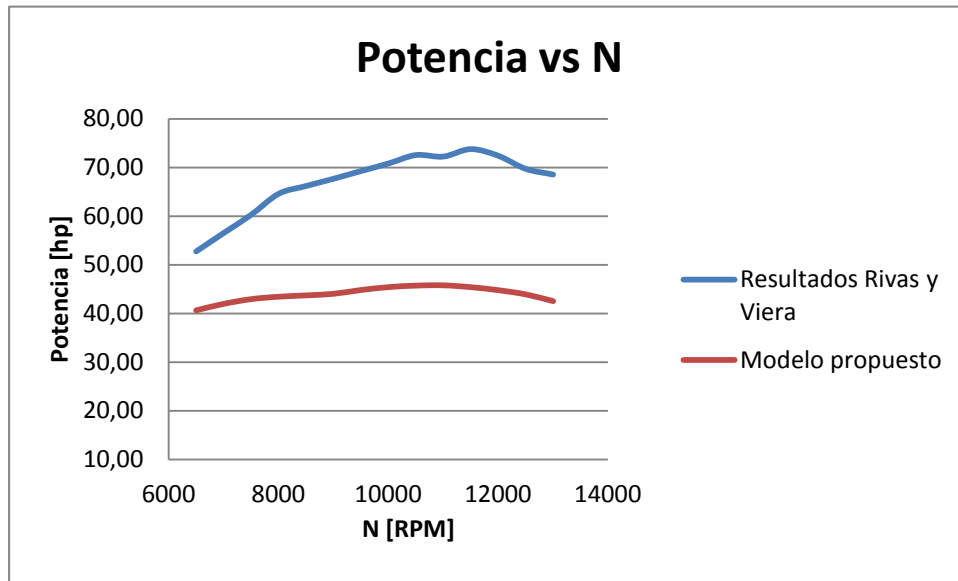
N	Torque			Potencia		
	Rivas y Viera	Modelo	Error	Rivas y Viera	Modelo	Error
[RPM]	[lbf·ft]	[lbf·ft]	%	[hp]	[hp]	%
6500	42,6	32,82	22,95	52,72	40,62	22,95
7000	42,4	31,48	25,75	56,51	41,96	25,75
7500	42,2	30,07	28,75	60,26	42,94	28,75
8000	42,4	28,52	32,74	64,58	43,44	32,74
8500	40,9	27,01	33,95	66,19	43,72	33,95
9000	39,5	25,70	34,93	67,69	44,05	34,93
9500	38,3	24,78	35,29	69,28	44,83	35,29
10000	37,2	23,86	35,87	70,83	45,42	35,87
10500	36,3	22,88	36,97	72,57	45,74	36,97
11000	34,5	21,87	36,61	72,26	45,80	36,61
11500	33,7	20,74	38,45	73,79	45,42	38,45
12000	31,7	19,60	38,15	72,43	44,79	38,15
12500	29,3	18,46	37,01	69,74	43,93	37,01
13000	27,7	17,18	37,98	68,56	42,53	37,98



**Figura 5.1.** Comparación de curvas de Torque vs Velocidad de giro.

En la figura 5.1 se pueden observar comparativamente las curvas de Torque vs RPM presentadas por Rivas y Viera y la generada por el modelo de motor propuesto, en esta curva se observa que el modelo propuesto genera valores de Torque menores a los resultados presentados por Rivas y Viera, sin embargo presenta un comportamiento similar exhibiendo una pendiente

bastante parecida para la disminución del torque a medida que aumenta la velocidad de giro del motor.



**Figura 5.2.** Comparación de curvas Potencia vs Velocidad de giro.

La figura 5.2 presenta la comparación de las curvas de potencia generadas por el modelo propuesto y las presentadas por Rivas y Viera, de igual forma que las curvas de torque se observa que ambas curvas exhiben un comportamiento similar, sin embargo los valores de potencia producidos por el modelo propuesto presenta valores menores a los esperados a partir de los resultados de Rivas y Viera, presentando errores superiores al 38% con respecto a los valores esperados.

De manera de ajustar un poco el modelo propuesto para obtener valores más similares a lo esperado pueden modificarse los coeficientes utilizados para la ecuación de Stöckli <sup>(10)</sup> para la estimación de las pérdidas por fricción del motor, se decidió modificar solamente el coeficiente  $k_1$  ya que el mismo es el que presenta una influencia más apreciable en los resultados presentados por modelo desarrollado.

**Tabla 5.2.** Coeficientes de la ecuación de Stöckli <sup>(10)</sup> para la corrección del modelo.

Término	Valor
$k_1$	$0,936 \cdot 10^5$ [Pa]
$k_2$	0,46
$k_3$	$9,1 \cdot 10^{-4}$ [s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
$k_4$	0,075 [m]

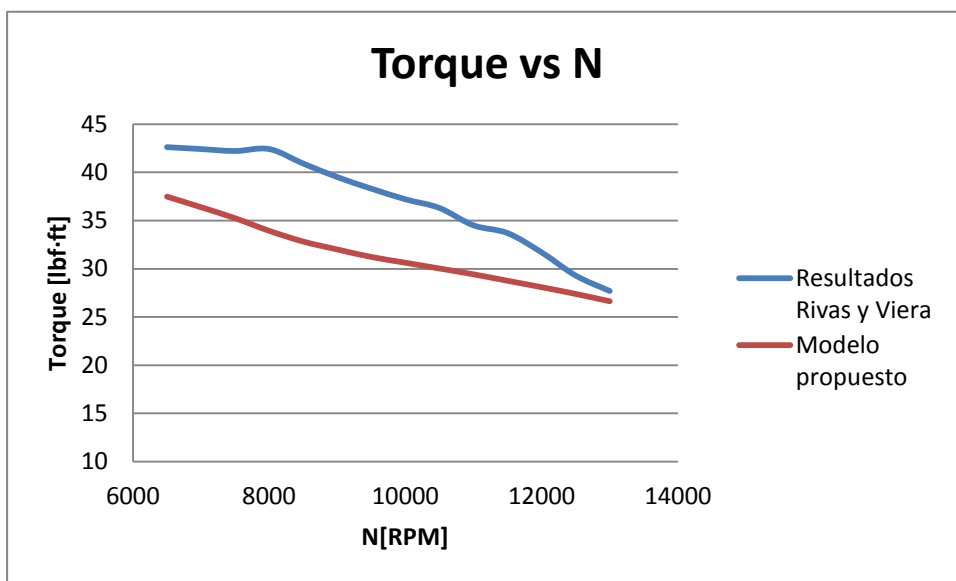
De esta forma se mantienen los valores  $k_2$ ,  $k_3$  y  $k_4$  propuestos anteriormente y se procede a variar solo el valor del coeficiente  $k_1$ . La tabla 5.2 presenta los coeficientes utilizados para la ecuación para la estimación de las pérdidas por fricción una vez corregido el modelo.

Modificados estos parámetros se procedió a obtener los datos de torque y potencia vs Velocidad de giro de manera de comparar los mismos con los resultados de Rivas y Viera<sup>(7)</sup>. La tabla 5.3 presenta los valores de torque y potencia obtenidos, se observa que al comparar los mismos con los resultados esperados se obtienen errores porcentuales menores que los obtenidos previa a la corrección del modelo, siendo el máximo error obtenido menor al 19,9% al comparar con el máximo error del 38,45 % obtenido previa la corrección del modelo observamos que se produce una reducción del error obtenido cercana al 48%. A pesar que se logra una reducción significativa en el error presentado por los datos generados por el modelo respecto a los esperados, el máximo error presentado sigue siendo cercano al 20% dicho error no resulta ideal si la aplicación desarrollada tuviera la finalidad de ser utilizada para el estudio de algún componente del motor, sin embargo, ya que la aplicación fue desarrollada con fines académicos con el objetivo de mostrar una aproximación al comportamiento del motor, el error presentado por la aplicación resulta aceptable. De igual forma que para los resultados presentados anteriormente, se utilizó un valor de  $\lambda$  igual a 1 para los datos generados por la aplicación por las razones anteriormente planteadas.

Con los valores presentados en la tabla 5.3 se procedió a realizar las curvas de torque y potencia vs RPM de manera de observar de manera más intuitiva el comportamiento que presentan las mismas.

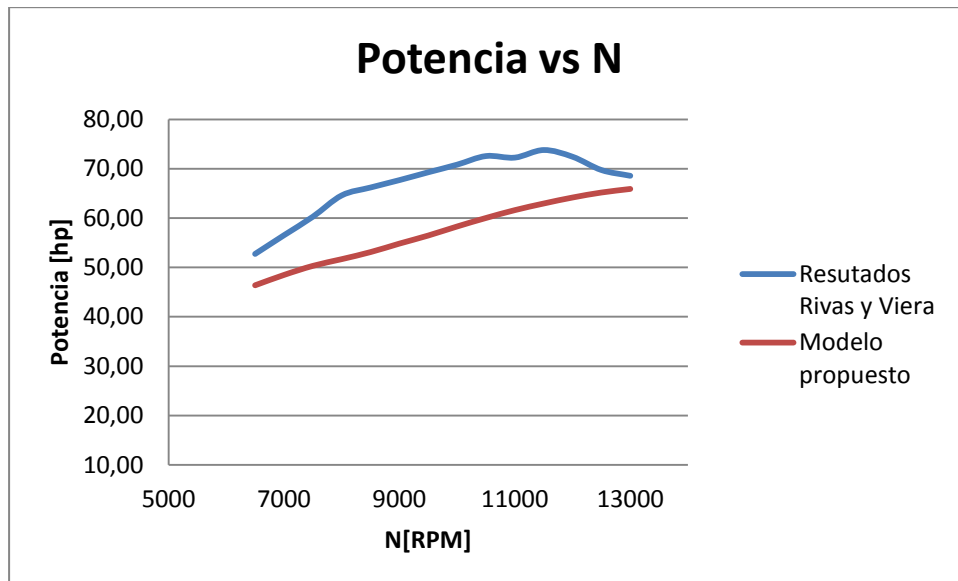
**Tabla 5.3.** Valores de Torque y Potencia generados por el modelo corregido y presentados por Rivas y Viera.

N	Torque			Potencia		
	Rivas y Viera	Modelo	Error	Rivas y Viera	Modelo	Error
[RPM]	[lbf·ft]	[lbf·ft]	%	[hp]	[hp]	%
6500	42,6	37,48	12,02	52,72	46,39	12,02
7000	42,4	36,38	14,20	56,51	48,49	14,20
7500	42,2	35,24	16,49	60,26	50,32	16,49
8000	42,4	33,94	19,95	64,58	51,70	19,95
8500	40,9	32,83	19,73	66,19	53,13	19,73
9000	39,5	32,01	18,96	67,69	54,85	18,96
9500	38,3	31,23	18,46	69,28	56,49	18,46
10000	37,2	30,63	17,66	70,83	58,32	17,66
10500	36,3	30,03	17,27	72,57	60,04	17,27
11000	34,5	29,43	14,70	72,26	61,64	14,70
11500	33,7	28,76	14,66	73,79	62,97	14,66
12000	31,7	28,10	11,36	72,43	64,20	11,36
12500	29,3	27,40	6,48	69,74	65,21	6,48
13000	27,7	26,64	3,83	68,56	65,94	3,83



**Figura 5.3.** Comparación de curvas de Torque vs Velocidad de giro para el modelo corregido.

En la figura 5.3 se observa la comparación de las curvas de Torque vs RPM, se aprecia que la curva generada por el modelo corregido produce una aproximación razonable a los resultados presentados por Rivas y Viera<sup>(7)</sup>.



**Figura 5.4.** Comparación de curvas Potencia vs Velocidad de giro para el modelo corregido

La figura 5.4 presenta la comparación de las curvas Potencia vs RPM, similar a la curva de torque vs RPM se tiene que la curva generada por el modelo otorga una aproximación a los resultados presentados por Rivas y Viera<sup>(7)</sup>, sin embargo, se observa que se produce una modificación en el comportamiento de la curva el cual anteriormente era ascendente descendente, ahora resulta simplemente ascendente.

Por razones de tiempo se decidió mantener el modelo con las correcciones realizadas aunque los resultados obtenidos aun presentan errores apreciables al compararse con los resultados presentados por Rivas y Viera<sup>(7)</sup>, aun así, estas aproximaciones resultan aceptables y razonables para el alcance del proyecto.

### 5.1 Obtención de las curvas para el modelo corregido.

Una vez verificado que el modelo corregido presenta una aproximación razonable a los resultados esperados se puede proceder a realizar las diversas curvas que se obtendrían para la realización de la práctica del laboratorio virtual, de manera de tener caracterizado el modelo.

De esta forma se procedió a realizar las diversas curvas que caracterizan el modelo para los distintos valores de relación aire combustible, para esto se trabajo con 7 distintos valores de relación aire combustible variando los mismos entre 0,7 y 1,3. Resulta necesario utilizar la

aplicación desarrollada de manera de generar los datos para los distintos valores de la relación aire combustible

**Tabla 5.4.** Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 0,7.

Valores obtenidos del LV				Valores Calculados			
N [RPM]	T [lbf·ft]	$\dot{m}_{gas}$ [kg/s]	$\dot{m}_{aire}$ [kg/s]	$p_{me}$ [MPa]	$p_{mgas}$ [MPa]	$\eta$	P [hp]
13903	18,44	0,007350	0,075628	0,5245	4,3634	0,12	48,81
12850	20,28	0,006793	0,069902	0,5769	4,3633	0,13	49,63
11651	22,13	0,006159	0,063380	0,6294	4,3633	0,14	49,09
10315	23,97	0,005453	0,056109	0,6818	4,3634	0,16	47,08
8755	25,81	0,004629	0,047628	0,7343	4,3634	0,17	43,03
8002	27,66	0,004230	0,043528	0,7867	4,3633	0,18	42,14
7201	29,50	0,003807	0,039173	0,8392	4,3633	0,19	40,45
6318	31,35	0,003389	0,034877	0,8916	4,4280	0,20	37,71

La tabla 5.4 presenta los valores generados con la realización de la práctica de laboratorio virtual para un valor de relación aire combustible igual a 0,7.

**Tabla 5.5.** Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 0,8.

Valores obtenidos del LV				Valores Calculados			
N [RPM]	T [lbf·ft]	$\dot{m}_{gas}$ [kg/s]	$\dot{m}_{aire}$ [kg/s]	$p_{me}$ [MPa]	$p_{mgas}$ [MPa]	$\eta$	P [hp]
13381	22,13	0,006190	0,072791	0,6294	3,8179	0,16	56,38
12209	23,97	0,005648	0,066416	0,6818	3,8180	0,18	55,72
10969	25,81	0,005074	0,059670	0,7343	3,8180	0,19	53,92
9537	27,66	0,004412	0,051882	0,7867	3,8179	0,21	50,23
8329	29,50	0,003853	0,045307	0,8392	3,8180	0,22	46,79
7658	31,35	0,003542	0,041657	0,8916	3,8180	0,23	45,71
6815	33,19	0,003165	0,037220	0,9441	3,8333	0,25	43,07
6118	34,67	0,002884	0,033917	0,9860	3,8911	0,25	40,38

En la tabla 5.5 se observan los datos generados por la aplicación del LV para una relación aire combustible de 0,8.



**Tabla 5.6.** Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 0,9.

Valores obtenidos del LV				Valores Calculados			
N [RPM]	T [lbf·ft]	$\dot{m}_{gas}$ [kg/s]	$\dot{m}_{aire}$ [kg/s]	$p_{me}$ [MPa]	$p_{mgas}$ [MPa]	$\eta$	P [hp]
13525	23,97	0,005561	0,073573	0,6818	3,3937	0,20	61,73
12393	25,81	0,005096	0,067415	0,7343	3,3937	0,22	60,91
11161	27,66	0,004589	0,060712	0,7867	3,3937	0,23	58,78
9759	29,50	0,004013	0,053085	0,8392	3,3937	0,25	54,82
8437	31,35	0,003469	0,045898	0,8916	3,3938	0,26	50,36
7819	33,19	0,003215	0,042533	0,9441	3,3938	0,28	49,41
6997	35,03	0,002877	0,038067	0,9965	3,3940	0,29	46,68
6179	36,88	0,002586	0,034214	1,0489	3,4542	0,30	43,39

La tabla 5.6 muestra los valores generados al realizar la práctica con un valor de relación aire combustible igual a 0,9.

**Tabla 5.7.** Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 1.

Valores obtenidos del LV				Valores Calculados			
N [RPM]	T [lbf·ft]	$\dot{m}_{gas}$ [kg/s]	$\dot{m}_{aire}$ [kg/s]	$p_{me}$ [MPa]	$p_{mgas}$ [MPa]	$\eta$	P [hp]
13541	25,81	0,005011	0,073660	0,7343	3,0543	0,24	66,56
12329	27,66	0,004562	0,067067	0,7867	3,0544	0,26	64,93
10945	29,50	0,004050	0,059538	0,8392	3,0543	0,27	61,48
9402	31,35	0,003479	0,051146	0,8916	3,0543	0,29	56,12
8277	33,19	0,003063	0,045028	0,9441	3,0544	0,31	52,31
7592	35,03	0,002810	0,041301	0,9965	3,0544	0,33	50,65
6782	36,88	0,002522	0,037069	1,0489	3,0689	0,34	47,62
6094	38,35	0,002300	0,033804	1,0909	3,1145	0,35	44,50

En la tabla 5.7 se presentan los resultados obtenidos al utilizar la aplicación del laboratorio virtual con una relación aire combustible igual a 1.

**Tabla 5.8.** Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 1,1.

Valores obtenidos del LV				Valores Calculados			
N [RPM]	T [lbf·ft]	$\dot{m}_{gas}$ [kg/s]	$\dot{m}_{aire}$ [kg/s]	$p_{me}$ [MPa]	$p_{mgas}$ [MPa]	$\eta$	P [hp]
13403	22,13	0,004509	0,072912	0,6294	2,7767	0,23	56,47
12296	23,97	0,004137	0,066889	0,6818	2,7767	0,25	56,12
11017	25,81	0,003706	0,059929	0,7343	2,7767	0,26	54,15
9598	27,66	0,003229	0,052213	0,7867	2,7766	0,28	50,55
8374	29,50	0,002817	0,045553	0,8392	2,7767	0,30	47,04
7700	31,35	0,002590	0,041885	0,8916	2,7767	0,32	45,95
6871	33,19	0,002318	0,037482	0,9441	2,7844	0,34	43,42
6194	34,67	0,002120	0,034282	0,9860	2,8253	0,35	40,88

En la tabla 5.8 se plasman los datos generados por la aplicación al utilizar una relación aire combustible igual a 1,1.

**Tabla 5.9.** Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 1,2.

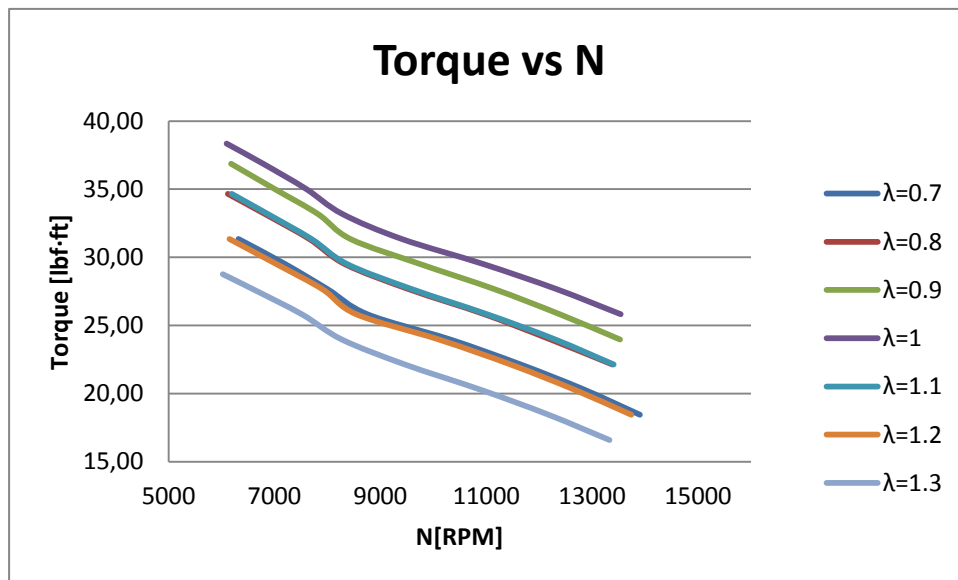
Valores obtenidos del LV				Valores Calculados			
N [RPM]	T [lbf·ft]	$\dot{m}_{gas}$ [kg/s]	$\dot{m}_{aire}$ [kg/s]	$p_{me}$ [MPa]	$p_{mgas}$ [MPa]	$\eta$	P [hp]
13735	18,44	0,004236	0,074716	0,5245	2,5453	0,21	48,22
12659	20,28	0,003904	0,068865	0,5769	2,5453	0,23	48,89
11460	22,13	0,003534	0,062340	0,6294	2,5453	0,25	48,28
10098	23,97	0,003114	0,054933	0,6818	2,5453	0,27	46,09
8546	25,81	0,002635	0,046487	0,7343	2,5453	0,29	42,00
7905	27,66	0,002438	0,042999	0,7867	2,5453	0,31	41,63
7036	29,50	0,002170	0,038277	0,8392	2,5453	0,33	39,53
6150	31,35	0,001932	0,034073	0,8916	2,5923	0,34	36,71

La tabla 5.9 muestra los resultados arrojados por el LV para una relación aire combustible de 1,2.

**Tabla 5.10.** Datos obtenidos para una relación Aire-Combustible de 1,3.

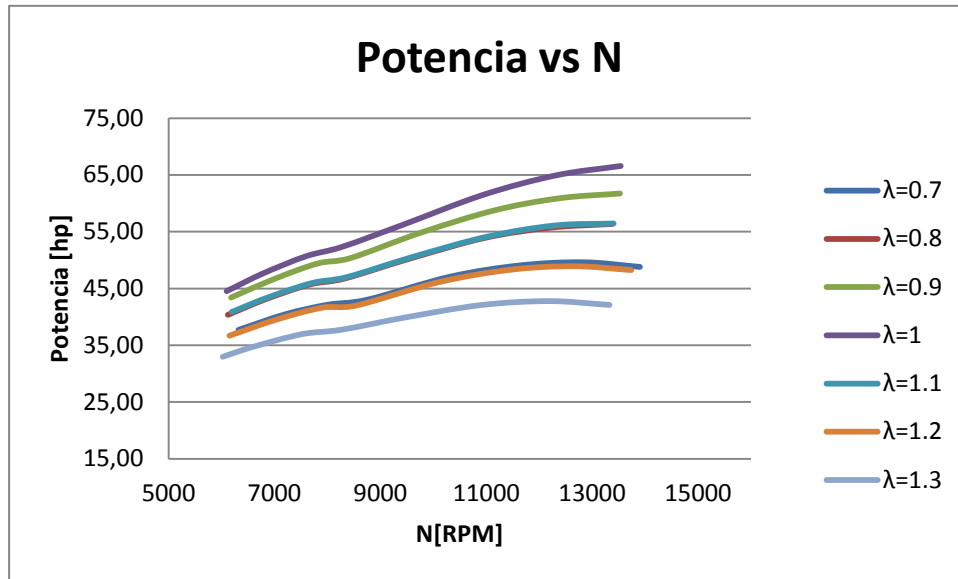
Valores obtenidos del LV				Valores Calculados			
N	T	$\dot{m}_{gas}$	$\dot{m}_{gas}$	$p_{me}$	$p_{mgas}$	$\eta$	P
[RPM]	[lbf·ft]	[kg/s]	[kg/s]	[MPa]	[MPa]		[hp]
13325	16,60	0,003793	0,072482	0,4720	2,3495	0,20	42,10
12182	18,44	0,003468	0,066270	0,5245	2,3495	0,22	42,77
10892	20,28	0,003101	0,059252	0,5769	2,3495	0,25	42,07
9470	22,13	0,002696	0,051517	0,6294	2,3495	0,27	39,90
8272	23,97	0,002355	0,044996	0,6818	2,3495	0,29	37,75
7520	25,81	0,002141	0,040907	0,7343	2,3495	0,31	36,96
6596	27,66	0,001894	0,036196	0,7867	2,3702	0,33	34,74
6022	28,76	0,001751	0,033454	0,8182	2,3994	0,34	32,98

Por último la tabla 5.10 presenta los resultados otorgados por la aplicación al utilizar una relación aire combustible igual a 1,3. Utilizando los datos presentados en estas tablas se procede a realizar las diversas curvas de manera de observar el comportamiento presentado por el modelo desarrollado para la aplicación.

**Figura 5.5.** Curvas Torque vs Velocidad de giro para distintas relaciones Aire-Combustible.

La figura 5.5 presenta las curvas de Torque vs RPM para los distintos valores de relación aire combustible estudiados, se puede observar que para el modelo desarrollado los mayores valores de torque se obtienen para una relación aire combustible igual a 1, esto guarda relación con lo teóricamente esperado, ya que para este valor se posee un balance de masas entre el aire y el

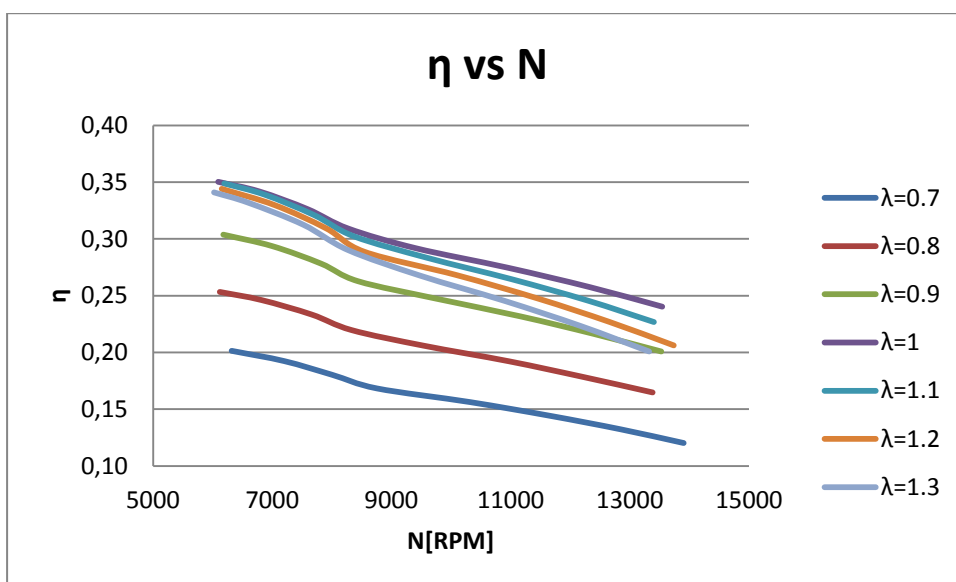
combustible que permite que se produzca la completa combustión de los gases y un completo aprovechamiento de la energía química del combustible. Los menores valores se obtienen para una relación aire combustible igual a 1,3.



**Figura 5.6.** Curvas Potencia vs Velocidad de giro para distintas relaciones Aire-Combustible.

En la figura 5.6 se observan las curvas de Potencia vs RPM para los distintos valores de relación aire combustible, se observa que estas curvas presentan un comportamiento muy similar a las curvas de torque vs RPM, obteniéndose los mayores valores de potencia para una relación aire combustible igual a 1 y los menores valores para una relación aire combustible de 1.3.

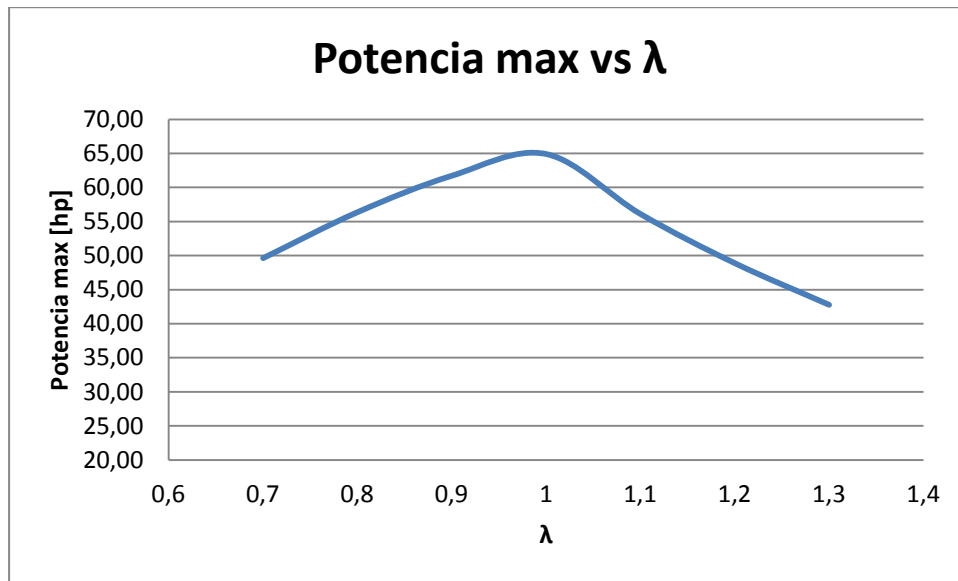
Se obtuvieron además las curvas de eficiencia vs RPM para los diversos valores de relación aire combustible, de manera de observar como se ve afectada la misma a la hora de variar dichos valore, estas curvas se presentan en la figura 6.7.



**Figura 5.7.** Curvas Eficiencia vs Velocidad de giro para distintas relaciones Aire-Combustible.

Se observa que de forma similar a las curvas anteriores los mayores valores de eficiencia se obtienen para una relación aire combustible igual a 1, sin embargo el comportamiento varía un poco con respecto a las curvas anteriores, en este caso las menores eficiencias se obtienen para la relación aire combustible igual a 0,7; se observa además que para los valores de relación aire combustible de 1; 1,1; 1,2 y 1,3 los valores de eficiencia se encuentran bastante aproximados entre sí, sin embargo, se logran diferenciar los niveles de eficiencia entre las mismas.

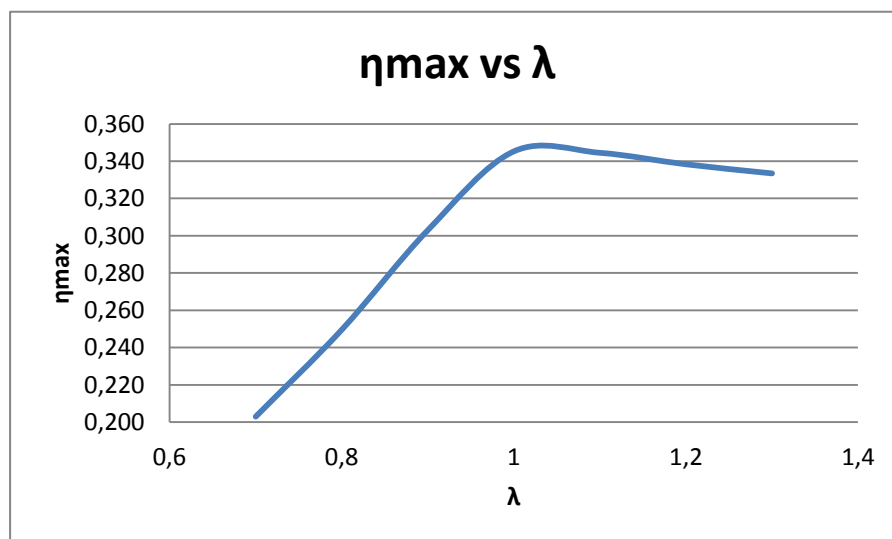
Una vez presentadas estas curvas sería necesario presentar la curva de potencia máxima en función de los diversos valores de relación aire combustible, de manera de observar con mayor claridad la forma en la que la variación de la relación aire combustible afecta el valor de la potencia entregada por el motor. De esta manera se presenta en la figura 6.8 la curva de potencia máxima vs la relación aire combustible.



**Figura 5.8.** Curva Potencia máxima vs Relación Aire-Combustible.

En la figura 5.8 se observa como varía la potencia máxima entregada por el motor en función de la relación aire combustible, se aprecia como entre 0,7 y 0,9 se produce un incremento de la potencia máxima entregada al aumentar el valor de la relación aire combustible, el máximo se alcanza para una relación aire combustible igual a 1, y para las relaciones aire combustible entre 1,1 y 1,3 va en disminución el valor de la potencia máxima del motor al aumentar la relación aire combustible.

Similar a la curva anterior, se realizó la curva de máxima eficiencia vs relación aire combustible, la misma se presenta en la figura 5.9.



**Figura 5.9.** Curva Eficiencia Máxima vs Relación Aire-Combustible.

La figura 5.9 presenta la curva eficiencia máxima vs relación aire combustible, en ella se aprecia que el máximo valor de eficiencia se obtiene para una relación aire combustible igual a 1, se observa además que al aumentar la relación aire combustible entre 0,7 y 0,9 se produce un aumento en los valores de eficiencia máxima, similar a la curva anterior para valores entre 1,1 y 1,3 se produce una disminución en los valores de eficiencia máxima, sin embargo en este caso la pendiente en esta disminución es mucho menor, de manera que al variar la relación aire combustible entre 1,1 y 1,3 se presentan menores variaciones que al variar los valores de relación aire combustible entre 0,7 y 0,9.

Se observa que los mayores valores tanto para la eficiencia máxima como para la potencia máxima se obtienen para los valores de relación aire combustible igual a 1, como se mencionó anteriormente este comportamiento guarda concordancia con lo teóricamente esperado, dado que es la condición para la que se logra aprovechar completamente la energía química liberada en la combustión de los gases.

Lamentablemente el modelo desarrollado no responde suficientemente rápido como para que la velocidad de giro del motor se estabilice para bajas RPM, esto debido a las variaciones que se producen para la presión del colector de admisión, para que se produzca la convergencia del valor de la presión en el colector de admisión es necesario que el flujo de aire que sale hacia los cilindros sea igual al flujo de aire que ingresa al colector de admisión de manera de mantener un valor de presión constante, dado que el flujo de aire hacia los cilindros es dependiente de la velocidad de giro del motor la variable a controlar para lograr dicha convergencia es el porcentaje de apertura de la válvula mariposa (esta dicta el flujo de aire hacia el colector), sin embargo resulta bastante complicado para el usuario lograr manipular dicho parámetro de manera suficientemente rápida como para lograr igualar ambos valores y conseguir la convergencia de la presión en el colector, esta limitación no se presenta para altas velocidades de giro debido a que al colocar la válvula mariposa en 100% de apertura el flujo de aire hacia el colector resulta mayor que el flujo hacia los cilindros, de manera que esto permite que el colector logre alcanzar su máxima presión, dado que se trabaja con un motor aspirado, dicha presión máxima es aproximada a la presión ambiental. Producto de esta limitación, el modelo no permite obtener las curvas para bajas RPM, sin embargo se pueden obtener las mismas para velocidades de giro superiores a 6000 RPM siendo este el rango más amplio y de mayor interés de estudio para este tipo de motores utilizados para motos de alto rendimiento ya que los mismos normalmente suelen operarse en altos valores de RPM.

## CONCLUSIONES

Consiguió desarrollarse una aplicación que representa un Laboratorio Virtual que permite realizar una práctica de un motor de combustión interna. Dicha aplicación fue desarrollada en el entorno de programación de LabView, el mismo permitió realizar la programación de la aplicación de forma relativamente sencilla sin la necesidad de disponer de amplios conocimientos de programación.

Se logró aplicar un modelo matemático que describe de manera satisfactoria, para los fines académicos para los que fue desarrollado, el comportamiento del motor de combustión interna utilizado para la realización de este trabajo, dicho modelo se obtuvo a partir de una compilación de ecuaciones teóricas que permiten describir por separado el comportamiento de los diversos fenómenos que ocurren dentro del motor.

La aplicación desarrollada presenta la ventaja que puede ser instalada en cualquier computadora ya que se generó un archivo ejecutable que permite la realización de esta tarea, sin embargo es necesario que la computadora en la que se vaya a utilizar la aplicación disponga de Microsoft Office dado que los archivos con los datos generados por la aplicación son guardados en archivos de Excel.

Dado que la aplicación del LV desarrollada puede ser utilizada en cualquier computadora que disponga de Microsoft Office, el ejecutable que permite instalar la aplicación puede distribuirse a los estudiantes a través de internet utilizando las plataformas de aula virtual disponibles en la USB, de esta forma la práctica no debe ser necesariamente realizada en horario de clases resultando de esta manera conveniente para los estudiantes que pueden realizar la misma en momento de su preferencia. De igual forma se permite a los estudiantes que dispongan de mayor acceso a la misma, dado a que no se verían obligados a realizar la práctica en las aulas computarizadas del Laboratorio de Conversión de Energía Mecánica, superando de esta forma la limitación de la disponibilidad de estas aulas.

Se observó como a nivel mundial se vienen utilizando las TIC de manera de mejorar la experiencia de los estudiantes a la hora de adquirir conocimientos, específicamente con la utilización de laboratorios virtuales que facilitan el acceso a los estudiantes a las experiencias normalmente desarrolladas en laboratorios convencionales a los que quizás los estudiantes no puedan tener acceso.



**Recomendaciones:**

- Incluir la realización de la práctica de Laboratorio Virtual de Motores de Combustión Interna en el programa de la materia Máquinas Volumétricas, de manera de observar los resultados obtenidos de la realización de la misma, tanto para estudiantes como profesores.
- Extender este tipo de proyectos a otras prácticas de laboratorio a las que sea aplicable, de manera de generar una librería de LV a la que los estudiantes tengan acceso de manera de otorgarle más herramientas para su formación profesional.
- Resultaría interesante crear un portal web para el laboratorio desde el cual se pudieran llevar a cabo este tipo de prácticas de Laboratorios Virtuales.
- Este tipo de proyectos podrían desarrollarse en conjunto con estudiantes de Ingeniería en computación de la USB de manera de crear aplicaciones más robustas y que presenten mayores funcionalidades.
- Una vez se encuentre operativo el banco de pruebas del motor estudiado, recolectar datos experimentales de manera de realizar una validación del modelo desarrollado comparándolo con dichos datos.
- Existe la posibilidad de desarrollar un modelo que muestre el efecto que tiene el tiempo en que se produce la chispa en el comportamiento del motor, el mismo no fue incluido en el modelo desarrollado por qué no se tuvo acceso a las ecuaciones necesarias para describir dicho fenómeno, si en el futuro se logra acceder a estas ecuaciones podría incluirse en el modelo propuesto de manera de ampliar las experiencias desarrolladas en la práctica del laboratorio virtual.
- Si se desea que el modelo presente una mayor aproximación a los resultados presentados por Rivas y Viera<sup>(7)</sup>, podrían modificarse los coeficientes presentados en la tabla 5.2 de manera de obtener curvas que representen con mayor fidelidad dichos resultados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **DAGNINO, David.** *Desarrollo de un Laboratorio Virtual de Turbina a Gas.* Coordinación docente de Ingeniería Mecánica, Universidad Simón Bolívar. Sartenejas: s.n, 2011.
2. **CEBRIÁN, Manuel.** *Enseñanza Virtual para la Innovación Universitaria.* Madrid: Narcea, 2007.
3. **Loranti, A., Hermida, G., Hernández, J., Ladrón, E.,** “*Los laboratorios Virtuales y Laboratorios Remotos en la Enseñanza de la Ingeniería*”, ISSN 1940-116, Vol. 4, 2011.
4. VIRTUAL LABS[En Línea] [Citado el 03 de 06 de 2015]  
<http://www.vlab.co.in/index.php>
5. Institutionen för Energiteknik. *E-learning and distance education.*[En Línea] [Citado el 05 de 06 de 2015]  
[http://www.energy.kth.se/proj/projects/Remote\\_labs/VCLAB/Home/Home.htm](http://www.energy.kth.se/proj/projects/Remote_labs/VCLAB/Home/Home.htm)
6. **HEYWOOD, John.** *Internal Combustion Engine Fundamentals.* McGraw-Hill, 1988.
7. **RIVAS, Manuel y VIERA, Juan.** *Diseño y construcción de un sistema de longitud de trompetas variables para un carro tipo formula.* Coordinación Docente de Ingeniería Mecánica, Universidad Simón Bolívar. Sartenejas: s.n., 2008.
8. **GUZZELLA, Lino y ONDER, Christopher.** *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems.* Springer, 2009.
9. **H. W. Engleman.** *The Tuned Manifold: supercharging without a blower.* ASME paper 73-WA/DGP.
10. **STÖCKLI, M.** *Reibleistung von 4-Takt Verbrennungsmotoren.* LVV Technical Report, ETH Zürich, 1989.
11. **JOYANES AGUILAR, Luis y ZAHONERO MARTÍNEZ, Ignacio.** *Programación en C.* Madrid: Mc Graw Hill, 2001. págs. 20-45.
12. **ANGULO, Jacobo.** *Simulación en estado transitorio de un motor CBR600 F4i.* Coordinación docente de Ingeniería Mecánica, Universidad Simón Bolívar. Sartenejas: s.n, 2006.
13. **Ross Pursifull, Alain J. Kotwiski, and Sulgi Hong.** *Throttle flow characterization.* SAE Technical Paper No. 2000-01-0571, 2000.

## APENDICE A

### GUIA DE LABORATORIO PROPUESTA

#### 1. INTRODUCCIÓN.

Durante la realización de esta práctica se estudia el comportamiento de un motor Honda CBR 600F4i, dicho motor ha utilizado por el equipo Formula SAE-USB para el desarrollo de sus prototipos desde el año 2002, durante los años de desarrollo de los prototipos del equipo se han desarrollado diversos trabajos para mejorar el desempeño del motor dadas las limitaciones impuestas por la competencia, entre los principales desarrollos realizados destaca la utilización de un colector de admisión con longitud de trompetas variables.

<b>Características Motor CBR600F4i</b>		
<b>Diámetro Cilindros</b>	<b>[m]</b>	0,067
<b>Carrera</b>	<b>[m]</b>	0,0425
<b>Volumen de Desplazamiento</b>	<b>[m<sup>3</sup>]</b>	0,000599
<b>Volumen de Compresión</b>	<b>[m<sup>3</sup>]</b>	1,36218E-05
<b>Relación de compresión</b>		12.0:1
<b>Momento de Inercia</b>	<b>[kg·m<sup>2</sup>]</b>	0,09

Las admisiones variables se utilizan con el fin de aprovechar los pulsos de presión, creados en las trompetas dados los aperturas y cierres de válvulas, de manera de utilizar los mismos para aumentar el flujo másico de aire que ingresa a los cilindros para la posterior combustión.

Dado que el banco de prueba dispuesto para el estudio de este motor no se encuentra operativo durante todos los trimestres por las limitaciones existentes dentro del laboratorio (falta de repuestos, etc.), Se decidió desarrollar un entorno virtual que permita simular la experiencia realizada en dicho banco, de esta forma los estudiantes disponen de una herramienta que permite poner en práctica los conocimientos adquiridos en las aulas de clase.

El laboratorio virtual utilizado para llevar a cabo esta práctica fue desarrollado en el entorno de programación LabView, el mismo puede ser utilizado en cualquier computadora con la única limitación de que la computadora en que se pretenda utilizar debe disponer de Microsoft Office instalado, ya que la aplicación crea un reporte con los datos generados en un archivo de Excel, de igual forma una de las variables a manipular debe ser ingresada en un archivo de Excel.

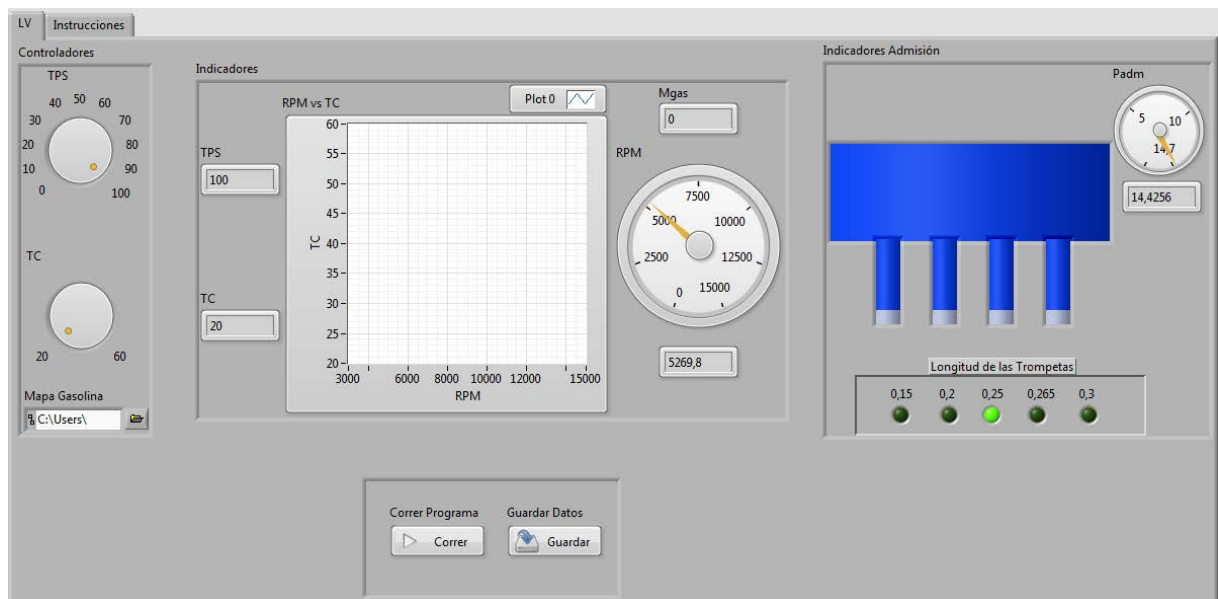
El estudio de los motores de combustión interna (MCI) es de vital importancia ya que los mismos representan una de las máquinas más utilizadas en la actualidad, sus aplicaciones van desde el transporte, utilizadas en carros, barcos, etc.; hasta la generación de energía.

## 2. OBJETIVOS.

Los objetivos de la realización de esta práctica son la obtención de las curvas características que permitan describir el comportamiento de un MCI, estas son:

- Torque vs Velocidad de giro.
- Potencia vs Velocidad de giro.
- Eficiencia vs Velocidad de giro.
- Potencia vs Relación Aire-Combustible.
- Eficiencia vs Relación Aire-Combustible.

## 3. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO VIRTUAL.



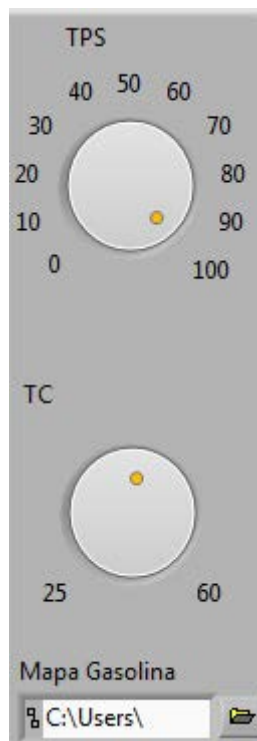
La práctica es llevada a cabo en un programa de computadora que utiliza un modelo desarrollado que permite simular el comportamiento del motor Honda CBR600F4i utilizado por el equipo Formula SAE-USB.

El banco de prueba constaría básicamente del motor, la unidad de control del mismo y un freno acoplado al eje del motor que permite variar el torque que se le introduce al mismo.

La unidad de control del motor permite variar la relación aire combustible impuesta al motor, para esto, generalmente se utilizan tablas denominadas “mapas de inyección” que permiten establecer la relación aire combustible deseada para diversos rangos de velocidades de giro del motor y grados de apertura de la válvula del acelerador.

		RPM								
		500	1000	1500	2000	..	11500	12000	12500	13000
Apertura Valvula Mariposa	4	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	8	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	12	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	16	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	88	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	92	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	96	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3
	100	1,3	1,3	1,3	1,3	...	1,3	1,3	1,3	1,3

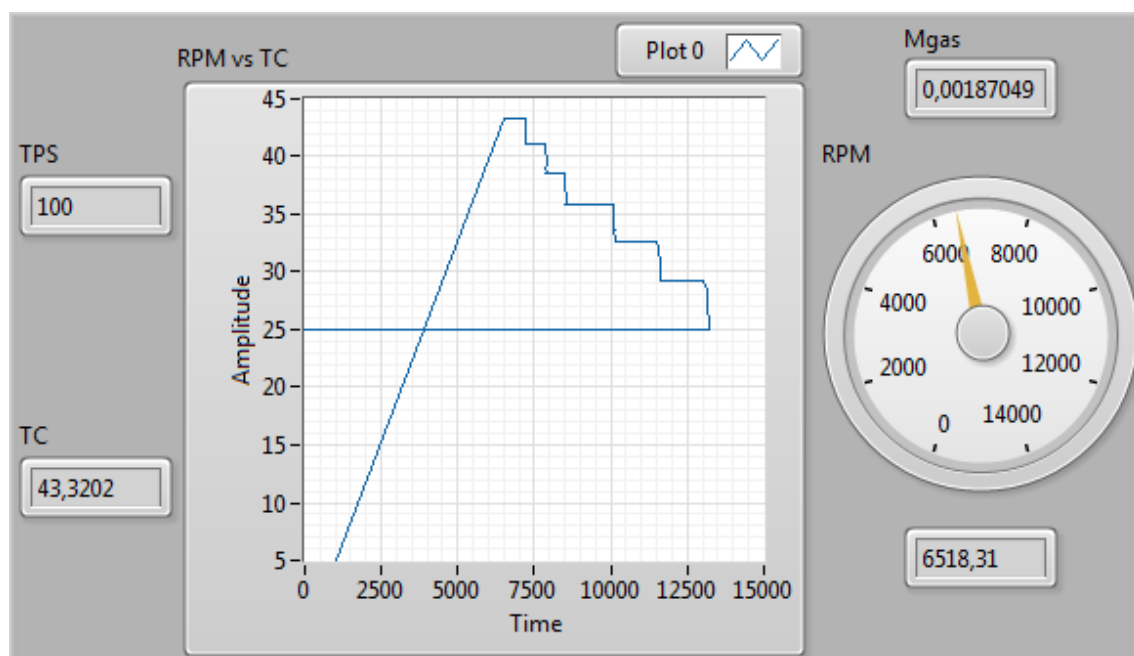
De igual forma es necesario poder manipular el porcentaje de apertura de la válvula del acelerador y el torque al que es impuesto el motor, para esto el programa presenta dos perillas que permiten variar dichos parámetros.



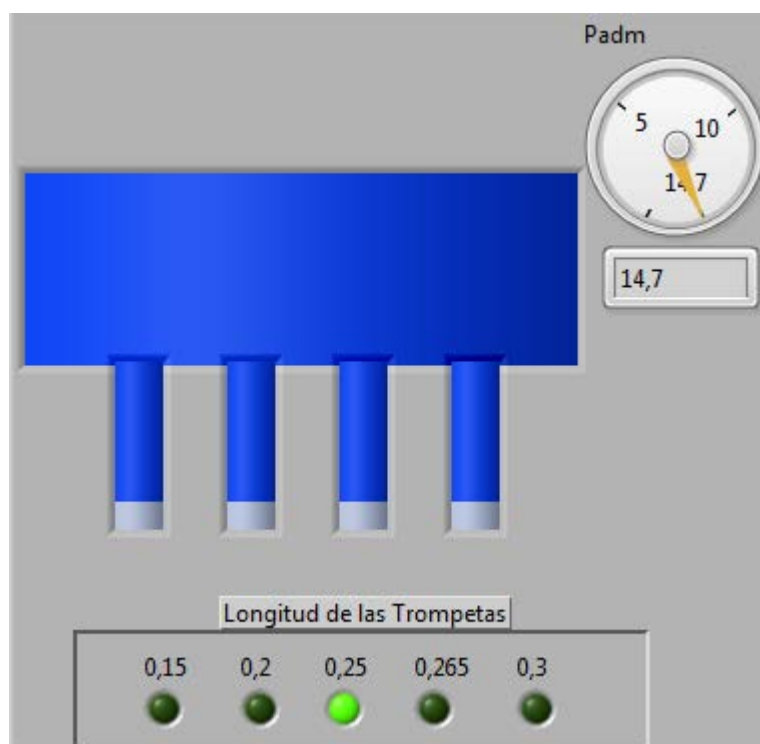
Se observa además que se tiene una barra donde se debe introducir el directorio del archivo para el mapa de inyección a utilizar para el desarrollo de la práctica.

El programa cuenta además con una ventana donde se pueden observar los datos necesarios para el desarrollo de la práctica, se disponen de indicadores numéricos que permiten observar de manera más clara los valores del porcentaje de apertura de la válvula del acelerador, y del torque impuesto al motor. Se presenta un tacómetro que permite observar la variación de las RPM del motor, de igual manera se tiene un indicador numérico que permite observar el valor de las RPM de forma más clara, además se tiene un indicador que muestra el

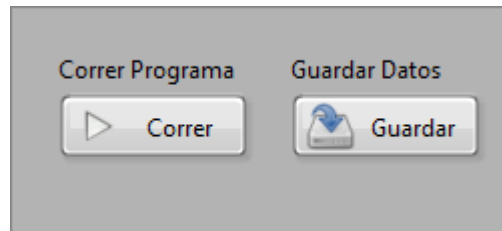
valor del flujo másico de combustible hacia los cilindros del motor. Se tiene una ventana en la que se va presentando gráficamente como se va produciendo la variación del Torque en función de las RPM del motor.



El programa muestra una ventana que permite observar el comportamiento de la admisión variable, demostrando como se va modificando la longitud de las trompetas a medida que va variando la velocidad de giro del motor, dicha ventana muestra además el comportamiento de la presión dentro del colector de admisión.



Por último el programa dispone de una ventana desde la cual se dispone de un botón desde el cual se puede correr o detener el funcionamiento del programa, y una vez generados los datos necesarios para la realización de los cálculos necesarios para el desarrollo la práctica guardar los mismos en un archivo de Excel.



#### 4. OPERACIÓN DEL PROGRAMA.

Para el inicio de la práctica es necesario cargar el archivo con mapa de inyección seleccionado de manera de establecer la relación aire combustible a utilizar para la realización de la experiencia, una vez cargado el archivo se procede a la puesta en operación del programa presionando el botón correr.

Una vez se encuentre el programa en funcionamiento se coloca la perilla que indica el porcentaje de apertura de la válvula del acelerador en 100% , con este porcentaje de apertura de la válvula se va variando el valor del torque de la carga acoplado al motor, preferiblemente con un paso establecido en el aumento del torque, de manera de observar el efecto que tiene la variación del mismo en las RPM del motor, es importante destacar que una vez modificado el valor del torque se debe observar el valor de las RPM y observar que el mismo se estabilice para poder proceder a variar el valor del Torque de la carga nuevamente.

Se va realizando la variación del torque para obtener diversos puntos hasta que se observe que se alcanzó el valor del máximo torque entregado por el motor, esto se observa cuando el valor de las RPM comienza a descender indefinidamente sin alcanzar un punto de estabilización. Lamentablemente el modelo desarrollado no responde lo suficientemente rápido como para obtener las curvas para bajas RPM.

Una vez se ha alcanzado el punto de máximo torque se puede proceder a guardar los datos generados por el programa para realizar los cálculos necesarios para hacer los ensayos planteados. Al oprimir el botón “Guardar” en el programa se abre un archivo de Excel donde se presentan 4 columnas con los datos de Torque de la carga, RPM, Flujo másico de combustible y presión en el colector de admisión. Para la realización de las curvas se seleccionan los datos para los diversos Torques de la carga impuestos para los cuales las RPM ya se encontraban en un valor estable.

## 5. ENSAYOS.

Las principales curvas utilizadas para describir el funcionamiento de un MCI son las curvas de Torque, Potencia y eficiencia vs RPM, las mismas van a ser calculadas para distintas relaciones aire combustible, de manera de observar el efecto que tiene la variación de dicho parámetro sobre el comportamiento del motor.

Potencia.

$$P = \frac{T_m \cdot RPM}{5252}$$

Donde:

$P$ : Potencia del motor. [hp]

$T_m$ : Torque del motor. [lbf·ft]

$RPM$ : Velocidad de giro del motor.

Eficiencia.

Para el cálculo de la eficiencia es necesario primero determinar la presión media efectiva y la presión media efectiva al combustible

$$p_{me} = \frac{T_m \cdot 4\pi}{V_d}$$

$T_m$ : Torque del motor. [N·m]

$V_d$ : Volumen desplazado por el motor. [m<sup>3</sup>]

$$p_{m_{gas}} = \frac{H_l \cdot m_{gas}}{V_d}$$

$H_l$ : Poder calorífico inferior de la gasolina. [41,2 MJ/kg]

$m_{gas}$ : Masa de combustible inyectada a los cilindros. [kg]

$V_d$ : Volumen desplazado por el motor. [m<sup>3</sup>]

Para el cálculo de la presión media al combustible es necesario determinar la masa de combustible inyectada a los cilindros, dicho valor se puede obtener a partir del flujo másico de combustible hacia a los cilindros.



$$\dot{m}_{gas} = m_{gas} \cdot \frac{\omega_m}{4\pi}$$

$\dot{m}_{gas}$ : Flujo másico de gasolina a los cilindros. [kg/s]

$m_{gas}$ : Masa de gasolina inyectada a los cilindros. [kg]

$\omega_m$ : Velocidad de giro del motor. [rad/s]

Por último se realiza el cálculo de la eficiencia del motor a partir de

$$\eta_m = \frac{p_{me}}{p_{mgas}}$$

$p_{me}$ : Presión media efectiva. [Pa]

$p_{mgas}$ : Presión media efectiva al combustible. [Pa]

Gráficas a realizar:

Para distintas relaciones aire combustible ( $\lambda$ ):

Torque vs RPM.

Potencia vs RPM.

Eficiencia vs RPM.

Utilizando los mayores valores de Potencia y eficiencia:

Potencia vs  $\lambda$ .

Eficiencia vs  $\lambda$ .