

**SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DIESEL
TRABAJANDO CON MEZCLA
(DIESEL-GAS NATURAL) SIMUDUAL 1.0**

**YENNY PAOLA URIBE AYALA
EDWIN INGNACIO TRUJILLO VELANDIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.008

**SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DIESEL
TRABAJANDO CON MEZCLA
(DIESEL-GAS NATURAL) SIMUDUAL 1.0**

**YENNY PAOLA URIBE AYALA
EDWIN IGNACIO TRUJILLO VELANDIA**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
JORGE LUIS CHACON
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.008

DEDICATORIA

A Dios,

A mis padres,

A mi familia,

A mis amigos.

Yenny Paola Uribe Ayala

DEDICATORIA

A DIOS, por la vida y el entendimiento.

A mis Padres, principalmente por ser el motor de vida, por su colaboración apoyo incondicional.

A mi hermana, por brindarme siempre una voz de aliento.

A mis amigos, por su apoyo y compañía.

Edwin Ignacio Trujillo Velandia

AGRADECIMIENTOS

A Jorge Luis Chacón, ingeniero mecánico director del proyecto, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna.

A Ing. Alvaro Ruiz, amigo de quien parte la idea para desarrollar este proyecto.

A Juan Francisco Maradey, ingeniero mecánico, quien compartió su conocimiento y acompañó durante todo el proceso de desarrollo de este proyecto.

A todos nuestros amigos y compañeros que nos apoyaron y alentaron para el feliz término de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	3
1.1 MOTOR DIESEL.....	3
1.1.1 Historia	3
1.1.2 Funcionamiento del motor Diesel.....	4
1.1.3 El Ciclo Diesel	8
1.2 COMBUSTIBLES	12
1.2.1 Combustible Diesel	12
1.2.1.1 Número de Cetano.....	13
1.2.1.2 Punto de Inflamación.....	13
1.2.1.3 Rango de Ebullición.....	13
1.2.1.4 Densidad.....	14
1.2.1.5 Azufre	14
1.2.1.6 Composición Química	15
1.2.1.7 Aditivos	15
1.2.2 Gas Natural	16
1.2.2.1 Tipos de Gas Natural.....	18
1.2.2.2 Propiedades Físico Químicas	20
1.3 ALTERNATIVAS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DIESEL CON COMBUSTIBLE GAS NATURAL	28
1.3.1 Motor de Gas Natural como combustible único.....	28
1.3.1.1 Motores Dedicados	28
1.3.2 Motores Duales.....	29
1.4 GASES DE ESCAPE.....	29
1.4.1 Dióxido de carbono CO ₂	30
1.4.2 Vapor de agua H ₂ O	31
1.4.3 Monóxido de Carbono.....	31
1.4.4 Hidrocarburos no quemados HC	31
1.4.5 Óxidos de nitrógeno NO _x	32
1.4.6 Óxidos de azufre SO _x	33
2 COMBUSTIÓN.....	34
2.1 ESTEQUIOMETRIA.....	34
2.1.1 Relación aire combustible	36
2.2 EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN.....	37
2.3 PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN	40
2.4 ANÁLISIS ORSAT	46

2.5	CICLO AIRE COMBUSTIBLE	47
2.5.1	Calculo de Volúmenes.....	47
2.5.2	Proceso de compresión [1-2].....	48
2.5.3	Proceso de combustión [2-3].....	49
2.5.4	Proceso de expansión [3-4].....	49
2.5.5	Proceso de expulsión [5a-6]	49
2.5.6	Proceso de admisión [7-1]	50
2.5.7	Análisis general del ciclo termodinámico.....	51
3	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE	61
3.1	GENERALIDADES DE PROGRAMACIÓN EN JAVA.....	61
3.1.1	Características.....	62
3.1.2	Programación Orientada a Objetos (POO)	63
3.1.3	Datos y Variables.....	64
3.1.4	Crear objetos	64
3.1.5	Utilizar clases	65
3.1.5.1	Declaración de la clase.....	65
3.2	LENGUAJE UNIFICADO DE MODELADO UML.....	65
3.3	SIMULACIÓN DE MOTOR CUMMINS 160 BT 5.9	77
3.3.1	Características del motor evaluado	77
3.3.2	Características del los combustibles utilizados.....	78
3.3.3	Resultado de la validación.....	78
3.4	EJEMPLO DE SIMULACIÓN MOTOR CUMMINS 6B 5.9.....	79
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
	BIBLIOGRAFIA	88
	ANEXOS.....	90

LISTA DE FIGURAS

	pag.
Figura 1: Fases de la combustión de un motor Diesel	6
Figura 2: Inyección indirecta diesel	7
Figura 3: Inyección directa diesel.....	7
Figura 4: Carrera de admisión.....	8
Figura 5: Compresión e inyección.....	9
Figura 6: Expansión.....	9
Figura 7: Escape	10
Figura 8: Ciclo real Aire - Combustible	11
Figura 9: Ciclo real Aire - Combustible	47
Figura 10. Diagrama de Casos de Uso	67
Figura 11: Diagrama de Clases.....	75
Figura 12: Diagrama de Secuencias.	76

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Especificaciones Técnicas Diesel - Colombia	16
Tabla 2. Poder calorífico de combustibles	23
Tabla 3. Composición y propiedades de los gases comercializados en Colombia ..	27
Tabla 4. Emisiones del motor Diesel.....	30
Tabla 5. Propiedades del agua saturada.	39
Tabla 6. Logaritmos en base 10 de la constante de equilibrio Kp para algunas reacciones.	42
Tabla 7. Características Motor CUMMINS 160 BT 5.9	78
Tabla 8. Características Motor CUMMINS 6B 5.9	79

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. MATRIZ DE ESTADO DEL ARTE DE LAS SOLUCIONES EXISTENTES ACTUALMENTE	91
Anexo B. MANUAL DE DISEÑO	93
Anexo C. MANUAL DE INSTALACIÓN	99
Anexo D. MANUAL DE USUARIO	103

NOMENCLATURA O GLOSARIO

NOTACIÓN

bef	Moles CO producidos por baja eficiencia en la combustión
bhp	Potencia al freno
C	Número de cilindros
D	Diámetro del pistón
F	Relación combustible - aire
f	Fracción residual
h	Entalpía específica
K	Constante de equilibrio
J	Número de oxígeno
L	Número de Nitrogeno
M	Masa molar
ΩC	Numero de carbonos en el combustible
ΩH	Número de hidrógenos en el combustible
ΩN	Número de nitrógeno en el combustible
ΩO	Número de oxígeno en el combustible
n	Número de moles
P	Presión
q	Poder calorífico
r	Relación de compresión
S	Carrera del pistón
T	Temperatura absoluta
w	Átomos de N en un combustible
X	Número de Carbono
x	Fracción molar o volumétrica

Y	Composición másica, Número de Hidrogeno
Z	Grado de disociación en la solución

LETRAS GRIEGAS Y SIMBOLOS ESPECIALES

α	Exceso de aire
β	Relación de inyección
Δ	Indica diferencia o cambio finito de valor
ϵ	Moles de oxígeno teórico por mol de combustible
Φ	Humedad relativa del aire
η	Eficiencia
θ	Relación moles de CO ₂ / moles CO
ζ	Fracción de masa que se pierde por fugas
λ	Fracción de energía interna que se disipa en calor
Ω	Número
R	Constante universal de los gases

SUBÍNDICES

a	Aire
atm	Atmosférico
b	
c	Combustión
d	Diesel
ef	Eficiencia
f	Combustible
g	Fase gaseosa
i	Inducida o de admisión
iny	Inyección

m	Mecánico
o	Salida
r	Residual
T	A temperatura constante
u	
v	Fase de vapor
w	Agua
1,2,3...K	Propiedades de las sustancias 1,2,3...K

ABREVIATURAS

air	Aire
atm	Atmósfera estándar
nom	Nominal
Pot	Potencia
Torq	Torque
rpm	Revoluciones por minuto.
Isfc	Consumo específico de combustible

RESUMEN

TÍTULO:

SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DIESEL TRABAJANDO CON MEZCLA (DIESEL-GAS NATURAL) SIMDUAL 1.0 *

AUTORES:

Yenny Paola Uribe Ayala
Edwin Ignacio Trujillo Velandia**

PALABRAS CLAVES:

Simulación, combustión, mezcla, Diesel, gas, GNV.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es continuar con la misión de la Universidad Industrial de Santander de formar Ingenieros mecánicos que contribuyan en la búsqueda de alternativas ante la grave crisis ambiental y económica que se vive día a día debido al uso irracional de los diferentes combustibles fósiles como fuentes de energía, suministrando a los estudiantes de la Universidad Industrial de Santander una herramienta con la que puedan ampliar sus conocimientos adquiridos en la materia Maquinas Térmicas Alternativas y tengan la posibilidad de observar el comportamiento de un motor diesel con alimentación de mezcla de combustibles (Diesel-Gas natural).

Esta herramienta fue desarrollada en lenguaje Java, logrando plasmar gráficamente el comportamiento del motor Diesel trabajando con mezcla Diesel- gas natural. La estructura de diseño, se basa en la metodología de programación orientada a objetos, la cual permite organizar los modelos matemáticos aplicados para facilitar futuras modificaciones.

El escenario de simulación, muestra el comportamiento del motor en cuanto a curvas características de potencia, torque y consumo específico de combustible. Contemplando como variables de entrada al sistema: coeficientes experimentales, tipos de combustibles y sus respectivas mezclas, datos geométricos como diámetro del pistón, carrera del pistón, número de cilindros, relación de compresión y datos termodinámicos como temperaturas y presiones iniciales.

Esta herramienta académica permite visualizar la variación de los gases de escape del motor como resultado de la combustión y comparar la calidad de las emisiones de acuerdo a la proporción de combustible empleado.

* Investigación.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Mecánica, Ing. Jorge Luis Chacón.

Con el software SIMUDUAL 1.0, se obtuvo como resultado una herramienta académica que permite a los estudiantes el análisis, entendimiento y comparación del comportamiento del motor Diesel de acuerdo a la proporción de la mezcla de combustible Diesel - Gas natural.

SUMMARY

TITLE:

SOFTWARE FOR THE SIMULATION OF THE BEHAVIOR OF A DIESEL MOTOR WORKING WITH MIXTURE (NATURAL DIESEL-GA) SIMDUAL 1.0 *

AUTHORS:

URIBE AYALA, Yenny Paola,
TRUJILLO VELANDIA, Edwin Ignacio **

KEY WORDS:

Simulation, combustion, mixes, Diesel, gas, GNV.

DESCRIPTION:

The objective of this project is to continue with the mission of the Industrial University of Santander of forming Mechanical Engineers that contribute in the search of alternative before the environmental and economic serious crisis that one lives day by day due to the irrational use of the fossil different fuels as energy sources, giving the students of the Industrial University of Santander a tool with which they can enlarge its knowledge acquired in the matter you Scheme Thermal Alternative and have the possibility to observe the behavior of a diesel motor with feeding of mixture of fuels (Diesel - Natural Gas).

This tool was developed in language Java, being able to capture the behavior of the Diesel motor graphically working with Diesel - Natural Gas mixture. The design structure is based on the programming methodology guided to objects, which allows to organize the mathematical models applied to facilitate future modifications. The simulation scenario shows the behavior of the motor as for characteristic curves of power, torque and specific consumption of fuel. Contemplating as entrance variables to the system: experimental coefficients, types of fuels and their respective mixtures, geometric data as diameter of the piston, career of the piston, number of cylinders, compression relationship and thermodynamic data as temperatures and initial pressures.

This academic tool allows to visualize the variation of the gases of escape of the motor as a result of the combustion and to compare the quality of the emissions according to the proportion of fuel employee. With the software SIMUDUAL 1.0, it was obtained an academic tool that allows the students the analysis, understanding and comparison of the behavior of the Diesel motor according to the proportion of the mixture of Diesel fuel - Natural Gas, as a result.

The objective of this project is to endow to the school of Mechanical Engineering of the Industrial University of Santander, a program that it can be used like complement of the subject Heat Transfer I, titled "Software for the teaching of the Heat Transfer".

* Investigation

** Faculty of Engineerings Physique Mechanics. School of Mechanical Engineering. Jorge Luis Chacón

The algorithm of the program was designed with base in the mathematical equations of each mechanism for which you can transfer the heat, orderly in an appropriate way and including the possibility to carry out iterations if it is necessary, using as programming language the **Borland Delphi** for its versatility and the easiness with which it allows to create graphic interfaces in an environment of Windows, besides the use of other packages like **Corel Draw** and **Adobe PhotoShop**, to make the graphics and **Lotus Screen Cam**, to make of the demo of the Software.

The result is a software of easy handling that allows to solve a wide variety of concerning problems to the transfer of heat in quick form, presenting the results in a clear format and of easy interpretation that includes text and some complementary graphs. These characteristics make the program very useful point for students and professors like it stops engineers, since it avoids tedious and long calculation procedures, facilitating more time for the analysis and understanding of the problems to analyze.

INTRODUCCIÓN

La interacción entre estudiante - computadora a crecido considerablemente convirtiéndose en una herramienta necesaria para su desarrollo y formación integral como ser pensante e ingenioso.

Debido al avance tecnológico de los últimos años y las facilidades que los sistemas informáticos prestan, simular el comportamiento de los diseños se convierte en una fase fundamental de la metodología a desarrollar durante la investigación.

Este proyecto de grado tiene como finalidad desarrollar una herramienta informática que simula el comportamiento del motor diesel operando con GNV como combustible.

La idea de comparar el comportamiento del motor diesel con GNV es evaluar el desempeño con combustibles limpios y verificar su influencia en emisiones, potencia y consumo.

Se busca que esta herramienta educativa trabaje satisfactoriamente en diversos sistemas operativos (fundamentalmente Windows y Linux), para que el campo de experimentación sea mayor, permitiéndolo utilizar en mucho mas equipos.

Este proyecto desarrolla un escenario de simulación que contiene un modelo matemático para cada uno de los fenómenos fundamentales en los motores Diesel, entre los que se encuentran; modelos termodinámicos para la composición química y modelos geométrico.

El capítulo 1 tiene como finalidad presentar los conceptos básicos de motores Diesel, generalidades de combustibles y mostrar las diferentes alternativas del funcionamiento del motor Diesel con combustible Gas natural.

El capítulo 2 describe, el modelamiento físico y matemático que se empleo para el desarrollo del software SIMUDUAL 1.0.

El capítulo 3, muestra las generalidades del lenguaje de programación JAVA, en el cual fue diseñado el software SIMUDUAL 1.0. En este capítulo se relaciona todo el proceso de diseño desarrollado, incluyendo el paso a paso de un ejemplo de simulación.

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1 MOTOR DIESEL

1.1.1 Historia

Tras cuatro años de experimentación, el ingeniero alemán Rudolf Diesel presenta el primer motor de combustión interna que funciona según el ciclo que él mismo había inventado en 1892. La máquina se presenta desde sus inicios como un competidor de la máquina de vapor más serio que el motor Otto.

Los socios capitalistas y los consejeros técnicos de muchos países se lanzan sobre la fábrica de máquinas de Augsburgo en la que trabaja Diesel, con el fin de obtener licencias. Éste nuevo motor presenta ventajas fundamentales respecto al motor de Otto:

1. Es más robusto debido a que está construido con menor número de piezas
2. Puede consumir aceite pesado, con la ventaja que este es más económico que la gasolina
3. Tiene mayor rendimiento que el de Ciclo Otto.

El motor de Ciclo Otto en la década de los años 90 del siglo XIX lograba transformar un 13 % de la energía calorífica generada por la gasolina en trabajo mecánico, mientras que el motor de Diesel aumenta esa proporción a un 26 %. Sin embargo, para el propio Diesel este resultado es desalentador, pues había calculado que su motor sería capaz de aprovechar un 75% del calor. No obstante, la máquina es todavía más que competitiva. Sigue presentando problemas constructivos con la estanqueidad de 30:1, así como la inyección de combustible en

el momento que la densidad del aire es máxima. Ésta es la razón por la que los primeros motores son de grandes dimensiones.

En la actualidad, la eficiencia de los motores diesel, es mayor que en cualquier motor de gasolina, llegando a superar el 40%. Los motores diesel suelen ser motores lentos con velocidades de cigüeñal aproximadas de 100 a 750 revoluciones por minuto (rpm o r/min), mientras que los motores Otto trabajan de 2.500 a 5.000 rpm. No obstante, algunos tipos de motores diesel pueden alcanzar más de 2.000 rpm. Como el grado de compresión de estos motores es aproximadamente de 14 a 1, son por lo general más pesados que los motores Otto, pero más livianos que los diseños anteriores. Esta desventaja se compensa con una mayor eficiencia y el hecho de utilizar combustibles más baratos [1].

1.1.2 Funcionamiento del motor Diesel

El combustible es inyectado en el cilindro del motor hacia el final de la carrera de compresión, justo antes del inicio deseado de la combustión. El combustible líquido, usualmente inyectado a alta velocidad por uno o más chorros a través de pequeños orificios o toberas en la boquilla del inyector, se atomiza en pequeñas gotas y penetra en la cámara de combustión. Dado que la temperatura y la presión del aire están por encima del punto de inflamación del combustible, y el núcleo de las gotas está algo más frío, estas empiezan a vaporizarse de inmediato en su superficie externa, pero el combustible no arde de inmediato, y la inflamación espontánea de la mezcla de combustible - aire ocurre después de un período de retraso de unos pocos grados del ángulo del cigüeñal. La presión y temperatura del cilindro aumenta a medida que se desarrolla la combustión de la mezcla aire-combustible, lo cual ocasiona que el combustible que todavía atomiza el inyector se inflame tan pronto como sale de la tobera o punta del inyector.

El proceso de combustión antes descrito, en un motor Diesel de alta velocidad, puede decirse que ocurre en cuatro etapas o fases. La figura 1 muestra el incremento de presión dentro del cilindro con respecto a la rotación del cigüeñal desde 90° antes del PMS hasta 90° después del PMS.

En la figura 1 hay dos líneas: una línea punteada, que muestra la forma en que cambiaría la presión dentro del cilindro durante y después de la carrera de compresión si no hubiera inyección de combustible; el aumento y la caída de presión sería durante las carreras; y una línea continua que muestra el cambio en la presión durante las carreras de compresión y potencia, con un aumento rápido en la presión como resultado de la combustión [2].

Las cuatro fases de la combustión, como se ilustra en el diagrama son:

A a B: periodo de demora o retraso de la ignición. La inyección empieza en A, pero la combustión no ocurre de inmediato, sino que se demora hasta que los vapores que rodean las gotas de la atomización del inyector llegan a una temperatura alta suficiente para que se inflamen. La combustión empieza en B.

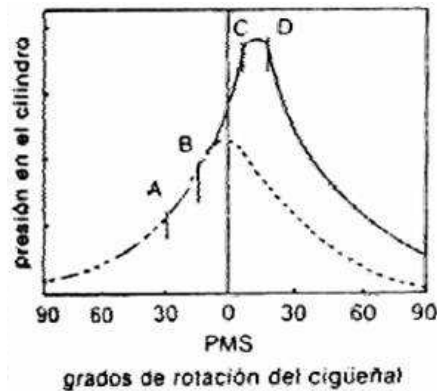
B a C: una fase de combustión rápida. Después del inicio de la combustión en B, las gotitas arden con rapidez y ocasionan un aumento súbito en la presión hasta que se llega al punto C. Durante esta fase, la combustión no está controlada.

C a D: una fase de combustión controlada. Conforme continúa la inyección, el combustible arde con uniformidad. La combustión está "controlada" por el volumen descargado por el inyector hasta el punto D, en donde termina la inyección.

D en adelante: postcombustión. La inyección ha cesado en D, pero la combustión continúa hasta que se ha quemado todo el combustible. No hay aumento en la

presión señalada en la gráfica, por que el pistón ahora se mueve hacia abajo y aumenta el volumen del cilindro [3].

Figura 1: Fases de la combustión de un motor Diesel

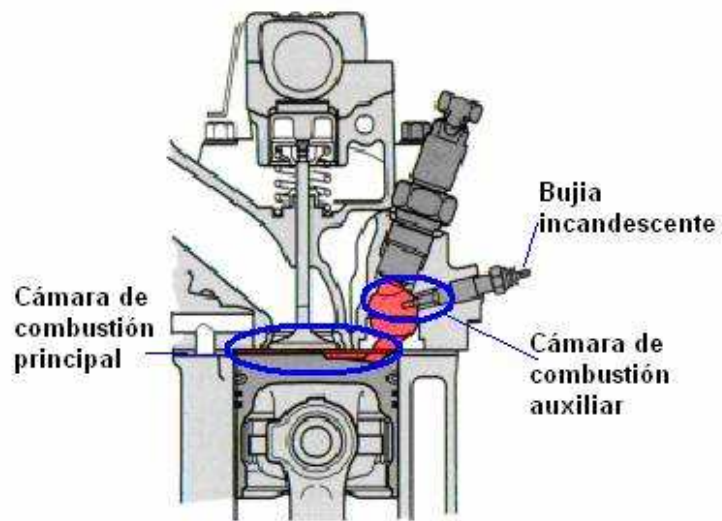


Fuente: MAY, Ed. Mecánica para Motores Diesel: Teoría, Mantenimiento y Reparación. Tomo I. México. Mac Graw Hill. 1988.

Uno de los factores que afecta el proceso de combustión en los motores Diesel es el diseño de la cámara de combustión. Ya que el problema principal en el diseño está en conseguir suficientemente rápido la mezcla entre el combustible inyectado y el aire en el cilindro para completar la combustión en el intervalo apropiado del ángulo del cigüeñal cerca al punto central.

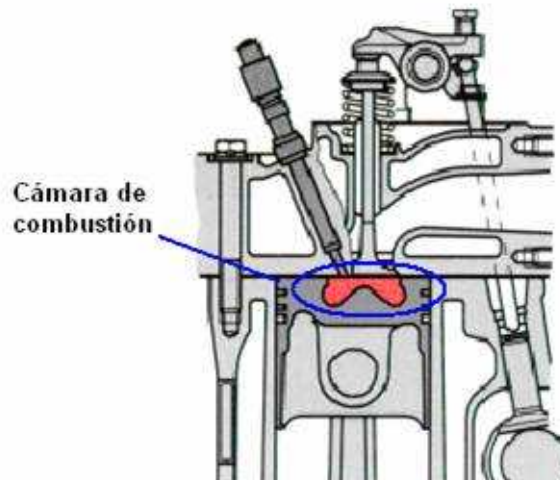
Existen dos tipos de cámaras: inyección directa, empleada en motores de bajas revoluciones y cámaras de inyección indirecta, utilizadas en motores de mediana, alta velocidad y poco robustos. La diferencia básica entre estas cámaras de combustión se puede observar en la figura 2: la cámara de inyección indirecta puede ser con un pistón casi plano o un pistón con una cavidad de poco fondo, se utiliza una bujía incandescente para ayudar el arranque en frío. La cámara principal de combustión está formada entre la parte superior del pistón y la culata de cilindros, pero también hay una cámara separada más pequeña, en la culata, en la cual se inyecta el combustible.

Figura 2: Inyección indirecta diesel



Fuente: TAYLOR. The Internal Combustion Engine in Theory and Practice. 1997. The MIT Press.

Figura 3: Inyección directa diesel



Fuente: TAYLOR. The Internal Combustion Engine in Theory and Practice. 1997. The MIT Press.

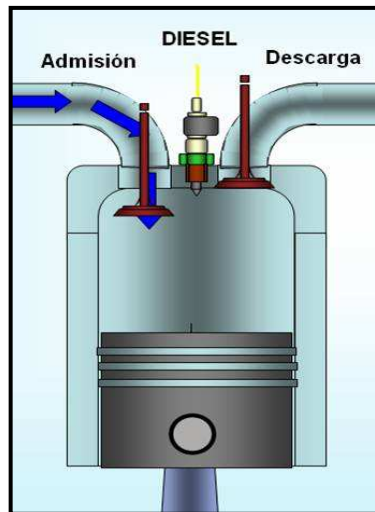
La cámara de inyección directa, ver la figura 3, tiene culata de cilindros con superficie plana y la cámara está formada por una cavidad en la parte superior del pistón [2].

1.1.3 El Ciclo Diesel

Se trata del ciclo de un motor de combustión interna, en el cual el calor que produce la compresión se encarga de encender el combustible. La secuencia de sus procesos es:

Carrera de admisión: en la carrera de admisión de un motor diesel penetra una carga completa de aire a cada cilindro. Ver la figura 4.

Figura 4: Carrera de admisión

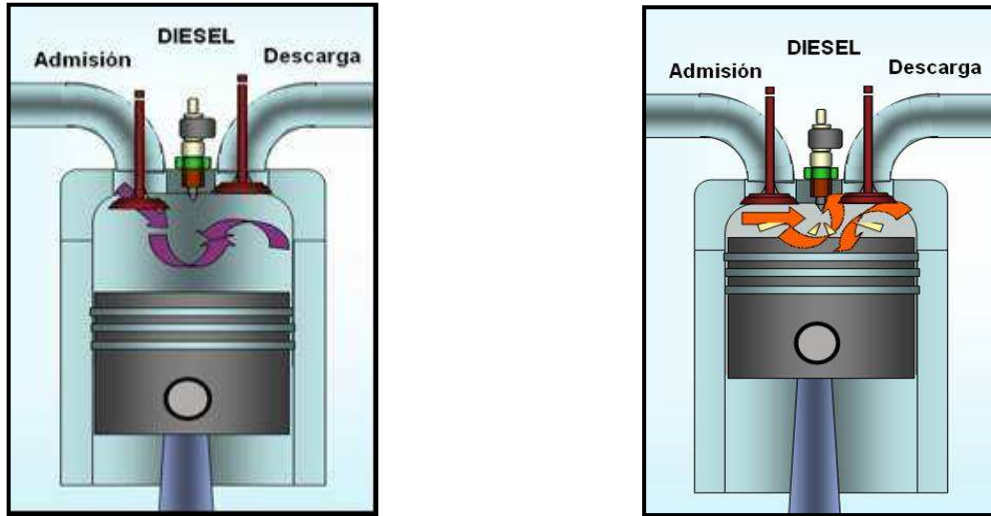


Fuente: EL AUTOR

Carrera de compresión: durante la carrera de compresión, se eleva la temperatura del aire a causa de la alta relación de compresión. Ver figura 5. El combustible es atomizado en la cámara de combustión poco antes de llegar al punto muerto superior en la carrera de compresión.

Adición de calor: se obtiene a partir de la quemada del combustible producida casi en el mismo instante en el que se introduce, debido a la alta temperatura del aire.

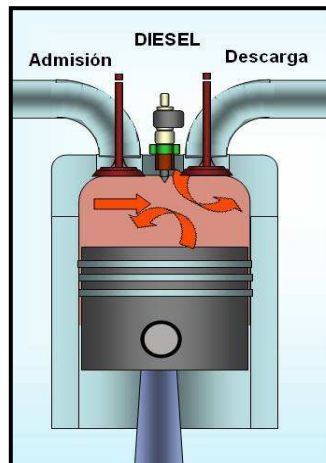
Figura 5: Compresión e inyección



Fuente: EL AUTOR

Carrera de expansión: se expanden los productos de la combustión para producir potencia. Ver figura 5.

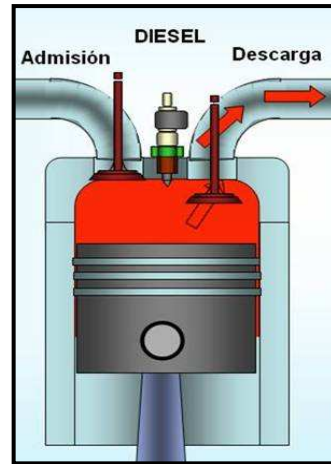
Figura 6: Expansión



Fuente: EL AUTOR

Carrera de Escape: salen los productos de la combustión después de expandirse para concluir el ciclo. Ver figura 6.

Figura 7: Escape



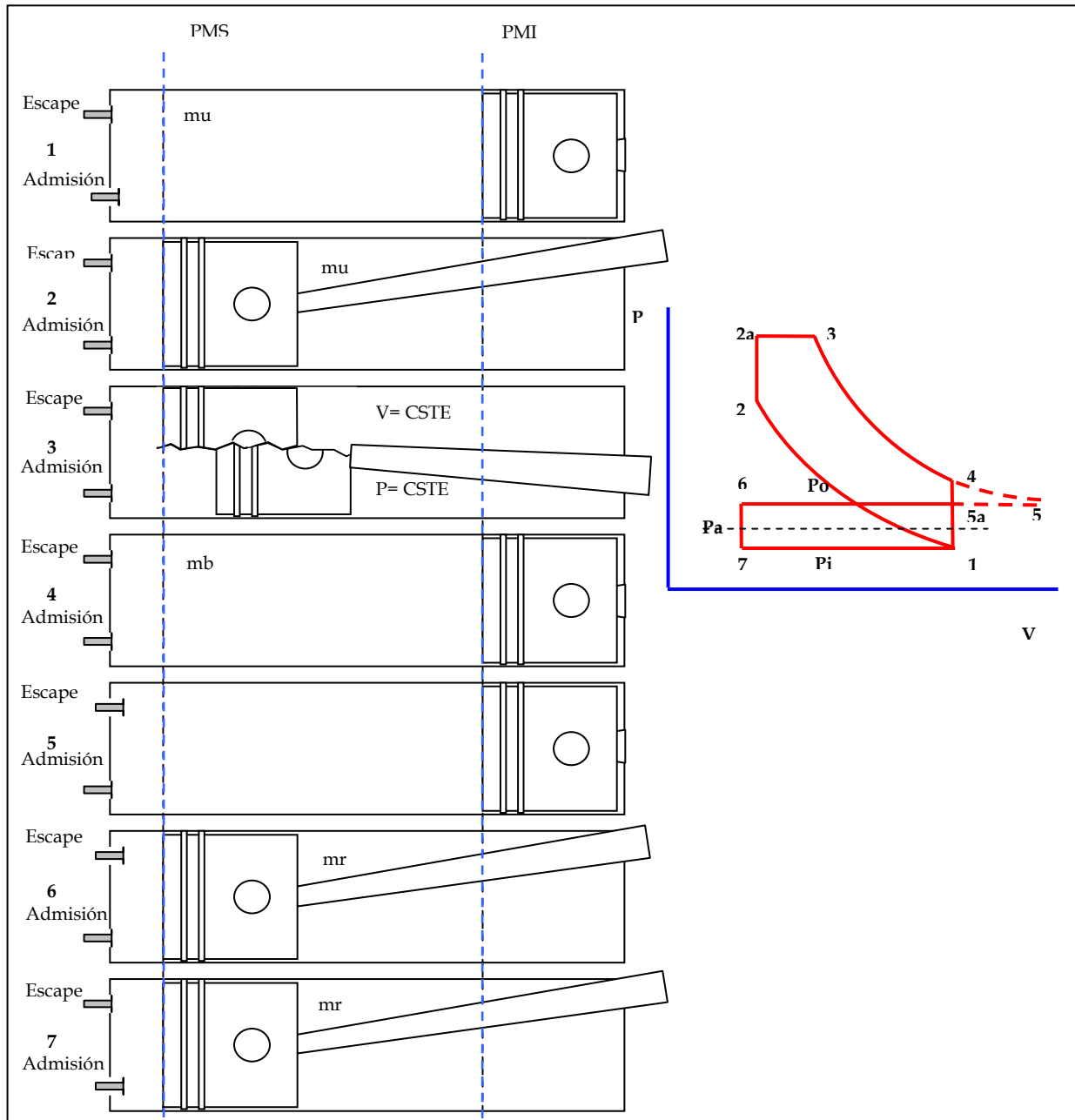
Fuente: EL AUTOR

Para obtener una explicación más precisa del ciclo real aire-combustible se describe paso a paso el proceso. [4] Ver figura 8.

1-2: Compresión adiabática reversible, del PIM al PMS, después del cierre de la válvula de admisión, de una mezcla de aire seco y residuos de gas que quedaron del ciclo anterior. La masa total contenida en el cilindro antes que ocurra la combustión (μ) se llama carga, y consideramos su composición inalterable.

2-3: Combustión a presión constante o con presión limitada junto con pérdidas de masa. El poder calorífico a utilizar será el del combustible líquido, en los motores de ciclo Diesel. Tendremos en cuenta la disociación del CO_2 y del H_2O cuando exista aire en defecto. El CO y el H_2 producidos en este caso con combustibles, y el poder calorífico de lo que quede de ellos en los residuos se resta del el de el combustible principal. Si existe exceso de aire se asume combustión completa.

Figura 8: Ciclo real Aire - Combustible



Fuente: EL AUTOR

3-4: Expansión hasta el PMI con pérdidas de calor de los gases productos de la combustión. La composición de los productos, cuando exista aire en defecto, será la de equilibrio durante el descenso de temperatura hasta 1700 K, por debajo de la

cual se considera que la composición permanece constante. En cualquier caso, el exponente isoentrópico de la expansión se calcula con los valores molares medios de la expansión y con la composición correspondiente a 1700 K. El proceso de expansión se considera politrópico.

4-5: Expansión adiabática reversible de los gases que permanecen dentro del cilindro durante la apertura de la válvula de escape, hasta la presión en el múltiple de escape, p_o , con el pistón inmóvil en el PMI, como se muestra en el diagrama PV de la figura 7.

5-6: Expulsión adiabática reversible de los gases a la presión del múltiple de escape constante, debida al movimiento del pistón desde el PMI al PMS. La masa que permanece en el cilindro se llama masa residual (m_r).

6-7a: Expansión adiabática reversible de la masa residual, después del cierre de la válvula de escape y durante la apertura de la válvula de admisión, hasta la presión en el múltiple de admisión (p_i), con el pistón inmóvil en el PMS.

7-1: Proceso de admisión a presión constante, con mezcla adiabática entre la masa residual (m_r) y la masa inducida (m_i).

1.2 COMBUSTIBLES

1.2.1 Combustible Diesel

Los combustibles Diesel, también llamados Aceite Combustible para motores (ACPM), están constituidos por un gran número de hidrocarburos, los cuales tienen rangos de ebullición entre 180°C y 380°C. Ellos son obtenidos por procesos de destilación atmosférica del petróleo crudo. Algunas refinerías incrementan la producción de ACPM incorporando productos del craqueo catalítico, previamente tratados para eliminar compuestos indeseables, tales como azufre y las olefinas.

Las diferentes propiedades del ACPM tienen incidencia sobre la calidad de la combustión, es decir sobre la cantidad de compuestos nocivos emitidos al ambiente.

A continuación se describe brevemente las propiedades más importantes del ACPM:

1.2.1.1 Número de Cetano

Esta relacionado con la calidad de la ignición. El ACPM debe iniciar su combustión fácilmente, es decir su auto ignición, por temperaturas, sin necesidad de una fuente externa de ignición. A mayor número de cetano, más fácil es iniciar la combustión. Los números de cetano típicos que se encuentran en el mercado están entre 45 y 50, los cuales satisfacen las tecnologías actuales de los motores. A mayor contenido de hidrocarburos parafínicos se obtienen más altos números de cetano, mientras que lo contrario sucede con los aromáticos.

1.2.1.2 Punto de Inflamación

El punto de inflamación es aquella temperatura a la cual un líquido produce suficiente cantidad de vapores para formar una mezcla aire/combustible capaz de encenderse bajo la presencia de una fuente de ignición o chispa. Esta propiedad se controla normalmente, por razones de seguridad en el manejo del producto, en valores superiores a 51 °C.

1.2.1.3 Rango de Ebullición

El rango de ebullición, determinado por la curva de destilación debe estar muy bien balanceado para no comprometer el buen desempeño de los motores. Los compuestos de bajo rango de ebullición son deseables para facilitar una buena operación a baja temperatura, buenos patrones de dispersión, combustible más

fácil; pero pueden disminuir el número de cetano y desmejorar las propiedades de lubricación. Por otra parte, los compuestos de alto rango de ebullición son deseables para mejorar el rendimiento de los crudos, aumentar la densidad calórica, la lubricidad; pero son más difíciles de quemar, aumentando las emisiones de material particulado y los depósitos sobre las boquillas.

1.2.1.4 *Densidad*

El valor calorífico del ACPM depende en alto grado de su densidad, manteniendo una relación directa. Las bombas de inyección de combustible inyectan volúmenes fijos, por lo tanto si la densidad varía ampliamente se presentan fluctuaciones notorias en la masa de entrada, y por ende, en la energía disponible.

1.2.1.5 *Azufre*

El azufre esta presente en el combustible Diesel en proporciones que dependen de los crudos de origen. En las refinerías el azufre es retirado mediante tratamientos con hidrógeno. Las regulaciones sobre calidad de combustibles son muy exigentes con el contenido de azufre por dos razones fundamentales:

- La combustión del azufre genera SO_2 , responsable de la formación de lluvias ácidas y de smog foto químico por reacción con otros productos de la combustión.
- Los nuevos sistemas de tratamiento de gases de escape para reducir las emisiones de NO_x , y de material particulado son muy sensibles al azufre, perdiendo actividad en su presencia.

1.2.1.6 Composición Química

En el Diesel se pueden encontrar más de 200 diferentes tipos de hidrocarburos, siendo los compuestos poliaromáticos los más indeseables por su dificultad para quemar completamente en el motor, produciendo compuestos de alto potencial cancerígeno. Las regulaciones ambientales limitan bastante estos compuestos, siendo necesario en las refinerías someter el combustible Diesel a procesos de hidrocrqueo para reducir los compuestos poliaromáticos, transformándolos en hidrocarburos parafínicos.

1.2.1.7 Aditivos

Para mejorar el desempeño de los combustibles Diesel se utilizan productos químicos en pequeñas cantidades, llamados aditivos, cuyo nombre se asocia a la propiedad que mejoran. Entre ellos se encuentran: antioxidantes, inhibidores de herrumbre y corrosión, antiespumantes, mejoradores de cetano, mejoradores de combustión, depresores de punto de fluidez, detergentes, dispersantes, odorizantes y mejoradores de lubricidad, entre otros.

En la tabla 1. Se muestra las especificaciones técnicas del ACPM de acuerdo a las pruebas de calidad realizadas en la Gerencia Complejo Barrancabermeja. Este producto fue muestreado de acuerdo con el instructivo STC-00-I-004, el cual está basado en la norma ASTM D 4057.

Tabla 1. Especificaciones Técnicas Diesel - Colombia

ANALISIS	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACION	METODO
AGUA Y SEDIMENTO	mL/100mL	0	0.05 MAXIMO	ASTM D 1796
CENIZAS	g/100g	0	0.01 MAXIMO	ASTM D 482
AZUFRE	g/100g	0.34	0.4 MAXIMO	ASTM D 4294
CORROSION LAMINA COBRE	CLASIFICACION	1A	2 MAXIMO	ASTM D 130
HIDROCARBUROS AROMATICOS	g/100g	28.65	35 MAXIMO	ASTM D 5186
DESTILACION				
PTO INICIAL DE EBULLICION	°C	185	REPORTAR	ASTM D 86
50% vol. RECOBRADO	°C	288	REPORTAR	
90% vol. RECOBRADO	°C	349	360 MAXIMO	
PTO FINAL DE EBULLICION	°C	386	390 MAXIMO	
GRAVEDAD API	Grados API	32.2	REPORTAR	ASTM D 4052
INDICE DE CETANO	N/A	45	45 MINIMO	ASTM D 4737
MICROCARBON RESIDUAL	g/100g	0.03	0.2 MAXIMO	ASTM D 4530
NUMERO DE CETANO	N/A	46	43 MINIMO	ASTM D 613
COLOR ASTM	CLASIFICACION	1	3 MAXIMO	ASTM D 1500
PUNTO DE FLUIDEZ	°C	0	3 MAXIMO	ASTM D 97
PUNTO DE INFLAMACION	°C	71.1	52 MINIMO	ASTM D 93
VISCOSIDAD CINEMATICA A 40°C	mm ² /s	3.669	1.9 MINIMO -5 MAXIM	ASTM D 445

N/A: No Aplica

Comentario: NINGUNO

FUENTE: www.ecopetrol.com.co/37315/CERTIFICADO DE COMBUSTIBLES/Reporte de resultados de ensayo de laboratorio 16-11-07.

1.2.2 Gas Natural

El Gas Natural es una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, que en su mayor parte está constituida por metano y etano y en menor proporción por propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados. Generalmente, esta

mezcla contiene impurezas tales como vapor de agua, gas carbónico y nitrógeno. Otras veces puede contener impurezas como sulfuro de hidrógeno, mercaptanos y helio.

El gas que se entrega para consumo final como combustible o materia prima tiene una composición bastante diferente a la presente en el yacimiento o en boca de pozo, composición que debe definirse mediante una calidad específica que requiere ser cumplida por todos los productores que comercialicen gas natural.

El Gas Natural Vehicular se ha presentado como una oportunidad para el país en términos económicos y ambientales. De acuerdo a proyecciones realizadas por el Ministerio de Minas y Energía, Colombia cuenta con reservas de gas natural para los próximos 20 años. Adicionalmente, la interconexión gasífera con Venezuela permite acceder a las reservas del vecino país que representan por lo menos 150 años de producción de dicho combustible.

Por otra parte, el gas natural a diferencia de otros combustibles no está sujeto a los vaivenes de las tasas de cambio ni de los precios internacionales. Estas ventajas son las que permiten a los consumidores invertir en este combustible como alternativa para el transporte.

En cuanto a las calidades ambientales del Gas Natural Vehicular es claro que las emisiones contaminantes por el uso de este combustible son inferiores comparadas con las de otros combustibles. Es por esto que los países están invirtiendo en las investigaciones para el uso del gas natural como combustible automotor, con el fin de reducir las el efecto invernadero y gran parte de las enfermedades respiratorias en las zonas urbanas.

Es así como el Ministerio de Transporte le ha propuesto a los Ministerios de Minas y Energía y del Medio Ambiente la creación de una mesa de trabajo permanente

entre las tres instituciones que permita unir esfuerzos con el fin de obtener los mayores beneficios para los colombianos.

Otro aspecto fundamental del trabajo de investigación es la revisión de las normas técnicas existentes y el estudio de nuevas. El intento de masificar el uso del Gas Natural Vehicular ha venido coordinando normas técnicas relacionadas con el tema. Por ejemplo ya existen Normas Técnicas Colombianas para los cilindros dedicados a contener este combustible y para los componentes de los equipos de conversión. Además se encuentran Normas Técnicas relacionados con Estaciones de Servicio, talleres de conversión, y pruebas de la instalación de componentes (mangueras, compresores, válvulas, etc).

Se ha considerado pertinente que empresas certificadoras debidamente autorizadas por la Superintendencia de Industria y Comercio sean las encargadas de verificar que tanto los equipos de conversión, como los talleres de conversión y las estaciones de servicio cumplan con las normas técnicas de calidad.

1.2.2.1 Tipos de Gas Natural

Debido a que el gas natural es una mezcla de varios compuestos y debido a que su composición difiere de un yacimiento a otro y que su presencia en el subsuelo puede darse acompañado de petróleo o libre se definen varios tipos de gas natural a saber:

- **Gas Crudo:** Es aquel que sale del yacimiento, sin tratar ni procesar.
- **Gas Libre:** Es aquel que proviene de un yacimiento donde solo existe gas como hidrocarburo
- **Gas Asociado:** Es aquel que proviene de un yacimiento donde simultáneamente se produce gas y crudo.

- **Gas Pobre:** Un gas que contiene muy poca cantidad de etano, propano y compuestos mas pesados.
- **Gas Rico:** Gas que contiene una cantidad de compuestos más pesados que el etano, alrededor de 0.7 galones de propano equivalente por 1000 pies cúbicos de gas.
- **Gas Acido o Agrio:** Gas que contiene más de 16 ppm de H₂S o cantidades porcentuales altas (mayores a 6%) de CO₂.
- **Gas Dulce:** Gas que contiene menos de 16 ppm de H₂S o cantidades bajas de CO₂.
- **Biogás:** Mezcla de gases que se obtienen a partir de la descomposición en un ambiente anaerobio (sin oxígeno) de los residuos orgánicos, como el estiércol animal o los productos de desecho de los vegetales. En este proceso realizado por bacterias, se libera una mezcla de gases formada por metano (el principal componente del biogás), dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y ácido sulfhídrico. Es un combustible económico y renovable; se utiliza en vehículos de motor, para mezclar con el gas del alumbrado y para usos industriales y domésticos. La producción de biogás, además de aprovechar materia considerada como desperdicio, origina como subproducto un fertilizante de calidad excelente. El biogás tiene mucha importancia en los países en desarrollo, y en los industrializados está aumentando la atención por este combustible para intentar reducir la dependencia actual del petróleo [16].

1.2.2.2 *Propiedades Físico Químicas*

El gas natural es incoloro, inodoro, inflamable y no es tóxico, sin embargo desplaza al aire en un ambiente cerrado. El gas natural es un excelente combustible debido a que quema fácil y completamente produciendo poca contaminación.

El gas natural es tratado al salir del pozo. La composición del gas tratado, en la forma como se entrega a los consumidores obedece a una reglamentación previamente establecida. Los tres parámetros utilizados para describir la calidad del gas natural son la presión, la temperatura y el volumen.

Un gas ideal, a menudo llamado gas perfecto, es un gas donde no existe fuerza molecular. Es necesario conocer la temperatura y la presión para poder determinar el volumen de un gas ideal con precisión [17].

Las propiedades básicas de los gases, aplicadas al comportamiento del gas natural son:

- Los gases son afectados por los cambios de temperatura y de presión debido a su capacidad de expandirse y contraerse con facilidad.
- Si no están confinados, los gases se expanden al calentarse y se contraen al enfriarse.
- Limitaciones solo por el tamaño del recipiente, los gases se expanden para ocupar el espacio que los contiene.
- Los gases pueden fácilmente comprimirse hasta volúmenes más pequeños.
- Los gases puros, que contienen un solo componente gaseoso, son tratados generalmente como gases ideales a baja presión.

La presión se define como la fuerza que actúa sobre una superficie. Si aumenta la presión que se aplica a un gas, las moléculas del gas se aprietan unas contra otras. En mayores alturas, la presión atmosférica es menor debido a que la presión de la atmósfera terrestre es menor que a nivel del mar.

Un gas se comporta como un gas ideal a baja presión, dicha ley expresa los efectos de la presión sobre el volumen al igual que la temperatura sobre el volumen.

Los gases reales se desvían del comportamiento anterior debido a la interacción de las fuerzas moleculares. Para la mayoría de los gases incluyendo el gas natural la desviación del comportamiento puede ser estimado con bastante exactitud, utilizando el factor de compresibilidad Z .

Poder calorífico del gas

El cambio de entalpía que acompaña a un mol de sustancia formada a partir de sus elementos constituyentes cuando una reacción da a lugar, en el estado de referencia (1atm de presión, y 25° C de temperatura), se llama *Calor o entalpía de Formación* (h°_f). es decir es el calor retirado o adicionado a los productos para llevarlos a condiciones de referencia a partir de los reactivos a las mismas condiciones.

Los calores de formación se obtienen experimentalmente midiendo el calor generado por la reacción.

Los elementos puros como el carbono (C), oxígeno (O₂), nitrógeno (N₂), hidrógeno (H₂), etc. Tienen su forma más estable en el estado de referencia, por tanto su calor de formación es *cero*.

La entalpía de un compuesto a presión P y temperatura T se define como la suma entre la entalpía de formación y el cambio de entalpía sufrido a partir del estado estándar al estado P y T.

$$\bar{h}(T, P) = h_f^\circ + \Delta \bar{h}(T, P) \quad (1)$$

Si aplicamos la 1ª ley de la termodinámica a un volumen de control en donde se lleva a cabo la reacción tenemos

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{n}_f} = \bar{q} = \sum_i^m n_{pi} * \bar{h}_{pi}(T_p) - \sum_i^n n_{ri} * \bar{h}_{ri}(T_r) \quad (2)$$

Aplicando la definición de entalpía de un compuesto tenemos

$$\bar{q} = \sum_i^m v_{pi} * \bar{h}_{f_{pi}}^\circ - \sum_i^n v_{ri} * \bar{h}_{f_{ri}}^\circ + \sum_i^m n_{pi} * \Delta \bar{h}_{pi}^{T_p} - \sum_i^n n_{ri} * \Delta \bar{h}_{ri}^{T_r} \quad (3)$$

Donde la variable v representa el coeficiente estequiométrico de cada componente de la reacción, positivo si pertenece a los productos y negativo si pertenece a los reactivos.

De la ecuación anterior se obtiene la expresión

$$\bar{q} = \sum_i^n v_{pi} * \bar{h}_{f_{pi}}^\circ - \sum_i^m v_{ri} * \bar{h}_{f_{ri}}^\circ \quad (4)$$

Expresa $(\Delta \bar{H}^\circ)$ el flujo de calor por mol de combustible requerido para que la reacción se da a condiciones estándar $T_p = T_r = 25^\circ\text{C}$ y $P = 1\text{atm}$. El negativo de esta expresión es llamado *Poder calorífico molar* (\bar{q}°). La tabla 2, muestra el poder calorífico de algunos combustibles.

Tabla 2. Poder calorífico de combustibles

ESPECIFICACION	\bar{q}° KJ/mol	\bar{l}° KJ/mol
HIDROGENO	241.8	-----
CARBON	393.6	-----
MONOXIDO DE CARBONO	283	-----
METANOL ETANOL	802.2	-----
ETANO	1430	5.02
PROPANO	2043	14.8
n-BUTANO	2658	21.1
n-PENTANO	3293	26.4
n-HEXANO	3857	31.5
n-HEPTANO	4466	36.7
n-OCTANO	5074	41.5
n-DECANO	6282	51
n-DODECANO	7518	61.3
NITROMETANO	642	38.4
BENCENO	3136	34
METANOL	638	37.9
ETANOL	1237	42.3
ACETILENO	1256	21.6
GASOLINA	4540	38.5
QUEROCENO	7350	44.9
DIESEL	8580	74.1
AGUA	0	44

FUENTE: MARADEY, Juan Francisco. Termodinamica Aplicada. Ed.1 2002

Reacción de Combustión

Una reacción de combustión es una reacción de oxidación rápida en la que se libera energía luminosa y calorífica.

Los procesos de combustión y de oxidación tienen algo en común: la unión de una sustancia con el oxígeno. La única diferencia es la velocidad con que el proceso tiene lugar. Así, cuando el proceso de unión con el oxígeno es lo bastante lento como para que el calor desprendido durante el mismo se disipe en el ambiente sin calentar apreciablemente el cuerpo, se habla de oxidación. Si el proceso es rápido y

va acompañado de un gran aumento de temperatura y en ocasiones de emisión de luz (llama), recibe el nombre de combustión.

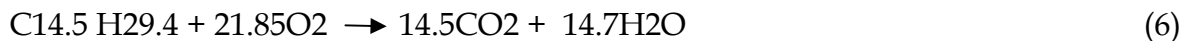
Ésta consiste en una combinación química con el oxígeno de la atmósfera para dar dióxido de carbono y agua. Se obtiene una gran cantidad de energía.

Si la oxidación es completa, la combustión produce el máximo rendimiento energético y los productos finales no son susceptibles de nueva combustión, es decir, se obtiene CO₂ y H₂O. De ser incompleta, una parte saldrá como hidrocarburo, otra como CO y se habrá perdido un porcentaje de la energía disponible. Como se observa en la ecuación 5 y 6 correspondiente a la combustión del gas natural y el Diesel, respectivamente.

Combustión del gas natural:



Combustión del Diesel:



Temperatura de Ignición

La temperatura de ignición de un gas es la temperatura más baja a la que sucede la combustión auto sostenida. La temperatura de ignición de un gas natural es inferior a la temperatura de ignición del metano como componente puro, debido a la presencia de otros hidrocarburos con temperaturas de ignición más bajas. A la temperatura de ignición, el gas empieza a arder en una mezcla adecuada de gas y aire. Esta posibilidad de ignición tiene aplicaciones tanto en la seguridad como en su uso como combustible. La temperatura de ignición del metano es de 705°C.

Limites de Inflamabilidad

Los límites de inflamabilidad de un gas definen el rango en el que se sucede la combustión.

Límite Inferior de Inflamabilidad (LII): Es la concentración más baja de un gas en aire en la que ocurre una combustión sostenida.

Límite Superior de Inflamabilidad (LSI): Es la concentración más alta de un gas en aire en la que soporta la combustión.

Los límites de inflamabilidad del gas natural son aproximadamente 5% (LII) y 15% (LSI) dependiendo de su composición. Si la concentración del gas natural en aire está entre el 5% y el 15% el gas empezará a arder si está expuesto a una fuente de ignición.

Peso Molecular

El comportamiento de una mezcla de gas está influenciado por su composición, es decir, por el contenido de cada componente de la mezcla. La cantidad de masa se expresa en términos del peso molecular en unidades de masa que se denominan moles.

Una molécula de metano (CH_4) está formada por un átomo de carbono ($\text{C} = 12$)

y cuatro átomos de Hidrógeno ($\text{H} = 1$), por lo tanto el peso molecular del metano es de 16.0.

Gravedad Específica

La gravedad específica de un gas está definida como la relación entre la densidad del gas y la densidad del aire seco a la misma temperatura y presión.

Para calcular la gravedad específica de un gas debe conocerse la densidad del aire a la misma temperatura y presión que la muestra del gas. La gravedad específica del metano es de 0.554.

La gravedad específica de un gas natural tiene un rango que va de 0.55 a 0.90, dependiendo de la cantidad de hidrocarburos pesados que haya en el gas. En un ambiente no confinado el gas natural sube y se disipa.

1.2.2.3 *Composición del Gas Natural - Colombia*

La composición del gas natural varía de acuerdo con el yacimiento de donde proviene. El gas natural puede contener de 80% a 98% de metano dependiendo del origen y del grado de procesamiento, razón por la cual se considera el más limpio de los combustibles fósiles.

En la tabla 3. Se muestra la cromatografía del gas de algunos de los campos productores con mayor representación en Colombia, estos valores están expresados en porcentaje molar.

Tabla 3. Composición y propiedades de los gases comercializados en Colombia

	ESPECIFICACION	UNID	APIAY	CANT AGAL LO	CUSIAN A 20M	CUSIAN A 50M	CUSIANA (OCENSA)	EL CENTRO - OPÓN	GUAJIRA COSTA ATLÁNTICA	GUAJIRA INTERIOR
1	METANO	%	82.3	91.341	76.513	78.8	74.78	92.03	98	97.997
2	ETANO	%	12.44	3.144	11.591	10.004	10.99	6.07	0.249	0.266
3	PROPANO	%	2.19	2.286	4.478	3.939	5.12	0.11	0.054	0.052
4	i-BUTANO	%	0.02	0.285	0.729	0.612	0.96	0.01	0.025	0.007
5	n-BUTANO	%	0.24	0.745	0.785	0.665	1.27	0.02	0.009	0.007
6	i-PENTANO	%		0.165	0.132	0.134	0.43	0.01	0.008	0.006
7	n-PENTANO	%		0.155	0.079	0.082	0.33	0	0.001	0.002
8	HEXANO	%		0.304	0.029	0.048	0.27	0	0.018	0.01
9	HEPTANO	%		0			0.22	0	0	0.025
10	OCTANO	%					0			
11	NONANO	%					0			
12	DECANO	%					0.01			
13	NTROGENO	%	0.837	1.329	0.43	0.602	0.57	0.84	1.395	1.405
14	CO2	%	2.194	0.246	5.234	5.114	5.06	0.79	0.242	0.24
15	OXIGENO	%						0.11	0	

	ESPECIFICACION	UNI D	GÜEPAJ É	LLANITO	MON TAÑU ELO	MORI CHAL	PAYOA	PAYO A - PROV INCIA	PROV INCIA	RIO CEIB AS	SANTA CLARA	TOQUI TOQUI
1	METANO	%	96.748	83.263	96.13	75.98	90.417	90.41	88.86	92.78	84.02	87.302
2	ETANO	%	0.589	3.627	0.7	10.3	6.806	6.806	9.102	4.34	2.71	5.879
3	PROPANO	%	0.148	1.389	0.025	5.28	0.36	0.36	0.99	1.37	0.93	3.678
4	i-BUTANO	%	0.069	0.72	0.042	1.12	0.013	0.013	0.012	0.26	0.43	0.553
5	n-BUTANO	%	0.021	0.707	0.011	1.44	0.017	0.017	0.003	0.4	0.4	1.226
6	i-PENTANO	%	0.014	0.416	0.009	0.54	0.006	0.006	0.001	0.11	0.2	0.329
7	n-PENTANO	%	0.004	0.342	0.004	0.39	0.005	0.005	0.002	0.07	0.15	0.233
8	HEXANO	%	0.051	0.11	0.008	0.31			0.004	0.04	0.18	0.368
9	HEPTANO	%	0		0.057	0.11				0.01	0.19	0.083
10	OCTANO	%				0.11					0.09	
11	NONANO	%				0.1					0.05	
12	DECANO	%				0					0.02	
13	NTROGENO	%	2.308	8.72	0.522	0.43	0.276	0.276	0.151	0.61	0.56	0.297
14	CO2	%	0.047	0.219	2.49	3.91	2.07	2.07	0.864	0	10.05	0.011
15	OXIGENO	%		0.487		0	0.03	0.03	0.011			

FUENTE: ECOPETROL, Gerencia de Gas, Julio 2004. Pag. 1-2.

1.3 ALTERNATIVAS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DIESEL CON COMBUSTIBLE GAS NATURAL

Existen dos tipos de tecnologías que pueden ser implementadas en motores de servicio pesado para operar con Gas Natural: Motor de gas natural como combustible único y Motor dual (Diesel/GNC). Para profundizar en el desarrollo de conversión de motores a nivel mundial, visualizar la matriz del Anexo A, en este documento se encuentra registrada las diferentes técnicas aplicadas.

1.3.1 Motor de Gas Natural como combustible único

Para operar un motor Diesel con combustible 100% gas natural, se hace necesario que la ignición del combustible se efectúe mediante el salto de una chispa eléctrica proveniente de una bujía.

1.3.1.1 Motores Dedicados

Un Vehículo a gas natural dedicado es un vehículo que puede operar solamente usando gas natural. La mayor parte de los vehículos a GNC dedicados, son producidos por fabricantes de equipos originales, sin embargo, pueden ser vehículos que se han convertido para operar con gas natural.

La conversión de Motor Diesel a “Motor Dedicado” consiste básicamente en el cambio del ciclo termodinámico, es decir que los motores pasarán de trabajar con ciclo Diesel a ciclo Otto. Este cambio implica modificaciones estructurales de varios componentes del motor diesel (pistones; tapa de cilindro; válvulas), también afecta el comportamiento del turbo compresor. Dado que para igualdad de desplazamiento y valores de potencia el consumo de aire de un motor diesel es mayor que el de un ciclo Otto, ya que la energía disponible en los gases de escape

de un ciclo Otto es mayor que en el Diesel, el turbocompresor original del motor diesel resulta sobredimensionado y con características de mapeo totalmente inadecuadas para un ciclo Otto. Con el fin de evitar el costoso reemplazo de la unidad turbo compresora es necesario desarrollar un dispositivo que ajuste los valores de caudal y presión del turbo compresor original del motor diesel a las nuevas condiciones de trabajo.

1.3.2 Motores Duales

La conversión de Motor Diesel a “Dual (Diesel/GNC)” mantiene el ciclo Diesel original y se añade el sistema de admisión de combustible GNC, por lo que el motor pasa a trabajar con diesel y gas natural simultáneamente.

Su principal ventaja es el menor costo de adecuación para operar con GNC, aunque su costo operativo y las emisiones de escape podrían superar a un motor dedicado.

Este sistema trabaja mezclando aire, gas natural y usando una inyección piloto de diesel para generar la combustión. La relación de trabajo Diesel/GNC varía en función del régimen de trabajo del motor, y en el común de los casos, la sustitución de diesel por gas natural podría ser de un 20% para bajas revoluciones, hasta llegar a un 80% en los regimenes nominales, dependiendo de los ciclos de servicio en tránsito (ciudad, autopista, o ciclo combinado).

1.4 GASES DE ESCAPE

Son los compuestos gaseosos formados en el proceso de combustión producto de la unión de los átomos de oxígeno con los átomos que conforman las moléculas de los hidrocarburos. La tabla 4. muestra los rangos típicos de materiales tóxicos,

presentes en los humos de escape del motor Diesel, valores menores pueden encontrarse en motores nuevos y limpios, y los valores altos en equipos antiguos [9].

Tabla 4. Emisiones del motor Diesel

CO	HC	DPM	NOX	SO2
vppm	vppm	g/m ³	vppm	Vppm
5-1500	20-400	0.1-0.25	50-2500	10-150

FUENTE: NETT TECHNOLOGIES INC. Purificadores para escapes de motor Diesel. Pag 2.

1.4.1 Dióxido de carbono CO₂

Es un gas inerte que aparentemente no afecta la salud, pero es uno de los principales responsables del efecto invernadero, ya que al no reaccionar con otros compuestos, permanece en la atmósfera y evita que el calor generado en la tierra salga al espacio. Este efecto invernadero es el que ha aumentado la temperatura del planeta en las últimas décadas.

El porcentaje en los gases de escape es un índice de la eficiencia de la combustión. Dependiendo de las características del motor el porcentaje de CO₂ emitido debe estar entre el 12% y el 17% del total de gases que salen por el tubo de escape.

Dada la mayor relación hidrógeno/carbono en la composición del gas natural en comparación con otros combustibles fósiles, su combustión produce considerablemente menos CO₂ por unidad de energía producida, la combustión de gas natural produce como mínimo un 25-30 % menos CO₂ que la del petróleo y al menos un 40-50% menos que la del carbón por unidad de energía producida, dependiendo del proceso que se utiliza y la calidad del combustible.

1.4.2 Vapor de agua H₂O

Resulta de la unión del hidrogeno contenido en las moléculas del hidrocarburo y el oxigeno presente en el aire. El vapor de agua es un gas oxidante y corrosivo que al unirse con los óxidos forman ácidos, los cuales son los principales responsables del daño en los tubos de escape, fuera que contribuyen a la formación de la lluvia ácida en el ambiente.

1.4.3 Monóxido de Carbono

Existe en el aire y es absolutamente necesario para que la combustión se realice en el cilindro. Es medido en porcentaje en volumen la presencia de este en los gases de escape es un buen indicador de la riqueza o pobreza de la mezcla.

Es un gas invisible, sin olor, sabor ni color; es altamente venenoso, ya que se combina con la sangre mas fácilmente que el oxigeno y puede producir la muerte. Es producto de un mal proceso de combustión, ya sea por variaciones de la mezcla estequiométrica, fallas mecánicas o combustión incompleta. Es el parámetro principal en el diagnostico por emisión de gases, y su valor en el porcentaje depende del año y el modelo del vehiculo.

El CO es medido en porcentaje de volumen, y es también considerado como un indicador de la riqueza o pobreza de la mezcla.

En la atmósfera el CO reacciona con el O₃ y lo disminuye, produciendo CO₂, lo cual afecta la capa de ozono.

1.4.4 Hidrocarburos no quemados HC

Hacen referencia al combustible no quemado en el proceso de combustión, y es el segundo parámetro de importancia en el análisis de gases de escape. Su presencia

en los gases que salen por el tubo de escape es un indicativo de combustión incompleta, ya sea por fallas mecánicas, eléctricas, o mezcla fuera de especificaciones.

Adicionalmente en todos los motores se deja de quemar cierta cantidad de HC, debido a las llamadas zonas de extinción, ya que la temperatura en la paredes es la mas baja de toda la cámara. La presencia de estos HC en el ambiente causa asfixia e irritaciones en la piel y en los ojos.

1.4.5 Óxidos de nitrógeno NO_x

El nitrógeno es un elemento que se encuentra en grandes cantidades en el aire y entra simultáneamente con el oxígeno a la cámara, participando de manera conjunta en la combustión. Su unión con el oxígeno en diferentes proporciones depende de la temperatura. A mayor temperatura mayor será la cantidad de NO_x que se formará. Su presencia en atmósferas húmedas, aumenta la formación de los ácidos, contribuyendo al incremento de la lluvia acida.

Los NO_x son sustancias sumamente nocivas para la salud, ya que en presencia de hidrocarburos no quemados y la luz solar, incrementa la formación de smog y ozono, los cuales afectan las mucosas nasales y el globo ocular, siendo los responsables del incremento de formación de cataratas.

La presencia en un alto porcentaje de NO_x puede ser un indicador de alta temperatura en el motor o mal funcionamiento del sistema de recirculación parcial de los gases de escape (EGR).

1.4.6 Óxidos de azufre SO_x

El azufre se encuentra como un elemento extraño e indeseable en el combustible, generalmente en forma de hidróxido y al igual que con el nitrógeno, cuando la temperatura es suficientemente alta, en la cámara se forma óxidos, utilizando el oxígeno necesario para la formación de SO₂, incrementando así la formación de CO.

El SO_x en presencia de atmósferas húmedas forma ácido sulfúrico y además es el principal responsable del daño del tubo de escape. Un alto contenido de SO_x puede significar combustible con alto contenido de azufre o alta temperatura del motor.

2 COMBUSTIÓN

A continuación se describe, el modelamiento físico y matemático que se empleo para el desarrollo del software SIMUDUAL 1.0. [4] [12] [14].

2.1 ESTEQUIOMETRIA

Estequiometría es el estudio de las proporciones según las cuales las sustancias se combinan entre sí, donde cambian para formar una o mas sustancias nuevas.

Las reacciones químicas se representan por medio de formulas químicas donde la combinación de las sustancias que inician la reacción llamadas reactivos y las sustancias que resultan de la misma llamadas productos están separados normalmente por una flecha con dirección hacia donde se dirige la reacción, los cálculos en esta formula química se efectúan bajo el criterio de que el numero de átomos de cada elemento involucrado permanece invariable durante la reacción. Para el proceso de combustión dentro del motor el combustible y el oxidante en este caso el aire son los reactivos y los productos corresponden a los gases de escape.

El objetivo principal es determinar las proporciones en las cuales los reactivos se combinan para formar los productos estas proporciones se indican con los coeficientes que preceden a cada símbolo químico. Para efecto de facilitar el procedimiento de cálculo es recomendable trabajar con estos coeficientes en moles y no en átomos ya que es menos práctico emplear cifras demasiado reducidas correspondientes a la masa de las moléculas.

Para determinar las respectivas proporciones de la combustión entre los combustibles Diesel y gas natural combinado con aire se tomara como base 1 mol de combustible.

Los términos más frecuentes de expresar la mezcla entre diesel y gas natural, es en porcentaje másico, pero para efectos de cálculo es práctico utilizar la composición molar.

$$nd = \frac{Yd[\%]}{100} * \frac{1000[g / Kg]}{Md[g / mol]} \quad (7)$$

$$ng = \frac{Yg[\%]}{100} * \frac{1000[g / Kg]}{Mg[g / mol]} \quad (8)$$

$$nf = nd + ng \quad (9)$$

$$xd = \frac{nd}{nf} \quad (10)$$

$$xg = \frac{ng}{nf} \quad (11)$$

Donde las masas molares de los combustibles se determinan por la tabla 3.

La mezcla de los dos combustibles se toma como un solo combustible de X números de carbonos C, Y números de hidrógenos H, J número de Oxígeno O y L número de Nitrógeno N; así ($C_xH_yO_jN_l$).

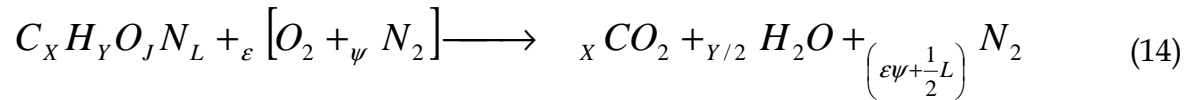
Para nuestro estudio se especifican los tipos de combustible representativos en el país, así se tiene la posibilidad de comparar de acuerdo a cada combustible.

Donde,

$$X = xd * \Omega Cd + xg * \Omega Cg \quad (12)$$

$$Y = xd * \Omega Hd + xg * \Omega Hg \quad (13)$$

La fórmula química de la reacción de esta mezcla con una cantidad de aire teórico será:



Si se realiza un balance entre los átomos encontrados antes y después de la reacción, y conociendo el valor de los coeficientes X,Y,J y L se obtiene la cantidad de aire teórico (ε), bajo la siguiente ecuación 15:

$$\varepsilon = X + \frac{1}{4} * Y - \frac{1}{2} J \quad (15)$$

La composición del aire atmosférico contiene Oxígeno, Nitrógeno, Argon, gas carbónico y otros componentes. Se considera que el aire atmosférico esta compuesto solamente de Oxígeno y Nitrógeno atmosférico, el cual es un nitrógeno ficticio; ya que esta compuesto por Nitrógeno y los otros compuestos del aire. Para efectos de minimizar el error que se genera al hacer esta consideración, en el cálculo se toma el valor de la masa molar de este nitrógeno como 28.17[g/mol] [4] y se asume la composición del aire como 20.95% O2 y 79.05% N2, obteniendo como resultado la cantidad de N2 por mol de O2 $\psi=3.77$.

2.1.1 Relación aire combustible

En la experiencia se a comprobado que para obtener una combustión mas completa es necesario suministrar mas aire del que se calcula en la ecuación estequiométrica, este parámetro se conoce como coeficiente de exceso de aire (α) y se expresa como un factor numérico, es decir si se introduce 20% de aire en exceso, equivalente a 120% de aire teórico, el factor será $\alpha=1.2$. Un factor $\alpha < 1$ implicaría una deficiencia en la cantidad de oxígeno en los productos.

La relación de aire-combustible (A) y su inverso (F) están expresados por:

$$A = \frac{1}{F} = \frac{\alpha * \varepsilon * 4.77 * M_{air}}{M_f} \quad (16)$$

2.2 EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN

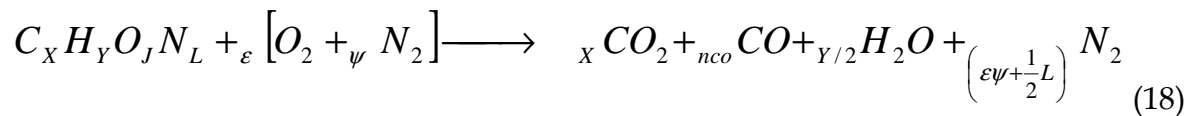
El objetivo del diseño de cámaras de combustión es conseguir que se realice una combustión completa, pero entran a jugar factores de costos, de construcción y operación que exigen a los diseñadores ser más flexibles en este objetivo.

Cuando la combustión es incompleta la energía liberada es menor que el poder calorífico del combustible, y esta variación se mide a través de la eficiencia de combustión, la cual se define como la relación entre el incremento de la entalpía real y el incremento de la entalpía ideal:

$$\eta_c = \frac{(h_{s(real)} - h_e)}{(h_{s(ideal)} - h_e)} \quad (17)$$

El cambio de entalpía máximo (ideal) de los gases se presenta cuando el combustible libera todo su poder calorífico (q_f), para este caso en donde se mezclan los dos combustibles $q_f = xd * q_d + xg * q_g$ [KJ/mol]. En la realidad se forman productos parcialmente oxidados como el CO, la fracción del poder calorífico que no se libera será el correspondiente a la combustión del CO, por tanto el cambio de entalpía real de los gases será $q_f - n_{co} * q_{co}$

Entonces la ecuación química teniendo en cuenta que la combustión no es completa será:



Si conocemos el valor de la eficiencia de la combustión, podemos calcular las moles CO producidas por efecto de una mala combustión.

En este análisis llamaremos a estas moles "bef" ya que el CO también se produce por efecto de altas temperaturas, que mas adelante veremos.

$$bef = n_{co} = \frac{(1-\eta_c) * n_f * q_f}{q_{co}} \quad (19)$$

Donde ,

$$q_{co} = 283 \quad [KJ / mol]$$

Es muy frecuente que el aire que entra en la cámara de combustión de los motores sea aire húmedo. Si conocemos el valor de la humedad relativa, el cual se puede medir a partir de un psicrómetro se obtiene un cálculo aproximado de la cantidad de H2O que se encuentra en el aire.

Por definición la humedad relativa es la relación entre la masa de vapor que se encuentra en un volumen determinado de mezcla y la masa de vapor que existiría en ese mismo volumen si la mezcla estuviera saturada a la misma temperatura.

$$\phi = \frac{m_v}{m_v^*} \quad (20)$$

Si consideramos que el vapor que se encuentra mezclado con el aire atmosférico se comporta como gas ideal podemos deducir:

$$P_v = \phi * P_{@Tatm}^* \quad (21)$$

Conociendo la temperatura que se encuentra el aire que va a ser aspirado por el motor se extrae el valor de $P_{@T_{atm}}^*$ de la tabla 5.

Tabla 5. Propiedades del agua saturada.

T [C]	P [bar]	T [C]	P [bar]	T [C]	P [bar]
0.01	0.006108	27	0.03564	100	1.0131
2	0.007054	28	0.03779	110	1.4326
4	0.008129	29	0.04004	120	1.9854
5	0.008719	30	0.04241	130	2.7011
6	0.009347	31	0.04491	140	3.614
7	0.010013	32	0.04753	150	4.76
8	0.010721	33	0.05029	160	6.18
9	0.011473	34	0.05318	170	7.92
10	0.012277	35	0.05622	180	10.92
11	0.013118	36	0.0594	190	12.553
12	0.014016	37	0.06274	200	15.551
13	0.014967	38	0.06624	210	19.08
14	0.015974	39	0.06991	220	23.201
15	0.017041	40	0.07375	230	27.979
16	0.01817	45	0.09584	240	33.48
17	0.019364	50	0.12335	250	39.776
18	0.02062	55	0.1574	260	46.94
19	0.02196	60	0.19917	270	55.05
20	0.02337	65	0.2501	280	64.19
21	0.02486	70	0.3117	290	74.45
22	0.02643	75	0.3855	300	85.92
23	0.02808	80	0.4736	320	112.9
24	0.02982	85	0.5781	340	146.08
25	0.03166	90	0.7011	360	186.74
26	0.0336	95	0.8451	374.7	2212.97

FUENTE: MARADEY, Juan Francisco. Termodinámica Aplicada. Edición I. Colombia 2002, tabla A8

Nuestro objetivo es saber cuanta cantidad de H₂O va a entrar en la cámara de combustión por cada mol de combustible.

La relación de moles de H₂O con respecto al las moles de aire seco esta dada por:

$$\frac{n_v}{n_a} = \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (22)$$

Si se expresa en masa obtenemos

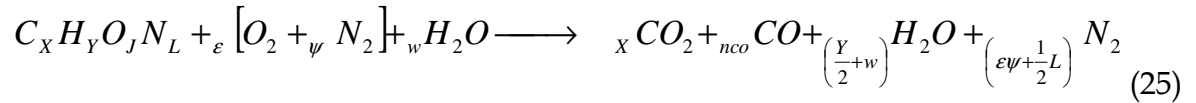
$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_a * n_v}{M_v * n_a} = 0.622 * \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (23)$$

Donde la cantidad de moles de aire seco por 1 mol de combustible es $4.77 * \alpha * \epsilon$.

Entonces la cantidad de moles de H₂O por cada mol de combustible que entra a la cámara de combustión será:

$$w = 4.77 * \alpha * \epsilon * \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (24)$$

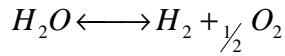
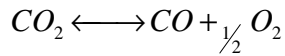
Entonces la reacción química teniendo en cuenta la humedad del aire se muestra en la ecuación 25.



2.3 PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

Dependiendo de la naturaleza de los reactivos, cantidades y parámetros, las reacciones se pueden invertir, el parámetro más representativo para que esto ocurra es la temperatura. En particular, en un motor de combustión interna, la mezcla de gases de combustión en equilibrio a temperaturas mayores de 1700 K se considera que presenta disociación y recombinación, entendiéndose por disociación, la ruptura de una molécula en sus constituyentes básicos, y por recombinación como su nombre lo indica es el proceso contrario. Estos efectos se presentan en el CO₂ y H₂O producidos por la combustión.

Las reacciones que darían lugar a lo anteriormente expuesto son:



Generalmente el análisis de los productos de combustión en los motores de combustión interna, se efectúa a la salida del tubo de escape, donde la temperatura de estos productos no es muy alta, lo que daría a pensar que no ocurre disociación, pero estos productos, se han disociado a temperaturas altas y se recombinado al bajar esta temperatura, experimentalmente se ha visto que a temperaturas menores de 1700 K la recombinación se estabiliza, por tanto este valor de temperatura será el parámetro de estudio en nuestros cálculos para el análisis de combustión.

Un parámetro importante para el cálculo de CO y H₂ productos de la disociación de CO₂ y H₂O respectivamente es la constante de equilibrio (K_p), que indica que tanto se han disociado estos gases.

Los valores de K_p se hallan a partir de la **tabla 6** donde:

El subíndice 1 representa la reacción $CO_2 \longleftrightarrow CO + \frac{1}{2} O_2$

El subíndice 2 representa la relación $H_2O \longleftrightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$

El subíndice 3 representa la relación $CO_2 + H_2 \longleftrightarrow CO + H_2O$

Por definición K_p es el producto de las presiones parciales de los compuestos,

elevado a su respectivo coeficiente. $K_p = \prod_i (P_i)^{\sigma_i}$ tomando el coeficiente negativo para los reactivos y positivo para los productos.

Tabla 6. Logaritmos en base 10 de la constante de equilibrio Kp para algunas reacciones.

T [K]	Log Kp1	Log Kp3
1200	-7.764	0.135
1300	-6.821	0.243
1400	-6.014	0.333
1500	-5.316	0.409
1600	-4.706	0.474
1700	-4.169	0.53
1800	-3.693	0.577
1900	-3.267	0.619
2000	-2.884	0.656
2100	-2.539	0.688
2200	-2.226	0.716
2300	-1.94	0.742
2400	-1.679	0.764
2500	-1.44	0.784
2600	-1.219	0.802
2700	-1.015	0.818
2800	-0.825	0.833
2900	-0.649	0.846
3000	-0.485	0.858
3100	-0.332	0.869
3200	-0.189	0.878
3300	-0.054	0.888
3400	0.071	0.895
3500	0.19	0.902
3600	0.302	0.909
3700	0.408	0.915
3800	0.508	0.921
3900	0.603	0.926

FUENTE: US NATIONAL BUREAU OF STANDARDS, JANAF Thermochemical tables, Second Edition.

La constante de equilibrio puede también expresarse en términos de moles, como se muestra en la ecuación 26.

$$Kp = \prod_i (P_i)^{\sigma_i} = P^{\sum \sigma_i} \prod_i (x_i)^{\sigma_i} = \left(\frac{P}{n}\right)^{\sum \sigma_i} \prod_i (n_i)^{\sigma_i} \quad (26)$$

Donde, $\sum \sigma_i$ para la disociación del CO₂ y para H₂O $\sum \sigma_i = 1/2$

Al tomar $Kn = \prod_i (n_i)^{\sigma_i}$, entonces, $Kp = \left(\frac{P}{n}\right)^{\sum \sigma_i} Kn$

Donde, P es la presión de los gases de combustión y n es el número de moles de dicha mezcla de gases. Por tanto se puede deducir que:

$$Kp_3 = \frac{Kp_1}{Kp_2} = \frac{Kn_1}{Kn_2} \quad (27)$$

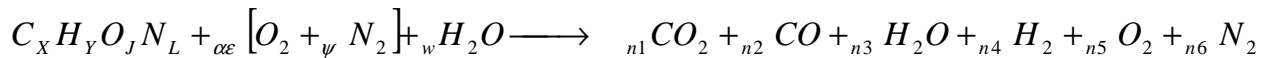
Para la disociación del CO₂ Kn estaría dada por:

$$Kn_1 = n_{CO_2}^{-1} * n_{CO}^1 * n_{O_2}^{1/2} \quad (28)$$

Para la disociación del H₂O Kn estaría dada por:

$$Kn_2 = n_{H_2O}^{-1} * n_{H_2}^1 * n_{O_2}^{1/2} \quad (29)$$

La ecuación estequiométrica teniendo en cuenta la disociación del CO₂ y H₂O es:



Realizando un balance de masa para cada elemento involucrado, se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\text{Balance de C:} \quad n_1 + n_2 = X \quad (30)$$

$$\text{Balance de H:} \quad n_3 + n_4 - w = \frac{1}{2} Y \quad (31)$$

$$\text{Balance de O: } 2n_1 + n_2 + n_3 + 2n_5 - J - w = 2 * \alpha * \varepsilon \quad (32)$$

$$\text{Balance de N: } n_6 = \alpha * \varepsilon * \psi + \frac{1}{2} L \quad (33)$$

Tomando la disociación de CO₂ y H₂O y organizando los factores de la ecuación 28 y 29, finalmente se obtiene:

$$\text{Disociación CO}_2: \quad Kn_1 = \frac{n_2 * n_5^{1/2}}{n_1} \quad (34)$$

$$\text{Disociación H}_2\text{O: } \quad Kn_2 = \frac{n_4 * n_5^{1/2}}{n_3} \quad (35)$$

Las reacciones se caracterizan por el grado de avance (ζ), es decir, cuando el grado de avance es cero la reacción se ha desplazado completamente hacia la izquierda y tenemos la máxima cantidad de reactivos y la mínima de productos, cuando el grado de avance es 1, la reacción esta completamente a la derecha y se tiene la mínima cantidad de reactivos y máxima de productos. Cuando la reacción es de disociación, ζ se llama grado de disociación.

Si tomamos ζ_1 como el grado de disociación del CO₂, entonces,

$$n_1 = X * (1 - \zeta_1) \quad \text{y} \quad n_2 = X * \zeta_1 \quad (36)$$

Si tomamos ζ_2 como el grado de disociación del H₂O se obtiene:

$$n_3 = (\frac{1}{2}Y + w) * (1 - \zeta_2) \quad \text{y} \quad n_4 = (\frac{1}{2}Y + w) * \zeta_2 \quad (37)$$

Entonces, tomando las definiciones de n₁, n₂, n₃ y n₄ dadas en la ecuación 36 y 37. y remplazándolas en las ecuaciones 34 y 35 se obtiene:

$$Kn_1 = \frac{\zeta_1 * n_5^{1/2}}{1 - \zeta_1} \quad (38)$$

$$Kn_2 = \frac{\zeta_2 * n_5^{1/2}}{1 - \zeta_2} \quad (39)$$

Despejando n_5 del balance de O (Ecuación 32) y reemplazando, se obtiene:

$$n_5 - \frac{1}{2} X \zeta_1 - \zeta_2 \left(\frac{1}{4} Y + \frac{1}{2} w \right) = \varepsilon(\alpha - 1) \quad (40)$$

Combinando las ecuaciones anteriores (38) y (39) de acuerdo a la definición de Kp3, se obtiene la ecuación (41),

$$Kp_3 = \frac{Kn_1}{Kn_2} = \frac{\zeta_1 * (1 - \zeta_2)}{(1 - \zeta_1) * \zeta_2} \quad (41)$$

Tomando la definición de Kp1, despejando Kn1 y reemplazándola en la ecuación 38, se obtiene la ecuación 42, reemplazando n_5 de la ecuación 40;

$$\left(\frac{n}{P} \right) \left[\frac{Kp_1 * (1 - \zeta_1)}{\zeta_1} \right]^2 - \frac{1}{2} X \zeta_1 - \left(\frac{1}{4} Y + \frac{1}{2} w \right) \zeta_2 = \varepsilon(\alpha - 1) \quad (42)$$

Se realiza el siguiente cambio de variables

$$\theta = \frac{(1 - \zeta_1)}{\zeta_1} \quad \therefore \quad \zeta_1 = \frac{1}{(1 + \theta)} \quad (43)$$

Se reemplaza la ecuación 43 en la ecuación 41 y se obtiene:

$$Kp_3 = \frac{(1 - \zeta_2)}{\theta * \zeta_2} \quad \therefore \quad \zeta_2 = \frac{1}{(1 + Kp_3 * \theta)} \quad (44)$$

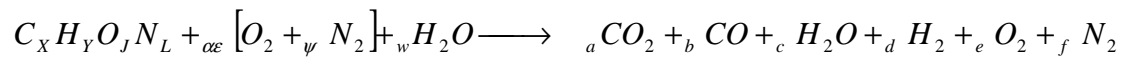
Como resultado final de las sustituciones de la ecuación (44) en (42), se obtiene:

$$\left(\frac{n}{P}\right)[Kp_1 * \theta]^2 - \frac{1}{2} X \frac{1}{(1+\theta)} - \left(\frac{1}{4} Y + \frac{1}{2} w\right) \frac{1}{(1+Kp_3 * \theta)} = \varepsilon(\alpha - 1) \quad (45)$$

$$\text{Si } n = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 \quad (46)$$

Es necesario realizar una iteración desde la ecuación (36) hasta la (46) para determinar el valor θ y definir el grado de avance de la disociación.

La ecuación estequiométrica teniendo en cuenta: una mala combustión, entrada de aire húmedo y disociación de los productos se puede expresar como:



Donde:

$$a = n1 - bef \quad (47)$$

$$b = n2 + bef \quad (48)$$

$$c = n3 \quad (49)$$

$$d = n4 \quad (50)$$

$$e = n5 + \frac{bef}{2} \quad (51)$$

$$f = n6 \quad (52)$$

2.4 ANÁLISIS ORSAT

Experimentalmente el análisis de los productos en los motores de combustión interna se puede realizar por medio del analizador Orsat, el cual proporciona la composición volumétrica de CO₂, CO y H₂, una característica de este análisis es que los resultados producidos son en base seca, lo cual para efectos de cálculo se despreciará la cantidad de H₂O en los productos de la ecuación estequiométrica.

$$\%CO_2 = \frac{a}{a+b+d+e+f} \quad (53)$$

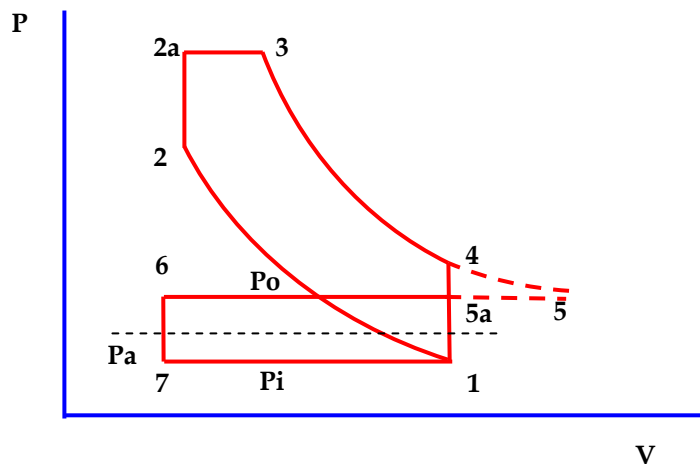
$$\%CO = \frac{b}{a+b+d+e+f} \quad (54)$$

$$\%O_2 = \frac{e}{a+b+d+e+f} \quad (55)$$

2.5 CICLO AIRE COMBUSTIBLE

La figura 9, muestra el ciclo aire combustible, descrito en el capítulo anterior. A continuación se muestra los modelos físicos y matemáticos aplicados al cálculo del ciclo real aire combustible.

Figura 9: Ciclo real Aire - Combustible



FUENTE: El Autor

2.5.1 Cálculo de Volúmenes

Es común escuchar que un motor de combustión interna se especifique por su cilindrada (V_s), la cual es el volumen total desplazado durante el movimiento del

pistón entre el PMI y el PMS, este parámetro se calcula a partir de el diámetro de los cilindros (D), la distancia que recorre el pistón entre el PMS y el PMI la cual se conoce como carrera (S), y el numero de cilindros (C).

$$V_s = \left(\frac{\pi}{4} * D^2 * S\right) * C \quad (56)$$

Otro parámetro importante de los motores, es la relación de compresión (r) la cual es la relación entre el volumen atrapado cuando el pistón esta en el PMI y el volumen cuando el pistón se encuentra en el PMS

$$r = \frac{V_1}{V_2} \quad (57)$$

A partir de la cilindrada y la relación de compresión, se puede calcular el valor de los volúmenes que usaremos para el análisis de las propiedades del ciclo termodinámico

$$V_2 = \frac{V_s}{r - 1} \quad (58)$$

$$V_1 = V_s + V_2 \quad (59)$$

2.5.2 Proceso de compresión [1-2]

El proceso de compresión se efectúa por el movimiento del pistón desde el PMI hasta el PMS, bajo la asunción que es un proceso politrópico $P * V^{k_b} = Cte$, y se realiza después del cierre de la válvula de admisión.

La masa total contenida antes de que ocurra la combustión se denomina “carga” (m_{ac}), y viene dado por la siguiente ecuación (60).

$$m_{ac} = m_a + m_f + m_r \quad (60)$$

2.5.3 Proceso de combustión [2-3]

El proceso de combustión más cercano a la realidad es aquel que en el cual una parte de la transferencia de calor se adiciona a volumen constante y la otra parte a presión constante. Donde la porción de calor trasferido a volumen constante (K_v) se define:

$$K_v = \frac{\text{Calor aderido a volumen constate}}{\text{Calor total aderido}}$$

Para efecto de la simulación, este valor se deja como dato paramétrico de entrada. En este proceso se considera que existen pérdidas de masa por fugas, si (ξ) es la fracción de masa que se pierde por fugas, entonces tendrá que la masa después de la combustión será:

$$m_b = (1 - \xi) * m_{ac} \quad (61)$$

2.5.4 Proceso de expansión [3-4]

El proceso de expansión se efectúa por el movimiento del pistón hacia el PMI, bajo la suposición de que es un proceso politrópico $P * V^n = Cste$.

Si se considera que se disipa una fracción de energía (λ) hacia las paredes del cilindro, entonces, el coeficiente politrópico estaría dado por la expresión:

$$n = \frac{K_b - \lambda}{1 - \lambda} \quad (62)$$

La expansión que sufren los gases después de la apertura de la válvula de escape [4-5], se considera equivalente a si el pistón se desplazara más del PMI, hasta que los gases alcancen una presión igual a la presión del múltiple de escape (P_0).

2.5.5 Proceso de expulsión [5a-6]

La expulsión de los gases producto de la combustión se realiza a presión constante P_0 y es debida al movimiento del pistón desde el PMI al PMS, la masa que queda

en el cilindro cuando el pistón llega al PMS se denomina masa residual (m_r). y se caracteriza por la fracción residual (f_r), la cual se define como la relación de la masa residual y la carga (63).

$$f_r = \frac{m_r}{m_{ac}} \quad (63)$$

Si se expresa en términos de moles la fracción residual molar (x_r) es:

$$x_r = \frac{n_r}{n_{ac}} = \frac{n_r}{n_r + n_{ii}} \left[1 + \frac{M_b}{M_{ii}} \left(\frac{1 - f_r}{f_r} \right) \right]^{-1} \quad (64)$$

Donde M_{ii} es la masa molecular de la mezcla total introducida (diesel, gas y aire húmedo)

$$M_{ii} = \frac{x_g * M_g + x_d * M_d + \alpha * \varepsilon * \psi * M_{air} + w * M_{H2O}}{1 + \alpha * \varepsilon * \psi + w} \quad (65)$$

Es importante notar que la densidad de los gases en este punto es igual a la del punto 5.

Después del cierre de la válvula de escape y durante la apertura de la válvula de admisión [6-7], los gases residuales presentan una compresión o expansión (si es o no turbocargado) hasta llegar a la presión del múltiple de admisión.

2.5.6 Proceso de admisión [7-1]

El combustible que entra al cilindro en el proceso de admisión es el gas natural, este viene previamente mezclado con el aire atmosférico, y posteriormente con los gases residuales producto de la combustión del ciclo anterior, la mezcla de gases en la cámara de combustión se denota mediante el subíndice "u".

$$m_u = m_a + m_{vap} + m_g + m_r \quad (66)$$

2.5.7 Análisis general del ciclo termodinámico

La Carga para el motor Diesel trabajando con mezclas DIESEL-GAS NATURAL teniendo en cuenta la cantidad de gases residuales que quedan del ciclo anterior, sería:

$$(1 - x_r) \{ C_X H_Y + \alpha \varepsilon [O_2 + \psi N_2] + w H_2O \} + (x_r) \{ a CO_2 + b CO + c H_2O + d H_2 + e O_2 + f N_2 \}$$

Se puede expresar para efectos del primer cálculo la carga sin contenido de masa residual como:

$$f_r = \frac{1}{m_f + m_{air} + m_{vap}} \quad (67)$$

Donde:

$$m_f = \frac{1}{X * M_C + Y * M_H} \quad (68)$$

$$m_{air} = \frac{\alpha * \varepsilon * (1 + \psi)}{M_{air}} \quad (69)$$

$$m_{vap} = \frac{w}{M_{H_2O}} \quad (70)$$

Se supone también que la temperatura en el punto 5 es aproximadamente 1000K, esta es una buena suposición para el primer calculo, y sabiendo que

$$\frac{V_5}{m_5} = \frac{V_6}{m_r} = \frac{V_2}{m_r}, \quad \Lambda, \quad P_1 = P_i, \quad \Lambda, \quad P_5 = P_0$$

Se obtiene:

$$T_1 = r * f_r * T_5 * \frac{P_i}{P_0} \quad (71)$$

Analizando el proceso politrópico presentado en la compresión del punto 1 a 2

$$T_2 = T_1 * r^{K_u-1} \quad (72)$$

$$P_2 = P_1 * r^{K_u} \quad (73)$$

En el punto 2 comienza el traspaso de energía por efecto de la combustión, si tomamos los subíndices “u” para antes, y “b” para después de la combustión. Considerando que en la combustión a volumen constante no se obtiene toda la cantidad de productos, es necesario relacionar esta cantidad con el porcentaje de combustión a volumen constante.

$$n_{b1} = n_u + (K_v - 1) * (n_b - n_u) \quad (74)$$

$$K_{b1} = K_u + (K_v - 1) * (K_b - K_u) \quad (75)$$

Para el primer cálculo es una buena aproximación considerar los coeficientes politrópicos como:

$$K_b = 1.4 - 0.16/\alpha \quad (76)$$

$$K_u \cong 1.3$$

La presencia de CO y H₂ en los productos de la combustión significa que todavía hay energía por liberar, de tal manera que la energía aprovechada por combustión es menor que la aprovechada si la combustión es completa, por tanto:

$$\bar{q}_v = xg * \bar{q}_{CH_4(g)}^o - b * \bar{q}_{CO}^o - d * \bar{q}_{H_2}^o \quad (77)$$

Si se realiza un balance de energía aplicando la primera ley de la termodinámica para la combustión entre los puntos 2 y 2a se tiene:

$$\bar{q}_v = \Delta n C_v T \Big|_2^{2a} \quad (78)$$

Conociendo que

$$C_v = \frac{\mathfrak{R}}{K - 1} \quad (79)$$

Donde $\mathfrak{R} = 8.314$ es la constante universal de los gases.

Se obtiene:

$$T_{2a} = \frac{K_{b1} - 1}{n_{b1}} * \left\{ \frac{n_u * T_2}{K_u - 1} + \frac{K_v * (1 - x_r) * \bar{q}_v}{\mathfrak{R}} \right\} \quad (80)$$

$$P_{2a} = P_2 * \frac{n_{b1}}{n_u} * \frac{T_{2a}}{T_2} \quad (81)$$

En el punto 2a comienza la inyección del combustible diesel (líquido) a la mezcla comprimida de aire + GN+ gases residuales, para poder ser inyectado debe estar por encima de la presión P_2 , el trabajo de elevación de presión (w_{iny}), aumenta la entalpía de formación al combustible Diesel, y es necesario sumarlo al poder calorífico del combustible y se representa por la ecuación (82).

$$w_{iny} = v^o * (P_f - P^o) \quad (82)$$

Donde:

P_f es la presión a la cual están calibrados los inyectores de Diesel

P^o indica la presión a las condiciones ambiente

v^o indica el volumen molar a las condiciones ambiente

De tal manera que la energía aprovechada por la combustión es:

$$\bar{q} = xg * \bar{q}_{CH_4(g)}^o + xd * \bar{q}_{Diesel(l)}^o + w_{iny} - b * \bar{q}_{CO}^o - d * \bar{q}_{H_2}^o \quad (83)$$

Ahora, si realizamos un balance de energía global entre los puntos 2 y 3 aplicando la primera ley de la termodinámica se obtiene:

$$\bar{q} = \Delta n C_v T \Big|_2^{2a} + \Delta n C_p T \Big|_{2a}^3 \quad (84)$$

Conociendo: $C_v = \frac{\mathfrak{R}}{K-1}$ $C_p = \frac{K * \mathfrak{R}}{K-1}$

Si $P_3 = P_{2a}$ y considerando las fugas de masa se obtiene:

$$T_3 = \frac{K_b - 1}{K_b * n_b} (1 - \xi)^{K_b - 1} * \left\{ \left(\frac{K_u}{K_u - 1} + \frac{P_3}{P_2} - 1 \right) * n_u * T_2 + \frac{(1 - x_r) * \bar{q}}{\mathfrak{R}} \right\} \quad (85)$$

La relación de volumen entre el inicio y el final de la adición de combustible Diesel se denomina como relación de inyección (β) y esta dada por:

$$\beta = \frac{V_3}{V_2} = (1 - \xi) * \frac{n_b}{n_u} * \frac{T_3}{T_2} * \frac{P_2}{P_3} \quad (86)$$

Para el proceso de expansión desde el punto 3 a 4 tenemos:

$$T_4 = T_3 * \left(\frac{\beta}{r} \right)^{n-1} \quad (87)$$

$$P_4 = P_3 * \left(\frac{\beta}{r} \right)^n \quad (88)$$

En la expansión politrópica entre el punto 4 y 5 no se considera la transferencia de energía hacia las paredes del cilindro y la T5 es:

$$T_5 = T_4 * \left(\frac{P_o}{P_4} \right)^{\frac{K_b - 1}{K_b}} \quad (89)$$

Ahora, la fracción residual teniendo en cuenta la presencia de gases residuales, se obtiene mediante la ecuación (90).

$$f_r = \frac{m_r * (1 - \xi)}{m_b} = (1 - \xi) * \frac{P_6 * V_6 / R_6 * T_6}{P_5 * V_5 / R_5 * T_5} \quad (90)$$

Donde, $R_6 = R_5$, $P_6 = P_5$, $T_6 = T_5$

Por tanto,

$$f_r = (1 - \xi) * \frac{V_6}{V_5} \quad (91)$$

$$\frac{1}{V_5} = \frac{1}{V_4} * \left(\frac{P_5}{P_4} \right)^{\frac{1}{Kb}} \quad (92)$$

Entonces

$$f_r = \frac{1 - \xi}{r} \left(\frac{P_o}{P_4} \right)^{\frac{1}{Kb}} \quad (93)$$

Si se realiza un balance de energía aplicando la primera ley de la termodinámica para cuando la válvula de admisión se abre, se obtiene:

$$T_1 = \left(\frac{K_i * (1 - x_r)}{K_i - 1} \right) * T_i + \left(\frac{K_b * x_r}{K_b - 1} \right) * T_5 * \left(\frac{K_u}{K_u - 1} + \frac{P_o - P_i}{r * P_i} \right)^{-1} \quad (94)$$

Para el proceso de compresión se debe conocer la entalpía de la mezcla de gases al inicio y al final de este proceso. Se determina a través de la ecuación (95) y (96).

$$\bar{h}_1 = \frac{a' * \Delta \bar{h}_{CO_2}^{T_1} + b' * \Delta \bar{h}_{CO}^{T_1} + c' * \Delta \bar{h}_{H_2O}^{T_1} + d' * \Delta \bar{h}_{H_2}^{T_1} + e' * \Delta \bar{h}_{O_2}^{T_1} + f' * \Delta \bar{h}_{N_2}^{T_1} + g' * \Delta \bar{h}_f^{T_1}}{a' + b' + c' + d' + e' + f' + g'} \quad (95)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{a' * \Delta \bar{h}_{CO_2}^{T_2} + b' * \Delta \bar{h}_{CO}^{T_2} + c' * \Delta \bar{h}_{H_2O}^{T_2} + d' * \Delta \bar{h}_{H_2}^{T_2} + e' * \Delta \bar{h}_{O_2}^{T_2} + f' * \Delta \bar{h}_{N_2}^{T_2} + g' * \Delta \bar{h}_f^{T_2}}{a' + b' + c' + d' + e' + f' + g'} \quad (96)$$

Donde:

$$a' = x_r * a \quad (97)$$

$$b' = x_r * b \quad (98)$$

$$c' = x_r * c \quad (99)$$

$$d' = x_r * d \quad (100)$$

$$e' = x_r * e \quad (101)$$

$$f' = x_r * f \quad (102)$$

$$g' = (1 - x_r) * x_g \quad (103)$$

El símbolo $\Delta \bar{h}_i^j$ representa el cambio de entalpía del componente "i" a la temperatura "j".

Conociendo las entalpías al inicio y al final de cualquier proceso politrópico, se puede conocer su exponente correspondiente, mediante la ecuación (104) y (105).

$$C_{pu} = \frac{h_2 - h_1}{T_2 - T_1} \quad (104)$$

$$K_u = \frac{C_{pu}}{C_{pu} - \Re} \quad (105)$$

Igualmente se obtienen estos parámetros para el proceso de expansión, en el estado 3 y 4.

$$\bar{h}_3 = \frac{a * \Delta \bar{h}_{CO_2}^{T_3} + b * \Delta \bar{h}_{CO}^{T_3} + c * \Delta \bar{h}_{H_2O}^{T_3} + d * \Delta \bar{h}_{H_2}^{T_3} + e * \Delta \bar{h}_{O_2}^{T_3} + f * \Delta \bar{h}_{N_2}^{T_3}}{a + b + c + d + e + f} \quad (106)$$

$$\bar{h}_4 = \frac{a * \Delta \bar{h}_{CO_2}^{T_4} + b * \Delta \bar{h}_{CO}^{T_4} + c * \Delta \bar{h}_{H_2O}^{T_4} + d * \Delta \bar{h}_{H_2}^{T_4} + e * \Delta \bar{h}_{O_2}^{T_4} + f * \Delta \bar{h}_{N_2}^{T_4}}{a + b + c + d + e + f} \quad (107)$$

$$C_{pb} = \frac{h_3 - h_4}{T_3 - T_4} \quad (108)$$

$$K_b = \frac{C_{pb}}{C_{pb} - \Re} \quad (109)$$

Los parámetros K_u y K_b son usados para recalcularse desde el proceso de compresión.

Antes de entrar a analizar los trabajos se debe conocer los valores de las constantes de los gases ideales para antes y después de la combustión.

$$R_u = \frac{\Re}{M_u} \quad (110)$$

$$R_b = \frac{\Re}{M_b} \quad (111)$$

Donde,

$$M_u = (1 - x_r) * M_i + x_r * M_b \quad (112)$$

$$M_i = \frac{(4.77 * \alpha * \varepsilon) * M_{air} + w * M_{H_2O} + xg * M_g}{4.77 * \alpha * \varepsilon + w + xg} \quad (113)$$

$$M_b = \frac{a * M_{CO_2} + b * M_{CO} + c * M_{H_2O} + d * M_{H_2} + e * M_{O_2} + f * M_{N_2}}{a + b + c + d + e + f} \quad (114)$$

El trabajo consumido en el proceso de compresión, se puede definir mediante la ecuación (115).

$${}_1w_2 = \frac{R_u}{K_u - 1} * (T_2 - T_1) \quad (115)$$

El trabajo realizado en el proceso de combustión a presión constante se puede calcular a través de la ecuación (116).

$${}_2w_3 = R_b * T_3 \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \quad (116)$$

El trabajo realizado en el proceso de expansión es:

$${}_3w_4 = \frac{R_b}{n - 1} * (T_3 - T_4) \quad (117)$$

El volumen cuando termina el proceso de combustión a presión constante en el punto 3 se puede calcular de la siguiente forma.

$$V_3 = (1 - \xi) * V_2 * \frac{R_b * T_3}{R_u * T_{2a}} \quad (118)$$

La eficiencia indicada se expresa como:

$$\eta_i = \frac{ihp}{Q} = \frac{\dot{m}_{ac} * w}{\dot{m}_f * q} \quad (119)$$

$$\text{Si } \dot{m}_{ac} = \dot{m}_a + \dot{m}_v + \dot{m}_f + \dot{m}_r \quad (120)$$

Por tanto se tiene:

$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{ac}} = \frac{F * (1 - f)}{1 + \omega + F} \quad (121)$$

Entonces:

$$\eta_i = \frac{(1 - \zeta) * (1 + \omega + F) * ({}_2w_3 + {}_3w_4) - (1 + \omega) * {}_1w_2}{(1 - f) * F * q} \quad (122)$$

Es necesario tener en cuenta que el poder calorífico es másico y se relaciona con el poder calorífico molar así:

$$q = \frac{\bar{q}}{M_f} \quad (123)$$

Donde,

$$M_f = x_g * M_g + x_d * M_d \quad (124)$$

El consumo específico de combustible es igual consumo de combustible por ciclo multiplicado por las RPM, en este caso estamos trabajando con motores de cuatro tiempos, entonces, en realidad el consumo es en dos revoluciones es:

$$m_f = \frac{m_{ac} * (1 - f) * F * 1/2 * RPM_{nom}}{(1 + F + \omega) * 60} \quad [\text{Kg/s}] \quad (125)$$

Donde,

$$m_u = \frac{V_1 * P_1}{R_u * T_1} \quad (126)$$

$$m_{ac} = m_u + x_d * M_d \quad (127)$$

Para definir la capacidad de un motor se suele hablar con frecuencia de su potencia máxima y de su torque, o par torsor máximo.

Por definición, potencia es el trabajo realizado en la unidad de tiempo. Dicho de otra manera la potencia mide la rapidez con que se efectúa un trabajo. La potencia que se mide a la salida del eje del cigüeñal del motor se define como potencia al

freno (bhp) y tiene involucrada las pérdidas ocasionadas por las partes mecánicas (η_m), por lo tanto la potencia al freno se obtiene mediante:

$$bhp = \eta_m ihp \quad (128)$$

O mediante,

$$bhp = \eta_i * \eta_m * m_f * q * \frac{1.341}{1} \quad [Hp] \quad (129)$$

El par torsor o par motor representa la capacidad que tiene un motor para producir trabajo y viene dado por:

$$Torq = 9950 * \frac{Pot \quad [Hp]}{RPM} \quad [N - m] \quad (130)$$

3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

A continuación se describe las generalidades del lenguaje de programación JAVA, en el cual fue diseñado el software SIMUDUAL 1.0. En este capítulo se relaciona todo el proceso de diseño desarrollado, incluyendo el paso a paso de un ejemplo de simulación.

3.1 GENERALIDADES DE PROGRAMACIÓN EN JAVA

Java es un lenguaje de programación 100% orientado a objetos creado por la compañía SUN Microsystems en 1991 y estaba orientado para el uso de electrodomésticos, lo cual lo hacía de poca memoria, con escasa potencia de cálculo y dependía de la CPU y a partir de 1995 se hace lenguaje de programación.

El 15 de enero de 1991 Bill Joy, Andy Bechtolsheim, Wayne Rosing, Mike Sheridan, James Gosling y Patrick Naughton se reúnen en Aspen, Colorado. El grupo quiere anticipar hacia donde se dirigirá la computación, Discuten sobre que les gusta y que no les gusta de varias tecnologías y al final llegan a la conclusión de que al menos una de las tendencias futuras será el acercamiento de sistemas digitales y electrónica de consumo, se marcan como objetivo desarrollar un entorno único que pudiera ser utilizado por todos los dispositivos de electrónica de consumo.

En un principio se considera C++ como lenguaje a utilizar, pero tanto Gosling como Bill Joy lo encontraron inadecuado, Gosling intentó primero extender y modificar C++ resultando el lenguaje C++ ++ - (++ - porque se añadían y eliminaban características a C ++), pero lo abandono para crear un nuevo lenguaje

desde cero al que llamo Oak (Roble), según la versión mas aceptada, por el roble que veía a tras de la ventana de su despacho.

El resultado fue un lenguaje que tenia similitudes con C,C++ y objetivo C y que no estaba ligado a un tipo de CPU concreta. Mas tarde se le cambiaria el nombre de Oak a Java, por cuestiones de propiedad intelectual, al existir ya un lenguaje con el nombre Oak, se supone que le pusieron ese nombre mientras tomaban café (Java es también el nombre de un tipo de café, originario del este de Asia, de la isla del mismo nombre), aunque hay algunos que afirman que el nombre deriva de las siglas de James Gosling, Arthur Van Hoff, y Andy Echolsheim.

Se describe java como un lenguaje " simple, orientado a objetos, distribuido, interpretado, robusto, seguro, de arquitectura neutra, portable, de altas prestaciones, multitarea y dinámico" [13].

3.1.1 Características

- Simple
- Orientado a objetos
- Distribuido
- Robusto
- Seguro
- Portable
- Multiplataforma
- Rendimiento medio
- Multithread

3.1.2 Programación Orientada a Objetos (POO)

Es una metodología de programación avanzada bastante extendida, donde los sistemas se modelan creando clases, que son un conjunto de datos y funcionalidades. Las clases son definiciones, a partir de las cuales se crean objetos, los objetos son ejemplares de una clase determinada y como tal, disponen de los datos y funcionalidades definidos en la clase, la POO permite concebir los programas de una manera bastante intuitiva y cercana a la realidad.

Para que un lenguaje sea considerado orientado objetos, debe cumplir las siguientes características:

- **Abstracción:** cada objeto en el sistema sirve como modelo de un agente abstracto que debe realizar trabajo, informar y cambiar su estado, y comunicarse con otros objetos en el sistema sin revelar como se implementan estas características.
- **Encapsulamiento:** también llamado "ocultación de la información". Cada objeto esta aislado del exterior, es un modulo natural, y cada tipo de objeto exponen una interfaz a otro objetos que especifica como pueden interactuar con los objetos de la clase.
- **Polimorfismo:** comportamientos diferentes, asociados a objetos distintos, pueden compartir el mismo nombre, al llamarlos por ese nombre se utilizará el comportamiento correspondiente al objeto que se este usando.
- **Herencia:** las clases no están aisladas, sino que se relacionan entre si, formando una jerarquía de clasificación. Los objetos heredan las propiedades y el comportamiento de todas las clases a las que pertenecen.

3.1.3 Datos y Variables

Una variable define un espacio en memoria que podemos usar para almacenar información en nuestros programas Java. Es necesario conocer como declarar variables y saber con que tipos de datos se puede contar.

Los nombres que escogemos para las variables se conocen como identificadores. Un identificador puede ser de cualquier longitud, pero siempre debe comenzar con una letra, guión bajo (_) o signo peso (\$). Para el resto de las variables podemos usar cualquier carácter a excepción de aquellos que se usan como operadores en java (+, -, *, /, %), hay que tener presente que Java es sensitivo a mayúsculas y minúsculas, así que variables 1 y variable 1 no son iguales.

Para declarar una variable se usa esta forma: tipo nombre.

3.1.4 Crear objetos

Java se encuentra estructurada sobre paquetes que almacenan las diferentes clases sobre las cuales se basa el lenguaje y las creadas por cada desarrollador. Los paquetes no son mas que estructuras de directorios que permiten almacenar de una mejor forma cada una de las clases.

Por defecto cualquier programa Java importa el paquete java.lang, donde podemos encontrar la clase String. Un objeto es un ejemplar de una clase y se declara de la misma forma como lo hacemos con una variable común y corriente, la única diferencia es que hay que tener en cuenta separar memoria para el objeto en mención.

3.1.5 Utilizar clases

Una clase es un prototipo que se puede utilizar para crear muchos objetos. La implementación de una clase comprende dos componentes : la declaración y el cuerpo de la clase.

3.1.5.1 Declaración de la clase

Para declarar una clase se usa la palabra clave class y el nombre de la clase que esta definiendo. Así la declaración más sencilla de una clase es como este ejemplo:

Class nombre de Clase. Los nombres de las clases deben ser un identificador legal de Java y, por convención, deben empezar por una letra mayúscula.

En Java, todas las clases tienen una superclase. Si no se especifica una superclase para una clase, se asume que es la clase Object (declara en java. Lang).

3.2 LENGUAJE UNIFICADO DE MODELADO UML

Es este capítulo se describe las aplicaciones del Software SIMUDUAL 1.0, en el diagrama de casos de uso, ver figura 10, se representa las acciones que un usuario puede realizar en el sistema con el Programa SIMUDUAL 1.0, el primer contacto del usuario con el software es el formulario principal donde se indica cuales son los parámetros que se deben usar para correr la simulación, este formulario se complementó con recursos como imágenes para dar un aspecto mas amigable al usuario.

Después de haber identificado y digitado los parámetros iniciales de simulación el software le da la opción de correr la simulación obteniendo sus diferentes resultados en forma gráfica y numérica. Para ver mas en detalle la parte gráfica el usuario puede interactuar con el sistema con la ampliación de las mismas.

Como se observa en el diagrama el usuario puede crear una simulación o un grupo de simulaciones denominado “*proyecto*”, la opción de crear varias simulaciones dentro de un mismo proyecto surge a partir de la necesidad de anteceder a un banco de pruebas para motores de combustión interna , donde existe una gran cantidad de parámetros constantes y se realizan variaciones mínimas para predecir su comportamiento, a pesar que esta opción es abierta para que el usuario guarde las simulaciones que considere necesarias, su principal función es generar un proyecto diferente para cada tipo de motor con sus respectivas simulaciones.

Teniendo guardados los datos de las diferentes simulaciones, el usuario tiene la opción de visualizar gráficamente las variaciones de máximo tres simulaciones realizadas.

En caso que se necesite un registro físico, el software le da la opción al usuario de imprimir los valores de cada simulación.

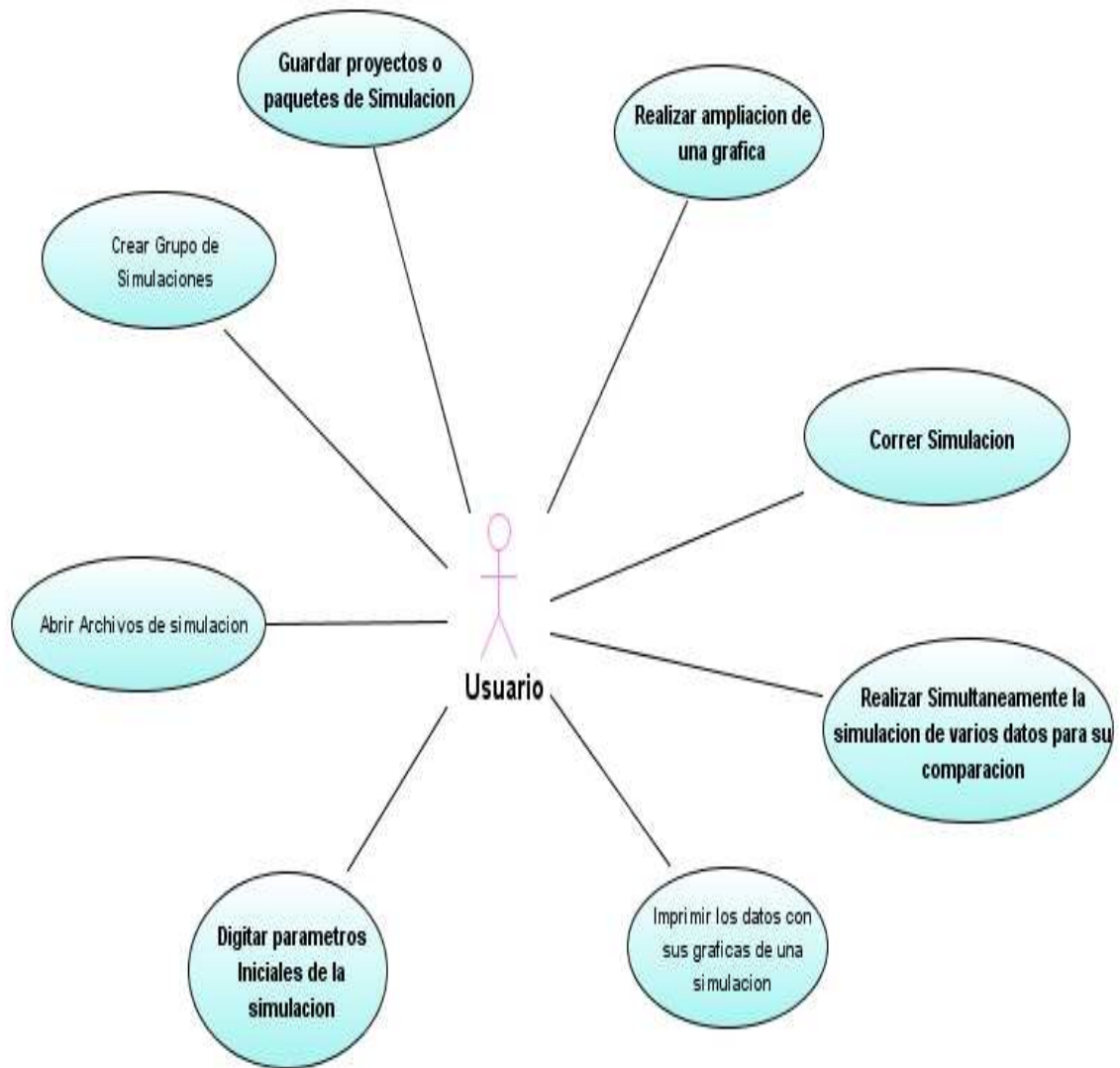
Otra comunicación que tiene el sistema SIMDUAL con el usuario, como la gran mayoría de los programas es poder abrir proyectos con sus respectivas simulaciones anteriormente guardadas.

En resumen, las diferentes elipses muestran las funcionalidades del software, como son:

- a. Digitar datos iniciales para una simulación
- b. Correr una simulación
- c. Ampliar una gráfica
- d. Crear Grupos de simulaciones

- e. Guardar proyectos que contiene datos de varias simulaciones
- f. Realizar simultáneamente varias simulaciones
- g. Imprimir datos y gráfica de la simulación
- h. Abrir Archivos de simulación

Figura 10. Diagrama de Casos de Uso



Fuente: EL AUTOR

El diagrama de clases (ver figura 11), nos muestra la relación que existe entre las clases del software, para este ejemplo se gráficán las clases mas relevantes que interactúan en el procesamiento de la información en una simulación.

Nuestra Clase Principal se llama *Principal*, dicha clase es el inicio del software y desde donde se realiza la llamada de la Clase *MenuDto*, esta clase es la encargada de gestionar todos los formularios que se muestran en el software, *FrmComparar*, *FrmEditor*, *FrmTema*, *Zoom*, *ZoomMultiple* cada una de estas clases contiene una referencia en esta clase para la manipulación de mostrar o ocultar un formulario en particular.

*** Clase MenuDto.java**

```
package com.simulador.publico.dtos;

import com.simulador.editor.forms.FrmComparar;
import com.simulador.editor.forms.FrmEditor;
import com.simulador.principal.forms.Principal;
import com.simulador.publico.util.Util;
import com.simulador.editor.forms.FrmTema;
import com.simulador.editor.forms.Zoom;
import com.simulador.editor.forms.ZoomMultiple;
import java.awt.print.PrinterJob;
import java.io.BufferedReader;
import java.io.File;
import java.io.FileReader;
import javax.swing.JDesktopPane;

public class MenuDto {

    private static JDesktopPane jdpPrincipal = null;
    private static Principal frmPrincipal = null;
    private static FrmTema frmTema = null;
    public static FrmEditor frmEditor = null;
    public static FrmComparar frmComparar =null;
    private static Zoom frmZoom =null;
    private static ZoomMultiple frmZoomMultiple =null;
    public static int imagenZoom =-1;
    public MenuDto() { }

    public static void mostrarMenu(int valor) throws Exception{

        if(valor==Util.FORMULARIO_TEMA){
```

```

//Mostrar el formulario para temas

MenuDto.frmTema = new FrmTema();
MenuDto.jdpPrincipal.add(MenuDto.frmTema,Util.SECUNDARIO_FRAME_LAYER);
Util.centrar(MenuDto.frmPrincipal,MenuDto.frmTema);
MenuDto.frmTema.show();

}
else if(valor == Util.FORMULARIO_NUEVO){

    //Mostrar el formulario para nuevo

    MenuDto.frmEditor = new FrmEditor();

    MenuDto.jdpPrincipal.add(MenuDto.frmEditor, Util.PRINCIPAL_FRAME_LAYER);
    Util.centrar(MenuDto.frmPrincipal,MenuDto.frmEditor);
    MenuDto.frmEditor.setMaximum(true);
    MenuDto.frmEditor.show();

}else if(valor == Util.FORMULARIO_COMPARAR){

    //Mostrar el formulario para nuevo

    MenuDto.frmComparar = new FrmComparar();

    MenuDto.jdpPrincipal.add(MenuDto.frmComparar, Util.PRINCIPAL_FRAME_LAYER);
    Util.centrar(MenuDto.frmPrincipal,MenuDto.frmComparar);

    MenuDto.frmComparar.show();

}else if(valor == Util.FORMULARIO_ZOOM){

    //Mostrar el formulario para nuevo

    MenuDto.frmZoom = new Zoom(imagenZoom);

    MenuDto.jdpPrincipal.add(MenuDto.frmZoom, Util.SECUNDARIO_FRAME_LAYER);
    Util.centrar(MenuDto.frmPrincipal,MenuDto.frmZoom);

    MenuDto.frmZoom.show();

}else if(valor == Util.FORMULARIO_ZOOMCOMPARA){
    //Mostrar el formulario para nuevo

    MenuDto.frmZoomMultiple = new ZoomMultiple(imagenZoom);
    MenuDto.jdpPrincipal.add(MenuDto.frmZoomMultiple, Util.SECUNDARIO_FRAME_LAYER);
    Util.centrar(MenuDto.frmPrincipal,MenuDto.frmZoomMultiple);

    MenuDto.frmZoomMultiple.show();

}
}

```

La clase *FrmEditor* es la Clase que se encarga de mostrar la interface del usuario, dicha clase tiene una referencia con la Clase *SimulacionDto* a la cual le pasa los valores necesarios para la simulación, la clase *simulacionDto* es la encargada de realizar el procesamiento de los datos y generar listas con los resultados obtenidos, dichas listas son enviadas a la clase *Panel* la cual es encargada de organizar estos valores para posteriormente graficarlo, la Clase *panel* se encuentra referenciada en la clase *FrmEditor* para reflejarla gráfica allí, similarmente sucede con la clase *GraficaEspecialDto*, a diferencia que esta clase admite mas de una secuencia de valores para generar la gráfica.

* Clase SimulacionDto.java

```
package com.simulador.publico.dtos;

import com.simulador.publico.util.Util;
import java.text.DecimalFormat;
import java.util.ArrayList;
import java.util.List;
import java.util.logging.Level;
import java.util.logging.Logger;

public class SimulacionDto implements Runnable{

    private List<Double> partes = new ArrayList<Double>();
    private Panel panelPto = null;
    private Panel panelTor = null;
    private Panel panelIcf = null;
    private GraficaEspecialDto grafica = null;
    private UnidadDto diametroPiston = new UnidadDto();
    private UnidadDto carreraPiston = new UnidadDto();
    private UnidadDto numeroCilindros = new UnidadDto();....

    public SimulacionDto(String diametroPiston, String unidadDiametroPiston, String carreraPiston, String
    unidadCarreraPiston...) {

        this.gases = dtoGases;

        this.diametroPiston.setValorActual(Double.parseDouble(diametroPiston));
        this.diametroPiston.setUnidadActual(unidadDiametroPiston);
        this.diametroPiston.setUnidadReal(Util.MM);
        this.diametroPiston.convertir(1);

        this.carreraPiston.setValorActual(Double.parseDouble(carreraPiston));
```

```

        this.carreraPiston.setUnidadActual(unidadCarreraPiston);
        this.carreraPiston.setUnidadReal(Util.MM);
        this.carreraPiston.convertir(1); ....

// Asignación de constantes

private double getMg() {
    return (12 * OCG) + OHG + (16 * OOG) + (14 * ONG); }
private double getR() {
    return 8.314f; }

// Realización de cálculos

Mf = this.getXg() * this.getMg() + this.getXd() * this.getMd();
F = Mf / (4.77 * (this.getExcesoAire().getValorReal() * this.getE() * this.getMAir()));
w = 0.622f * (this.getPv()) / (this.getPresionAtmosferica().getValorReal() - this.getPv());
q = q_ / Mf * (double) 1000;...

* Clase Panel.java

public class Panel extends JPanel {

    List<GraficaDto> lista = null;
    private double escalaPotX = (double) 300 / (double) Util.TAMANORPM;
    private double escalaPotY = (double) 200 / (double) Util.TAMANOPOTY
    private double escalaTorY = (double) 190 / (double) 1800;
    private double escalaIsfcY = (double) 190 / (double) Util.TAMANOISFCY;    double puntoInicialIsfcX = 0;
    double puntoInicialIsfcY = 100;
    double puntoFinalIsfcX = 0;
    double puntoFinalIsfcY = 0;
    private int grafica = 0;
    private int indMultiplesGrafica = -1;

    public int getIndMultiplesGrafica() { return indMultiplesGrafica; }

    public Panel() {
        imagen=new
        ImageIcon(getClass().getResource("/com/simulador/resources/cuadrícula6.PNG")).getImage();
        Util.imagen = imagen;
    public void paint(Graphics g) {
        Graphics2D g2 = (Graphics2D) g;
        int tam = 0;
        float puntoy = 0;
        puntoInicialIsfcX = 0;
        puntoInicialIsfcY = 190;
        puntoFinalIsfcX = 0;
        puntoFinalIsfcY = 0;
        List<GraficaDto> listaTem = new ArrayList<GraficaDto>();
        super.paint(g);
        g2.drawImage(imagen, 0, 0, 300, 200, (ImageObserver) null);
        if (this.indMultiplesGrafica == 1) {

```

```

switch (grafica) {
    case 0:
        this.setFont(new java.awt.Font("Tahoma", 0, Util.tamanoPuntos));
        tam = Util.listaComparacionPot.size();
        for (int i = 0; i < tam; i++) {
            listaTem = Util.listaComparacionPot.get(i);
            for (GraficaDto dto : listaTem) {
                g2.setColor(Util.color[i]);
                if (dto.getY() >= 0) {
                    puntoy = ejeCero + (float) dto.getY() * (-1) * (float) escalaPotY;
                    g2.drawString(".", (float) dto.getX() * (float) escalaPotX, puntoy);
                }
            }
        }
        break;....
}

```

```

switch (grafica) {
    case 0:
        this.setFont(new java.awt.Font("Tahoma", 0, 17));
        if (dto.getY() >= 0) {
            g2.setColor(new Color(0, 255, 0));
            g2.drawString(".", (float) dto.getX() * (float) escalaPotX, ejeCero + (float) dto.getY() * (-1) *
(float) escalaPotY);
        }
        break;.....
}

```

```

public List<GraficaDto> getLista() {
    return lista;
}

public void setLista(List<GraficaDto> lista) {
    switch (getGrafica()) {
        case 0:
            Util.listaPot = lista;
            break;....
    }
}

```

```

this.lista = lista;
}

public int getGrafica() {
    return grafica;
}

public void setGrafica(int grafica) {
    this.grafica = grafica;
}
}

```

Existe una Clase adicional *UnidadDto* que es la encargada de relacionar los las unidades que serán utilizadas en la Clase *SimulacionDto*. las relaciones entre las clase se les agrega el nombre de la variable que se utiliza en cada Clase.

```
* Unidad.dto

package com.simulador.publico.dtos;

import com.simulador.publico.util.Util;

public class UnidadDto {

    private String unidadReal      = Util.NULL;
    private String unidadActual    = Util.NULL;
    private double valorReal       = 0;
    private double valorActual     = 0;

    public UnidadDto() { }

    public String getUnidadReal() {
        return unidadReal; }

    public void setUnidadReal(String unidadReal) {
        this.unidadReal = unidadReal; }

    public String getUnidadActual() {
        return unidadActual; }

    public void setUnidadActual(String unidadActual) {
        this.unidadActual = unidadActual; }

    public double getValorReal() {
        return valorReal; }

    public void setValorReal(double valorReal) {
        this.valorReal = valorReal; }

    public double getValorActual() {
        return valorActual; }

    public void setValorActual(double valorActual) {
        this.valorActual = valorActual; }

    public void convertir(int tipo){

        //Toma el valor actual, la unidad actual y lo transforma segun la unidad real al valor real

        this.valorReal = Util.getConversion(tipo, this.unidadActual, this.unidadReal, this.valorActual);
    }
}
```

Con el diagrama de secuencias (Ver figura 12), se quiere mostrar gráficamente la secuencia de comunicación entre las clases para la interacción del usuario con el proceso de simular, comparar gráficas y realizar zoom.

Se inicia con la petición del usuario por medio de la pulsación en el botón simulación en el *FrmEditor* dicha clase después de realizar las validaciones le pasa los datos a la Clase *SimulacionDto* quien se encarga de procesar los datos, cuando termina pasa los datos al Panel, quien se encarga de graficar dichos valores, retornando la gráfica a *FrmEditor* para su visualización, además *FrmEditor* implementa los eventos del mouse y envía avisos a la Clase *Panel*.

Figura 11: Diagrama de Clases

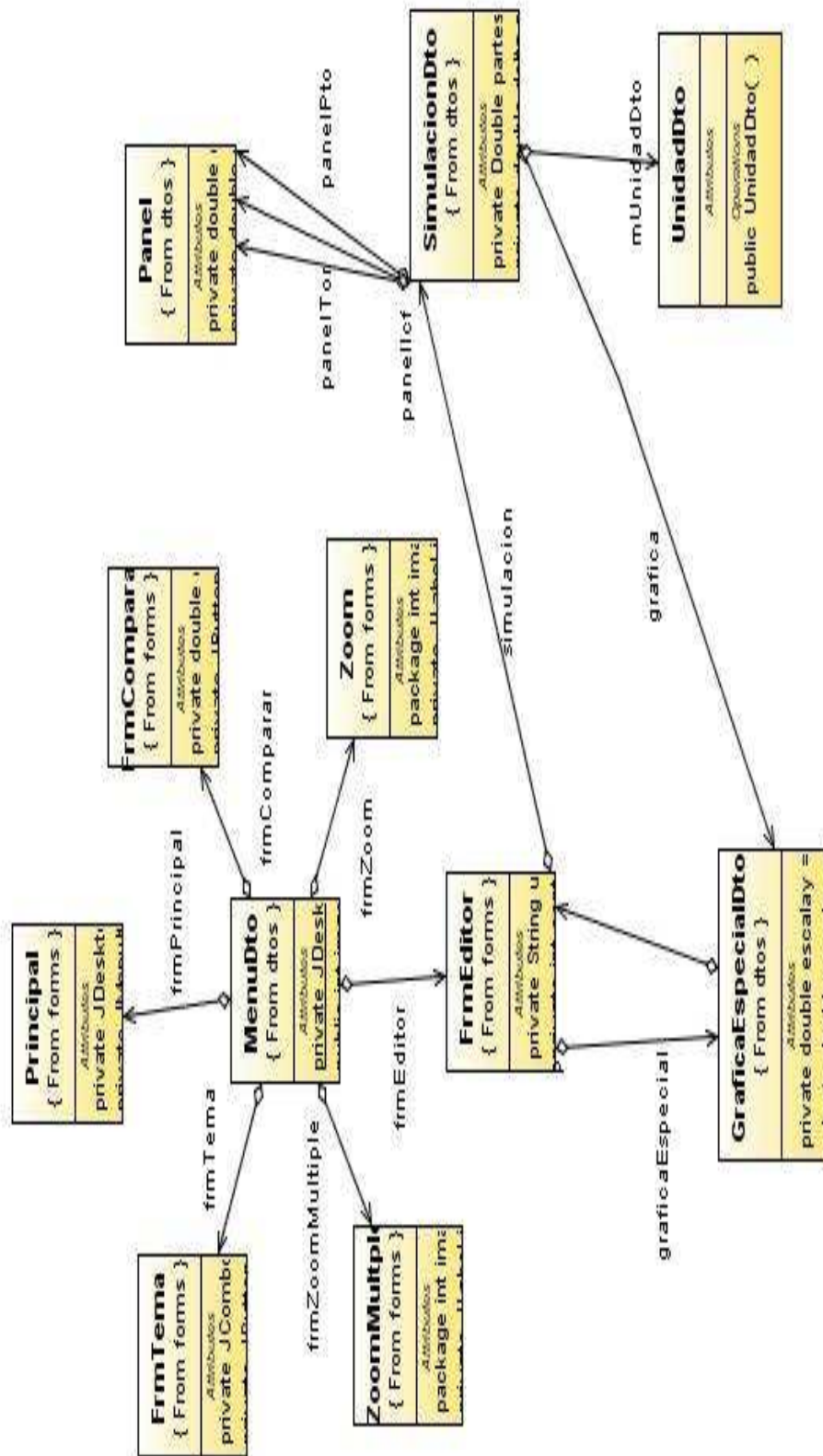
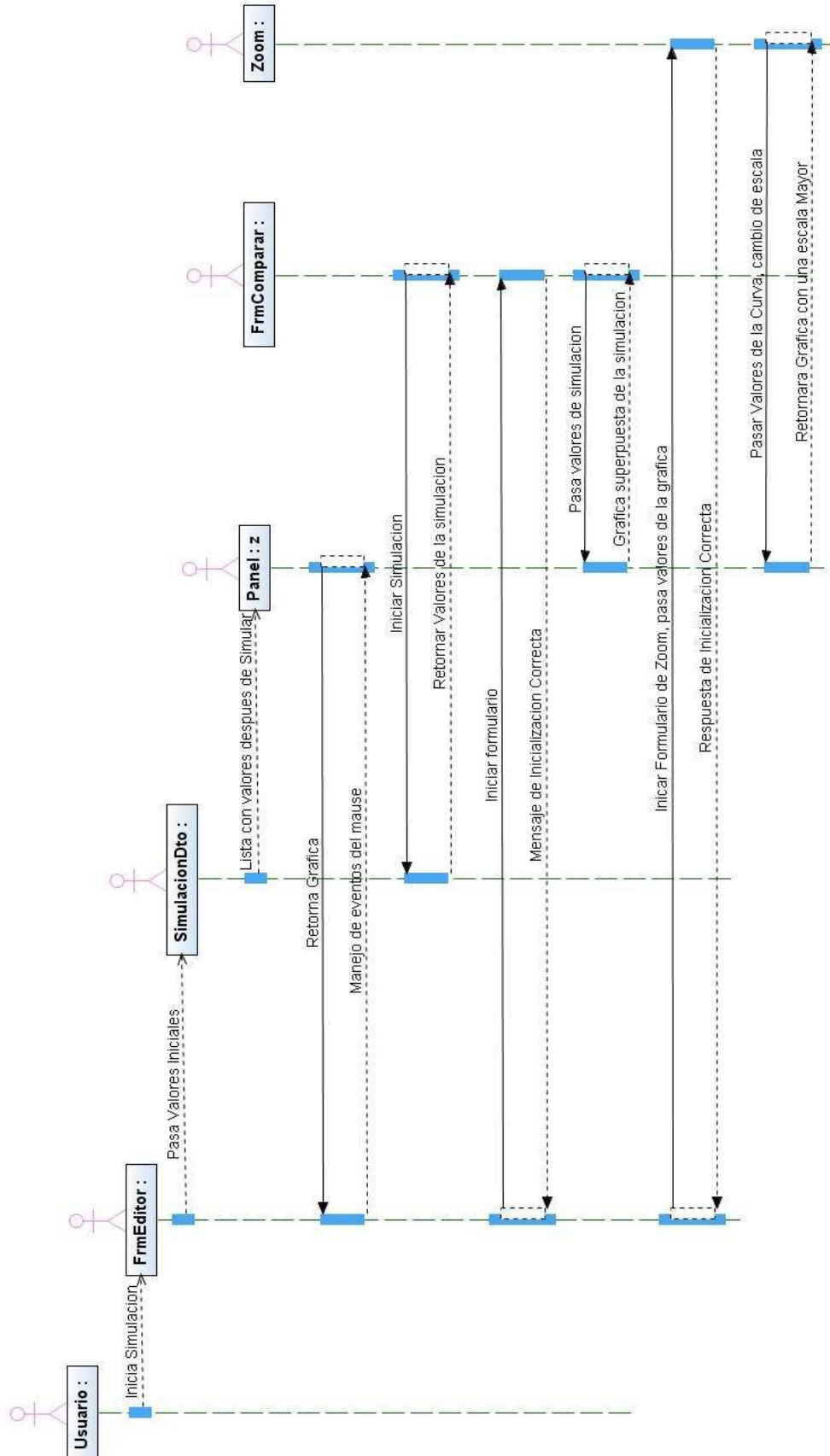


Figura 12: Diagrama de Secuencias.



La secuencia de comparar se inicia cuando se oprime el botón de simular en el formulario de comparar, esta se comunica con la clase *SimulacionDto* quien se encarga de procesar la lista de simulaciones a realizar, cuando se concluye la simulación retorna la lista con los valores de la simulación, es ahí cuando la clase *compara*, se comunica con la clase *Panel* y le pasa valores para que sean graficados.

La secuencia de realizar un Zoom se realiza entre la Clase *Zoom* y *Panel* ya que al iniciar *Zoom* los valores de la simulación ya se encuentran en el ambiente publico, cuando se oprime el Boton de Zoom de cualquier gráfica la clase *Zoom* se comunica con *Panel* y esta devuelve la gráfica a visualizar.

3.3 SIMULACIÓN DE MOTOR CUMMINS 160 BT 5.9

Para validar este software, se parte de la investigación realizada por el Instituto Colombiano del Petróleo ICP. El método de conversión empleado consiste en reemplazar parte del aire de admisión por gas natural, de tal manera que a la cámara de combustión llega una mezcla gaseosa de aire, gas natural y una nube de combustible Diesel. El combustible Diesel, actúa como ignitor de la mezcla aire - gas natural. El sistema de conversión solamente intercepta dos líneas del sistema: Una, la de aire de admisión, en la cual se instala el mezclador aire - gas natural; la otra, de gobierno por sistema de presión del múltiple de admisión a la bomba de Diesel, en la cual se coloca una solenoide [13].

3.3.1 Características del motor evaluado

La tabla 7. muestra las características del motor Cummins 160 BT 5.9 en el que fueron realizadas las pruebas.

Tabla 7. Características Motor CUMMINS 160 BT 5.9

PARAMETRO	VALOR
Potencia Nominal del motor	120(Kw) - 160(Cv)
Tipo	Diesel 4 tiempos
Régimen de Potencia Máxima	2500 rpm
Torque Máximo	556 (N.m) - 56.67 (Kgf.m)
Régimen torque máximo	1500 rpm
Número de cilindros	6 en línea
Cilindrada	5.883 cm ³
Diámetro/Carrera	102/120 (mm)
Relación de compresión	17.5 : 1
Consumo de combustible mínimo	193 (gr/Kw.h) a 1600 rpm

FUENTE: <http://www.viarural.com.ar/> > tractores > Pauny

3.3.2 Características del los combustibles utilizados

El gas natural que se suministro para las pruebas corresponde con las características del gas Cusiana (OCENSA) y el Diesel corresponde al combustible comercial.

El alcance de las pruebas desarrolladas en laboratorio lograron un proporción de combustible 40% Diesel - 60% Gas.

3.3.3 Resultado de la validación

1. Partiendo de la caracterización del motor 100% Diesel en laboratorio, se realiza diferentes corridas del software hasta encontrar similitud con los datos de operación, esta simulación nos permite determinar la eficiencia mecánica del motor (80%).

2. Se plantea la simulación de acuerdo a la relación de combustible 60% gas - 40% Diesel. Los datos de potencia, torque y consumo de combustible obtenidos en el software SIMUDUAL 1.0, mantienen una relación aproximada hasta 2000 rpm.
3. De acuerdo al análisis de gases de escape, se puede observar que las emisiones de CO2 disminuye notablemente con la mezcla Diesel - gas natural, confirmando los datos obtenidos en el laboratorio.

3.4 EJEMPLO DE SIMULACIÓN MOTOR CUMMINS 6B 5.9

En este ejemplo se va a simular el funcionamiento de un motor Cummins modelo 6B 5.9, para determinar las curvas características utilizando las diferentes mezclas de Diesel-Gas natural.

En la tabla 8, se registran los datos proporcionados por el fabricante para el motor CUMMINS 6B 5.9 que se utilizará en este ejemplo.

Tabla 8. Características Motor CUMMINS 6B 5.9

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del Pistón	102	mm
Carrera del Pistón	120	mm
Numero de Cilindros	6	
Relación de Compresión	18.5:1	
Cilindrada	5883	cm ³
Potencia	89/119 @2300	Kw/Hp
Torque	421 @1200	Nm
Consumo Específico	161 @1800	gr/Hp-h

Los datos del medio ambiente en el que se desarrolla la simulación son:

Temperatura Atmosférica	25 C
Presión Atmosférica	101.325 Kpa
Humedad relativa	70 %

Ya que es un motor nuevo vamos a despreciar las pérdidas de masa ocasionada por fugas, y a pesar de ser un motor nuevo, siempre se va a tener pérdidas por calor, fricción mecánica, esto no garantiza que la combustión sea completa, lo que nos lleva a estimar los siguientes datos.

Fracción de masa pérdidas por fugas	0 %
Fracción de Energía pérdidas por Calor	10 %
Eficiencia Mecánica	80 %
Eficiencia de Combustión	95 %

En este caso el fabricante no nos proporciona el valor de la presión a la cual los inyectores comienzan a liberar el combustible dentro de la cámara. En el centro de reparación y calibración de bombas e inyectores de combustible "CALIBRACIONES TECNICAS" de Bucaramanga nos informaron que el promedio de esa presión está en 2500 psi, por tanto ese valor lo tomaremos para la presión de inyección.

Presión de Inyección	2500 PSI
----------------------	----------

El fabricante también proporciona la información que el motor es de aspiración normal, es decir no es turbo cargado. Por tanto para que el aire sea introducido en el cilindro la presión en el múltiple de admisión debe ser menor a la presión atmosférica y para que los gases de combustión puedan salir por el ducto de

escape la presión allí debe ser mayor que la presión atmosférica. De esto asumimos los siguientes valores.

Presión en el Múltiple de admisión 1 bar

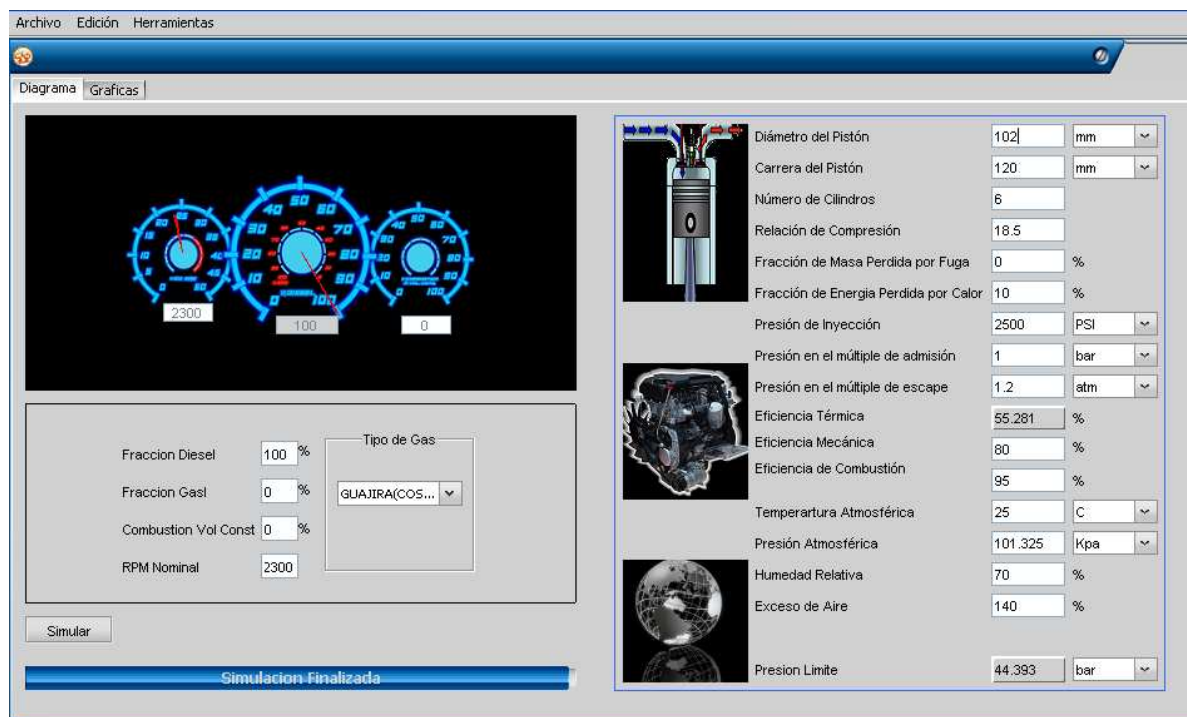
Presión en el Múltiple de Escape 1.2 bar

El tipo de gas que se trabaja en esta zona es *GUAJIRA INTERIOR*.

En la figura 13. Muestra la pantalla principal con todos los parámetros de entrada digitados, listo para simular.

El parámetro a variar es el porcentaje Diesel-Gas natural. Introduciendo estos valores 100, 50 y 0% Diesel al programa de simulación SIMUDUAL se obtiene:

Figura 13: Pantalla principal con parámetros de entrada



En la figura 14, se observa los resultados de la simulación con 100% de Diesel. Para continuar con el ejemplo simulamos con 50% y 0% de Diesel.

Figura 14: Pantalla secundaria, datos de salida

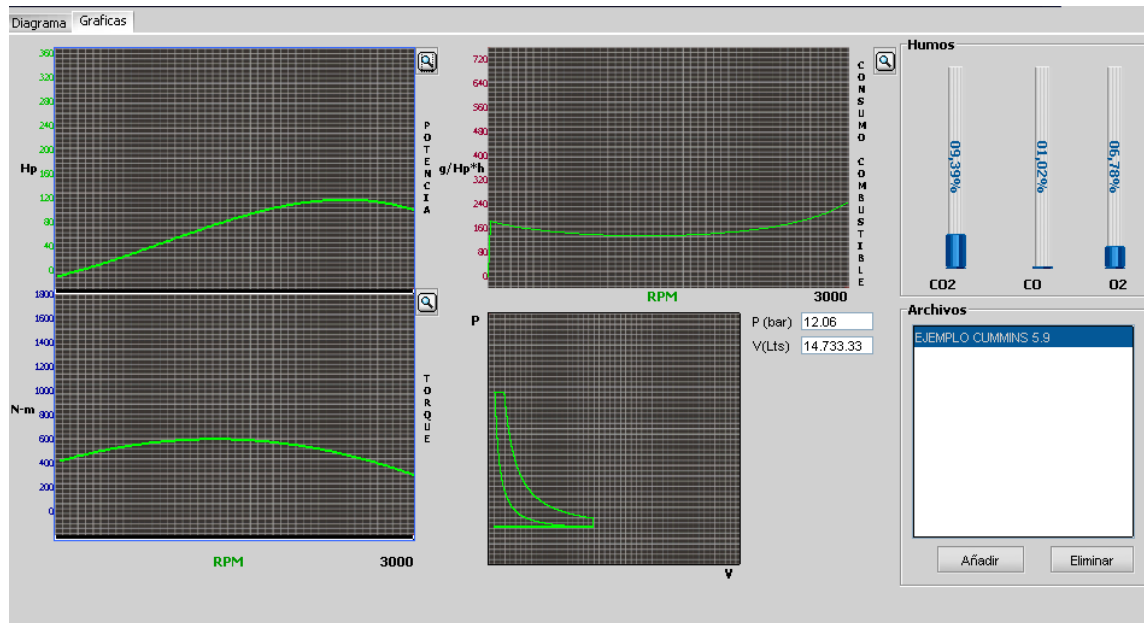
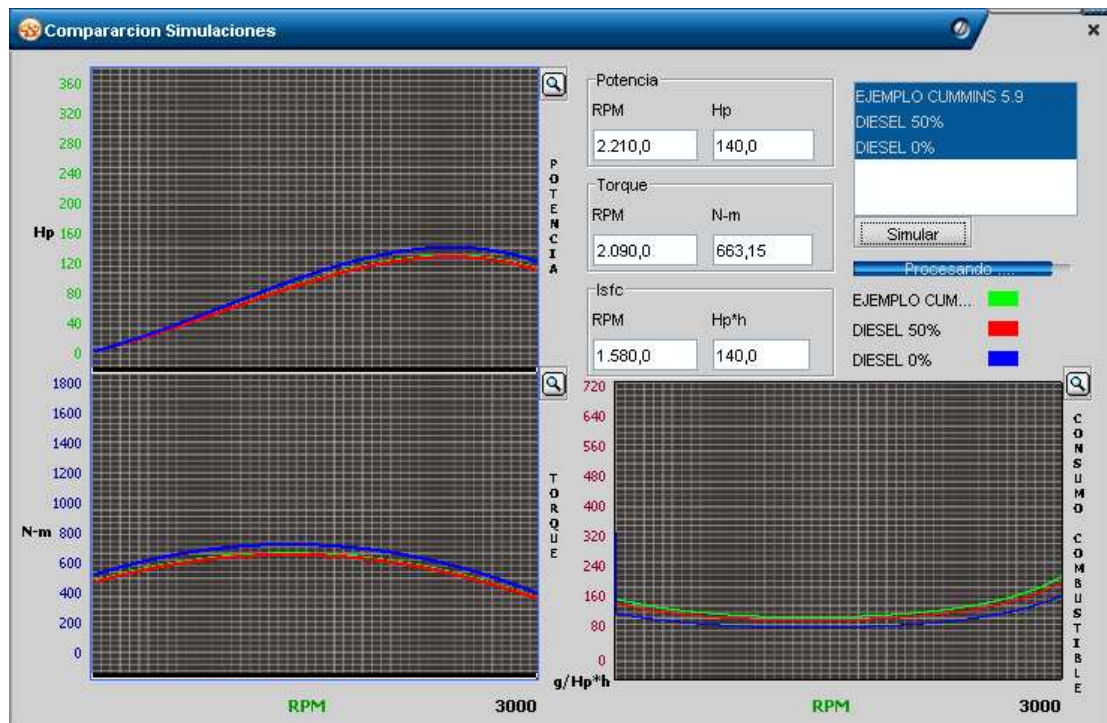


Figura 15: Comparación de las curvas características



En la figura 15, se muestra los resultados de comparación propuesta con 100%, 50% y 0% de Diesel. Para conocer con mayor facilidad cada proyecto, se identifica con colores diferentes.

Tabla 9. Resultados de la simulación con el motor CUMMINS 6B 5.9

PARAMETRO VARIABLE			
Fracción Diesel	100	50	0 %
PARAMETROS DE SALIDA			
Presión Máxima	44.39	44.39	44.39 bar
Temperatura Máxima	2045.73	2320.69	2558.67 K
Máxima Potencia	126.83@2380	125.77@2380	138.49@2380 Hp
Máximo Torque	651.06@1300	645.61@1300	710.94@1300 N-m
EMISIONES			
%CO ₂	9	7	6 %
%CO	1	1	1 %
%O ₂	6	6	7 %

Los resultados de la simulación se resumen en la tabla 9. Teóricamente se espera que este motor cuando opere con mezclas diesel gas tenga mejor respuesta en las medidas de torque y potencia.

Se nota un aumento considerable de la temperatura máxima, la cual es alcanzada al final de la combustión. Este aumento se ve reflejado en el trabajo de expansión, si recordamos el modelamiento matemático, el trabajo de expansión ($2w_3$ y $3w_4$) es directamente proporcional a esta temperatura (T_3). Por lo cual estos aumentos se ven reflejados en los valores de torque y potencia.

Es necesario notar que al realizar este tipo de pruebas en el laboratorio se debe tener en cuenta los estos aumentos significativos de la temperatura, ya que los materiales con los que fueron diseñados los motores Diesel se pueden ver afectados.

Se observa también que el CO₂ producto de la combustión disminuye, lo cual hace que el gas natural sea motivo de investigación para la operación en el sector automotor.

Cada proyecto puede ser impreso, la gráfica 16 muestra los resultados de la simulación con el ejemplo del motor CUMMINS 6B 5.9 operando con 100 % Diesel.

Figura 16: Hoja de impresión del ejemplo



Universidad
Industrial de
Santander

SIMULADOR DE MOTORES DIESEL OPERANDO CON MEZCLAS DIESEL-GAS NATURAL SIMDUAL 1.0



LABORATORIO
MÁQUINAS TÉRMICAS ALTERNATIVAS

Nombre Proyecto =EJEMPLO CUMMINS 5.9
 Archivo =EJEMPLO CUMMINS 5.9

DATOS GEOMETRICOS

Diametro Piston =102 mm
 Carrera Piston =120 mm
 Numero de Cilindros =6
 Relacion de Compresion =18.5
 Fraccion energia perdida por Calor =10 %
 Fraccion de Masa Perdida por Fuga =0 %

DATOS DE COMBUSTION

Presion Inyeccion =2500 PSI
 Presion Admision =1 bar
 Presion Escape =1.2 atm
 Eficiencia Termica =55.281 %
 Eficiencia Mecanica =80 %
 Eficiencia de Combustion =95 %

DATOS AMBIENTALES

Temperatura Atmosferica =25 C
 Presion Atmosferica =101.325 Kpa
 Humedad Relativa =70 %
 Exceso de aire =140 %

PARAMETROS DE OPERACION

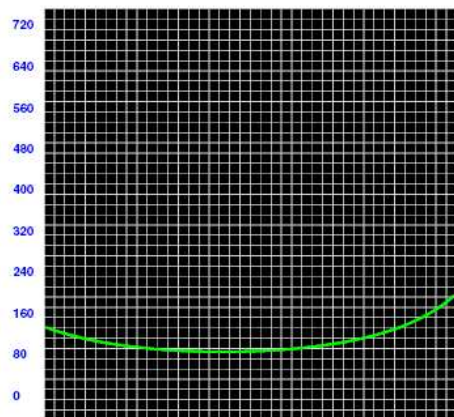
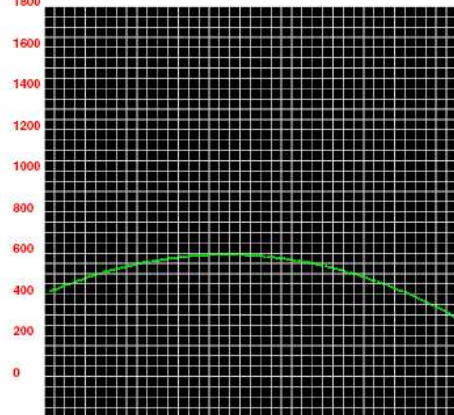
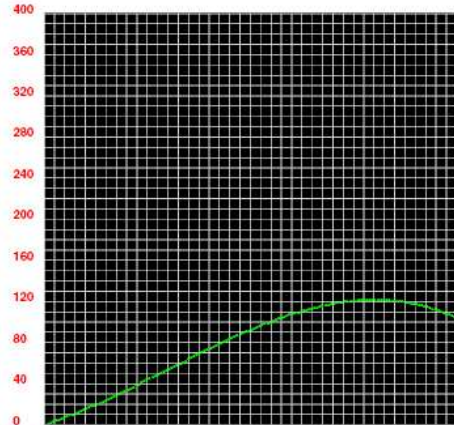
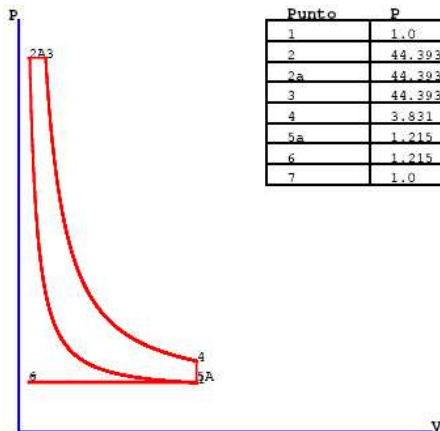
Fraccion Diesel =100 %
 Fraccion Gas =0 %
 KV =0
 RPM Nominal =2300

PARAMETROS DE SALIDA

Presion Maxima =44,39
 Temperatura Maxima =2045,62
 Maxima Potencia =126,75HP @2380,0RPM
 Maximo Torque =650,65N-m @1300,0RPM

EMISIONES

%CO2 =9 %
 %CO =1 %
 %O2 =6



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de este trabajo de grado de investigación, podemos señalar:

- El proceso de simulación es una forma fácil y rápida de predecir aproximadamente cualquier comportamiento, de ahí la necesidad que el proceso de cálculo anteceda el proceso de construcción y pruebas experimentales.
- Esta herramienta académica permite visualizar de forma aproximada la variación de los gases de escape del motor como resultado de la combustión y comparar la calidad de las emisiones de acuerdo a la proporción de combustible empleado.
- Esta herramienta fue desarrollada en lenguaje Java, logrando plasmar gráficamente el comportamiento aproximado del motor Diesel trabajando con mezcla Diesel- gas natural. La estructura de diseño, se basa en la metodología de programación orientada a objetos, la cual permite organizar los modelos matemáticos aplicados para facilitar futuras modificaciones.
- El escenario de simulación, muestra el comportamiento del motor en cuanto a curvas características de potencia, torque y consumo específico de combustible. Contemplando como variables de entrada al sistema: coeficientes experimentales, tipos de combustibles y sus respectivas mezclas, datos geométricos como diámetro del pistón, carrera del pistón, número de cilindros, relación de compresión y datos termodinámicos como temperaturas y presiones iniciales.

- Con el software SIMUDUAL 1.0, se obtuvo como resultado una herramienta académica que permite a los estudiantes el análisis, entendimiento y comparación del comportamiento del motor Diesel de acuerdo a la proporción de la mezcla de combustible Diesel - Gas natural.
- Para trabajar un motor con Gas natural como combustible, se debe tener en cuenta el gran aumento de temperatura de combustión, y así tomar las respectivas precauciones en las pruebas experimentales.
- La simulación se basa en el principio de conversión que reemplaza parte del aire de admisión por gas natural, de tal manera que a la cámara de combustión llega una mezcla gaseosa de aire, gas natural y una nube de combustible Diesel. El combustible Diesel, actúa como piloto de encendido de la mezcla aire - gas natural. Según estudios realizados el rendimiento del un motor aumenta si la adición del gas se realiza a alta presión directamente en la cámara de combustión, con el inconveniente que los costos de conversión son muy altos. Es recomendable realizar una simulación prediciendo el comportamiento teórico de esta situación y comparar su respuesta.
- Se debe profundizar en el análisis de emisiones de gases identificando la influencia sobre los NOx y material particulado.
- Los modelos físico - matemáticos empleados, son sencillos y se tienen en cuenta varias simplificaciones. Es necesario en trabajos futuros emplear modelos más cercanos a la realidad, para obtener datos más aproximados a la pruebas experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

- [7] COLIN R. FERGUSON, Internal Combustion Engines : Applied Thermosciences. New York:JOHN WILEY, C1986.
- [12] GORDON P. BLAIR, Design And Simulation Of Four-Stroke Engines. Warrendale, Pa. : Society Of Automotive Engineers, C1999
- [13] HERRERA J, Jorge Hernando. Evaluación del desempeño de un motor Diesel operando con Gas Natural. Universidad Industrial de Santander. Tesis de Posgrado. Bucaramanga 2000.
- [14] JOVAJ M. S. Motores de Automóvil. URSS: Mir, 1982.
- [4] MARADEY, Juan Francisco. Termodinámica Aplicada. Edición I. Colombia 2002.
- [3] MAY, Ed. Mecánica para Motores Diesel: Teoría, Mantenimiento y Reparación. Tomo I. México. Mac Graw Hill. 1988.
- [1] RICHARD STONE, Introduction to Internal Combustion Engines, U.S.A, 1999.
- [11] RUEDA, Jesus David. Curso Básico de JAVA. Bucaramanga Marzo 2007.
- [2] TAYLOR.. The Internal Combustion Engine in Theory and Practice. 1997. The MIT Press.
- [6] CONFEDEGAS, Siglo XXI. La era de los combustibles gaseosos. No 62. Octubre-Diciembre 1999.
- [8] ECOPETROL, Gerencia de Gas, Julio 2004. Pag. 1-2.
- [9] NETT TECHNOLOGIES INC. Purificadores para escapes de motor Diesel. Pag 2.
- [5] TRANSVALGAS, CAT 3116 Dual fuel engine test, Report prepared by Icean Air Environmental, 1998.

[10] US NATIONAL BUREAU OF STANDARDS, JANAF Thermochemical tables, Second Edition.

[15] [www.ecopetrol.com.co/37315/CERTIFICADO DE COMBUSTIBLES/](http://www.ecopetrol.com.co/37315/CERTIFICADO_DE_COMBUSTIBLES/)Reporte de resultados de ensayo de laboratorio 16-11-07.

[16] Microsoft ® Encarta ® 2007. © 1993-2006 Microsoft Corporation.

[17] www.mintransporte.gov.co/ministerio/programas/gas/htm. Pag 1-4.

[18] <http://www.viarural.com.ar/> > tractores > Pauny

ANEXOS

Anexo A. MATRIZ DE ESTADO DEL ARTE DE LAS SOLUCIONES EXISTENTES ACTUALMENTE

ITEM	EMPRESA	MOTOR	TECNICA	ESPECIFICACION TECNICA	MODIFICACION EN EL MOTOR
1	Catee pillar- Clean Air Power	Caterpillar	Dedicado a Gas Natural por encendido por chispa	Este motor es aproximadamente 10% menos eficiente a máxima potencia y 30% a 40% menos eficiente a baja y media carga.	Requiere grandes modificaciones para alojar las bujías y reducir considerablemente la relación de compresión entre 14-18 a 8-10, esto indica cambios físicos y cambios en los pistones.
2	Caterpillar- Clean Air Power	Caterpillar	El diesel se inyecta cuando la cámara esta llena de aire y gas, y esta es la que genera la llama para iniciar la combustión. La cantidad de inyección piloto es casi siempre la misma que cuando esta el motor en marcha en vacío.	El gas natural es inyectado directamente sobre las válvulas de admisión de cada cilindro, diferente al sistema de carburador el cual mezcla el Gas Natural con el aire a través de un sistema de fumigación. Cuando se opera de modo diesel el motor dual de caterpillar, el motor trabaja igual que el de linea inyectando, sin embargo, cuando entra a operar modo dual los inyectores diesel reducen significativamente de acuerdo a los requerimientos de potencia de el motor.	No se realizan cambios en el motor.
3	Caterpillar- Clean Air Power	Caterpillar	SKIP-FIRE O Encendido Aleatorio	Para lograr el encendido por compresión, el motor diesel que trabaja como el sistema dual incorpora la tecnología de encendido aleatorio a cambio de utilizar una mariposa de aceleración a baja potencia. Consiste en reducir el número de cilindros que utiliza cuando la demanda de potencia es baja. En la aplicación el aire entra a todos los cilindros, para la inyección diesel se hace a los necesarios.	No se realizan cambios en el motor.
4	Cummins Westport	Cummins	Inyección directa de Alta Presión - HPDI	Se mantiene el ciclo diesel, el gas es inyectado a alta presión. El inyector se instala como un inyector Diesel, alimenta dos combustibles; una pequeña cantidad piloto de diesel para generar la ignición y una cantidad amplia de gas natural para generar la potencia del motor.	No se realizan cambios en el motor.
5	Tomasetto Achille Ing. Alberto P. Garibaldi	Mercedes Benz OM 366	Conversión ciclo otto	El criterio de diseño fue el de obtener una cámara de combustión que favoreciendo la dinámica de gases minimizara la medida de lo posible la relación superficie/volumen a los fines de incrementar la velocidad de combustión y minimizar el recorrido de llama. Los resultados obtenidos fueron excelentes y se evidenciaron por la total ausencia de detonación y los sorprendentemente bajos valores de avance de encendido requeridos por el motor bajo cualquier condición de marcha.	Modificación en la cámara de combustión (cabeza del pistón y cabeza de los cilindros) para reducir la relación de compresión. Al eliminar los inyectores originales diesel y posicionar los alojamientos de bujías para permitir su acceso directo, se estudió detenidamente la circulación de fluido refrigerante en la zona de las mismas. El volumen de las cámaras de agua fue incrementado en 450 cc respecto de la cabeza original, se reemplazaron guías de válvulas y asientos por materiales aptos para GNC y se introdujo un nuevo diseño de
6	F. PIETREZ, A. BORGES, B LEAL de RIVAS. Universidad Metropolitana de Caracas. Venezuela. A. DE SANTA ANNA. Argenchip, Buenos Aires. Argentina	Caterpillar yMACK CAT-3116	El diesel se inyecta cuando la cámara esta llena de aire y gas, y esta es la que genera la llama para iniciar la combustión.	en el momento inicial aun el turbo no ha enviado suficiente proporción de gas natural. Cuando el motor comienza a aumentar su velocidad (aproximadamente 800- 850 rpm) comienza la inducción de gas natural debido a la depresión que se genera en el mezclador por el flujo mayor de aire que viene del filtro de la admisión del motor	No se realizan cambios en el motor.
7	OPEN GAS	Caterpillar de 300 KVA turbo alimentado	Kit de conversión- manteniendo el ciclo diesel		No modifica ni sustituye ninguna pieza del motor, se adiciona el kit con la propiedad de retirse para que funcione en su forma original.
8	Beatriz Leal - Venoco Venezuela	El ensayo se realizó en un motor Caterpillar modelo 3176B de 10.3 litros	Mecla de aire - gas se realiza antes del turbocargador.	La entrega de gas natural se denomina "Fumigación", pre-mezclando el gas natural con el aire antes que entre a la camara en forma homogénea y pareja a través del múltiple de admisión. La temperatura generada durante el ciclo de compresión/ ignición (CI) no es suficiente para la ignición del gas natural, requiriéndose una fuente alterna de encendido. Para ello se utiliza el propio sistema de inyección del motor, se inyecta una cantidad reducida de diesel en la cámara de combustión.	No se realizan cambios en el motor.
			inyeccion de gas a alta persion	se comprime aire en el cilindro, el gas se inyecta a alta presión al final de la etapa de compresión así como una pequeña cantidad de diesel.	No se realizan cambios en el motor.
9	Combustion and exhaust emission characteristics of a compression ignition engine using liquefied petroleum gas-Diesel blended fuel	ZH1105W 4Tiempas, aspiracion Natural, presión de inyección	Mecla liquida de Diesel y GLP para posteriormente ser inyectada esta mezcla a ala camara de combustion	Se introduce Diesel y GLP en un tanque vacío controlando la prseion por medio de regulador N2, la mescla de combustible es inyectada a la camara por medio de una bomba de inyeccion, y el flujo es regulado por una unidad electronica	No se realizan cambios en el motor
10	UNITED STATES PATENT, Patent number 4576137.march 18 1986		Controlador de Inyeccion de diesel, adición de gas, y de aire se es turbocargado	se toma la señal de la velocidad del motor por medio de sensores, que transmiten la señal a un sistema de control, de allí se optiene respuesta para operar las valvulas que controlan los flujos de diesel,gas, y aire (si es turbocargado)	No se especifica

ITEM	ELEMENTOS ADICIONALES	DEDICADOS A		EFICIENCIA DE COMBUSTIBLE	% DE COMBUSTIBLES		RELACION DE COMPRESION
		GAS	DUAL		GAS	DIESEL	
1	Un carburador con mariposa debe ser adicionado para controlar el paso de Gas Natural al motor	X					8:10
2	Las adiciones consiste en un multiple de admisión de gas natural el cual incluye sensores de actuación, presión de gas, temperatura del gas natural y los inyectores de gas natural. Una unidad de control es adicionada al motor para controlar exclusivamente el sistema dual de combustible en el motor		X	La eficiencia de combustible en el sistema dual es muy similar a la producida por los motores Caterpillar en linea e igualan el rateo de potencia de los motores diesel con una perdida de potencia en el rango de bajas rpm.	a carga completa 90%	a carga completa 10%	
3	Se utiliza una valvula TAB, la cual controla la cantidad ideal de aire que llegara a los cilindros.		X				
4	Cambio de inyectores a gas natural HPDI. Se utilizan solenoides para controlar el flujo de diesel y gas.		X	Mantiene igual potencia, torque y eficiencia que el diesel. Es mas eficiente que el motor a gas natural encendido por chispa	95%	5%	
5	Bujias, dispositivo que ajusta y regula los valores de caudal y presión del turbocompresor original debido a que el turbo compresor original resulta sobre dimensionado al trabajar con las características del ciclo otto.	X					*9,6:1 Turbocomprimidos *10,6:1 Aspiración natural
6	Mezclador de gas- aire por medio de una caída de presión		X	aumento en el torque del motor y la potencia, provocando así una mayor capacidad de repuesta (aumenta la versatilidad del equipo bajo exigentes condiciones de operación).	64	36	
7					90	10	Ahorro economico del 50%
8	Valvula con sensor de temperatura -el motor arranca con 100 diesel hasta temperatura normal de operación para permitir el paso del gas		X		20-35	80-65	
	inyector dual		X		95	5	
9	regulador de presión pro gas Nitrogeno, Tanque de mezcla, Unidad de control electronico		X		0-10-20-30	70-80-90-100	16.5:1
10	Sensores de velocidad, transductores de señal, valvulas de control de flujo y unidad de control electronico		X				

Anexo B. MANUAL DE DISEÑO

LENGUAJE UNIFICADO DE MODELADO UML

Es este capítulo se describe las aplicaciones del Software SIMUDUAL 1.0, en el diagrama de casos de uso, ver figura 10, se representa las acciones que un usuario puede realizar en el sistema con el Programa SIMUDUAL 1.0, el primer contacto del usuario con el software es el formulario principal donde se indica cuales son los parámetros que se deben usar para correr la simulación, este formulario se complementó con recursos como imágenes para dar un aspecto mas amigable al usuario.

Después de haber identificado y digitado los parámetros iniciales de simulación el software le da la opción de correr la simulación obteniendo sus diferentes resultados en forma gráfica y numérica. Para ver mas en detalle la parte gráfica el usuario puede interactuar con el sistema con la ampliación de las mismas.

Como se observa en el diagrama el usuario puede crear una simulación o un grupo de simulaciones denominado "*proyecto*", la opción de crear varias simulaciones dentro de un mismo proyecto surge a partir de la necesidad de anteceder a un banco de pruebas para motores de combustión interna, donde existe una gran cantidad de parámetros constantes y se realizan variaciones mínimas para predecir su comportamiento, a pesar que esta opción es abierta para que el usuario guarde las simulaciones que considere necesarias, su principal función es generar un proyecto diferente para cada tipo de motor con sus respectivas simulaciones.

Teniendo guardados los datos de las diferentes simulaciones, el usuario tiene la opción de visualizar gráficamente las variaciones de máximo tres simulaciones realizadas.

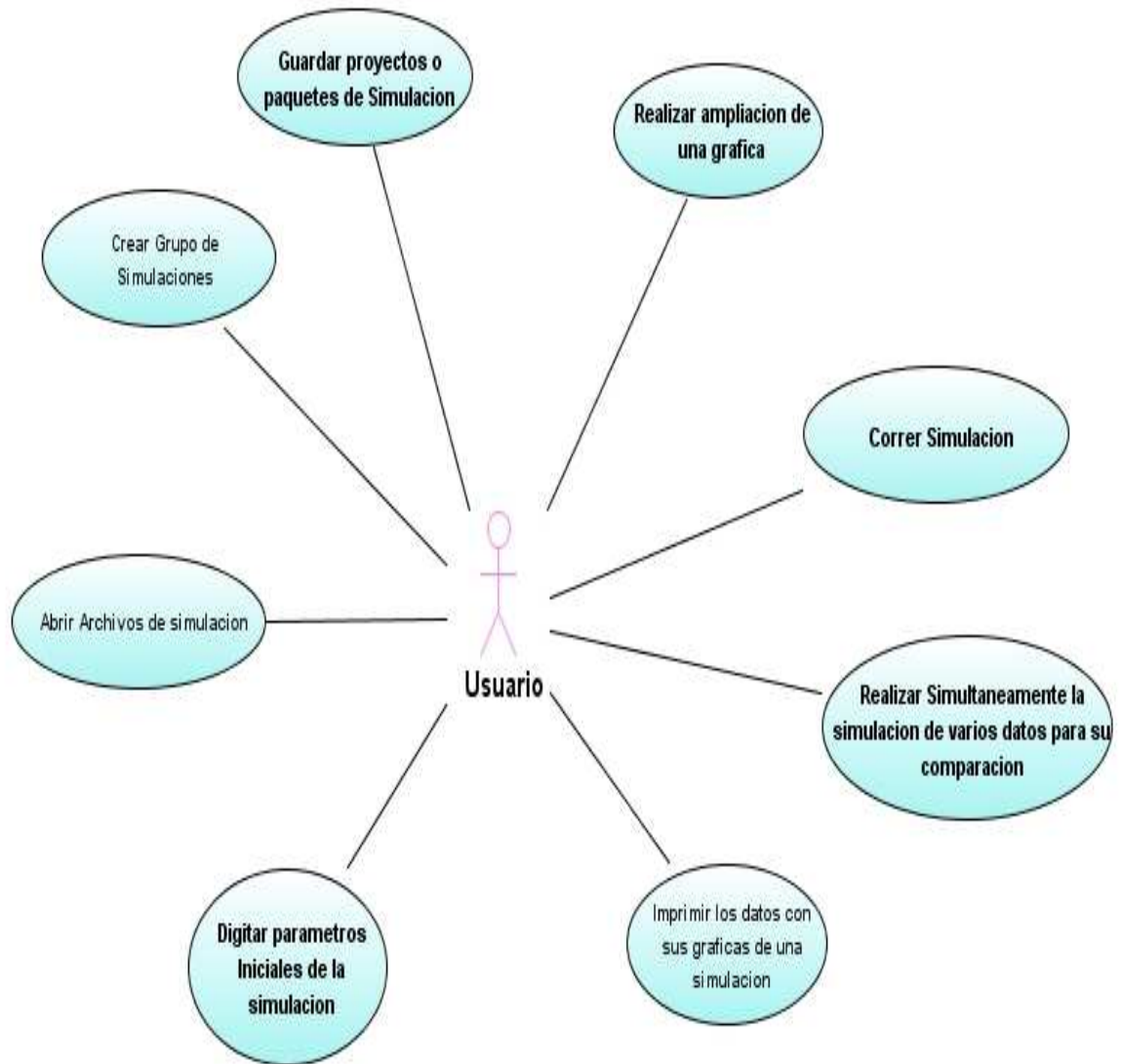
En caso que se necesite un registro físico, el software le da la opción al usuario de imprimir los valores de cada simulación.

Otra comunicación que tiene el sistema SIMUDUAL con el usuario, como la gran mayoría de los programas es poder abrir proyectos con sus respectivas simulaciones anteriormente guardadas.

En resumen, las diferentes elipses muestran las funcionalidades del software, como son:

- i. Digitar datos iniciales para una simulación
- j. Correr una simulación
- k. Ampliar una gráfica
- l. Crear Grupos de simulaciones
- m. Guardar proyectos que contiene datos de varias simulaciones
- n. Realizar simultáneamente varias simulaciones
- o. Imprimir datos y gráfica de la simulación
- p. Abrir Archivos de simulación

Diagrama de Casos de Uso



El diagrama de clases (ver figura 11), nos muestra la relación que existe entre las clases del software, para este ejemplo se gráficán las clases mas relevantes que interactúan en el procesamiento de la información en una simulación.

Nuestra Clase Principal se llama *Principal*, dicha clase es el inicio del software y desde donde se realiza la llamada de la Clase *MenuDto*, esta clase es la encargada de gestionar todos los formularios que se muestran en el software, *FrmComparar*, *FrmEditor*, *FrmTema*, *Zoom*, *ZoomMultiple* cada una de estas clases contiene una referencia en esta clase para la manipulación de mostrar o ocultar un formulario en particular.

La clase *FrmEditor* es la Clase que se encarga de mostrar la interface del usuario, dicha clase tiene una referencia con la Clase *SimulacionDto* a la cual le pasa los valores necesarios para la simulación, la clase *simulacionDto* es la encargada de realizar el procesamiento de los datos y generar listas con los resultados obtenidos, dichas listas son enviadas a la clase *Panel* la cual es encargada de organizar estos valores para posteriormente graficarlo, la Clase *panel* se encuentra referenciada en la clase *FrmEditor* para reflejarla gráfica allí, similarmente sucede con la clase *GraficaEspecialDto*, a diferencia que esta clase admite mas de una secuencia de valores para generar la gráfica.

Existe una Clase adicional *UnidadDto* que es la encargada de relacionar los las unidades que serán utilizadas en la Clase *SimulacionDto*. las relaciones entre las clase se les agrega el nombre de la variable que se utiliza en cada Clase.

Con el diagrama de secuencias (Ver figura 12), se quiere mostrar gráficamente las secuencia de comunicación entre las clases para la interacción del usuario con el proceso de simular, comparar gráficas y realizar zoom.

Se inicia con la petición del usuario por medio de la pulsación en el botón simulación en el *FrmEditor* dicha clase después de realizar las validaciones le pasa los datos a la Clase *SimulacionDto* quien se encarga de procesar los datos, cuando termina pasa los datos al *Panel*, quien se encarga de graficar dichos valores, retornando la gráfica a *FrmEditor* para su visualización, además *FrmEditor* implementa los eventos del mouse y envía avisos a la Clase *Panel*.

Diagrama de Clases

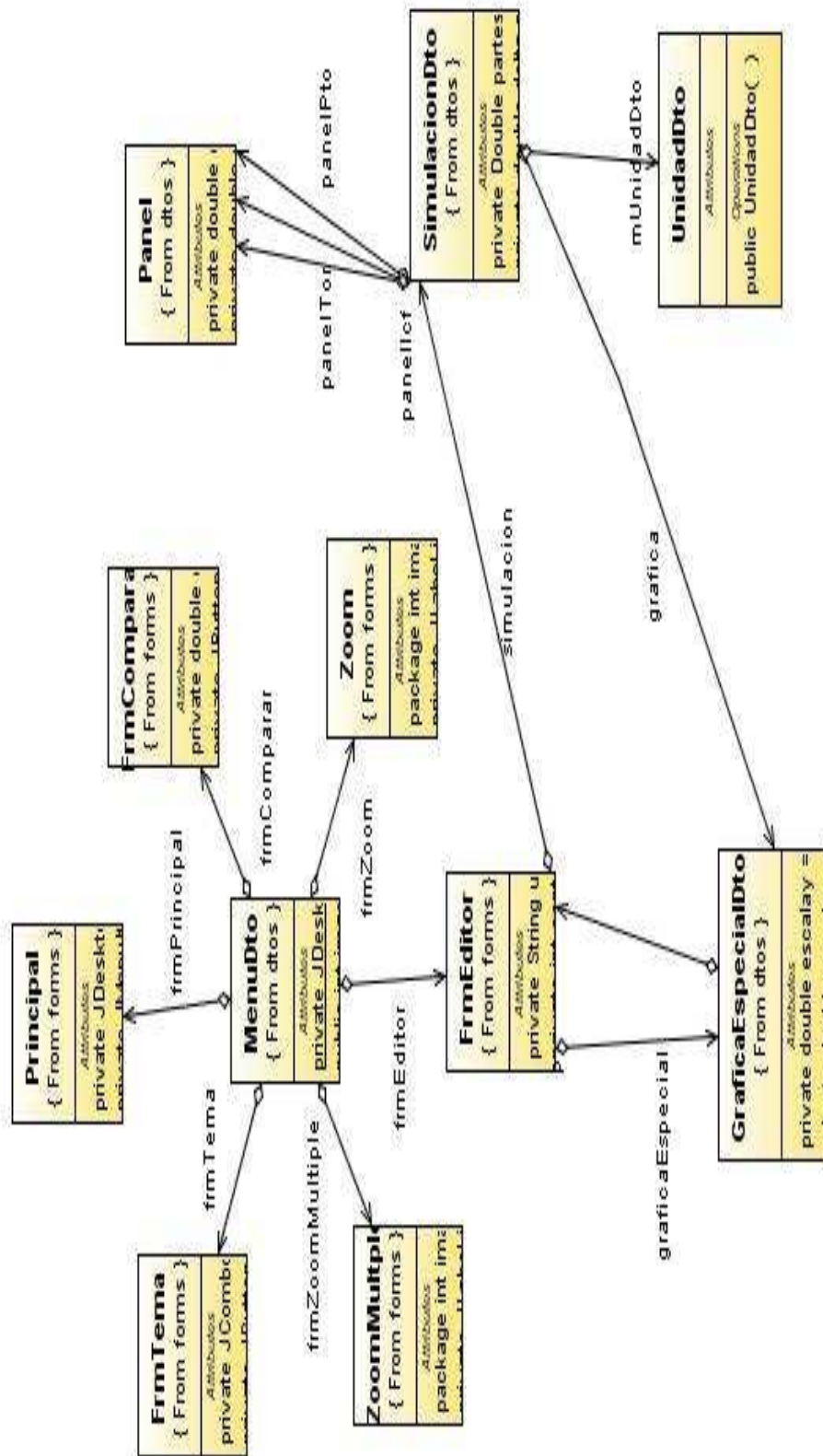
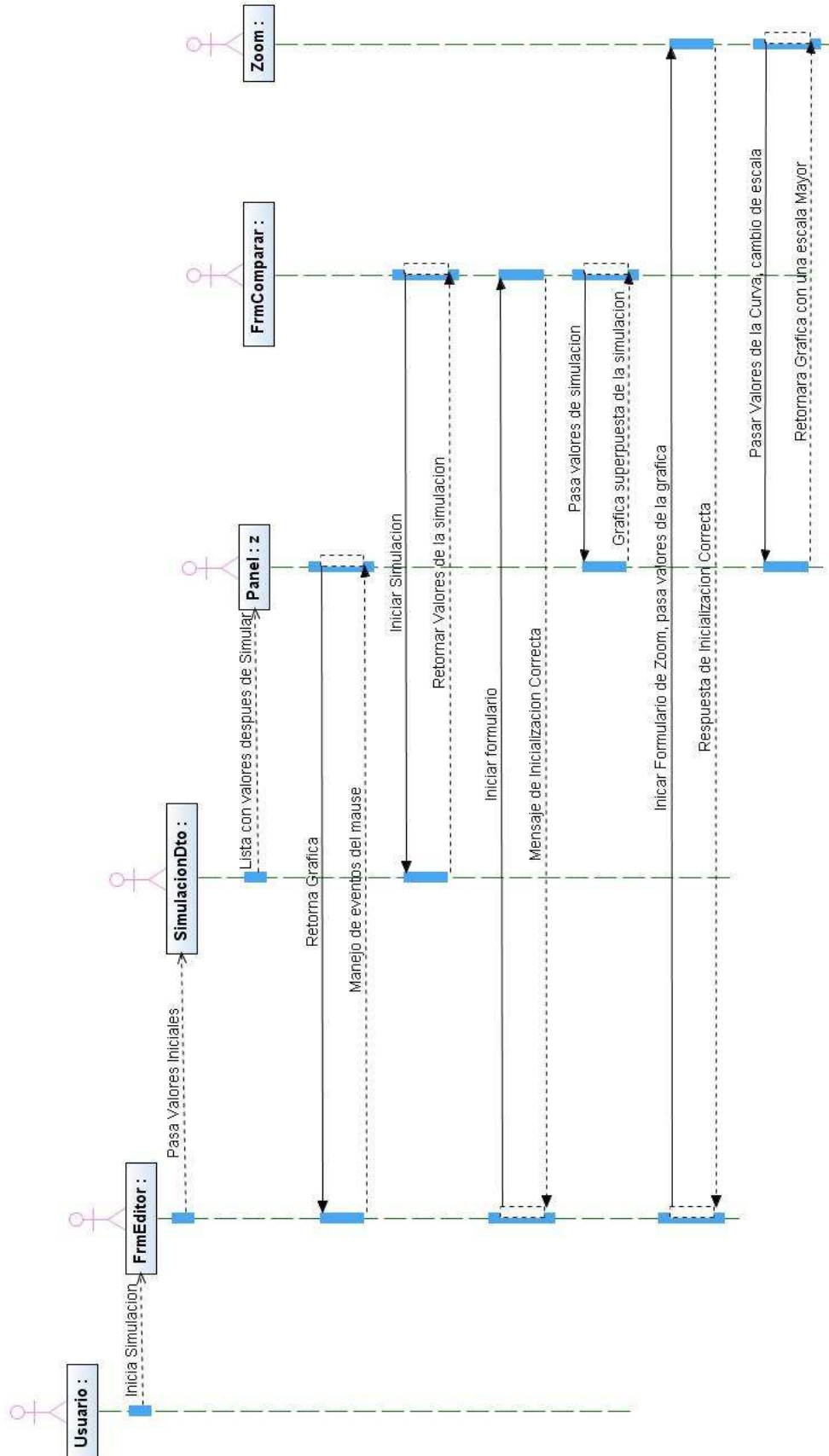


Diagrama de Secuencias.



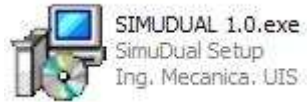
La secuencia de comparar se inicia cuando se oprime el botón de simular en el formulario de comparar, esta se comunica con la clase *SimulacionDto* quien se encarga de procesar la lista de simulaciones a realizar, cuando se concluye la simulación retorna la lista con los valores de la simulación, es ahí cuando la clase *compara*, se comunica con la clase *Panel* y le pasa valores para que sean graficados.

La secuencia de realizar un Zoom se realiza entre la Clase *Zoom* y *Panel* ya que al iniciar *Zoom* los valores de la simulación ya se encuentran en el ambiente publico, cuando se oprime el Boton de Zoom de cualquier gráfica la clase *Zoom* se comunica con *Panel* y esta devuelve la gráfica a visualizar.

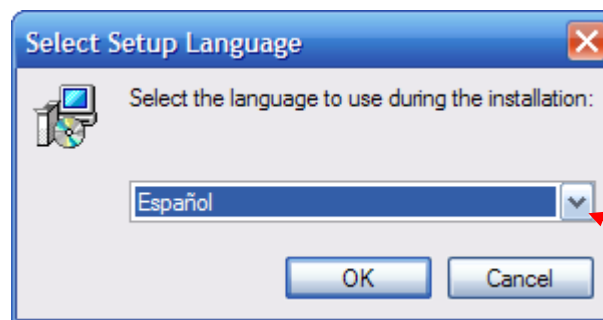
Anexo C. MANUAL DE INSTALACIÓN

INSTALACION PARA WINDOWS

El instalador se encuentra comprimido en un archivo ejecutable llamado "Setup SIMUDUAL 1.0".



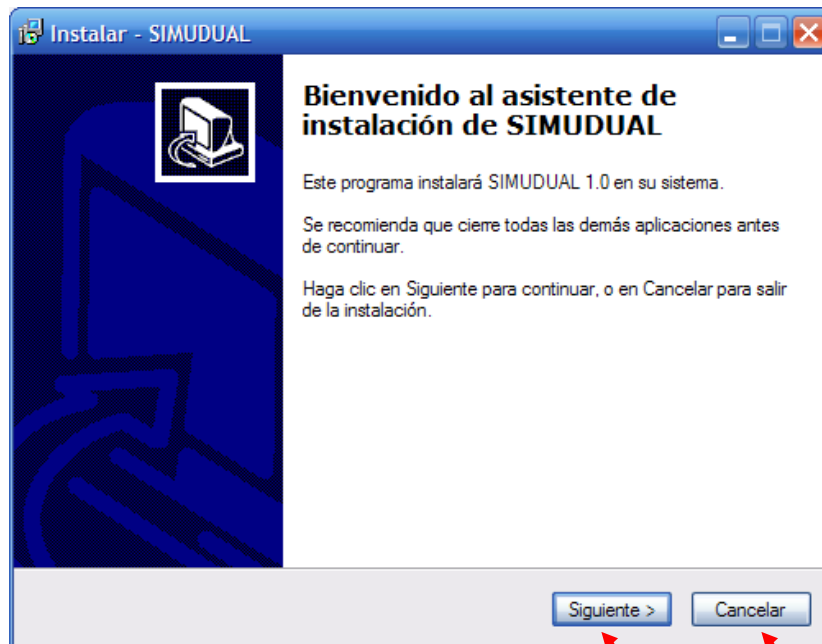
Inmediatamente cuando se da inicio a la instalación se muestra una ventana con la opción de seleccionar el lenguaje con el que se trabajara en el transcurso de toda la instalación. SIMUDUAL 1.0 presenta la oportunidad de seleccionar dos lenguajes para este fin, (ingles y español).



Lista a desplegar

Se presentará una ventana con un mensaje de bienvenida, oprima siguiente.

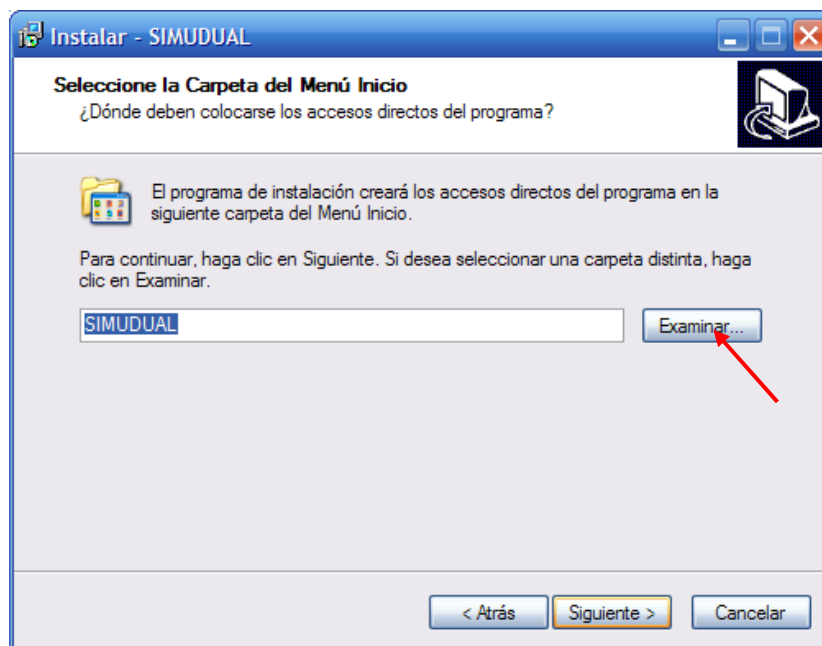
En transcurso de toda la instalación se presenta la opción de cancelar, si desea cancelar la instalación no es recomendable que lo haga oprimiendo de cerrar "X" ubicado en la esquina superior derecha, ya que se pueden quedar archivos del software en el disco duro de su PC sin realizar ninguna aplicación.



Para continuar con la instalación

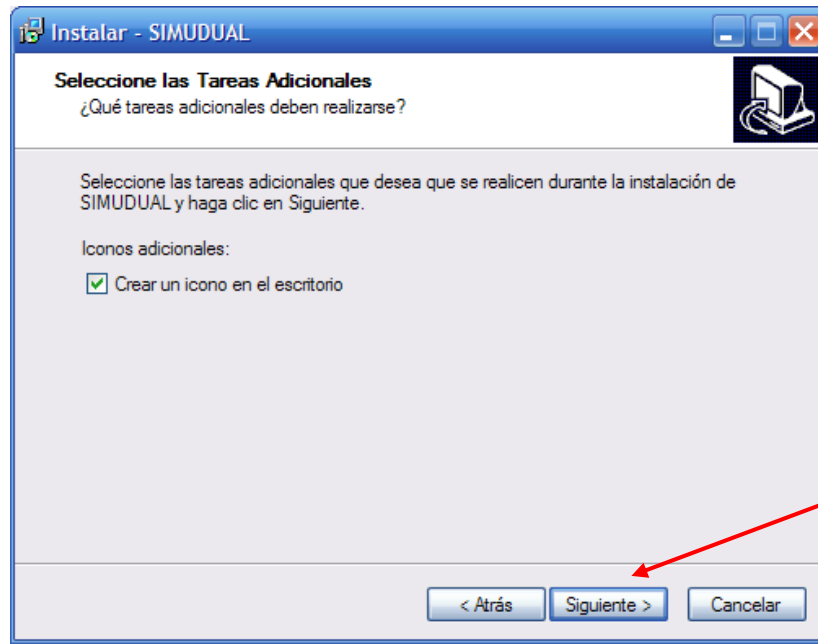
Si desea cancelar la instalación

Durante el proceso de instalación se genera una carpeta en donde se guardarán los archivos necesarios para que la simulación se ejecute. Esta carpeta por defecto se crea en la dirección "C:SIMUDUAL", además crea un acceso en el menú de inicio en el caso de querer instalar en otra dirección, esta ventana le da la opción direccional en donde desea crear el acceso.



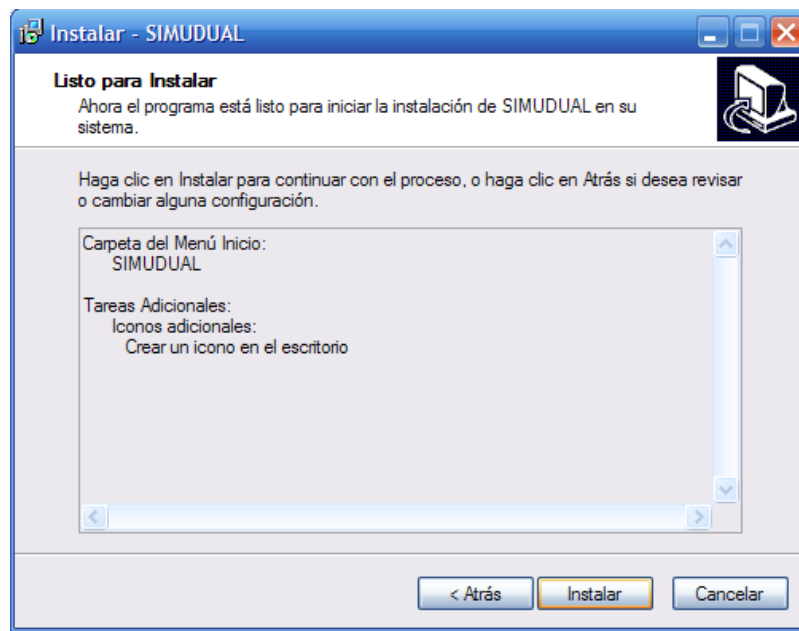
Para direccional donde desea guardar los archivos necesarios para ejecutar la simulación.

Por facilidad de acceso a la simulación, se crea un icono en el escritorio, la ventana que se muestra a continuación, da la opción de crear o no este icono, para continuar con la instalación oprima el botón siguiente. Si desea regresar a cambiar el directorio de ubicación del programa, lo puede hacer con la opción “Atrás”.

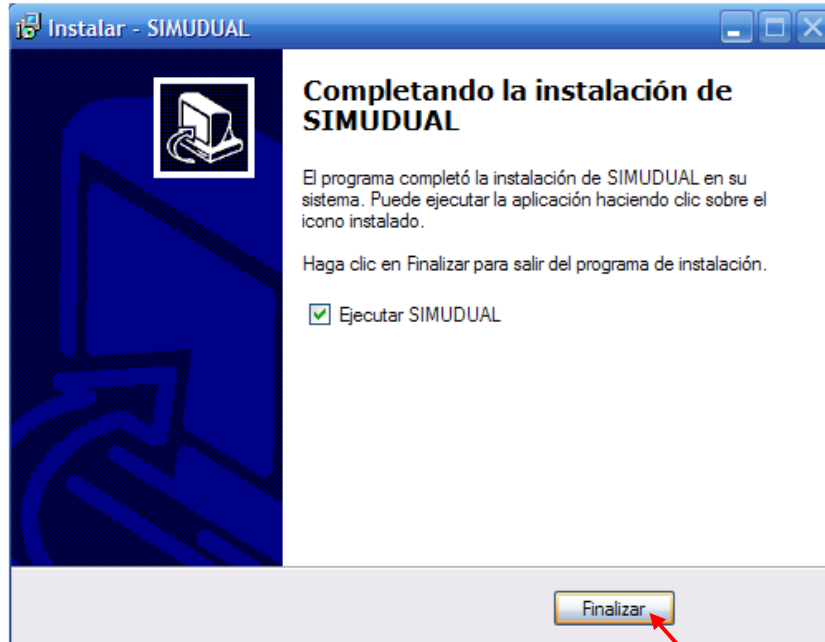


Para continuar con la instalación

Se habrá ahora una ventana donde presenta la información seleccionada para la instalación, en caso de desear cambiar estos oprima el botón “Atrás” de lo contrario oprima el botón “Siguiente” para continuar con la instalación.

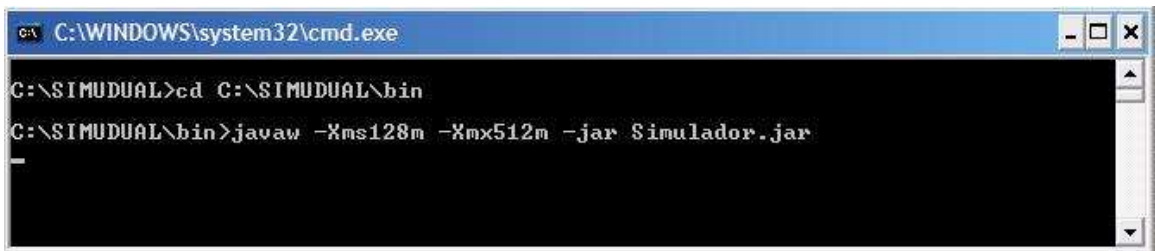


Si se ha instalado correctamente el software se abrirá la siguiente ventana confirmando el éxito de la instalación. Además da la opción de ejecutarlo inmediatamente después de oprimir el botón “Finalizar”.



Ha desarrollado el proceso de una forma correcta, puede finalizar la instalación para ejecutar SIMUDUAL 1.0.

En el momento de iniciar la ejecución de la simulación se abre la siguiente ventana en entorno DOS, puede demorar unos segundos antes de iniciar con la presentación inicial del software.



INSTALACION PARA LINUX

Debido a la gran variedad de versiones del sistema operativo LINUX el programa SIMUDUAL 1.0 no contiene un instalador ejecutable ya que este ejecutables se realizan para versiones específicas. Por tanto la instalación de SIMUDUAL 1.0 se realiza de forma general.

Se toma la carpeta SIMUDUAL1.0 LINUX se copia y pega en la dirección que el usuario lo desee.

Se busca la "Terminal" de LINUX que se encuentra en el menú de inicio, al igual como se encuentra "Command Prompt" o editor de DOS en plataforma Windows.

Se abre el editor del Terminal con la información del dominio y el usuario con el que se inicio la sesión. eg. Usuario@casa:~\$

Se digita las letras "pwd" y luego ENTER , este es el comando para recibir información en donde se esta ubicado dentro del sistema operativo.
eg. /home/Usuario

Posteriormente se digita las letras "su" y luego ENTER, este comando es para usar los permisos del administrador y poder instalar cualquier software. Se debe digitar la clave del administrador en donde el Terminal lo indica.

Se digita la dirección de ubicación de la carpeta SIMUDUAL1.0LINUX. Anteponiendo las letras "cd" y espacio.
eg. cd /home/Usuario/SIMUDUAL1.0LINUX/

El comando "cp" copia el manual Manual.pdf en la raíz del sistema el cual lo utiliza el software para la opción de ayuda. eg, cp MANUAL.pdf /

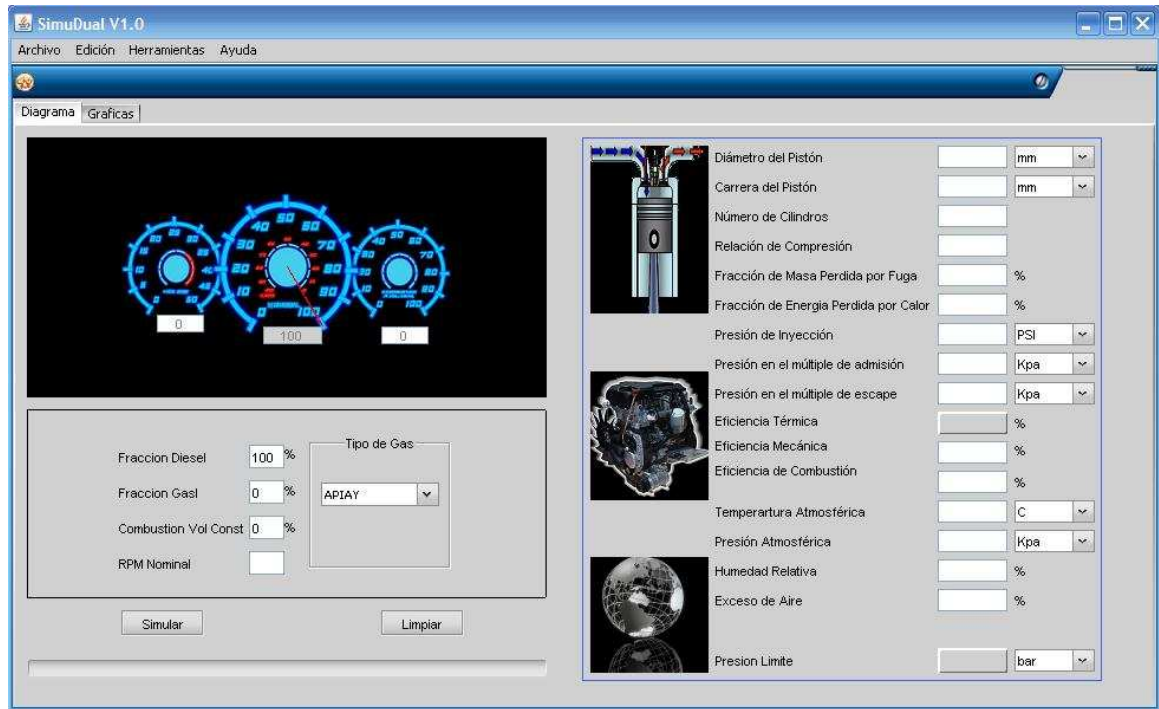
Se da el permiso para la ejecución del softwre con el comando "chmod 777 ejecutar.sh"

Por último se ejecuta el software con el comando "./ejecutar.sh"

Dentro de la carpeta SIMUDUAL1.0LINUX se encuentra un archivo llamado "Comandos Terminal.txt" en donde se encuentra un resumen de los comandos usados en el Terminal para la instalación de SIMUDUAL1.0

Anexo D. MANUAL DE USUARIO

Al ingresar al software SIMUDUAL 1.0 encontrara la ventana principal con su respectiva barra de herramientas y dos páginas, en la barra de herramientas se encuentran el menú Archivo, Edición, Herramientas y Ayuda; las páginas son Diagrama y Gráficas.



- **Menú Archivo:** se encuentra las siguientes opciones:

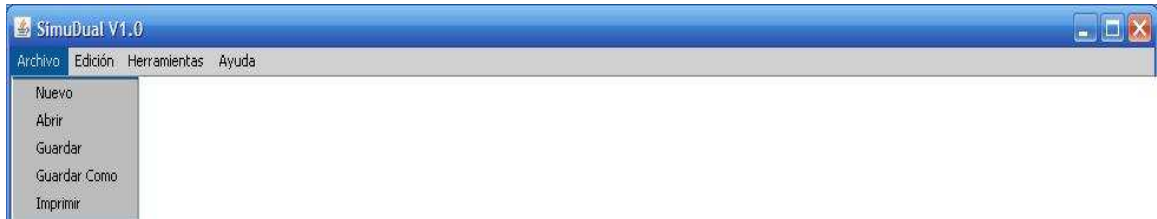
Nuevo: Genera un nuevo Proyecto, conociendo como Proyecto a un grupo de simulaciones, generalmente con características similares.

Abrir: Abre un proyecto anteriormente guardado por SIMUDUAL, el tipo de archivo que abre contiene la extensión *.sim, es necesario aclarar que la única forma de abrir estos proyectos es por esta opción, y no abriéndolo como se esta acostumbrado hacer con otros programas que se pueden abrir directamente desde el archivo.

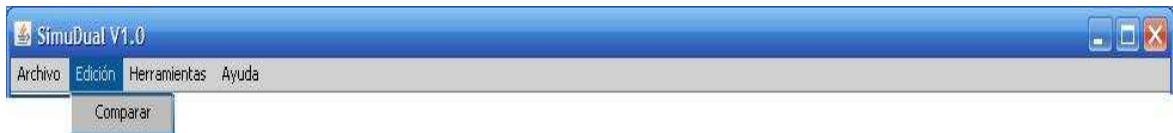
Guardar: Guarda los cambios al proyecto que se este trabajando, si es un proyecto nuevo, esta opción realiza las respectivas acciones de la opción Guardar Como.

Guardar Como: permite asignar un nombre al proyecto y guardarlo en una carpeta deseada.

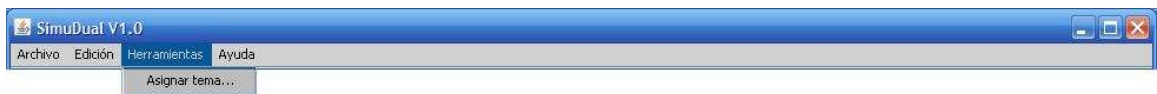
Imprimir: Esta opción permite como su nombre lo indica, imprimir los datos de entrada, salida y gráficas generadas por la simulación.



- **Menú Edición:** se encuentra la opción de comparar las gráficas de diferentes simulaciones, mas adelante en este manual entraremos en detalle de esta opción.



- **Menú Herramientas:** se encuentra la opción Asignar Tema, permite cambiar la presentación visual del programa. SIMUDUAL tiene 44 diferentes diseños de presentaciones visuales.



- **Menú Ayuda:** en está opción encontrara el manual de usuario, donde se brinda todas las ayudas para que pueda generar nuevos proyectos, ensayar con diferentes parámetros y comparar las respectivas variaciones de la simulación.

La *ventana Diagrama* permite ingresar los parámetros de entrada necesarios para que la simulación se ejecute, en la parte derecha encontramos una serie de datos como: Diámetro del pistón, Carrera del pistón, Número de cilindros, relación de compresión, estos parámetros son típicos de cada motor y son proporcionados por cada fabricante.

Fracción perdida por fuga, hace relación a la cantidad de mezcla de combustible-aire o gases de combustión que salen del cilindro tanto por holguras en los anillos del pistón o en las válvulas.

Fracción perdida por calor, hace referencia a la cantidad porcentual de energía térmica que transfieren los gases de combustión con las paredes del cilindro.

Presión de Inyección, es el valor de presión al cual los inyectores dejan liberar el combustible en la cámara de combustión.

Presión en el Múltiple de admisión y Presión en el Múltiple de escape, son las presiones como su nombre lo indica, a la entrada y salida de la cámara de combustión.


Eficiencia Mecánica, este parámetro depende del estado de las piezas mecánicas del motor.

Eficiencia de Combustión, hace referencia a que tan completa fue la reacción de combustión.

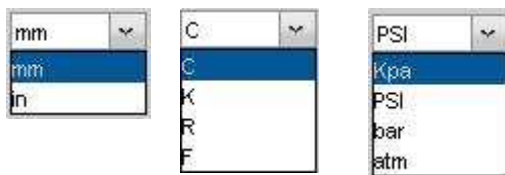
Temperatura Atmosférica, Presión Atmosférica y humedad relativa, son las condiciones del medio en donde se opera el motor.

Exceso de aire, es la cantidad porcentual del aire que entra al cilindro, tomando como 100% al aire que teóricamente sería necesario para realizar una combustión completa.



 Los parámetros que contienen el cuadro de texto inactivo indican que son parámetros de salida.

Las unidades con las que se deben introducir estos valores se indica al frente de cada parámetro, SIMUDUAL permite trabajar con diferentes unidades para facilitar al usuario su manipulación. La opción de cambiar las unidades se encuentran en los cuadros de selección frente de cada parámetro.



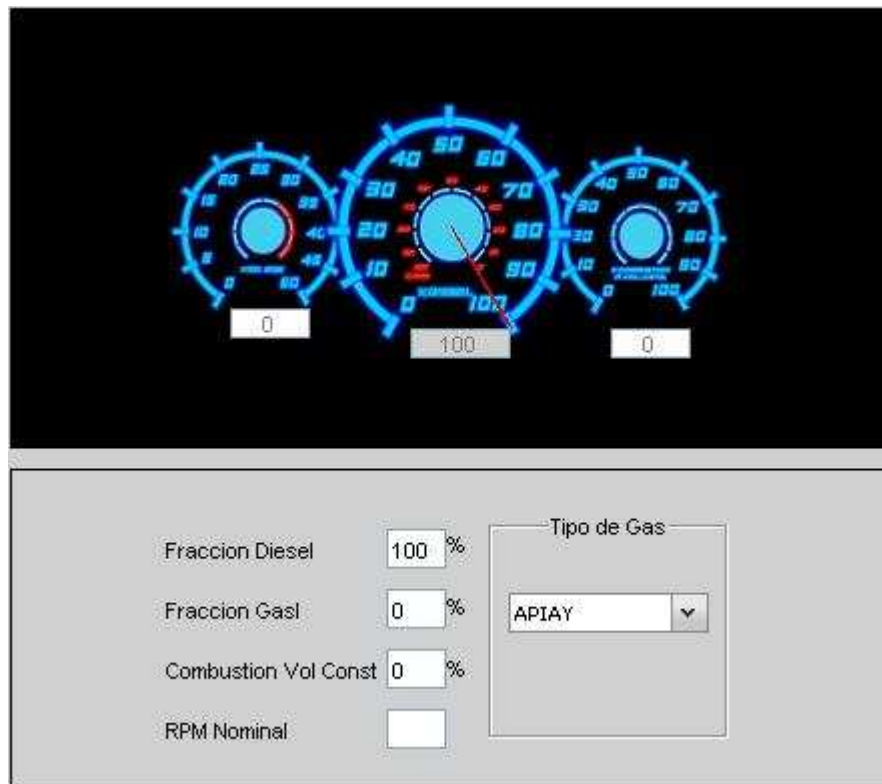
Los datos que se encuentran en la parte izquierda de la ventana hacen referencia a:

La fracción de combustibles Diesel y Gas que entran en la cámara de combustión.

La fracción de combustión a volumen constante, generalmente este valor es cero para el cálculo de parámetros para motores Diesel.

La velocidad de régimen nominal con la que esta diseñado el motor, este valor es proporcionado por el fabricante.

Estos tres parámetros se ven representados en los tacómetros que se encuentran en la parte superior izquierda.



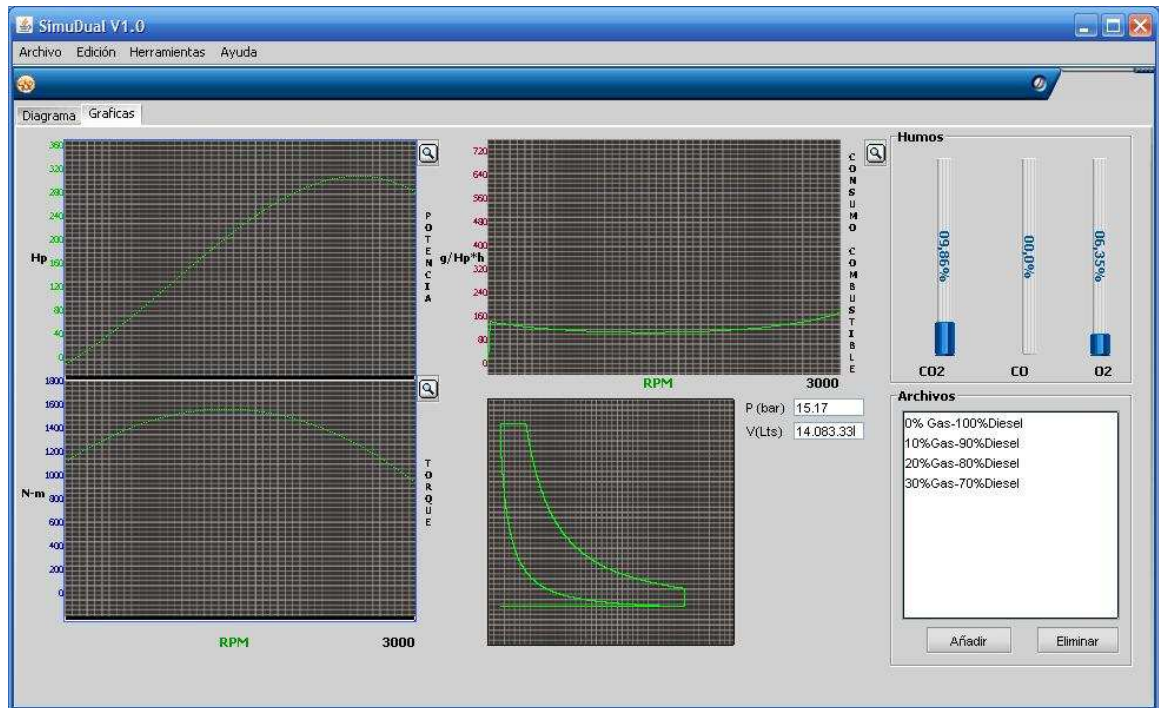
En Colombia se trabaja con gases de diferentes sitios, la composición de los diferentes gases extraídos en Colombia se ven reflejadas en el cuadro de selección de tipos de gas. En este icono puede despegar la lista y seleccionar el tipo de gas que se desee para la simulación.




En la parte inferior izquierda se encuentra el botón de inicio de la simulación y su respectiva barra de progreso.

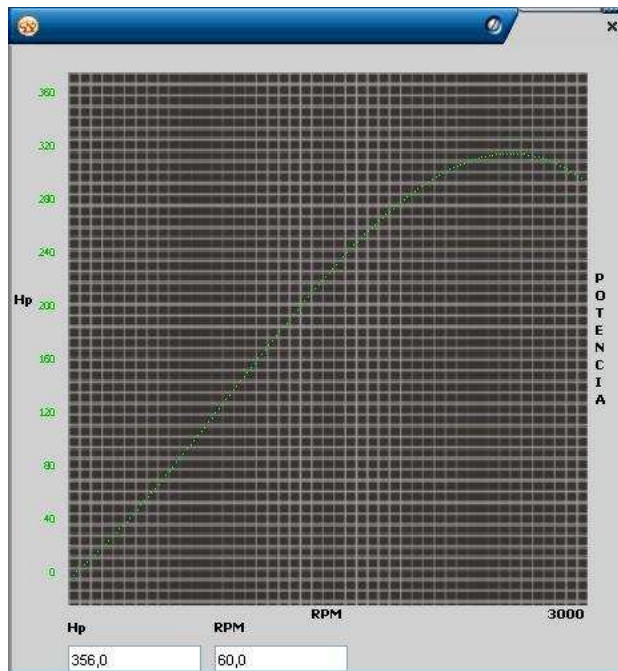


En la página Gráficas se encuentran reflejados los datos de salida de la simulación, como las gráficas de Potencia, Torque, y consumo específico de combustible.

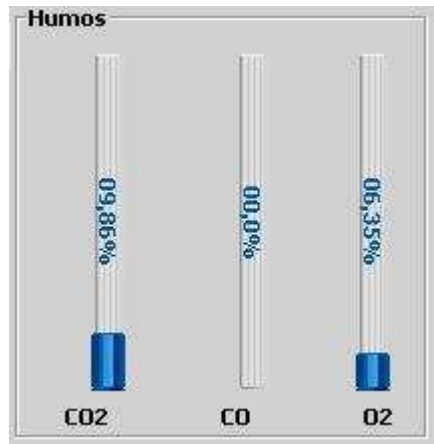


 En las gráficas donde se indica un icono con el dibujo de una lupa, significa que dicha gráfica puede ser ampliada, y se hace oprimiendo este icono.

El formulario de la gráfica ampliada tiene la propiedad de indicar el valor de cada punto a medida que se deslice el mouse sobre la gráfica, en la parte inferior se indica la posición en la que se encuentra el puntero del Mouse.



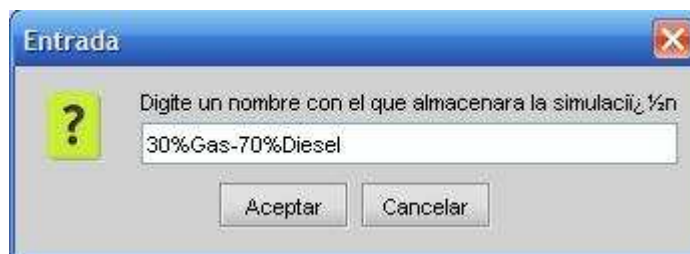
En la parte superior derecha se indica los niveles de composición de CO₂, CO, y O₂ generados en la combustión, de acuerdo a las emisiones generadas por la combustión.



En el cuadro de Archivos es donde se indica cuantas simulaciones grabadas contiene el proyecto en el que se esta trabajando. Es necesario destacar que cuando se selecciona cualquiera de las simulaciones que se encuentran en este cuadro, automáticamente toma los valores de entrada de dicha selección.

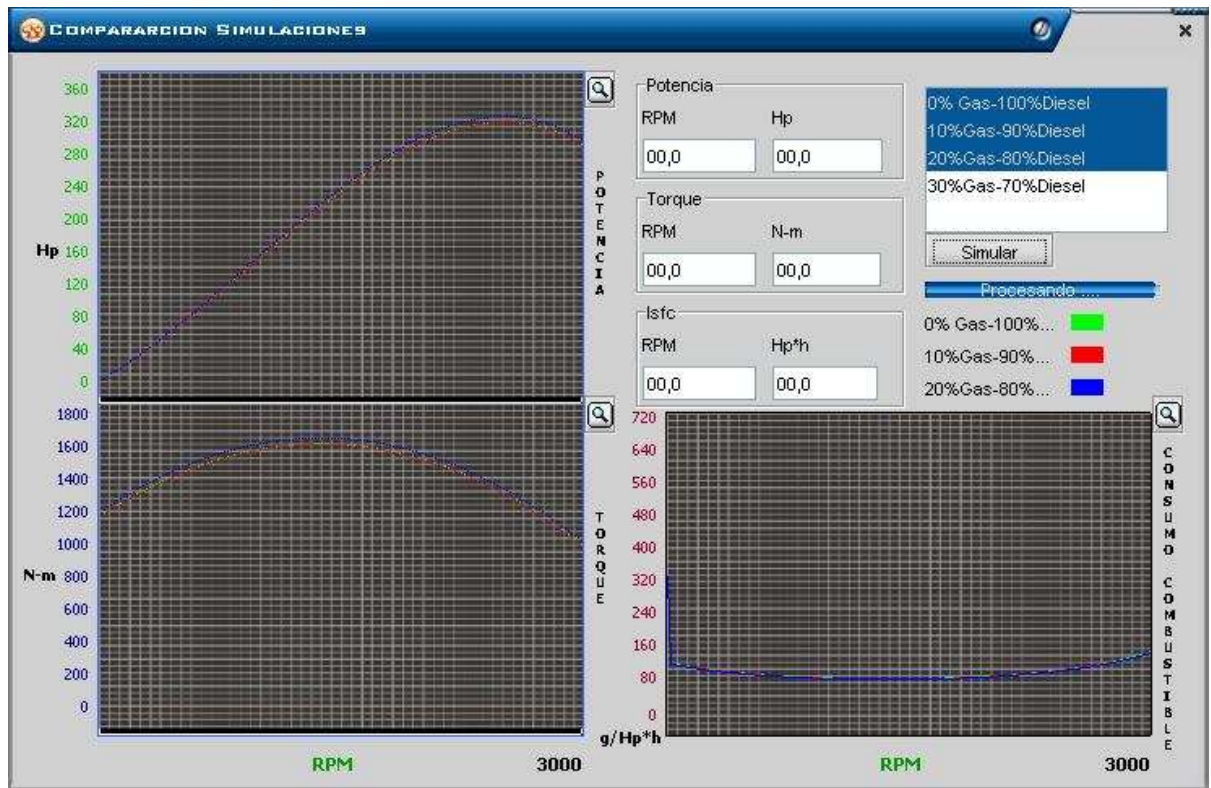


Después de haber corrido la simulación y desea guardarla al menú de archivos o menú de simulaciones se oprime el botón Añadir, aparece un formulario en el cual se pide el nombre con el que quiere guardar la simulación, y se oprime aceptar o cancelar según lo desee el usuario.



Cuando se selecciona en la barra de herramientas Edición/Comparar aparece el formulario Comparar, que dispone de tres plantillas de gráficas, Potencia, Torque, y Consumo específico de combustible, y el cuadro de archivos o simulaciones guardadas, donde se puede seleccionar hasta tres simulaciones consecutivas. Al seleccionarlas y oprimir el botón Simular, se generan las gráficas de las tres simulaciones asignándoles un color a cada una de las simulaciones, permitiendo así identificar las variaciones de respuesta para diferentes variaciones de las condiciones de entrada.

Para estas gráficas también aplican los comandos de ampliar e identificación del cursor dentro de la gráfica correspondiente.



Para salir del programa SIMDUAL se oprime el botón X ubicado en el extreme superior derecho de la ventana.