

**HERRAMIENTA EDUCATIVA EN LA WEB BASADA EN LA SIMULACION
DE LOS PROCESOS TERMOFLUIDODINAMICOS DE MOTORES DE
COMBUSTION INTERNA, SIMTA 1.0**

**JOSÉ LUIS BARBOSA MORA
JUAN FELIPE SALCEDO SANDOVAL.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
BUCARAMANGA
2.007**

**HERRAMIENTA EDUCATIVA EN LA WEB BASADA EN LA SIMULACION
DE LOS PROCESOS TERMOFLUIDODINAMICOS DE MOTORES DE
COMBUSTION INTERNA, SIMTA 1.0**

**JOSÉ LUIS BARBOSA MORA
JUAN FELIPE SALCEDO SANDOVAL.**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero de sistemas**

**Director
JORGE LUIS CHACÓN
Ingeniero Mecánico**

**Codirector
MANUEL GUILLERMO FLORES
Ingeniero de sistemas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
BUCARAMANGA
2.007**

*A Dios por darme tantas cosas lindas,
incluyendo esta oportunidad.*

*A mi madre Ana Elcida Mora, bastión
fundamental de lo que soy y ejemplo de
superación.*

*A mi amor Gina Paola Castellanos, voz de
aliento en momentos difíciles y testigo de
mis logros.*

JOSE LUIS BARBOSA MORA

*A Dios
A mis padres
A mi amor.*

JUAN FELIPE SALCEDO SANDOVAL

AGRADECIMIENTOS

A PhD. Jorge Luís Chacón, director del proyecto, por su incondicional apoyo, amistad y su constante confianza en el proyecto.

A Manuel Guillermo Flores Becerra, Ingeniero de Sistemas, Codirector del proyecto y a sus asistentes, principalmente Mónica Rivera, por toda la colaboración brindada para la obtención de este logro

A la Universidad Industrial de Santander, por darnos la oportunidad de formarnos profesionalmente y ser motor de desarrollo para nuestra región.

A PhD. Argentino Norbeto Nigrio, eminencia en la materia, que muy generosamente soportó nuestro proyecto, aportando información de sus trabajos de Modelado buscando el desinteresado compartir del conocimiento en pro del crecimiento del pueblo latinoamericano.

A nuestros familiares, por brindarnos todo su apoyo y cariño durante el desarrollo de este trabajo.

A todos nuestros amigos, por su constante motivación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO	22
1.1 ANTECEDENTES	22
1.2 CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA	24
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	25
1.4 OBJETIVOS	26
1.4.1 Objetivo general.	26
1.4.2 Objetivos específicos.	26
1.4.3 Justificación de la solución.	27
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	29
2.1 GENERALIDADES DE LOS MOTORES DE COMBUSTION INTERNA	29
2.2 CLASIFICACION DE LOS MOTORES	30
2.3 PARAMETROS DE OPERACION DE UN MOTOR	32
2.4 CICLOS DE LOS GASES DE LOS MCI	33
2.4.1 Ciclo Otto Estándar de Aire.	34
2.4.2 Ciclo Diesel Estándar de Aire.	36
2.4.3 Ciclo dual estándar de aire.	38
2.5 CICLOS REALES DE LOS MCI 4T ECH	41

2.5.1	Termodinámica de Mezclas de Aire-combustible.	45
3	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DEL MOTOR	46
3.1	MODELO GEOMÉTRICO DEL MOTOR	47
3.2	MODELOS MATEMÁTICOS	48
3.2.1	Modelo de Compresión-Expansión (modelo del cilindro).	48
3.2.2	Modelo de combustión (Adición de calor)	51
3.2.3	Modelo de admisión-escape.	59
3.2.4	Parámetros de operación de un motor.	61
4	FASE DE INICIO DEL SOFTWARE	62
4.1	FLUJO DE REQUISITOS	62
4.1.1	Modelo del dominio.	62
4.1.2	Listado de funcionalidades.	63
4.1.3	Listado de actores.	63
4.1.4	Diagrama de casos de uso.	63
4.1.5	Listado final de casos de uso.	70
4.2	FLUJO DE ANALISIS	70
4.2.1	Análisis general de casos de uso.	71
4.3	FLUJO DE DISEÑO	78
4.3.1	Descripción del ámbito del motor.	78
4.3.2	Descripción del ámbito de simulación.	81

5	FASE DE ELABORACION DEL SOFTWARE	83
5.1	FLUJO DE REQUISITOS	83
5.1.1	Consultar datos.	83
5.1.2	Graficar variables.	84
5.1.3	Diagrama de casos de uso final.	85
5.2	FLUJO DE ANALISIS	87
5.2.1	Simular escenario real.	87
5.2.2	Consultar datos.	90
5.2.3	Graficar variables.	92
5.3	FLUJO DE DISEÑO	94
5.3.1	Ámbito de los modelos de la simulación Ideal.	94
5.3.2	Ámbito de los modelos de la Simulación Real Isentrópica.	95
5.3.3	Ámbito de los modelos de la simulación real.	96
5.3.4	Ámbito de interfaz de usuario.	97
5.4	FLUJO DE PRUEBAS	100
6	FASE DE CONSTRUCCION	102
6.1	FLUJO DE IMPLEMENTACION	102
6.1.1	Crear escenario.	102
6.1.2	Editar escenario.	105
6.1.3	Simular escenario ideal.	107

6.1.4	Simular escenario real.	112
6.1.5	Graficar variables.	118
6.1.6	Consultar datos.	121
6.2	FLUJO DE PRUEBAS	124
7	HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA	131
7.1	HARDWARE.	131
7.2	SOFTWARE.	131
8	CONCLUSIONES	132
9	RECOMENDACIONES	133
	BIBLIOGRAFÍA	134

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Flujo de información	25
Figura 2. Fotografía genérica de un MCI.	29
Figura 3. Cuatro tiempos del motor de combustión interna	31
Figura 4. Motor de dos tiempos	32
Figura 5. Diagrama PV y TS para el ciclo Otto estándar de aire	35
Figura 6. Diagrama PV y TS para el ciclo Diesel estándar de aire*	37
Figura 7. Diagrama PV y TS para el ciclo Dual estándar de aire	39
Figura 8. Diagrama indicado de un motor de 4T	44
Figura 9. Geometría básica del cilindro, pistón, biela y manivela	47
Figura 10. Diagrama de casos de uso General	64
Figura 11. Diagrama del caso de Uso "Creación de escenarios" de simulación	64
Figura 12. Diagrama del caso de uso "Edición de datos" en diferentes tipos de escenarios	66
Figura 13. Diagrama de caso de Uso "Simular escenario"	68
Figura 14. Diagrama del caso de uso "Consulta de parámetros".	69
Figura 15. diagrama de estados para un objeto simulación de un MCI 4T.	71
Figura 16. Diagrama de subestados de un ciclo ideal Otto	72
Figura 17. Diagrama de subestados de un ciclo ideal Diesel.	72
Figura 18. Diagrama de subestados del Ciclo dual	73
Figura 19. Diagrama de actividades del caso de uso simular escenario	74
Figura 20. Diagrama de estados del caso de uso "crear escenario"	75
Figura 21. Diagrama de actividades del caso de uso "crear escenario"	76
Figura 22. Diagrama de Estados Para el caso de Uso "Editar Datos"	76
Figura 23. Diagrama de actividades para el caso de uso "Editar Datos Geométricos"	77
Figura 24. Diagrama de clases del Ámbito Motor	80
Figura 25. Diagrama de clases del ámbito simulador	82
Figura 26. Diagrama del caso de Uso "Graficar Variables"	84
Figura 27. Diagrama de casos de uso final del sistema	86
Figura 28. Diagrama de actividades de simulación de un escenario real.	89
Figura 29. Diagrama de estados del caso de uso "Consulta de Datos"	90
Figura 30. Diagrama de actividades del caso de uso "Consulta de Datos"	91
Figura 31. Diagrama de estados del caso de uso "Graficar Variables"	92
Figura 32. Diagrama de actividades del caso de uso "Graficar Variables"	93
Figura 33. Diagrama de clases usadas para la solución de la Simulación de escenarios de tipo ideal.	94

Figura 34. Diagrama de clases usadas para la solución de la Simulación de escenarios de tipo Real	95
Figura 35. Diagrama de clases usadas para la solución de la Simulación de escenarios de tipo Real.	96
Figura 36. Diagrama de clases del ámbito Interfaz de usuario.	98
Figura 37. Diagrama de clases heredadas a partir de la clase Vista_Motor.	99
Figura 38. Diagrama de secuencia del caso de uso Crear Escenario	104
Figura 39. Diagrama de secuencia del caso de uso Editar Escenario	105
Figura 40. Diagrama de secuencia del caso de uso Simular Escenario Ideal	109
Figura 41. Diagrama de secuencia del caso de uso Simular Escenario Real	113
Figura 42. Diagrama de secuencia del caso de uso Graficar Variables	119
Figura 43. Diagrama de secuencia del caso de uso Consultar Datos	122
Figura 44. Comparación entre presiones	124
Figura 45. Comparación de temperaturas	124
Figura 46. Comparación Temo de No quemado	125
Figura 47. Comparación de temperaturas de quemado	125
Figura 48. Comparación entre las Fracciones de Quemado	125
Figura 49. Comparación de los trabajos producidos	126
Figura 50. Comparación de las pérdidas de calor	126
Figura 51. Comparación de la entalpía perdida por la fuga de gases	126
Figura 52. Diagrama indicado "presión ángulo de giro" para un adelanto de chispa de 0 grados.	128
Figura 53. Diagrama indicado "presión ángulo de giro" para un adelanto de chispa de 15 grados.	129
Figura 54. Diagrama indicado "presión ángulo de giro" para un adelanto de chispa de 30 grados.	129
Figura 55. Diagrama indicado "presión ángulo de giro" para un adelanto de chispa de 45 grados.	130
Figura 56. Diagrama indicado "presión ángulo de giro" para un adelanto de chispa de 60 grados.	130

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Constantes para calcular las propiedades de gas ideal según el tipo de combustible	49
Tabla 2. Datos de las constantes de equilibrio	51
Tabla 3. Ficha técnica caso de uso editar escenario ideal.	65
Tabla 4. Ficha técnica caso de uso editar datos geométricos.	67
Tabla 5. Ficha técnica caso de uso simular escenario ideal.	69
Tabla 6. Ficha técnica caso de uso consultar parámetros.	70
Tabla 7. Casos de uso según prioridad	70
Tabla 8. Ficha técnica caso de uso consultar datos.	84
Tabla 9. Ficha técnica caso de uso graficar variables.	85
Tabla 10. Resultados primera prueba escenario ideal.	100
Tabla 11. Resultados segunda prueba escenario ideal.	101
Tabla 12. Valores estimados de la presión media efectiva, potencia efectiva calculada y presión máxima, para cada valor del ángulo de adelanto de chispa:	128

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ecuaciones de estado para gases ideales.	136
Anexo B. Manual de usuario e instalación	148

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área de transferencia de Calor
a, b, c	Valores correspondientes al primero, segundo y tercer término de la reacción de una ecuación polinómica de segundo grado.
A, B, C, D, E	Constantes para el cálculo de las constantes de equilibrio de las ecuaciones de Olikara y Borman.
AAA	Adelanto de la apertura de la válvula de admisión.
AAE	Adelanto de la apertura de la válvula de escape.
a_i	Constantes para el cálculo de las propiedades Termodinámicas.
A_{ij}	Número de átomos del elemento i en especies j .
a_o, b_o, c_o	Constantes utilizadas para el calculo de las propiedades del combustible.
$b^{\circ}i$	Número de átomos del elemento i en el reactante.
B_i	Número de átomos del elemento i en los productos.
C	Porción de masa perdida por la camisa del cilindro a través de los anillos (blowby)
C_p	Calor específico a presión constante.
C_v	Calor específico a volumen constante.
D_c	Diámetro del Cilindro.
ECP	Subprograma que sirve para calcular las propiedades de la mezcla en el cilindro luego de la combustión. (Mezcla de Productos de la Combustión en Equilibrio, su nombre proviene de sus siglas en ingles).
F	Relación Combustible-aire Real.
f	Fragmento de Masa residual.
$FARG$	Subprograma que sirve para calcular las propiedades de la mezcla en el cilindro antes de la combustión. (Mezcla Aire Combustible y Gases Residuales, su nombre proviene de sus siglas en ingles).
F_s	Relación Combustible-aire Estequiométrica.
G	Energía libre de Gibas.
H	Entalpía de la Mezcla.
H	Entalpía intensiva.
h_i	Entalpía intensiva de los componentes de la Mezcla
J	Numero total de componentes de la Mezcla.
K	Exponente Politrópico Adiabático
K	Constante de equilibrio de la reacción
K_p	Constantes de equilibrio de Olikara y Borman
L	Desplazamiento Máximo del Pistón.

M	Masa de la mezcla
M	Peso molecular de la Mezcla.
M_i	Masa de los componentes de la mezcla.
N	Moles en algunos casos se empleará n para especificar las moles, se aclarará según contexto.
N	Moles de la mezcla.
N	Velocidad rotacional del cigüeñal.
N_b	Moles de la Mezcla quemada.
N_i	Moles de los componentes de la mezcla.
U_n	Moles de la Mezcla quemada.
P	Presión.
P_a	Presión al final de la admisión del ciclo estándar de aire.
P_b	Presión al final de la expansión del ciclo estándar de aire.
P_b	Presión de la Mezcla quemada.
P_c	Presión al final de la compresión del ciclo estándar de aire.
P_i	Presión indicada
PMI	Punto Muerto Superior.
PMS	Punto Muerto Inferior.
P_o	Presión estandar.
P_u	Presión de la Mezcla no quemada.
P_z	Presión al final de la combustión del ciclo estándar de aire.
Q	Calor
q_1	Calor de entrada en los ciclos estándar de aire.
q_2	Calor de salida en los ciclos estándar de aire.
R	Relación de compresión.
R_{bs}	Relación entre el desplazamiento del pistón y la longitud de la biela.
RCA	Retardo al cierre de la válvula de admisión.
RCE	Retardo al cierre de la válvula de escape.
$AACH$	Angulo de Avance de la chispa.
S	Entropía de la Mezcla.
S	Entropía intensiva.
$S(\theta)$	Desplazamiento en Función del ángulo del cigüeñal.
s_i	Entropía intensiva de los componentes de la Mezcla
S_i°	Entropía del componente a la presión estandar.
T	Temperatura.
T_a	Temperatura al final de la admisión del ciclo estándar de aire.
T_b	Temperatura al final de la expansión del ciclo estándar de aire.
T_b	Temperatura de la Mezcla quemada.
T_c	Temperatura al final de la compresión del ciclo estándar de aire.

T_u	Temperatura de la Mezcla no quemada.
T_z	Temperatura al final de la combustión del ciclo estándar de aire.
U	Energía interna de la Mezcla.
U	Energía interna intensiva.
u_i	Energía interna intensiva de los componentes de la Mezcla
u_m	Velocidad Media del Pistón.
V	Volumen.
$V(\theta)$	Volumen en Función del ángulo del cigüeñal.
V_a	Volumen al final de la admisión del ciclo estándar de aire.
V_b	Volumen al final de la expansión del ciclo estándar de aire.
V_b	Volumen de la Mezcla quemada.
V_c	Volumen al final de la compresión del ciclo estándar de aire.
V_c	Volumen en el Punto Muerto Superior o volumen de la cámara de combustión.
v_i	Cantidad de moles según producto de la combustión.
v_i'	Cantidad de moles de reactante.
v_i''	Cantidad de moles del Producto.
V_s	Volumen de trabajo Geométrico.
V_T	Volumen Total del Cilindro.
V_u	Volumen de la Mezcla no quemada.
V_z	Volumen al final de la combustión del ciclo estándar de aire.
X	Fracción de Calor suministrada por la mezcla aire combustible.
X_i	Fracción de masa del componente en la mezcla.
Y_i	Fracción molar del componente en la mezcla.
Y_r	Fracción de masa residual.
B	Cantidad de moléculas de Hidrógeno en el combustible.
Γ	Cantidad de moléculas de Oxígeno en el combustible.
Δ	Cantidad de moléculas de Nitrógeno en el combustible.
η_t	Eficiencia térmica.
η_v	Eficiencia volumétrica.
Θ	Ángulo de giro del cigüeñal.
Θ_b	Angulo de duración de la combustión.
Θ_s	Angulo de comienzo de la combustión.
λ	Relación de Presión P_z/P_c .
λ_i	Operadores de Lagrange.
μ_j	Potencial Químico de las especies.
P	Relación de inyección.
Φ	Relación Combustible-Aire Equivalente
Ω	Velocidad angular

ϵ Cantidad estequiométrica de moles de combustible
 α Cantidad de moléculas de Carbono en el combustible.
 ϵ Relación de compresión en los modelos estándar de aire.

RESUMEN

TÍTULO:

HERRAMIENTA EDUCATIVA EN LA WEB BASADA EN LA SIMULACION DE LOS PROCESOS TERMOFLUIDODINAMICOS DE MOTORES DE COMBUSTION INTERNA, SIMTA 1.0*

AUTORES

José Luí́s Barbosa Mora.

Juan Felipe Salcedo Sandoval**.

PALABRAS CLAVES

Motores de Combustión Interna de Cuatro Tiempos, Ciclos Termodinámicos, Admisión, Compresión, Combustión, Expansión, Escape, ciclos reales e ideales, Simulación, Java.

DESCRIPCIÓN

El objetivo de este proyecto es dotar a la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander y al público en general, de un software que permita simular el funcionamiento de las máquinas de combustión interna "SIMTA 1.0", que pueda utilizarse como complemento de la asignatura "Maquinas Térmicas Alternativas" y que sea de fácil acceso desde la Web.

La herramienta se realizó empleando la metodología del proceso unificado de desarrollo de software, con una arquitectura de programación por capas y orientada a objetos utilizando **java** como lenguaje de programación, lo cual garantiza el acceso a la herramienta vía web desde diversas plataformas.

El modelado matemático se obtuvo teniendo en cuenta la formulación con base en ecuaciones empíricas y semi-empíricas de cada uno de los procesos fundamentales que rigen el comportamiento de los ciclos reales e ideales presentes en un motor de combustión interna (MCI) de cuatro tiempos (4T) encendido por chispa (ECH),

El resultado es un software de fácil manejo que permite simular diversos tipos de motores, presentando los datos obtenidos en un formato claro y de rápida interpretación. Estas características hacen a la herramienta útil tanto para estudiantes, profesores y público en general, que tenga un conocimiento básico en la materia, facilitando el análisis y comprensión del funcionamiento de MCI 4T ECH.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica y Escuela de Ingeniería de Sistemas, Director PhD. Jorge Luis Chacón Velasco

ABSTRACT

TITLE:
EDUCATIONAL WEB TOOL BASED ON THE SIMULATION OF FLUIDTHERMODYNAMICS ON INTERNAL COMBUSTION ENGINES, SIMTA 1,0*

AUTHORS

José Luí́s Barbosa Mora.
Juan Felipe Salcedo Sandoval**.

KEY WORDS

Four Strokes Internal Combustion Engines, Thermodynamic cycles, Intake, Compression, Combustion, Expansion, Exhaust, Real and Ideal Cycles, Simulation, Java.

DESCRIPTION

The goal of this work is to provide the Mechanical Engineering School of the Universidad Industrial de Santander and the public in general with software that allows the simulation of the functioning of internal combustion machines, called SIMTA 1,0 that can be used as a complement for the subject "Alternative Thermal Machines" and with easy web access.

The tool was made using the Unified Process Methodology for Software Development with a program architecture by layers oriented to objects using Java as the programming language, which grants the access to the tool via the web from different platforms.

The mathematical model was achieved by the formulation based in empirical and semi-empirical equations of each of the fundamental processes that rule the behaviour of the real and ideal cycles that exist in a Spark Ignited (SI) four stroke (4S) Internal combustion Engine (ICE).

The result is an easy-use software that permits the simulation of a variety of engines, presenting the obtained results in a clear format with easy interpretation. This characteristics make this tool useful for students, teachers and public in general with a basic knowledge about internal combustion engines easing the analysis and comprehension of SI 4S ICE.

* Graduation Project

** Physical and Mechanical Engineering Faculty. Mechanical Engineering School and System Engineering School, Director. PhD. Jorge Luis Chacón Velásco.

INTRODUCCIÓN

La tendencia en innovación y desarrollo ha demostrado que la velocidad en la que evolucionan, no permite que los países se mantengan siempre expectantes en la adquisición de tecnologías obsoletas desechadas por los países desarrollados, por un ahorro ficticio, mientras no generemos soluciones, por una parte rápidas para el mercado cambiante acordes a nuestro entorno y por la otra ajenas a la influencia extranjera, no vamos a estar a la altura competitiva para las complicadas redes productivas actuales.

El hombre en su afán de conocer el comportamiento de la naturaleza ha convertido en modelos matemáticos la mayoría de los procesos que maneja de manera rutinaria. Para emplear este tipo de modelos, el hombre de la actualidad, se vale de un computador; actualmente, el uso de herramientas tecnológicas se presenta en todos los campos de la vida: la economía, la epidemiología, la moda, la música y la ingeniería. Sin este elemento resultaría imposible recrear las complejas interacciones de los fenómenos que nos rodean.

El empleo de métodos y herramientas computacionales para el desarrollo del modelado de los motores de combustión interna, se ha dado en la industria desde los años 60, pero con un aumento en su uso desde la década de los 80, ha permitido grandes avances gracias a la facilidad de experimentación por parte de los diseñadores y constructores llevando los diseños a los límites del óptimo desempeño, reducción de tiempos, economía y ecología, tan útil y requerido hoy en día.

En la Escuela de Ingeniería Mecánica, muchas asignaturas se están beneficiando con la introducción de paquetes de software versátiles y amigables, que permiten al estudiante y al profesor familiarizarse con el uso de las herramientas computacionales y a su vez aplicarlas a la solución de problemas de ingeniería.

Este trabajo de grado se elaboró con la intención de fortalecer y motivar el desarrollo de la investigación en el campo de los motores, para que a futuro, se permita realizar mejoras en el funcionamiento de los mismos y dar solución a la innumerable cantidad de interrogantes que rodean el uso sostenible de los motores de combustión interna.

El software modela un motor multicilíndrico, teniendo en cuenta los principales fenómenos de flujo en toberas y tubería del sistema de admisión y escape, procesos químicos, termodinámicos, dinámica y ciclo de trabajo de la mezclas en el cilindro; La herramienta se realizó empleando la metodología del proceso unificado de desarrollo de software, con una arquitectura de programación por capas y orientada a objetos utilizando **java** como lenguaje de programación, lo cual garantiza el acceso a esta, vía web desde diversas plataformas.

“SIMTA 1.0” está diseñada para todos los alumnos de ingeniería y público interesado en el funcionamiento de los motores de combustión interna y busca encaminar a los usuarios con curiosidad investigativa a probar sus conocimientos, y ponerlos en práctica en un ambiente virtual. Esperando que este tipo de trabajos permitan, en un futuro, entrar a competir en la solución a los problemas de desarrollo de motores de combustión interna de baja contaminación y alta potencia.

Es hora que los miembros de una sociedad en desarrollo mejoren y aumenten sus facultades para la innovación, optimizando el capital humano, como herramienta que permita obtener ventajas competitivas contra las industrias de los países desarrollados, en campos aún no explotados o subvalorados para que dicha ventaja permita el progreso de la sociedad

1 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO

El documento está organizado acorde a las fases presentes en la metodología del proceso unificado de desarrollo de software.

En el capítulo 1 se encuentra la introducción, una breve descripción, objetivos y motivos que llevan a la realización de este trabajo de grado.

En el capítulo 2 se registra el marco teórico, en donde se describen todas las bases para comprender la formulación y métodos empleados en la realización de este trabajo.

En el capítulo 3 se explican los modelos matemáticos que describen el funcionamiento de un motor.

Los capítulos 4, 5 y 6 describen las fases de Inicio, Elaboración y Construcción respectivamente, en las cuales se muestran documentados los diagramas UML obtenidos en cada una de las fases y las pruebas realizadas a la herramienta.

Finalmente en los capítulos 7, 8, 9 y 10 se muestran las herramientas requeridas para el desarrollo del sistema, las conclusiones, recomendaciones y bibliografía respectivamente.

1.1 ANTECEDENTES

La simulación de los MCI se encuentra en proceso de desarrollo y aunque se han logrado grandes adelantos, existen parámetros y factores de diseño aun por incluir. Esfuerzos internacionales por lograr simular fenómenos más complejos, se evidenciaron en la última conferencia internacional en el diagnóstico y modelado de motores de combustión interna (**COMODIA 2004**) llevada a cabo en Yokohama, Japón.

Las grandes empresas automotrices, poseen departamentos especializados en simulación de motores de combustión interna (MCI), los cuales facilitan, economizan y agilizan la evolución de nuevos motores.

En la escuela de Ingeniería Mecánica se han realizado numerosos proyectos enfocados en la simulación de procesos y comportamientos, en las diferentes ramas que cubre la carrera, tanto de carácter investigativo como de carácter pedagógico.

La alternativa pedagógica es la adquisición por parte de la escuela de ingeniería mecánica de software especializado para la asignatura Máquinas Térmicas Alternativas (MTA), opción que se descarta, debido a los altos costos de este tipo de software.

Previo al presente proyecto se realizó en la escuela de ingeniería mecánica un proyecto de simulación de los ciclos termodinámicos de los MCI de 4T, SICICLOTER 1.0, durante los años 2002-2003, por los estudiantes Alex Iván Montero Trespalacios y Elkin Arley Rodríguez Chacón. Dicho proyecto se realizó en el lenguaje de programación Visual Basic, este sirve como punto de partida para los procesos de simulación a los MCI de 4T.

Tras la elaboración del simulador SICICLOTER 1.0 se detectaron debilidades que hacen pensar que la implementación de los modelos matemáticos seleccionados así como la arquitectura elaborada para el desarrollo de la herramienta no fueron las mejores. Entre estas debilidades podemos citar la no coincidencia de los valores mostrados por la herramienta de las variables de la simulación (presión, temperatura, entropía, entalpía ,etc.) con las gráficas de las mismas variables obtenidas con la misma herramienta.

En la actualidad y anterior a la propuesta de este proyecto, existe un sitio web llamado MEI, que cuenta con información de materias como: sistemas operativos I y II; principalmente, se busca que el estudiante amplíe su aprendizaje presencial a uno complementado por un apoyo virtual, y así lograr que este proceso se efectúe no sólo en las horas de clase asignadas, sino que esté abierto y disponible en cualquier momento en la red a través del MEI.

El MEI integra todos los contenidos de las materias citadas, anteriormente, así como un Chat un sistema para calificación vía Web, correo electrónico y algunas animaciones que permiten al usuario formarse una mejor idea de los temas contenidos en dichas materias. Todo esto tiene un propósito: que el estudiante se sienta en un aula virtual y tenga las herramientas necesarias para llevar a cabo su proceso de aprendizaje.

En el proceso de aprendizaje ocupa un lugar importante la experimentación, y aunque el MEI cuenta con animaciones que permiten ampliar el entendimiento de los estudiantes sobre algunos temas específicos, no permite realizar experimentos sobre dichos temas para así ampliar su universo de conocimiento sobre los mismos.

Este proyecto busca generar un espacio en el MEI, donde los estudiantes de la materia MTA, puedan realizar experimentos virtuales interactuando, directamente, con un simulador que les permite ampliar el horizonte de conocimiento en los diferentes temas tratados en la materia, y de esta manera, abrir una vía para que se generalice la utilización del MEI, a materias de carreras diferentes a Ingeniería de Sistemas.

1.2 CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

La materia de Máquinas Térmicas Alternativas (MTA) se encarga de la formación profesional de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica, permitiendo aplicar y afianzar los conocimientos adquiridos tanto en materias de la línea de diseño como las de la línea térmica, siendo fundamental para el entendimiento de los motores.

La materia se encuentra programada para el octavo semestre de la carrera de Ingeniería Mecánica y tiene como objetivo principal que el estudiante logre, los fundamentos por medio de clases teóricas y de laboratorios semanales, apropiarse de la teoría y la tecnología que rigen el funcionamiento de las MTA.

El proceso académico comienza con un periodo de conferencias dictadas por el docente en donde se pretende fortalecer a los estudiantes en la aplicación de los conocimientos adquiridos durante su carrera, de manera que estén en capacidad de observar una MTA como un compendio donde se conjugan todas las materias vistas y para que afronten un problema de análisis o de optimización de un diseño de MTA con visión ingenieril, siguiendo un proceso científico que les garantice el buen desenvolvimiento en su futuro profesional.

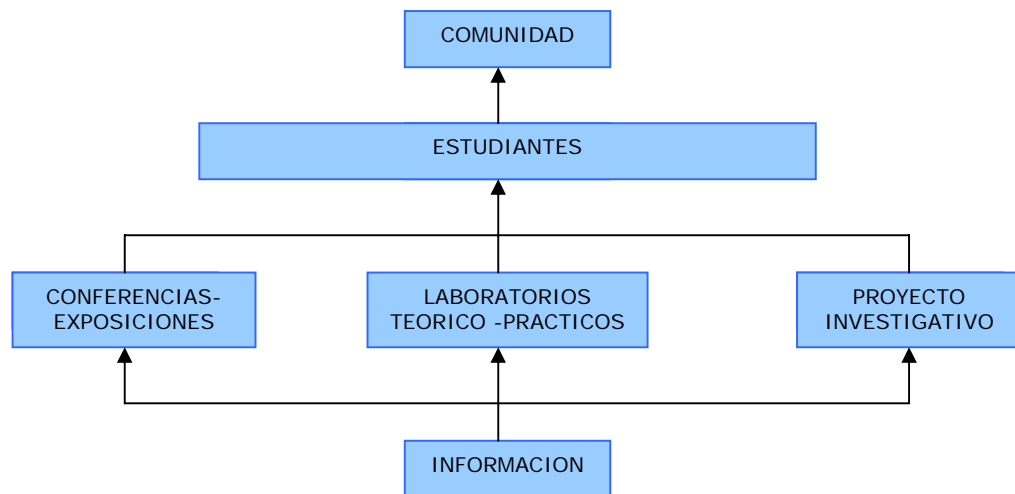
Luego de cumplir con la primera etapa se tratan cada uno de los sistemas que concurren en el funcionamiento de los MTA. Para esta etapa, se recurre a conferencias y seminarios realizados por los alumnos que busca garantizar que el estudiante desarrolle habilidades cognoscitivas y de comunicación.

Como tercera etapa, directamente, ligada a las dos anteriores se realizan laboratorios semanales, realizados en el laboratorio de MTA que se encuentra en la escuela de ingeniería mecánica, que permiten al estudiante por medio de la práctica apropiarse de los temas vistos, teniendo como guía al docente. Así mismo este laboratorio sirve para acercar al estudiante a la realidad existente en la aplicación de los modelos teóricos.

Además de la teoría y la práctica, en la materia se recurre al desarrollo de un proyecto final, donde se busca fomentar en el estudiante el espíritu investigativo, se programa una reunión periódica, a la que asiste el estudiante con el docente, para estudiar la evolución del proyecto. Esta metodología permite al estudiante acercarse a las fuentes de información y al mismo tiempo preparar el camino para futuros proyectos de grado que posicionen a la Universidad y a la Escuela de Ingeniería Mecánica como centro de innovación científica y tecnológica.

Finalmente, en la figura 1 se muestra el flujo de información hacia los estudiantes, por medio de conferencias, seminarios, laboratorios teórico-prácticos y proyectos investigativos. Información que, finalmente, debe ser transmitida a la comunidad interesada, con el fin de lograr un objetivo fundamental como es ayudar en el desarrollo y bienestar del sector y de la nación.

Figura 1. Flujo de información



Autores proyecto.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema, desde el punto de vista académico, hace referencia a la falta de experiencia práctica por parte de los estudiantes que ingresan a la asignatura Maquinas Térmicas Alternativas (MTA), muchos de los cuales hasta este momento, no han tenido la oportunidad de enfrentar un análisis u optimización del diseño de una MTA verdadera en la que puedan aplicar los conocimientos adquiridos durante su carrera; de manera que actúan con incertidumbre y no se apropian de la información que se les suministra, la mayor parte de las veces no saben cómo, y que tanto afectan los factores ante las situaciones que se les presentan.

Este enfoque del problema trata de solucionarse con el desarrollo de las conferencias y seminarios, pero el tiempo dedicado a éstas, no es suficiente si se compara con la diversidad de situaciones a las que puede llegar a enfrentarse un profesional. Por tanto, esta etapa de inducción deberá fortalecerse o complementarse, en vista de su vital importancia para la preparación de los estudiantes, para lo cual, la solución más efectiva se centraría en reforzar el contenido de la materia con ejercicios prácticos, clave fundamental del presente

proyecto, centrado específicamente en brindar un apoyo por medio de la simulación a la materia MTA.

Si la etapa de inducción no es suficiente, la inexperiencia se hace manifiesta en una gran cantidad de dudas en la aplicación de los conceptos adquiridos. Para atender a esta situación, recurren principalmente a los asesores y al material bibliográfico, dando como resultado un proceso ineficiente en la toma de decisiones que tendrían que ser de rápida solución por parte del ingeniero.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general.

Elaborar una herramienta educativa informática para la web, que ayude a los estudiantes a realizar las experiencias necesarias para aprender la teoría de la materia Máquinas Térmicas Alternativas (MTA) a manera de laboratorio virtual, que les permita tanto profundizar en el conocimiento, como validar el modelo del funcionamiento de los motores, mediante la simulación del trabajo de los mismos de acuerdo a las diferentes características de diseño y operación.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Desarrollar una arquitectura base consistente para la herramienta, orientada a la implementación de modelos matemáticos, empleando el lenguaje de modelado unificado (UML) y el paradigma de la programación orientada a objetos.
- Elaborar una herramienta informática que permita simular los ciclos de compresión, combustión y expansión de escenarios que representen motores ideales con adición de calor a volumen constante, a presión constante y dual (adición de calor a presión y volumen constante), así como la simulación de un ciclo completo (admisión, compresión, combustión, expansión y escape) de escenarios que representen motores reales¹ y de la misma forma realizar un seguimiento a algunas variables que describen el comportamiento del motor, como es el caso de la presión, temperatura, entropía, entalpía, entre otras, por medio de la representación tanto numérica como gráfica de las mismas.
- Permitir que la herramienta sea accedida por el usuario a través de la web por medio de diversas plataformas, especialmente Windows y Linux, facilitándole

¹ Al hablar de motores ideales nos referimos a aquellos en los cuales no hay pérdida de energía, y al hablar de motores reales hacemos mención a aquellos motores que sufren pérdida de energía que es lo que ocurre en los motores realmente.

un medio de uso de toda la operatividad del software descrita en el objetivo inmediatamente anterior a éste.

- Elaborar la respectiva documentación de apoyo de la herramienta a desarrollar que incluya: Manual de instalación, manual de usuario y manual de diseño.

1.4.3 Justificación de la solución.

Dando respuesta a la problemática presentada, anteriormente, en lo referente a la dificultad de experimentación que tienen los estudiantes de la materia MTA, surgió la idea de desarrollar una herramienta informática que les ayude en el proceso de aprendizaje de algunos temas de la materia.

Se busca desarrollar una herramienta informática que sirva de complemento para el aprendizaje de la materia MTA, permitiendo a los estudiantes y personas interesadas desarrollar diversas simulaciones del funcionamiento de un motor de combustión interna de cuatro tiempos (MCI 4T) fortaleciendo el conocimiento de cada una de estas personas.

Así mismo se busca que dicha herramienta trabaje satisfactoriamente en diversas plataformas (fundamentalmente Windows y Linux), para que los medios de experimentación sean aun mayores, permitiendo utilizar la herramienta SIMTA 1.0 desde equipos que cuenten con cualquier sistema operativo, por esto se ha decidido trabajar con el lenguaje de programación java, el cual permite crear applets, que son aplicaciones que corren bajo ambientes webs, y garantizan que la herramienta sea multiplataforma y totalmente orientada a objetos, lo cual permite crear una arquitectura confiable..

Un MCI 4T presenta una serie de fenómenos, estos cuentan con más de un modelo matemático que describe de forma muy aproximada su funcionamiento, por lo tanto es de gran importancia desarrollar una arquitectura robusta del sistema, que permita el crecimiento de la misma en posteriores proyectos, por medio de la implementación (programación) de otros modelos matemáticos, los cuales ampliarán las posibilidades de simulación.

Este proyecto desarrollará un escenario de simulación que contenga modelos que reflejen el proceso de adición de calor a presión constante, adición de calor a volumen constante, compresión isentrópica y el modelo geométrico del motor, que permitirán simular motores ideales Otto, Diesel y Duales. Estos modelos resueltos durante los tiempos de compresión, combustión y expansión. Así mismo se desarrollará un escenario de simulación real que contenga un modelo matemático para cada uno de los fenómenos fundamentales en los MCI 4T, entre los que se

encuentran; el modelo de los múltiples de admisión y escape, modelo de las válvulas de admisión y escape y modelo del cilindro, este último, a su vez, contará con un modelo de transferencia de calor (Woshni modificado), de combustión (Wiebe, Watson), modelos termodinámicos para la composición química y modelo geométrico.

Por medio de la herramienta se busca obtener los parámetros de operación de un motor (potencia al freno, trabajo del ciclo indicado, eficiencia mecánica, curvas características, etc.) a partir de los datos geométricos, termodinámicos, de operación y de simulación de dicho motor y presentar los datos de las variables incluidas en la simulación de forma tabular así como por medio de gráficas que permitan hacer un seguimiento más preciso al proceso que se presenta en un motor durante su funcionamiento.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 GENERALIDADES DE LOS MOTORES DE COMBUSTION INTERNA

Los motores de combustión interna son las máquinas térmicas más utilizadas hoy en día. Permiten la producción de potencia a partir de la energía química contenida en el combustible. Este ha sido el principal motor térmico del Siglo XX, sin embargo su status ha de cambiar en el siglo XXI. A pesar de que la tecnología de este tipo de motor tiene poco más de 100 años, son muchos los cambios que ya se han producido y muchos más los cambios aún por producirse.

Los principales factores que llevan a pensar esto son:

- Altos niveles de contaminantes producidos por una combustión poco controlada.
- Niveles de eficiencia relativamente pobres.
- Problemas crecientes en cuanto a disponibilidad de combustibles en base de origen no renovable.

Figura 2. Fotografía genérica de un MCI.



<http://images.google.com.co/images?q=photos+engines>

Los MCI se diferencian de otras máquinas térmicas en que la combustión se lleva a cabo dentro de las partes productoras de trabajo, tienen una mayor eficiencia máxima, una menor relación peso por unidad de potencia (excepto en unidades de más de 10000 HP), su sistema de enfriamiento maneja una menor cantidad de calor. Entre sus mayores problemas se encuentra el reto de encontrar una mayor economía y una disminución en los niveles de toxicidad.

El mayor número de motores de combustión interna está asociado a los vehículos. Es allí donde se hace necesario realizar los cambios más radicales, pues por su

simple número, el impacto en cuanto a emisiones y consumo global de combustibles es muy significativo.

Los MCI son máquinas reciprocantes, esto quiere decir que funcionan con un movimiento de vaivén. Estas se clasifican en: de efecto sencillo o de doble efecto.

Los motores son del tipo simple efecto y de desplazamiento positivo, puesto que el intercambio de trabajo ocurre debido al movimiento de los límites del sistema variando el volumen.

2.2 CLASIFICACION DE LOS MOTORES

Los motores reciprocantes de combustión interna son dispositivos productores de trabajo, de fluido constante, circuito abierto y se clasifican según:

- a) Tipo de ciclo teórico utilizado
 - i. Ciclo Otto.
 - ii. Ciclo Diesel.
 - iii. Ciclo Mixto o dual.

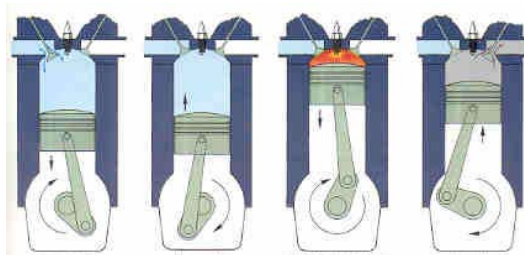
- b) Según el encendido: (depende del combustible)
 - i. La gasolina es muy volátil y con alta temperatura de ignición. Por lo tanto los ciclos Otto que funcionan con gasolina requieren de una chispa proporcionada por la bujía. Por lo tanto se les denomina motores encendidos por chispa (Ech).

 - ii. En los motores Diesel, se introduce el combustible en forma de chorro, donde se enciende al entrar en contacto con el aire caliente (a una temperatura mayor a la temperatura de auto ignición), Se les llama de encendido o ignición por compresión (EC)

- c) Según el número de recorridos por ciclos: de cuatro tiempos (4T) y de dos tiempos (2T).
 - i. Motores de 4T, emplean cuatro carreras o dos vueltas de giro del cigüeñal para realizar un ciclo termodinámico completo.
En este tipo de motor el ciclo ocurre de la siguiente manera: en el punto muerto inferior (PMI) con las válvulas cerradas comienza la compresión hasta el punto muerto superior (PMS), antes de regresar ocurre el encendido (chispa o compresión) el pistón es empujado hacia abajo por el gas a alta presión y ocurre una expansión (este recorrido es denominado tiempo o carrera de trabajo); poco antes de llegar al PMI se abre la VE hasta que el pistón regresa al PMS (este es

el tiempo de escape). Al final queda una pequeña cantidad de gases de escape calientes, un poco antes del PMI se abre la VA y un poco después se cierra la VE y se introduce masa fresca al cilindro al regresar al PMI (tiempo de admisión) mezclándose esta con los gases residuales. La VA se cierra y comienza un nuevo ciclo, a las dos últimas carreras se les llama Proceso de intercambio de gases.

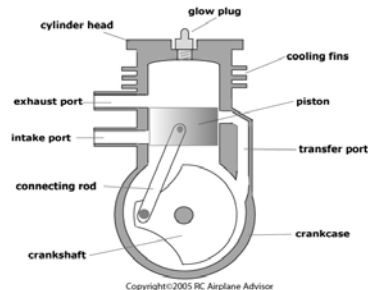
Figura 3. Cuatro tiempos del motor de combustión interna



[http://images.google.com/co/images?q=photos+4T\\$20\\$Motor](http://images.google.com/co/images?q=photos+4T20Motor)

- ii. Motores de 2T, utilizan 2 recorridos para completar un ciclo algunos disponen de válvulas (Grandes y de alta tecnología), los pequeños y sencillos tienen 2 puertos para la admisión y el escape, la apertura y cierre depende de la posición del pistón. En estos motores cuando el pistón desciende comprime la carga fresca en el carter, poco antes del PMI se abre la salida y casi simultáneamente la entrada (proveniente del carter). La entrada de masa nueva ayuda a barrer los gases de escape. Cuando el pistón sube cierra los puertos y abre la inducción, comprimiendo la carga al mismo tiempo que succiona una nueva en el carter. Con estos motores se ahorra la potencia del intercambio de gases por lo que se espera que para una cilindrada se produzca el doble de potencia, sin embargo en el cilindro quedan gases quemados y se pierde carga fresca al tener abiertos los puertos de entrada y salida simultáneamente, la eficiencia de estos motores por tanto es menor.

Figura 4. Motor de dos tiempos



[http://images.google.com.co/images?q=photos+2T\\$20\\$Motores](http://images.google.com.co/images?q=photos+2T20Motores)

Como puntos negativos tenemos que este tipo de motores consumen mucho aceite y son ruidosos por la apertura del escape, como puntos positivos encontramos que son de construcción sencilla, no tienen árbol de levas ni válvulas y el momento sobre el cigüeñal es más uniforme. Se usan en MICH como motocicletas, cierras de cadena, etc. Y en MEC como buses, motores de tracción por rieles. El número de ciclos de trabajo es igual al número de revoluciones (en el de 4T es la mitad)

2.3 PARAMETROS DE OPERACION DE UN MOTOR

En este capítulo explicaremos las relaciones geométricas y los parámetros comúnmente usados para caracterizar un motor. Los factores importantes para el usuario de un motor son:

- Las características de un motor en su rango de operación.
- El consumo de combustible en este rango de operaciones y el costo del combustible requerido.
- Ruido y polución producidos en este rango de operación.
- Costo inicial del motor y su instalación.
- Rentabilidad y durabilidad del motor, sus requerimientos en el mantenimiento, y cómo estos afectan la disponibilidad del motor y los costos operativos.

Nos vamos a enfocar en la caracterización, la eficiencia y la estimación del rendimiento volumétrico; las características del motor son diferenciadas por:

1. Máxima potencia(o máximo torque) disponible a cada velocidad en el rango de operación correcto.

2. Rango de velocidad y potencia en el cual la operación es satisfactoria.

2.4 CICLOS DE LOS GASES DE LOS MCI

El objetivo principal del presente proyecto es desarrollar un sistema que permita realizar simulaciones del funcionamiento de los motores de combustión interna de 4 tiempos por encendido a chispa multicilíndricos (MCI 4T), de tal manera que las personas interesadas en el estudio de dichos motores, y fundamentalmente los estudiantes de ingeniería mecánica de la UIS, que cursen la materia de Máquinas Térmicas Alternativas (MTA), puedan valorar la perfección de los procesos por separado y en su conjunto de un motor real, teniendo como punto de comparación los valores de rendimiento de los ciclos teóricos para poder establecer el grado de perfección de los procesos aislados de los motores y crearse una idea de la forma como pueden aumentarse la capacidad de trabajo de los ciclos presentes en el motor.

De acuerdo a lo consignado en el párrafo anterior, se pueden citar dos procedimientos básicos y fundamentales para el desarrollo del sistema como son:

- 1) Realizar la simulación de los ciclos ideales de los motores de combustión interna.
- 2) Realizar la simulación del ciclo real de un MCI 4T multicilíndrico.

El análisis de los ciclos de gases en motores de combustión interna son los que rigen los modelos ideales, por tanto vamos a iniciar con el estudio de este tipo de ciclos a partir de su transformación de la energía.

La transformación de energía calorífica en mecánica en el MCI es un proceso complejo. Su realización en condiciones reales está ligada con el surgimiento de pérdidas adicionales que se consideran en la segunda ley de la termodinámica.

Para valorar la perfección de los procesos por separado en el motor real y en su conjunto que es lo que determina el ciclo real, es necesario determinar la posible utilización del calor característico para el ciclo termodinámico, en el cual el desprendimiento de calor a fuente fría representa el único y obligatorio tipo de pérdidas. Comparando los valores de los rendimientos de los ciclos teórico y real se puede establecer con qué grado de perfección transcurren los procesos aislados en los motores, y, de esta manera, se pueden esbozar las vías para aumentar la economía y la capacidad de trabajo del ciclo.

Los ciclos ideales que mejor representan los procesos que ocurren en una máquina de combustión interna son los llamados de aire estándar. A continuación se analizarán los ciclos de aire equivalente utilizados por los MCI teniendo en cuenta las siguientes suposiciones²:

² M.S. JÓVAJ, Motores de Automóvil, Ediciones MIR, 1982 página 21.

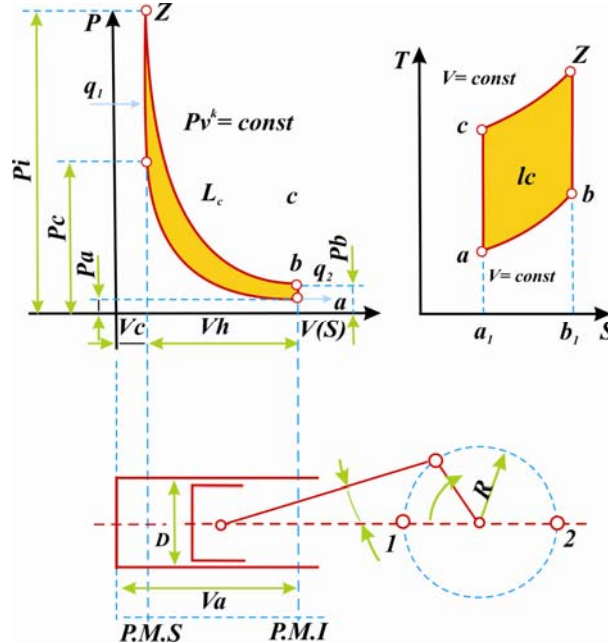
- a. En el cilindro del motor se encuentra una cantidad constante e invariable de fluido operante que efectúa un ciclo cerrado. En la realidad para realizar el ciclo es indispensable eliminar del cilindro los gases quemados en el ciclo anterior y asegurar el ingreso de una porción fresca de fluido operante. Para efectuar este proceso de intercambio de gases, no previsto en el ciclo teórico, se consume trabajo.
- b. El calor se suministra desde el exterior durante un determinado período del ciclo en correspondencia al carácter elegido para que éste transcurra. En los ciclos reales, en el período correspondiente del ciclo, el calor se obtiene como resultado de la reacción química del combustible con el oxígeno del aire. El proceso de la combustión es complejo y como consecuencia, durante la reacción química no siempre el combustible se quema por completo hasta obtener los productos finales de la combustión. Todo esto origina pérdidas adicionales de calor.
- c. El calor específico del fluido operante, que permanentemente se encuentra en el cilindro, es constante y no depende de la temperatura. En la realidad, el calor específico tiene una magnitud variable y depende de la variación de la temperatura, así como de la composición del fluido operante.
- d. Los procesos de compresión y expansión transcurren sin intercambio de calor con el medio exterior (es decir, son procesos adiabáticos). En condiciones reales estos procesos, así como el intercambio de gases y la combustión, transcurren siendo considerables las diferencias de temperaturas entre el fluido operante y las paredes del cilindro, culata y cara del pistón; como consecuencia, aparece un intenso intercambio térmico que da lugar a que se pierda parte del calor liberado durante la combustión. El rendimiento del motor caracteriza el grado de utilización del calor en el mismo, mientras que la economía del motor significa la cantidad de calor consumida por unidad de potencia.

2.4.1 Ciclo Otto Estándar de Aire³.

El ciclo Otto llamado también *ciclo de aire de volumen constante*, modela el caso especial de una máquina de combustión interna de ignición por chispa (MICH), en donde la combustión es tan rápida que el pistón apenas se mueve cuando ésta tiene lugar. Su diagrama *PV* y *TS* se muestran en la figura 5.

³M.S. JÓVAJ, op. cit., página 25

Figura 5. Diagrama PV y TS para el ciclo Otto estándar de aire



M.S. JÓVAJ, *op. cit.*, página 25

Este tipo de motores se comporta de la siguiente forma. Al comienzo del ciclo el cilindro contiene una masa, m , a la presión y temperatura del punto a (PMI). El pistón se mueve entonces hacia dentro empujado por la biela y el aire es comprimido isentrópicamente hasta el punto c (PMS). Ahora se adiciona calor instantáneamente desde una fuente externa y la presión y temperatura se incrementa a volumen constante hasta el punto z .

Enseguida el pistón se mueve hacia afuera empujado por el gas caliente y tiene lugar una expansión isentrópica hasta el volumen original en el punto b . Finalmente, el medio se enfría instantáneamente, rechazando calor al exterior a volumen constante hasta la presión y temperatura originales. Cabe notar que en este ciclo idealizado no aparecen los procesos de bombeo.

Las ecuaciones que rigen este comportamiento son las siguientes.

a. Compresión isentrópica (a - c).

$$T_c = T_a (\varepsilon)^{k-1} \quad (2.11)$$

$$P_c = P_a (\varepsilon)^k \quad (2.12)$$

Donde $\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}$ es la relación de compresión y k es el exponente adiabático.

b. Adición de calor a volumen constante (c-z).

$$q_1 = C_v(T_z - T_c) \quad (2.13)$$

Donde C_v es el calor específico a volumen constante.

c. Expansión isentrópica (z-b).

$$T_b = T_z(\varepsilon)^{k-1} \quad (2.14)$$

$$P_b = P_z(\varepsilon)^k \quad (2.15)$$

d. Rechazo de calor a volumen constante (b-a).

$$q_2 = C_v(T_b - T_a) \quad (2.16)$$

Utilizando las ecuaciones anteriores para q_1 y q_2 la *eficiencia térmica* viene dada por:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{(k-1)}} \quad (2.17)$$

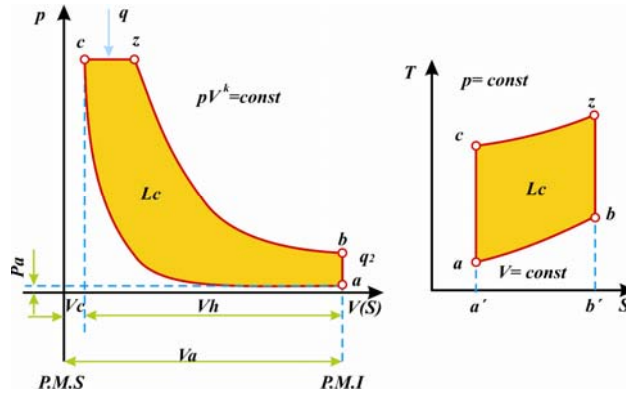
La eficiencia térmica depende exclusivamente de los parámetros geométricos ε y de las propiedades del fluido utilizado k. Como k es constante (igual a 1.4), esta expresión muestra que la eficiencia de este ciclo depende solamente de la relación de compresión ε , y aumenta junto con ésta.

La eficiencia calculada mediante la ecuación anterior es cerca de un 30% mayor que la obtenida por medición en las máquinas reales. La razón de esto es que no hemos tenido en cuenta la fricción interna, el hecho de que las máquinas reales queman un combustible y no utilizan transferencia de calor y además, se ha ignorado las pérdidas de calor y masa.

2.4.2 Ciclo Diesel Estándar de Aire.

La figura 6 muestra un ciclo Diesel estándar de aire, llamado también de presión constante, el cual idealiza los procesos que ocurren en un motor Diesel de baja velocidad.

Figura 6. Diagrama PV y TS para el ciclo Diesel estándar de aire*



M.S. JÓVAJ, op. cit., página 26.

Esta figura muestra este ciclo con suministro de calor q_1 a presión constante y la extracción del calor q_2 a volumen constante en las coordenadas PV y TS.

Los procesos que se presentan en este ciclo con su respectivo rendimiento térmico son:

a. Compresión isentrópica. (a-c).

$$T_c = T_a (\varepsilon)^{k-1} \quad (2.18)$$

$$P_c = P_a (\varepsilon)^k \quad (2.19)$$

b. Adición de calor a presión constante (c-z).

Si consideramos que $PV = NRuT$ donde $P = \frac{nRuT_c}{V_c} = \frac{nRuT_z}{V_z}$ entonces:

$$T_z = T_c \left(\frac{V_z}{V_c} \right) \quad (2.20)$$

$$q_1 = C_p (T_z - T_c) \quad (2.21)$$

Donde C_p es el calor específico a presión constante.

c. Expansión isentrópica (z-b.)

$$T_b = T_z \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{k-1} \quad (2.22)$$

$$P_b = P_z \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^k \quad (2.23)$$

d. Rechazo de calor a volumen constante. (b-a).

$$q_2 = C_v (T_b - T_a) \quad (2.24)$$

Por lo tanto el *rendimiento térmico* se puede calcular a través de:

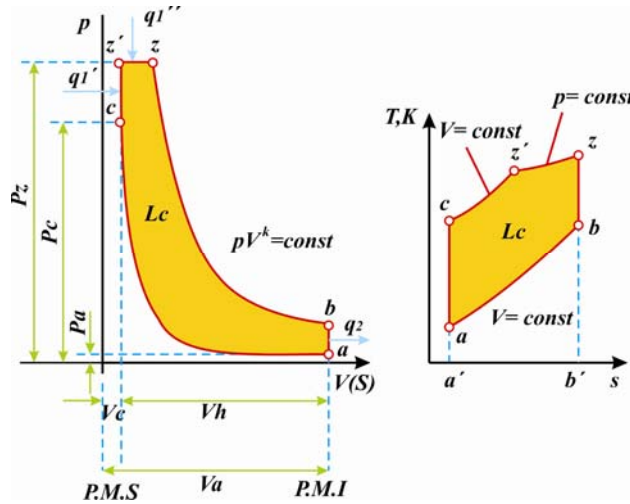
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{(\varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{(\rho)^k - 1}{k(\rho - 1)} \quad (2.25)$$

En la cual se ha definido el parámetro $\rho = \frac{V_z}{V_c}$, *la relación de inyección*, como la razón entre los volúmenes al final y al comienzo de la adición de energía. La relación de inyección es una medida del recorrido del pistón durante la inyección del combustible en el ciclo real. La expresión de la eficiencia indica que esta aumenta cuando ε aumenta, lo mismo que en el ciclo Otto, y disminuye cuando ρ aumenta, ya que ρ es siempre mayor que 1. El valor de ρ se trata de que sea lo menor posible y en la práctica varía entre 1.3 y 2.1 (ρ depende, en el ciclo real de la velocidad de inyección, la cual a su vez es una función compleja de la viscosidad del combustible, su densidad, la presión de inyección,...etc.). Por otra parte, ε debe ser alta ya que el encendido del combustible inyectado depende del incremento de la temperatura que se logre en la compresión. Sin embargo, la resistencia mecánica establece un límite mayor para la ε permisible y, por lo tanto, sobre la presión máxima admisible. Hoy en día la relación de compresión ε para los MEC esta entre 15 y 22.

2.4.3 Ciclo dual estándar de aire.

Originalmente los motores Diesel se diseñaron para que funcionaran con adición de energía a presión constante. Sin embargo este método de operación es difícil de obtener a altas velocidades, y resulta en bajas eficiencias. Hoy en día los motores Diesel funcionan con un ciclo similar al de volumen constante, excepto que la adición de energía se lleva a cabo sólo hasta alcanzar un cierto límite predeterminado de presión. Si es necesario adicionar más calor, se hace a presión constante. Por esta razón, este ciclo también se llama de *presión limitada o semidiesel*.

Figura 7. Diagrama PV y TS para el ciclo Dual estándar de aire



M.S. JÓVAJ, *op. cit.*, página 27.

En estos motores, la proporción entre el calor adicionado isocóricamente y el adicionado isobáricamente depende de la velocidad del motor, de la rata de combustión y del momento en que comienza la inyección.

En la figura 7 se ilustra un ciclo teórico en las coordenadas PV y TS, en la cual parte del calor q_1' se suministra a volumen constante y otra parte del mismo q_1'' , a presión constante. El calor q_2 se desprende a volumen constante.

Los procesos que se presentan en este ciclo son:

- a. **Compresión isentrópica (a-c).**

$$T_c = T_a (\varepsilon)^{k-1} \quad (2.26)$$

$$P_c = P_a (\varepsilon)^k \quad (2.27)$$

- b. **Adición de calor a volumen constante (c-z')**

$$q_1' = C_v (T_{z'} - T_c) \quad (2.28)$$

- c. **Adición de calor a presión constante (z'-z).**

$$q_1'' = C_p (T_z - T_{z'}) \quad (2.29)$$

- d. **Expansión isentrópica (z-b).**

$$T_b = T_z \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{k-1} \quad (2.30)$$

$$P_b = P_z \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^k \quad (2.31)$$

e. Rechazo de calor a volumen constante ($b-a$).

$$q_2 = C_v(T_b - T_a) \quad (2.32)$$

Por lo tanto el *rendimiento térmico* esta dado por la siguiente ecuación:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{(\varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\lambda(\rho)^k - 1}{(\lambda - 1) + \lambda \cdot k(\rho - 1)} \quad (2.33)$$

Donde ρ es la *relación de inyección* y λ es la *relación de presión*, definida como $\lambda = \frac{P_z}{P_c}$; entonces la eficiencia del ciclo dual depende de λ , además de ε y ρ , aumentando cuando λ también lo hace. La ecuación anterior se reduce a η_{otto} si $\rho = 1$ y η_{diesel} si $\lambda = 1$.

Los ciclos de los motores de combustión interna se pueden comparar entre sí y con el ciclo de Carnot, en términos del trabajo producido y de eficiencias. Los siguientes puntos son relevantes:

- Las eficiencias son funciones de k de manera directa, es decir, entre mayor sea k mayor será la eficiencia térmica. Sin embargo, gases como el He y Ar, que tienen un alto valor de k no se pueden utilizar, por no ser oxidantes. Estamos limitados a usar aire únicamente y, por lo tanto, la idea de obtener mayores eficiencias cambiando la sustancia de trabajo es imposible de llevar a cabo en el momento presente.
- El ciclo Diesel tiene una eficiencia menor que la del ciclo Otto para la misma relación de compresión. Sin embargo, el ciclo Diesel tiene dos ventajas importantes sobre el Otto: la autoignición no limita su relación de compresión (aunque en un Diesel no se debe usar gasolina, porque detonaría) y, además, puede operarse con relaciones aire-combustible mayores, es decir, con mezclas más pobres, lo cual hace que la combustión sea más completa (a esto último también contribuye las bajas rpm a que trabajan los Diesel). Estos dos factores contribuyen a que, cuando la limitante es la presión (o la temperatura), su eficiencia sea mayor que la de un Otto. El ciclo Dual exhibe una eficiencia intermedia entre el Otto y el Diesel. En resumen, para una ε máxima dada, la eficiencia es máxima si el calor se suministra a volumen constante, es decir: $\eta_{otto} > \eta_{dual} > \eta_{diesel}$; si se

limita la presión máxima, entonces la eficiencia se maximiza si el calor se adiciona a presión constante, o sea, $\eta_{diesel} > \eta_{dual} > \eta_{otto}$.

2.5 CICLOS REALES DE LOS MCI 4T ECH

Los motores de automóviles trabajan en una amplia zona de variación del régimen de velocidad. La frecuencia de rotación del cigüeñal en estos regímenes de funcionamiento dependen del tipo de motor (Diesel automóvil 4500 – 5000 rpm, Diesel camión 800 – 3000 rpm, motor encendido por chispa 800 – 6000 rpm). Con estas frecuencias cada ciclo se efectúa a 0.15 – 0.02s y en los motores de dos tiempos dura dos veces menos.

En cada ciclo se deberán efectuar los siguientes procesos:

- Suministro de combustible y aire al cilindro.
- Compresión y evaporación del combustible y se mezcla con el aire.
- La ignición de la mezcla aire combustible que conduce a elevar la temperatura y la presión de los gases.
- La expansión y la expulsión de los gases quemados

La mayor parte del tiempo por ciclo en los motores de cuatro tiempos se le concede al proceso de admisión y escape; sin embargo, para asegurar la efectividad del ciclo se debe prestar atención a la formación de la mezcla aire combustible y a su combustión.

En los MICH el proceso de formación de la mezcla ocurre anticipadamente. En el proceso de admisión en los motores a gasolina al aire en movimiento se le introducen gotas de combustible provenientes del chorro desintegrado que sale del surtidor. La calidad de la pulverización depende de las velocidades del aire y del combustible, así como de la turbulencia al pasar la mezcla por el múltiple de admisión, por el conducto de admisión en la culata y a través de la válvula de admisión. Una pulverización mas fina es de gran importancia ya que acelera el proceso de vaporización (entre menor sea el diámetro de las gotas menor será la superficie en contacto con el aire y mayor será su velocidad de vaporización) y disminuye la cantidad de combustible que se sedimenta sobre las paredes del sistema de admisión (película que se desplaza y evapora con menor intensidad)

Para garantizar el oportuno proceso de combustión se busca tener una mezcla homogénea al final de la compresión.

En el retardo a la inflamación se forman los focos iniciales de la ignición, a partir de los cuales comienza la combustión, (la presión, la temperatura y la velocidad de vaporización del carburante). Para lograr que este se mezcle con el oxígeno es

importante desalojar los productos de la combustión ya formados. Por esto es necesario garantizar el movimiento organizado de la carga de aire.

El encendido de la mezcla y el desarrollo del proceso de combustión se efectúan de diferente manera, en función del tipo de formación de la mezcla. En los motores con formación externa (MCI 4T ECH) la mezcla (mezcla prácticamente uniforme) se enciende por chispa eléctrica en una zona de la cámara.

El gas cercano a la zona de descarga se calienta hasta una temperatura que sobrepasa los 10.000 K, con lo cual aparece la llama, que se propaga desde el foco de ignición a gran velocidad (30 - 50 m/s) por todo el volumen de la cámara de combustión. El movimiento de la mezcla ayuda a acelerar la propagación del frente de llama. Experimentos y cálculos muestran que la combustión constituye unos 30° - 40° del ángulo del cigüeñal. Para que el calor desprendido se utilice con eficacia el proceso deberá comenzarse unos grados antes del punto muerto superior (PMS), estos grados varían en función del régimen de velocidad al variar la frecuencia de rotación del cigüeñal.

El desarrollo de cada una de las etapas de mezcla y combustión en los motores con formación externa e interna de la mezcla, depende del método de introducción del carburante a la cámara de combustión y de los parámetros del equipo de inyección, así como del método empleado para organizar el proceso de mezclado del combustible con el aire.

En los MICH al elegir el método de introducción del combustible (carburador, inyección de combustible, encendido por dardo y estratificación de la carga) y su subsiguiente encendido y combustión, se le dedica especial atención a la disminución de la toxicidad, junto con un mejoramiento del empleo del calor y la elevación de la confiabilidad del motor.

Para lograr condiciones óptimas al ejecutar el ciclo de trabajo hay que prestar atención a la combinación entre el tipo de cámara de combustión y el método de formación de la mezcla.

El proceso de suministro de carga fresca al cilindro, independiente del método de formación de la mezcla y de los métodos de encendido, requiere un correspondiente gasto de trabajo, al igual que la expulsión de los gases quemados en los cilindros luego de la combustión y de la carrera de trabajo.

En el ciclo real la compresión va acompañada de un intercambio de calor (debido a la diferencias de temperaturas entre la mezcla aire - combustible y las paredes del

cilindro); como consecuencia de esto, al final de la compresión la presión y la temperatura difieren de las que resultan en el caso de compresión adiabática. Además es posible la fuga a través de los anillos del émbolo y a través de las válvulas especialmente al arranque y al friccionar a baja frecuencia de rotación lo que también influye en los parámetros al final del proceso.

Durante la combustión y la posterior expansión, la temperatura de los productos de combustión son considerablemente mayores que las temperaturas de las superficies de la culata, de la camisa del cilindro y del pistón, que están en contacto con los gases; por lo tanto, tendrá lugar un intenso intercambio de calor entre el gas y las paredes. Además la combustión no acaba cerca del PMS sino que sigue durante la expansión, adicionando cierta cantidad de calor. En el transcurso de estos procesos también es posible encontrar una determinada fuga de gases a través de las paredes herméticas de los anillos del pistón.

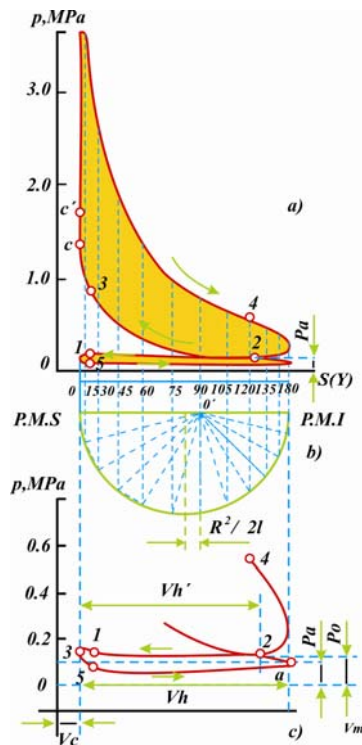
En el proceso de combustión la temperatura puede elevarse hasta 2200 – 2500 K, su crecimiento queda limitado debido a la asociación de las moléculas de vapor de agua y del anhídrido carbónico, que va acompañado por la absorción de cierta cantidad de calor durante la expansión, la temperatura disminuye y transcurre la reacción de la formación de los productos finales con desprendimiento de calor pero su utilización es menos efectiva.

Los fenómenos mencionados, inherentes al ciclo real, dan lugar a pérdidas adicionales en comparación con el ciclo termodinámico ideal, en consecuencia el rendimiento del ciclo real será siempre menor que el rendimiento térmico y el ciclo será mas perfecto entre menores sean estas pérdidas anteriormente señaladas.

Describir analíticamente el trabajo efectuado en el ciclo real es difícil, ya que para un motor es casi imposible determinar anticipadamente las pérdidas al realizar cada proceso por separado. Tales cálculos se realizan considerando coeficientes experimentales, obtenidos como resultado de gran cantidad de investigaciones. Al emplear computadores podemos emplear métodos que nos permitan optimizar los índices del ciclo. Ciertos coeficientes se pueden introducir a los cálculos en ciertas etapas del ciclo.

Los datos que caracterizan los procesos tanto por separado como en su conjunto, de un motor experimental o de uno que se encuentre en producción, se obtienen trazando el diagrama indicado. El diagrama indicado se obtiene registrando la variación de la presión en el cilindro de algunas otras magnitudes características en función del volumen (en coordenadas P – V), como se muestra en la siguiente figura.

Figura 8. Diagrama indicado de un motor de 4T



M.S. JÓVAJ, *op. cit.*, página 85

El área limitada por los contornos del diagrama indicado representa el trabajo indicado W_i ejecutado por el motor en cada ciclo. El grado de aprovechamiento del calor en el ciclo real se puede determinar por medio del rendimiento indicado, en donde Q es el calor total inducido en el motor por el combustible.

$$n_i = \frac{W_i}{Q} \tag{2.34}$$

En la figura 8 podemos ver que en los motores de carburador la válvula de admisión se abre con cierto adelanto con respecto al PMS (punto 1) y el proceso de admisión de la mezcla dura hasta el instante en que se cierra la válvula de admisión (punto 2). La mezcla carburante (carga fresca) se mezcla con los productos de la combustión que quedan en el cilindro del ciclo anterior (gases residuales) y forman la mezcla de trabajo.

Una vez terminada la compresión la mezcla de trabajo se comprime. El punto 3 representa la aparición de la chispa. Una vez formada la chispa comienza la combustión de la mezcla aire - combustible y dura cierto tramo de la expansión.

Con el escape (punto 4) comienza el barrido de gases; éste va desde el momento en que se abre la válvula de escape, en ese instante la presión del cilindro es considerablemente mas elevada que la atmosférica, por lo que los gases quemados salen a velocidad crítica. Cuando el pistón se acerca al punto muerto inferior (PMI) la presión del cilindro cae considerablemente y a continuación, cuando el pistón se mueve hacia el PMS, los gases son empujados a la atmósfera.

Si el motor trabaja sin sobrealimentación los gases se expulsan a una sobre presión insignificante. El proceso de escape y expulsión termina en el instante en que se cierra la válvula de escape (punto 5).

De la anterior descripción se deduce que los ciclos reales de los motores alternativos constan de los siguientes procesos; Intercambio de gases (que incluyen el escape de los gases quemados, el barrido de la cámara de combustión y la admisión de la carga fresca (aire en los Diesel y mezcla aire combustible en los MICH). La compresión (elevación de la energía del fluido operante), la combustión (desprendimiento de calor) y la expansión (carrera de trabajo) son también procesos de los motores alternativos.

El proceso de intercambio de gas depende del número de tiempos del motor. En los MCI a cuatro tiempos, su duración abarca mas de dos carreras del pistón, en el de dos tiempos, solo parte de una carrera del pistón.

El resto de procesos no dependen del número de tiempos del motor, sino que se define solamente por el modo de formación de la mezcla y encendido o caracterización de la misma.

2.5.1 Termodinámica de Mezclas de Aire-combustible⁴.

Se requiere de una pequeña explicación para comprender como se comportan los fluidos a medida que transcurre cada uno de los procesos ya mencionados. Para entender la combustión en los motores se requerirán modelos termodinámicos que nos permitan conocer las composiciones y propiedades de los elementos que actúan en la reacción. Para ver estos procesos termodinámicos, por favor remitirse al **anexo A** del proyecto.

⁴ Este subtítulo y el Anexo A están basados en el capítulo Tres del libro INTERNAL COMBUSTION ENGINES de Colin R. Ferguson

3 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DEL MOTOR

En esta sección se explican los modelos que serán llamados para simular el funcionamiento del motor. El presente capítulo es también llamado manual científico y se encuentra ubicado en el manual del usuario el cual brinda una breve pero clara explicación al usuario del sistema acerca de los procesos realizados por el programa.

Para realizar la simulación se maneja como parámetro independiente el tiempo, en este caso representado en los grados de giro del cigüeñal al simular el motor funcionando a revoluciones constantes, Modelo de estado estacionario.

Se divide, entonces, el funcionamiento del motor en 9 etapas, dependientes de los ángulos suministrados por el usuario: Angulo de Adelanto a la Apertura de la Válvula de Admisión AAA, Angulo de Adelanto de la Apertura de la Válvula de Escape AAE, Angulo de Retardo al cierre de la Válvula de Admisión RCA, Angulo de Retardo al cierre de Válvula de escape RCE, Punto muerto Inferior PMI, Punto Murto Superior PMS, Duración de la combustión, Angulo de avance de la Chispa AACH) estas son:

- | | |
|----------------------------------|-------------------------|
| 1) Admisión | (RCE / PMI) |
| 2) Admisión Compresión | (PMI / RCA) |
| 3) Compresión | (RCA / AACH) |
| 4) Compresión Combustión | (AACH / PMS) |
| 5) Expansión Combustión | (PMS / Dur. Comb-AACH) |
| 6) Expansión | (Dur. Comb.-AACH / AAE) |
| 7) Expansión Escape | (AAE / PMI) |
| 8) Escape (barrido) | (PMI / AAA) |
| 9) Admisión Escape(solapamiento) | (AAA / RCE) |

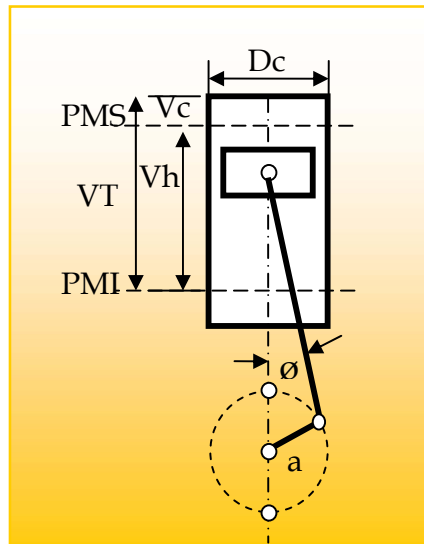
En cada una de estas etapas se llaman los modelos necesarios para realizar los cálculos que permitan obtener las composiciones y propiedades de la mezcla y los parámetros de desempeño del motor a cada grado del cigüeñal

Cada uno de estos modelos son un conjunto de ecuaciones algebraicas y diferenciales tanto ordinarias como de derivadas parciales, que deben ser resueltas de forma simultánea; por lo tanto el sistema es de tipo diferencial-algebraico.

3.1 MODELO GEOMÉTRICO DEL MOTOR

Para este tipo de máquinas sus parámetros geométricos se enuncian a continuación:

Figura 9. Geometría básica del cilindro, pistón, biela y manivela



Autores proyecto.

La relación de compresión

$$\varepsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c} = \frac{V_a}{V_c} \quad (3.1)$$

Relación entre el diámetro del cilindro y el desplazamiento del pistón:

$$R_{bs} = \frac{D_c}{L} \quad (3.2)$$

Relación entre la longitud de la biela y el radio de la manivela:

$$R = \frac{l}{a} \quad (3.3)$$

Desplazamiento del pistón:

$$L = 2a \quad (3.4)$$

El volumen total es:

$$V_h = V_h + V_c \quad (3.5)$$

Donde V_h es el volumen desplazado y esta regido por la formula

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \quad (3.6)$$

Y V_c es el volumen de la cámara de combustión o volumen del punto muerto superior y está dado por:

$$V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1} \quad (3.7)$$

Por tanto, Volumen del cilindro en función del ángulo del cigüeñal:

$$V_{(\theta)} = V_c + \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \left(2 \cdot L + \frac{L}{2} - s_{(\theta)} \right) \quad (3.8)$$

Donde $s_{(\theta)}$ es la distancia entre el eje de la manivela y el pasador del pistón en función del ángulo de giro del cigüeñal, y está dado por:

$$s_{(\theta)} = \frac{L}{2} \cdot \cos(\theta) + \sqrt{(2 \cdot L)^2 - \left(\frac{L}{2} \cdot \text{sen}(\theta) \right)^2} \quad (3.9)$$

Velocidad media del pistón:

$$u_m = (2 \cdot L \cdot n) \quad (3.10)$$

Donde n es la velocidad rotacional del cigüeñal.

3.2 MODELOS MATEMATICOS

3.2.1 Modelo de Compresión-Expansión (modelo del cilindro).

Este modelo se emplea a partir del cierre de la válvula de admisión, empleamos un modelo de dimensión cero o también llamado modelo de variables concentradas ya que la única variable independiente es el tiempo, por lo tanto se generan una serie de ecuaciones diferenciales ordinarias.

Esto presupone que no interesa la distribución espacial de las variables dentro del cilindro; equivale a considerar que toda la mezcla contenida dentro del cilindro está uniformemente mezclada y los sucesivos estados de equilibrio se alcanzan de forma espontánea. Obviamente se trata de una simplificación ya que los procesos termofluidodinámicos, químicos y térmicos que ocurren dentro del cilindro convierten al problema en un problema tridimensional.

El programa analizó el caso de un ciclo en que el combustible y el aire son inducidos a través de la válvula de entrada. Se emplea la ecuación de la conservación de la energía en forma diferencial aplicada a un sistema abierto, para un volumen de control bordeando el cilindro y rodeando lo que contiene. La ecuación de la energía es:

$$m \frac{du}{d\theta} + u \frac{dm}{d\theta} = \frac{dQ}{d\theta} - P \frac{dV}{d\theta} - \frac{m_1 h_1}{\omega} \quad (3.11)$$

El fluido no va a tener calor específico constante, más bien va a tener una entalpía y una energía interna dependiente de la temperatura y de la presión. Básicamente empleamos dos subprogramas para calcular estos valores llamados FARG y ECP⁵. En el capítulo anterior se explicaron las bases termodinámicas y matemáticas de estos dos subprogramas

En el FARG tendremos el cálculo de las propiedades en función de la temperatura y de la presión, para la primera etapa previa a la combustión, donde la mezcla se compone de aire combustible y gas residual (por sus siglas en inglés, Fuel Air Residual Gas).

Con el ECP obtenemos el cálculo de las propiedades y la composición de la mezcla luego de la combustión, por esto se llama productos de la combustión en equilibrio (por sus siglas en inglés, Equilibrium Combustion Products).

Subrutina FARG. Esta subrutina consta de 4 secciones. En la primera se leen los datos de entrada y llama la consulta de la base de datos, de esta consulta obtenemos la composición del combustible, según el combustible seleccionado por el usuario y las constantes que nos permitirán calcular el valor de las propiedades a partir de la aproximación a una curva polinómica y la siguiente tabla (Tabla 1), la cual contiene los valores para el cálculo de propiedades de los diferentes combustibles.

En la segunda etapa calculamos la composición de la mezcla de acuerdo a la tabla 2.2, la cual depende de qué tan rica o tan pobre sea la mezcla. En caso de ser rica se emplea la ecuación 2.67

Tabla 1. Constantes para calcular las propiedades de gas ideal según el tipo de combustible

FUEL	NOMBRE	a ₀	b ₀	c ₀	d ₀	e ₀
CH_3NO_2	Nitrometano	1.412633	2.087101E-02	-8.142134E-06	-1.026351E+04	1.917126E+01
CH_4	Metano	1.971324	7.871586E-03	-1.048592E-06	-9.930422E+03	8.873728
CH_3OH		1.779819	1.262503E-02	-3.624890E-06	-2.525420E+04	1.50884E+01
C_6H_6	Benceno	-2.545087	4.79554E-02	-2.030765E-05	8.782234E+03	3.348825E+01
$C_7H_{17}^a$		4.0652	6.0977E-02	-1.8801E-05	-3.5880E+04	1.545E+01
$C_{14.4}H_{24.9}^b$		7.9710	1.1954E-01	-3.6858E-05	-1.9385E+04	-1.7879

INTERNAL COMBUSTION ENGINES de Colin R. Ferguson, página 113.

⁵ INTERNAL COMBUSTION ENGINES de Colin R. Ferguson, página 111 y 128.

Pasamos a calcular las fracciones molares y el peso molecular. Por último calculamos las propiedades de cada componente (2.57) (2.58) (2.59) y del combustible por medio de los datos obtenidos y de los valores consultados a la base de datos. Teniendo estos datos calculamos las propiedades de la mezcla (2.46) (2.48) (2.56) realizando la corrección correspondiente debido a la presencia de gases residuales (2.70).

Para el cálculo de las propiedades del combustible utilizamos las siguientes ecuaciones.

$$\frac{c_p}{R} = a_0 + b_0 T + c_0 T^2 \quad (3.12)$$

$$\frac{h}{RT} = a_0 + \frac{b_0}{2} T + \frac{c_0}{3} T^2 + \frac{d_0}{T} \quad (3.13)$$

$$\frac{s^0}{R} = a_0 \ln T + b_0 T + \frac{c_0}{2} T^2 + e_0 \quad (3.14)$$

Subrutina ECP Con este subprograma se computan las propiedades de los productos de la combustión en equilibrio.

De la base de datos se obtiene el valor de las constantes necesarias para el cálculo de las propiedades de cada uno de los productos de la combustión, a partir de la tabla de Gordon y Mcbride.

Como se puede ver en el anexo A, para el cálculo de equilibrio se requiere de la solución de once ecuaciones no lineales con once incógnitas.

Para esta solución empleamos el método desarrollado por Olikara y Borman para resolver la composición, calores específicos en equilibrio, y otras derivadas parciales útiles en el análisis termodinámico.

Olikara y Borman (1975) tienen una curva que ajusta las constantes de equilibrio a la tabla de JANAF. Estas expresiones son de la forma:

$$\log K_p = A \ln \left(\frac{T}{1000} \right) + \frac{B}{T} + C + DT + ET^2 \quad (3.15)$$

Donde T esta dada en grados Kelvin. Para el rango entre $600 < T < 4000$ K y sus valores de las constantes están descritos en la siguiente tabla (Tabla 2).

Tabla 2. Datos de las constantes de equilibrio

	A	B	C	D	E
K₁	0.432168E+00	-0.112464E+05	0.267269E+01	-0.745744E-04	0.242484E-08
K₂	0.310805E+00	-0.129540E+05	0.321779E+01	-0.738336E-04	0.344645E-08
K₃	-0.141784E+00	-0.213308E+04	0.853461E+00	0.355015E-04	-0.310227E-08
K₄	0.150879E-01	-0.470959E+04	0.646096E+00	0.272805E-05	-0.154444E-08
K₅	-0.752364E+00	0.124210E+05	-0.260286E+01	0.259556E-03	-0.162687E-07
K₆	-0.415302E-02	0.148627E+05	-0.475746E+01	0.124699E-03	-0.900227E-08

INTERNAL COMBUSTION ENGINES de Colin R. Ferguson, página 128.

Olikara y Borman reordenan las ecuaciones de forma tal que se puede resolver de un conjunto de matrices formada por derivadas independientes por medio del método de iteración de Newton-Raphson y de esta forma obtener las composiciones de los productos y con estos las propiedades de los mismos.

Dentro del programa primero se calculan los pesos moleculares y otros datos. Se verifica que no se formará carbón sólido y si la temperatura inicial T estimada de la composición es <1000 en ese caso FARG será suficiente.

Resolvemos la matriz dada por las ecuaciones de Olikara y Borman para correcciones de la composición. Se computan las constantes requeridas para hallar las derivadas parciales y se resuelve las matrices siguiendo el método descrito por los autores anteriormente mencionados. Por ultimo se computan las propiedades termodinámicas.

3.2.2 Modelo de combustión (Adición de calor)

La combustión se obtiene a través de un modelo simple que calcula la fracción de calor liberada por el combustible en cada instante de la combustión como proporcional a la tasa de combustible quemado.

Este calor es entregado al modelo del cilindro y entregado al balance de energía. Existen muchos modelos para considerar el fenómeno de la combustión en motores térmicos. Los más simples se basan en expresiones algebraicas para la liberación de calor que asumen combustión completa y perfecta de los reactantes en productos y consideran que tanto los reactantes como los productos son una mezcla con un único calor de formación.

Existen otros modelos que se basan en plantear una tasa de quemado, mediante leyes empíricas como la ley de **Wiebe** para el combustible pero el modelo se suplementa con reacciones químicas en equilibrio.

Siguiendo en complejidad se puede incluir efectos de cinética en la combustión e incluso separar la cámara de combustión en diversas zonas de composición variada. Finalmente se puede incluso prescindir del conocimiento de la tasa de quemado e incluir su computo dentro del modelo

En este programa se emplearon los siguientes modelos matemáticos para el cálculo de la tasa de quemado. Se emplea una relación empírica para expresar la fracción de calor adicionado en función del ángulo del cigüeñal.

En este caso podemos emplear dos ecuaciones que funcionan razonablemente bien, para hallar la fracción x de calor suministrado por la mezcla aire-combustible:

$$x = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{\pi(\theta - \theta_s)}{\theta_b} \right] \right\} \quad (3.16)$$

Donde θ es el ángulo de cigüeñal θ_s el ángulo de comienzo de la combustión y θ_b es su duración. Esta ecuación (3.16) es empleada solamente durante el suministro de calor (combustión); $\theta_s < \theta < \theta_s + \theta_b$

$$x = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\theta - \theta_s}{\theta_b} \right)^n \right] \quad (3.17)$$

En la ecuación 3.17 a diferencia de la 3.16, θ_b es en este caso una escala de la duración total de la combustión y esta ecuación es útil solamente cuando x es cercano. Esta ecuación proviene de una modificación a la ecuación de Wiebe.

Para cada una de las anteriores ecuaciones (3.16), (3.17) los parámetros θ_s , θ_b y n son usados para encajar en una curva de datos experimentales.

La fracción de masa quemada x es utilizada como parámetro, por tanto la energía del sistema será:

$$u = \frac{U}{m} = xu_b + (1-x)u_u \quad (3.18)$$

Donde u_b es la energía del gas quemado que se encuentra a temperatura T_b y u_u es la energía del gas no quemado a temperatura T_u . Igualmente, el volumen específico del sistema es dado por:

$$v = \frac{V}{m} = xv_b + (1-x)v_u \quad (3.19)$$

Derivamos una serie de ecuaciones diferenciales ordinarias que describen la razón de cambio de la presión, el trabajo y el calor perdido con respecto al ángulo del cigüeñal, para que al integrar simultáneamente estas ecuaciones, obtengamos el diagrama de presión volumen, la eficiencia indicada y la presión media efectiva.

Para lograr este objetivo, vamos a emplear una relación muy útil existente entre v_b , T_b , y P como:

$$v_b = v_b(T_b, P) \quad (3.20)$$

Y diferenciando esta expresión con respecto al ángulo del cigüeñal, nos lleva a:

$$\frac{dv_b}{d\theta} = \frac{\partial v_b}{\partial T_b} \frac{dT_b}{d\theta} + \frac{\partial v_b}{\partial P} \frac{dP}{d\theta} \quad (3.21)$$

Podemos ver que emerge una de las derivadas que estamos buscando, esta es $dP/d\theta$.

El subprograma ECP fue programado para devolver la derivada parcial requerida en forma logarítmica. Sustituyendo la derivada logarítmica en la Ec. (3.21) da como resultado:

$$\frac{dv_b}{d\theta} = \frac{v_b}{T_b} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \frac{dT_b}{d\theta} + \frac{v_b}{p} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln P} \frac{dP}{d\theta} \quad (3.22)$$

Análogamente

$$\frac{dv_u}{d\theta} = + \frac{v_u}{T_u} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \frac{dT_u}{d\theta} + \frac{v_u}{p} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln P} \frac{dP}{d\theta} \quad (3.23)$$

La relación entre u_b , T_b , y p es representada como

$$u_b = u_b(T_b, P) \quad (3.24)$$

y

$$\frac{du_b}{d\theta} = \frac{\partial u_b}{\partial T_b} \frac{dT_b}{d\theta} + \frac{\partial u_b}{\partial P} \frac{dP}{d\theta} \quad (3.25)$$

Introduciendo las derivadas parciales proporcionadas por ECP a través de las ecuaciones:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_P = c_p - \frac{Pv}{T} \left(\frac{\partial \ln v}{\partial \ln T} \right)_P \quad (3.26)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial P} \right)_T = -v \left[\left(\frac{\partial \ln v}{\partial \ln T} \right)_P + \left(\frac{\partial \ln v}{\partial \ln P} \right)_T \right] \quad (3.27)$$

Obtenemos:

$$\frac{du_b}{d\theta} = \left(c_{pb} - \frac{Pv_b}{T_b} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \right) \frac{dT_b}{d\theta} - v_b \left(\frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} + \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln P} \right) \frac{dP}{d\theta} \quad (3.28)$$

Igualmente para el gas no quemado

$$\frac{du_u}{d\theta} = \left(c_{Pu} - \frac{Pv_u}{T_u} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \right) \frac{dT_u}{d\theta} - v_b \left(\frac{\partial \dot{\ln} v_u}{\partial \ln T_u} + \frac{\partial \dot{\ln} v_u}{\partial \ln P} \right) \frac{dP}{d\theta} \quad (3.29)$$

Un comentario antes de continuar. Se ha asumido tácitamente que las presiones del gas quemado y del no quemado son iguales, que, como fue mencionado anteriormente, es una buena aproximación para motores de cámara abierta.

Vamos a analizar la ecuación de energía (3.11) término a término.

Derivando la Ec. (3.12), el primer término se obtiene como está a continuación:

$$m \frac{du}{d\theta} = \left[x \frac{du_b}{d\theta} + (1-x) \frac{du_u}{d\theta} + (u_b - u_u) \frac{dx}{d\theta} \right] m \quad (3.30)$$

Sustituyendo la ec (3.28 y 3.29) y reemplazándolas da como resultado

$$\begin{aligned} m \frac{du}{d\theta} = & mx \left(c_{Pb} - \frac{Pv_b}{T_b} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \right) \frac{dT_b}{d\theta} + m(1-x) \left(c_{Pu} - \frac{Pv_u}{T_u} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \right) \frac{dT_u}{d\theta} \\ & - \left[mxv_b \left(\frac{\partial \dot{\ln} v_b}{\partial \ln T_b} + \frac{\partial \dot{\ln} v_b}{\partial \ln P} \right) + m(1-x)v_u \left(\frac{\partial \dot{\ln} v_u}{\partial \ln T_u} + \frac{\partial \dot{\ln} v_u}{\partial \ln P} \right) \right] \frac{dP}{d\theta} + m(u_b - u_u) \frac{dx}{d\theta} \end{aligned} \quad (3.31)$$

El término $u \frac{dm}{d\theta}$ requiere la introducción de la conservación de la masa y un algoritmo para computar el "**Blowby**" (escape de la mezcla por la camisa del cilindro a través de los anillos). Podemos decir

$$\frac{dm}{d\theta} = \frac{-m_i}{\omega} = \frac{-Cm}{\omega} \quad (3.32)$$

donde C es la constante dependiente blowby en un diseño de anillos.

El calor dentro del sistema, en el término $\frac{dQ}{d\theta}$ en la Ec. (3.11), será expresado en términos de pérdida de calor

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{-Q_l}{\omega} = \frac{-Q_b - Q_u}{\omega} \quad (3.33)$$

Para el gas quemado y no quemado respectivamente.

Para expresar el calor perdido en términos de temperatura se requiere introducir el coeficiente de transferencia de calor h

$$Q_b = hA_b(T_b - T_w) \quad (3.34)$$

$$Q_u = hA_u(T_u - T_w) \quad (3.35)$$

donde A_u y A_b son las áreas de gas quemado y no quemado en contacto con las paredes cilíndricas a temperatura T_w . Para calcular áreas A_b y A_u , suponemos que

$$A_b = \left(\frac{\pi b^2}{2} + \frac{4V}{b} \right) x^{1/2} \quad (3.36)$$

$$A_u = \left(\frac{\pi b^2}{2} + \frac{4V}{b} \right) (1 - x^{1/2}) \quad (3.37)$$

Las ecuaciones (3.36) y (3.37) son funciones empíricas que tienen los límites correctos en el caso de un cilindro donde $x \rightarrow 0$ y donde $x \rightarrow 1$. La fracción de área cilíndrica en contacto con el gas quemado se asume como proporcional a la raíz cuadrada de la fracción de masa quemada para reflejar la diferencia de densidad entre el gas quemado y el no quemado, el gas quemado ocupa un mayor volumen del cilindro que el gas no quemado.

En la práctica, el exponente en x es tomado como parámetro libre a ser determinado por medio de experimentos, o de una forma más complicada debe ser hallado por medio del crecimiento del frente de llama. Hemos asumido, por conveniencia, que $h_u = h_b = h = \text{constante}$.

El término de trabajo en la Ec. (3.11) no requiere más explicación, pero necesitamos especificar la entalpía de la masa pérdida debido al blowby. Temprano en el proceso de combustión, el gas no quemado se fuga a través de los anillos. Más tarde en el proceso de combustión, el gas quemado se fuga a través de los anillos. Con la intención de ser conceptualmente correctos al desviarse de lo que debe ser hecho en la práctica, asumamos que la entalpía de la masa perdida será:

$$h_l = (1 - x^2)h_u + x^2h_b \quad (3.38)$$

La cual tiene límites correctos y reconoce que una larga proporción del gas no quemado se estará fugando en lugar de la fracción de masa del gas no quemado. Finalmente, para completar la Ec. (3.38), las ecuaciones de estado deben incluir ahora

$$h_u = h_u(T_u, P) \quad (3.39)$$

$$h_b = h_b(T_b, P) \quad (3.40)$$

Las cuales son computadas por subprogramas FARG y ECP, respectivamente.

Examinando todos los términos de la Ec. (3.11) recientemente discutidos encontramos las siguientes derivadas:

$$\frac{dP}{d\theta}, \frac{dT_b}{d\theta}, \frac{dT_u}{d\theta}, \frac{dV}{d\theta}, \frac{dx}{d\theta} \quad (3.41)$$

Y las siguientes variables

$$P, T_b, T_u \quad (3.42)$$

$$u_b, u_u, v_b, v_u, h_b, h_u \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b}, \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u}, \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln P}, \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln P}, c_{p_b}, c_{p_u} \quad (3.44)$$

$$m, V, x \quad (3.45)$$

$$C, \omega, h, b \quad (3.46)$$

Las variables en (3.46) son todas constantes específicas de acuerdo al tipo de motor y sus características operativas.

Las variables en la Ec. (3.45) son todas funciones conocidas del ángulo del cigüeñal. La masa para cualquier ángulo es

$$m = m_1 \exp[-C(\theta - \theta_1)/\varpi] \quad (3.47)$$

que sale de la integración de la Ec. (3.42). La masa inicial m_1 en $\theta = \theta_1$ (al comienzo de la compresión) es especificada del conocimiento de la eficiencia volumétrica y la fracción residual.

El volumen del cilindro es conocido a partir de la relación de compresión r , volumen en el PMS V_o y $\epsilon = S/2l$ (S = carrera y l = largo de la biela)

$$V = V_o \left\| 1 + \frac{r-1}{2} \left\{ 1 - \cos \theta + \frac{1}{\epsilon} \left[1 - (1 - \epsilon^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \right] \right\} \right\| \quad (3.48)$$

La fracción de masa quemada es conocida como ya comentamos por medio de una ley de quemado empírica, por ejemplo

$$x = \begin{cases} 0 & \theta < \theta_s \\ \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left[\frac{\pi(\theta - \theta_s)}{\theta_b} \right] \right] & \theta_s < \theta < \theta_s + \theta_b \\ 1 & \theta > \theta_s + \theta_b \end{cases} \quad (3.49)$$

Todas las variables en las expresiones (3.45) y (3.46) son propiedades termodinámicas y funciones conocidas (por medio del ECP y FARG) de P , T_b y T_u .

Las derivadas $dV/d\theta$ y $dx/d\theta$ en la Ec. (3.41) son halladas diferenciando (3.48) y la Ec. (3.49), respectivamente. La ecuación de la energía (3.11) puede ser vista como una relación entre tres derivadas, sus integrales y sus parámetros dependientes en las integrales. En otras palabras, tenemos una ecuación de la siguiente forma

$$f\left(\theta, \frac{dP}{d\theta}, \frac{dT_b}{d\theta}, \frac{dT_u}{d\theta}, P, T_b, T_u\right) = 0 \quad (3.50)$$

Si podemos hallar dos ecuaciones más, entonces podremos reestructurarlas a la forma estándar usada para integrar numéricamente un juego de ecuaciones diferenciales ordinarias.

$$\frac{dP}{d\theta} = f_1(\theta, P, T_b, T_u) \quad (3.51)$$

$$\frac{dT_b}{d\theta} = f_2(\theta, P, T_b, T_u) \quad (3.52)$$

$$\frac{dT_u}{d\theta} = f_3(\theta, P, T_b, T_u) \quad (3.53)$$

Encontraremos conveniente integrar simultáneamente el trabajo realizado, la pérdida de calor, y la entalpía perdida.

$$\frac{dW}{d\theta} = f_4(\theta, P) \quad (3.54)$$

$$\frac{dQ_l}{d\theta} = f_5(\theta, P, T_b, T_u) \quad (3.55)$$

$$\frac{dH_l}{d\theta} = f_6(\theta, P, T_b, T_u) \quad (3.56)$$

Una ecuación de requisito puede ser derivada de la Ec. (3.11) para el volumen específico del sistema. Derivándola e incorporando la Ec (3.22) y (3.23) se obtiene :

$$\frac{1}{m} \frac{dV}{d\theta} - \frac{V}{m^2} \frac{dm}{d\theta} = x \frac{dv_b}{d\theta} + (1-x) \frac{dv_u}{d\theta} + (v_b - v_u) \frac{dx}{d\theta}$$

$$\frac{1}{m} \frac{dV}{d\theta} + \frac{VC}{m\varpi} = x \frac{v_b}{T_b} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \frac{dT_u}{d\theta} + (1-x) \frac{v_u}{T_u} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \frac{dT_u}{d\theta}$$

$$+ \left[x \frac{v_b}{P} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln P} + (1-x) \frac{v_u}{P} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln P} \right] \frac{dP}{d\theta} + (v_b - v_u) \frac{dx}{d\theta} \quad (3.57)$$

La ecuación que necesitamos viene de la introducción de la entropía del gas no quemado dentro del análisis. Tratando al gas no quemado como un sistema abierto con pérdida de masa vía fuga por los anillos y combustión, por consiguiente:

$$-Q_u = \omega * m(1-x)T_u \frac{ds_u}{d\theta} \quad (3.58)$$

Para utilizar la Ec. (3.58), la ecuación de estado relativa a la entropía a determinada temperatura y presión es:

$$s_u = s_u(T_u, p) \quad (3.59)$$

De la cual obtenemos

$$\frac{ds_u}{d\theta} = \left(\frac{\partial s_u}{\partial T_u} \right) \frac{dT_u}{d\theta} + \left(\frac{\partial s_u}{\partial P} \right) \frac{dP}{d\theta} \quad (3.60)$$

$$\frac{ds_u}{d\theta} = \left(\frac{c_{pu}}{T_u} \right) \frac{dT_u}{d\theta} - \frac{v_u}{T_u} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \frac{dP}{d\theta} \quad (3.61)$$

A través de la eliminación de $\frac{ds_u}{d\theta}$ entre Ec. (3.58) y (3.61) conseguimos

$$c_{pu} \frac{dT_u}{d\theta} - v_u \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \frac{dP}{d\theta} = \frac{-h \left(\frac{\pi b^2}{2} + \frac{4V}{b} \right) (1-x^{1/2})}{\varpi m (1-x)} (T_u - T_w) \quad (3.62)$$

Las tres ecuaciones que producirán las ecuaciones (3.51), (3.52) y (3.53) serán la ecuación (3.11), (3.57), y (3.62). Para nuestra conveniencia definimos algunas variables:

$$A = \frac{1}{m} \left(\frac{dV}{d\theta} + \frac{VC}{\varpi} \right) \quad (3.63)$$

$$B = h \frac{\left(\frac{\pi b^2}{2} + \frac{4V}{b} \right)}{\varpi m} \left[\frac{v_b}{c_{pb}} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} x^{1/2} \frac{(T_b - T_w)}{T_b} + \frac{v_u}{c_{pu}} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} (1-x^{1/2}) \frac{(T_u - T_w)}{T_u} \right] \quad (3.64)$$

$$C = -(v_b - v_u) \frac{dx}{d\theta} - v_b \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \frac{h_u - h_b}{c_{pb} T_p} \left[\frac{dx}{d\theta} - \frac{(x - x^2)C}{\varpi} \right] \quad (3.65)$$

$$D = x \left[\frac{v_b^2}{c_{pb} T_b} \left(\frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \right)^2 + \frac{v_b}{P} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln P} \right] \quad (3.66)$$

$$E = (1-x) \left[\frac{v_u^2}{c_{pu} T_u} \left(\frac{\partial \text{Inv}_u}{\partial \ln T_u} \right)^2 + \frac{v_u}{P} \frac{\partial \text{Inv}_u}{\partial \ln P} \right] \quad (3.67)$$

Finalmente las seis ecuaciones a ser integradas son:

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{A+B+C}{D+E} \quad (3.68)$$

$$\frac{dT_b}{d\theta} = \frac{h \left(\frac{\pi b^2}{2} + \frac{4V}{b} \right) x^{1/2} (T_b - T_w)}{\varpi m c_{pb} x} + \frac{v_b}{c_{pb}} \frac{\partial \text{Inv}_b}{\partial \ln T_b} \left(\frac{A+B+C}{D+E} \right) + \frac{h_u - h_b}{x c_{pb}} \left[\frac{dx}{d\theta} - (x - x^2) \frac{C}{\varpi} \right] \quad (3.69)$$

$$\frac{dT_b}{d\theta} = \frac{h \left(\frac{\pi b^2}{2} + \frac{4V}{b} \right) (1 - x^{1/2}) (T_u - T_w)}{\varpi m c_{pb} x (1-x)} + \frac{v_u}{c_{pu}} \frac{\partial \text{Inv}_u}{\partial \ln T_u} \left(\frac{A+B+C}{D+E} \right) \quad (3.70)$$

$$\frac{dW}{d\theta} = P \frac{dV}{d\theta} \quad (3.71)$$

$$\frac{dQ_l}{d\theta} = \frac{h}{\varpi} \left(\frac{\pi}{2} b^2 + \frac{4V}{b} \right) \left[x^{1/2} (T_b - T_w) + (1 - x^{1/2}) (T_u - T_w) \right] \quad (3.72)$$

$$\frac{dH_l}{d\theta} = \frac{Cm}{\varpi} \left[(1 - x^2) h_u + x^2 h_b \right] \quad (3.73)$$

Este conjunto de ecuaciones es el cual nos va a indicar las propiedades de la mezcla no quemada como de productos de la combustión durante el desarrollo de la simulación.

3.2.3 Modelo de admisión-escape.

Cuando realizamos estos modelos debemos considerar la mayor cantidad de los siguientes factores:

- Efectos cuasi-estacionarios
- Presencia de gases residuales
- Volumen ocupado por el combustible vaporizado
- Vaporización del combustible
- Transferencia de calor

- Fricciones en ductos y válvulas
- Bloqueo
- Efectos debidos a la inercia del flujo
- Tuning

Existen tres tipos de simulaciones aplicables para lograr este tipo de simulaciones.

- Modelo cuasi-estacionario con el cual se puede analizar el flujo a través de restricciones y la caída de la carga en dichos elementos.
- Modelo de llenado (carga y descarga; modelos no estacionarios) obtendríamos la variación temporal de la temperatura y la presión sin describir el campo de velocidades ni las variaciones espaciales de presión, este tipo de modelos será útil para observar la variación de la eficiencia volumétrica con respecto a las revoluciones del motor.
- Modelo de dinámica de gases, este nos proporcionará información detallada del campo de velocidades y presión, estos modelos permitirán calcular las dimensiones y geometrías específicas para los ductos de admisión y escape, pero debido a la complejidad de sus cálculos y análisis requiere de un proyecto independiente para lograr su entendimiento e implementación.

El modelo de admisión y escape que nosotros empleamos considera los efectos del flujo a través de las restricciones así como la transferencia de calor, pero no considera los efectos de los gases quemados en la válvula de escape, este efecto es importante, pero su análisis requeriría una estudio mas a fondo que el realizado en el presente trabajo.

Se ha tenido en cuenta el efecto del adelanto a la apertura y el retraso al cierre en las válvulas de admisión y escape, sin embargo, el traslape de válvulas fue analizado y tenido en cuenta en el análisis, más no en el modelo final debido a su complejidad.

Se utiliza una relación muy sencilla entre el área a través de la cual pasan los gases de escape, en relación al ángulo del cigüeñal.⁶

$$A_{ex} = A_o * \left\{ \left[180 * \frac{\theta + \theta_{ex}}{180 + \theta_{ex}} \right] \right\}^{1/3} \quad (3.74)$$

⁶ Campell, A. Thermodynamic Analysis of Combustión Engines. Malabar- Florida, Robert E. Krieger, 1^{ra} Edición 1985.

Siendo A_{ex} el área de paso de los gases para un ángulo de cigüeñal θ , A_o es el área efectiva de la válvula y θ_{ex} es el ángulo de apertura de la válvula de escape.

Para la presión se obtiene una ecuación del siguiente tipo:

$$dP = K_p * P \left(\frac{I}{M} * \frac{dM}{dt} - \frac{1}{V} * \frac{dV}{dt} \right) * dt + dP_{ht} \quad (3.75)$$

Donde K_p es la razón de los calores específicos de los productos, M , es la masa de los gases en el cilindro, dM/dt es el flujo de gases a través de las válvulas. Una ecuación similar se obtiene para la admisión.

3.2.4 Parámetros de operación de un motor.

En esta sección resumimos algunos parámetros comúnmente usados para caracterizar un motor de combustión interna. Los factores más importantes para un diseñador y para el usuario de un motor son:

- Curvas características (potencia, presión, temperatura, etc.)
- Eficiencia global
- Consumo específico de combustible
- Ruido y emisión de contaminantes dentro del rango de presión
- Costo y duración del motor.

En este proyecto haremos hincapié en los dos primeros aspectos buscando el trazado del ciclo, las curvas características y la estimación de la eficiencia global.

4 FASE DE INICIO DEL SOFTWARE

El objetivo fundamental de la fase de inicio es obtener una arquitectura candidata para el sistema, para esto nos centramos en los objetivos fundamentales del proyecto, que complementados con la información consignada en el marco teórico presente en capítulos anteriores de este libro, nos permita obtener una visión clara de los alcances y límites del proyecto.

Esta fase se ha desarrollado en una sola iteración pasando por los flujos de requisitos y análisis, mediante los cuales se obtuvo una arquitectura candidata que nos guiará en el desarrollo de las fases posteriores.

En el flujo de requisitos se obtuvo un listado de funcionalidades y actores del sistema, que nos describen un modelo de casos de uso para esta fase, y que servirá de modelo inicial guía para el desarrollo del proyecto.

Así mismo en el flujo de análisis se identificaron los primeros paquetes de análisis, los posibles paquetes de servicio y las dependencias entre estos paquetes. Todo esto partiendo del modelo de casos de uso obtenido durante el flujo de requisitos.

4.1 FLUJO DE REQUISITOS

El objetivo principal del presente proyecto es desarrollar un sistema que permita realizar simulaciones del funcionamiento de los motores de combustión interna de 4 tiempos por encendido a chispa multicilíndricos (MCI 4T), de tal manera que las personas interesadas en el estudio de dichos motores, y fundamentalmente los estudiantes de ingeniería mecánica de la UIS, que cursen la materia de Máquinas Térmicas Alternativas (MTA), puedan valorar los procesos por separado y en su conjunto de un motor real, teniendo como punto de comparación los valores de rendimiento de los ciclos teóricos para poder establecer el grado de perfección de los procesos en los motores y crearse una idea de la forma como pueden optimizarse la capacidad de trabajo en el motor.

De acuerdo a lo consignado en el párrafo anterior, podemos citar dos procedimientos básicos y fundamentales para el desarrollo del sistema como son:

- 1) Realizar la simulación de los ciclos ideales de los motores de combustión interna.
- 2) Realizar la simulación del ciclo real de un MCI 4T multicilíndrico.

4.1.1 Modelo del dominio.

El modelo del dominio fue registrado en los capítulos 2 y 3 del presente proyecto.

4.1.2 Listado de funcionalidades.

Los procedimientos listados en el numeral 4.1.1 y en el marco teórico se han agrupado en una funcionalidad básica llamada simular escenario, así mismo, luego de las entrevistas con los usuarios del sistema y con las personas expertas en el tema, hemos podido observar la necesidad de incorporar otras funcionalidades como la creación del escenario de simulación, la edición de los datos del escenario de simulación, la graficación de variables del escenario de simulación y las consultas de los parámetros y datos de simulación. El listado de funcionalidades es la siguiente:

- Crear escenario de simulación.
- Editar datos de un escenario de simulación.
- Simular escenario.
- Graficar variables de un escenario de simulación.
- Consultar parámetros de un escenario de simulación resuelto.
- Consultar datos de un escenario de simulación resuelto.

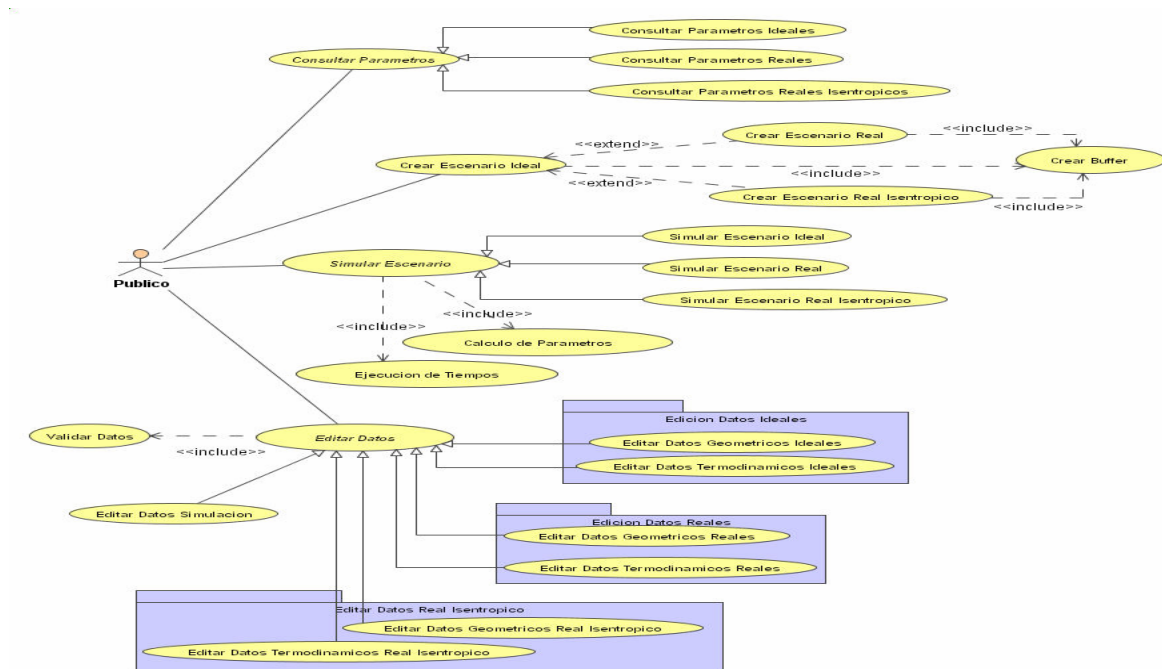
4.1.3 Listado de actores.

Los actores hacen referencia a los usuarios del sistema. Hemos considerado un usuario llamado público.

4.1.4 Diagrama de casos de uso.

Teniendo en cuenta los requisitos o funcionalidades listadas en el numeral 4.1.2, y realizando un análisis a estos requisitos, hemos llegado a obtener el siguiente diagrama de casos de uso, que será explicado a continuación.

Figura 10. Diagrama de casos de uso General

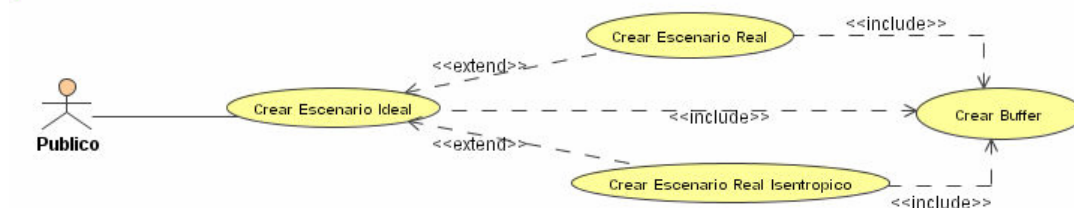


Autores proyecto

Haremos la explicación de este diagrama de casos de uso, por secciones para poder abarcar la totalidad del mismo de una forma entendible. Para esto se describirá el caso de uso y se mostrara una ficha técnica para cada uno de los mismos.

- **Creación de escenarios:** La siguiente es la sección del diagrama de casos de uso, que muestra la creación de escenarios de simulación.

Figura 11. Diagrama del caso de Uso "Creación de escenarios" de simulación



Autores proyecto.

➤ **Creación escenario ideal:**

Descripción: El usuario publico, podrá ejecutar la acción de crear un escenario en el sistema. En el diagrama anterior, se observa que el usuario puede crear un

escenario de tipo ideal, pero de la misma forma se pueden observar que los casos de uso **Crear Escenario Real** y **Crear Escenario Real Isentrópico**, extienden la funcionalidad del caso de uso **Crear Escenario Ideal**, esto debido a que el usuario inicialmente decide crear un escenario de simulación y el sistema da la opción de crear por omisión un escenario de tipo ideal, el cual el usuario puede cambiar por un escenario de tipo Real o Real Isentrópico, según sea su necesidad, de ahí la existencia de la relación extends. Así mismo, analizar que los tres casos de uso (Crear Escenario Ideal, Crear Escenario Real y Crear Escenario Real Isentrópico), ejecutan acciones comunes, como es el caso de la creación del buffer donde se va a guardar la información de la simulación realizada, por esto los tres casos de uso incluyen la funcionalidad del caso de uso **Crear Buffer**.

NOTA:

La descripción de este caso de uso y la ficha técnica que se mostrara a continuación aplica también para los casos de uso Crear Escenario Real y Crear Escenario Real Isentrópico.

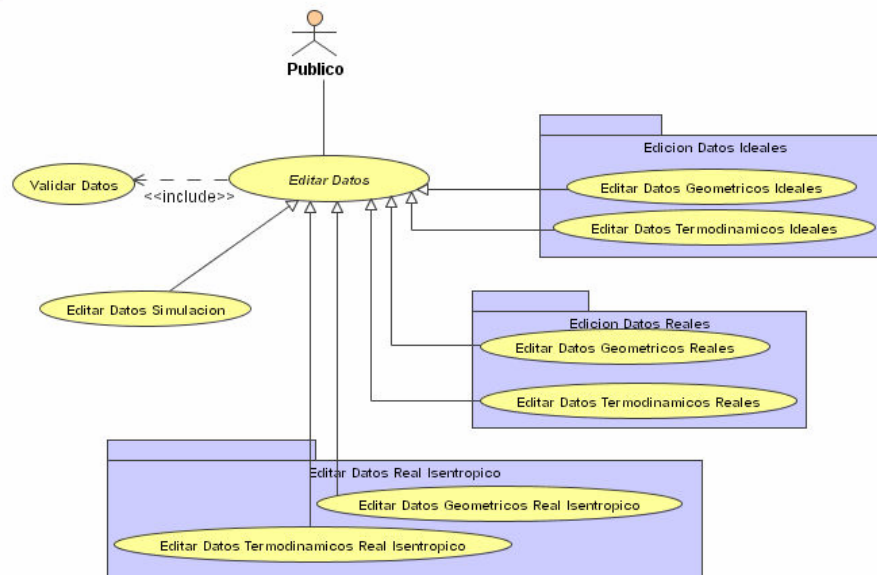
Tabla 3. Ficha técnica caso de uso editar escenario ideal.

Actores: Publico.
Precondiciones: Ninguna en particular
Flujo Normal: <ol style="list-style-type: none"> 1. El usuario da clic en el botón que ejecuta la acción de crear Escenario 2. El usuario verifica que el tipo de escenario a crear sea de tipo ideal en una ventana de confirmación y da clic en el botón aceptar. 3. El sistema valida y realiza la creación del tipo de escenario seleccionado, teniendo en cuenta la creación de los datos Geométricos, Termodinámicos, de Simulación y el buffer del mismo escenario.
Flujo Alternativo: <ol style="list-style-type: none"> 2. El usuario selecciona otro tipo de escenario diferente del ideal o cancela la acción de ejecución del caso de uso.
Post-condición: El escenario ha sido creado.

Autores proyecto

- **Editar datos:** La siguiente es la sección del diagrama de casos de uso, que muestra la edición de los datos de los diversos tipos de escenarios.

Figura 12. Diagrama del caso de uso "Edición de datos" en diferentes tipos de escenarios



Autores proyecto.

➤ **Editar datos geométricos ideales:**

Descripción: Primero que todo es necesario saber que el caso de uso *Editar Datos* tiene relación directa con el usuario Publico, pero este es un caso de uso abstracto, por eso su nombre se encuentra en letra cursiva. Un caso de uso abstracto es aquel que no se ejecuta como tal en el sistema, es decir el usuario no va a ejecutar la acción de editar datos, si no que el usuario va a ejecutar la acción directa de editar los datos geométricos de un escenario ideal la cual se encuentra representada en el diagrama de casos de uso por el caso de uso **Editar Datos Geométricos Ideales**. De la misma manera el actor Publico realizará de forma directa los casos de uso **Editar Datos Termodinámicos Ideales**, **Editar Datos Geométricos Reales**, **Editar Datos Termodinámicos Reales**, **Editar Datos Geométricos Real Isentrópico**, **Editar Datos Termodinámicos Real Isentrópico** y **Editar Datos Simulación**. La razón de ser del caso de uso *Editar Datos* es mostrar por medio de la relación de generalización (herencia) cuyo significado lo dan las flechas no rellenas en el diagrama, que todos los casos de uso nombrados líneas mas arriba, heredan el proceso de edición de datos, es decir realizan este proceso de la misma manera, el cual consiste en realizar una validación de los datos y la posterior aceptación de los mismos, proceso inmerso en el caso de uso **Validar Datos** Incluido por el caso de uso **Editar Datos**.

NOTA: La descripción de este caso de uso (*Editar Datos Geométricos Ideales*) y la ficha técnica que se mostrara a continuación aplica también para los casos de uso *Editar Datos Termodinámicos Ideales*, *Editar Datos Geométricos Reales*,

Editar Datos Termodinámicos Reales, Editar Datos Geométricos Real Isentrópico, Editar Datos Termodinámicos Real Isentrópico y Editar Datos Simulación, por lo cual los casos de uso mencionados en esta nota no serán descritos.

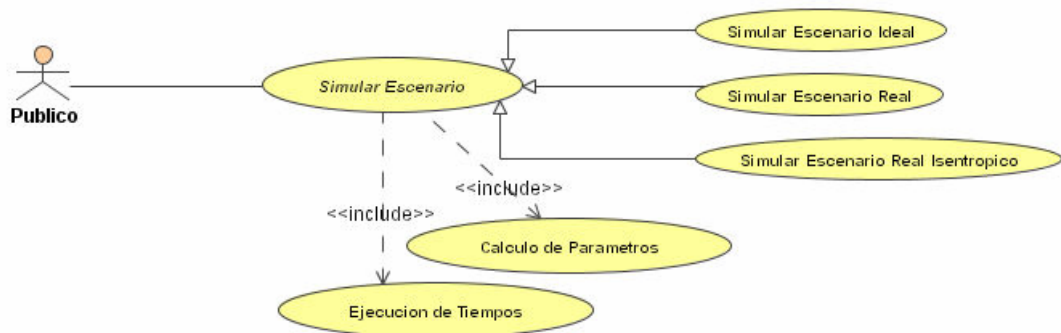
Tabla 4. Ficha técnica caso de uso editar datos geométricos.

Actores: Publico.
Precondiciones: El usuario debe haber creado el escenario ideal específico y situarse en la interfaz que le da la opción de editar los datos geométricos de un escenario ideal.
Flujo Normal: <ol style="list-style-type: none"> 1. El usuario da clic en el botón Editar de la interfaz pertinente. 2. El usuario procede a cambiar los datos geométricos necesarios 3. El usuario da clic en el botón Aceptar de la interfaz pertinente. 4. El sistema valida la pertinencia de los datos. 5. El sistema realiza el cambio de los datos geométricos en el escenario.
Flujo Alternativo 1: <ol style="list-style-type: none"> 3. El usuario cancela la ejecución del caso de uso dando clic en el botón cancelar de la interfaz pertinente. Flujo Alternativo 2: <ol style="list-style-type: none"> 4. El sistema valida la pertinencia de los datos, encuentra errores y muestra el respectivo mensaje de error al actor para que corrija los datos editados.
Post-condición: Se han cambiado todos o algunos de los datos geométricos de un escenario Ideal

Autores proyecto.

- **Simular escenarios:** La siguiente es la sección del diagrama de casos de uso, que muestra la Simulación de los escenarios.

Figura 13. Diagrama de caso de Uso "Simular escenario"



Autores proyecto.

➤ **Simular escenario ideal:**

Descripción: El caso de uso *Simular Escenario* es abstracto al igual que el caso de uso *Editar Datos*, por esto el usuario no ejecuta directamente este caso de uso, pero si lo hace con los casos de uso **Simular Escenario Ideal**, **Simular Escenario Real** y **Simular Escenario Real Isentrópico**, los cuales heredan el funcionamiento del caso de uso *Simular Escenario*, ya que para simular cualquier escenario de los nombrados anteriormente, se deben realizar la ejecución de tiempos y el calculo de parámetros, por esto, los dos últimos procesos citados, se encuentran como casos de uso incluidos en *Simular Escenario*, con lo cual los tres casos de uso nombrados al inicio, heredan la relación incluye con estos casos de uso. La ejecución de tiempos consiste en resolver los modelos pertinentes para un escenario seleccionado en cada uno de los tiempos del funcionamiento del motor (Admisión, Compresión, Expansión y Escape) y el cálculo de parámetros como su nombre lo indica consiste en calcular los parámetros básicos que dan una noción del funcionamiento del motor que compone el escenario simulado, para el caso de un escenario real estamos hablando básicamente del trabajo y la eficiencia térmica.

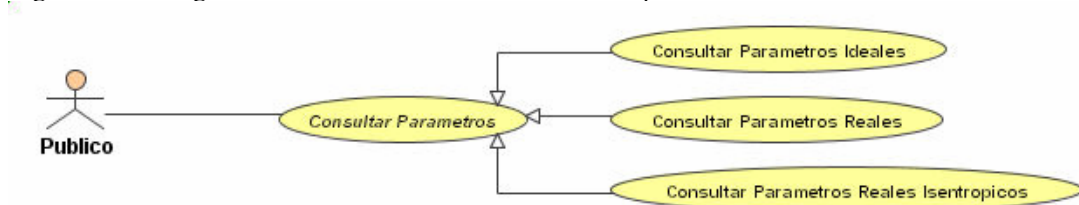
Tabla 5. Ficha técnica caso de uso simular escenario ideal.

Actores: Público.
Precondiciones: El usuario debe haber creado un escenario de tipo ideal.
Flujo Normal: <ol style="list-style-type: none"> 1. El usuario selecciona un escenario de tipo ideal. 2. El usuario selecciona la pestaña simular. 3. El usuario da clic en el botón simular. 4. El sistema realiza el proceso de ejecución de tiempos. <ol style="list-style-type: none"> 4.1 Se itera hasta concluir el estado de compresión. 4.2 Se itera hasta concluir el estado de Adición de calor a volumen constante. 4.3 Se itera hasta concluir el estado de Adición de calor a presión constante. 4.4 Se itera hasta concluir el estado de expansión. 5 El sistema realiza el cálculo de parámetros.
Flujo Alternativo: <ol style="list-style-type: none"> 3. El usuario decide no llevar a cabo el caso de uso y selecciona otra pestaña u otro escenario.
Post-condición: El escenario ha sido simulado y los parámetros calculados.

Autores proyecto.

- **Consultar parámetros:** La siguiente es la sección del diagrama de casos de uso, que muestra la consulta de los parámetros obtenidos al simular un escenario.

Figura 14. Diagrama del caso de uso "Consulta de parámetros".



Autores proyecto.

Descripción: Los casos de uso **Consultar Parámetros Ideales**, **Consultar Parámetros Reales** y **Consultar Parámetros Reales Isentrópicos**, permiten al actor publico, ver el valor de los diferentes parámetros de acuerdo al tipo de escenario seleccionado. Estos casos de uso heredan la forma como se realiza este proceso del caso de uso abstracto **Consultar Parámetros**.

Tabla 6. Ficha técnica caso de uso consultar parámetros.

Actores: Usuario Público.
Precondiciones: El usuario debe haber creado un escenario de tipo ideal, Real o Real Isentrópico y haberlo simulado.
Flujo Normal: <ol style="list-style-type: none"> 1. El usuario selecciona un escenario de tipo ideal. 2. El usuario selecciona la pestaña Parámetros indicados. 3. El sistema muestra los valores de cada parámetro de acuerdo al tipo de escenario seleccionado para la ejecución del caso de uso.
Flujo Alternativo: 3. El usuario decide no llevar a cabo el caso de uso y selecciona otra pestaña u otro escenario.
Post-condición: El sistema muestra los parámetros al usuario por medio de la Interfaz de usuario.

Autores proyecto.

4.1.5 Listado final de casos de uso.

En la siguiente tabla se listan los diversos grupos de casos de uso, listados según su prioridad.

Tabla 7. Casos de uso según prioridad

CASO DE USO	ACTOR	PRIORIDAD
Crear escenario	Público	Crítico
Editar datos geométricos	Público	Crítico
Editar datos termodinámicos	Público	Crítico
Editar datos simulación	Público	Crítico
Simular escenarios	Público	Crítico
Consultar parámetros	Público	Importante

Autores proyecto.

4.2 FLUJO DE ANALISIS

En este punto es necesario citar que se analizaron los casos de uso etiquetados como críticos en la tabla anterior.

4.2.1 Análisis general de casos de uso.

En este punto, se analizarán los diferentes estados y actividades de ser necesario, de los casos de uso críticos listados en el flujo de requisitos.

- **Simular escenario:**

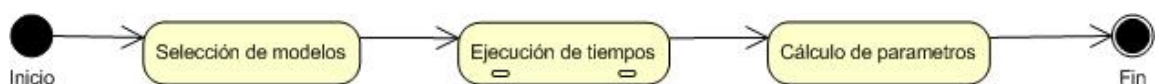
Por ser este un caso de uso amplio que describe prácticamente los procedimientos básicos requeridos en el sistema, se decidió etiquetarlo como un caso de uso extendido, lo que quiere decir que una parte de su análisis será realizada en esta fase y el resto en fases posteriores. Por lo anterior, Teniendo en cuenta los estados presentes en la simulación de un MCI 4T, hacemos un análisis de estos, aplicados a la simulación de los escenarios ciclo ideal Otto, ciclo ideal diesel, ciclo dual, y se deja el análisis del ciclo real Otto para fases posteriores.

Para este análisis utilizamos diagramas de estados. Estos son un grafico cuyos nodos son los estados, que se representan mediante cajas redondeadas unidas por flechas denominadas transiciones. Estos tipos de diagramas tienen un estado inicial representado por un círculo relleno y el estado de fin representado por un círculo relleno rodeado de otro círculo.

Para iniciar con este análisis, es importante notar que la simulación de un MCI 4T tiene básicamente 3 estados fundamentales que son: selección de modelos, ejecución de tiempos, cálculo de parámetros.

A continuación la siguiente figura muestra el diagrama de estados para un objeto simulación de un MCI 4T.

Figura 15. diagrama de estados para un objeto simulación de un MCI 4T.



Autores proyecto.

La simulación del escenario de un MCI 4T, inicia en el estado de selección de modelos, en el cual se hace una validación del tipo de escenario a simular, es decir se verifica el tipo de MCI 4T contenido por el escenario de simulación (ciclo ideal Otto, ciclo ideal diesel, ciclo dual o ciclo real Otto), y de acuerdo a esto se seleccionan los modelos a resolver para cada uno de los tiempos de simulación de acuerdo al tipo de MCI 4T.

Luego de esto, se pasa al estado de ejecución del ciclo, donde se itera desde un ángulo de inicio de simulación hasta un ángulo de fin de simulación. En cada una de estas iteraciones, se verifica el tiempo actual de simulación (Admisión, compresión, expansión, escape) y se resuelven el o los modelos seleccionados para dicho tiempo.

Finalmente, al terminar la ejecución del ciclo, se pasa al estado de cálculo de parámetros, donde se hace como su nombre lo indica el cálculo de los parámetros que me describen finalmente el funcionamiento del MCI 4T (eficiencia térmica, potencia, entre otros).

Ahora vamos a realizar el análisis de los subestados que componen al estado ejecución de tiempos según el tipo de motor a simular.

- **Ciclo ideal Otto:** Para el caso de la simulación de un escenario correspondiente a un ciclo ideal Otto, se debe tener en cuenta para la ejecución de tiempos, los estados de compresión, adición de calor a volumen constante y expansión, como se muestra en el siguiente diagrama.

Figura 16. Diagrama de subestados de un ciclo ideal Otto

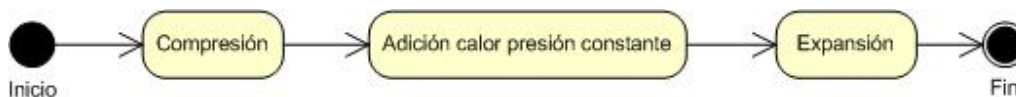


Autores proyecto.

Esto nos indica que la simulación de un escenario de tipo ciclo ideal Otto, pasa por los estados vistos en la figura 16, pero que en el estado de ejecución de tiempos, toma algunos subestados mas como son los mostrados en el diagrama anterior. La transición indica que primero se ingresa en un estado de compresión, que se da durante el tiempo en que el pistón viaja del PMI al PMS, seguido de un estado de adición de calor a volumen constante, que se da cuando el pistón está en el PMS, y finalizando con el estado del expansión, contenido durante el viaje hecho por el pistón desde el PMS hasta el PMI.

- **Ciclo ideal diesel:** La simulación de un escenario de tipo ciclo ideal diesel, tiene como complemento a su diagrama de estados el siguiente diagrama de subestados.

Figura 17. Diagrama de subestados de un ciclo ideal Diesel.



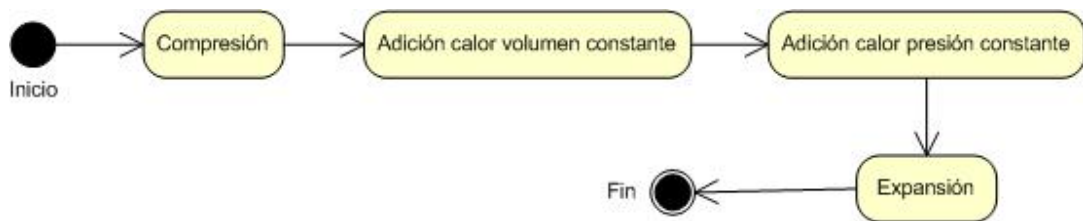
Autores proyecto.

El anterior diagrama, muestra que para el ciclo ideal diesel, primero se entra a un estado de compresión, que se da durante el viaje del pistón del PMI al PMS, luego se pasa a un estado de adición de calor a presión constante, que se da durante el viaje del pistón desde el PMS hasta el punto marcado por el ángulo del cigüeñal dado por la cantidad de calor adicionada que permite que la presión se mantenga constante aunque el volumen permitido por el cilindro aumente, y finalmente se pasa a un estado de

expansión propiamente dicha, que se da por el viaje del pistón desde el ángulo de finalización del estado de adición de calor a presión constante hasta el ángulo de cigüeñal correspondiente al PMI.

- **Ciclo dual:** La simulación de un escenario de tipo ciclo dual, tiene como complemento a su diagrama de estados el siguiente diagrama de subestados.

Figura 18. Diagrama de subestados del Ciclo dual

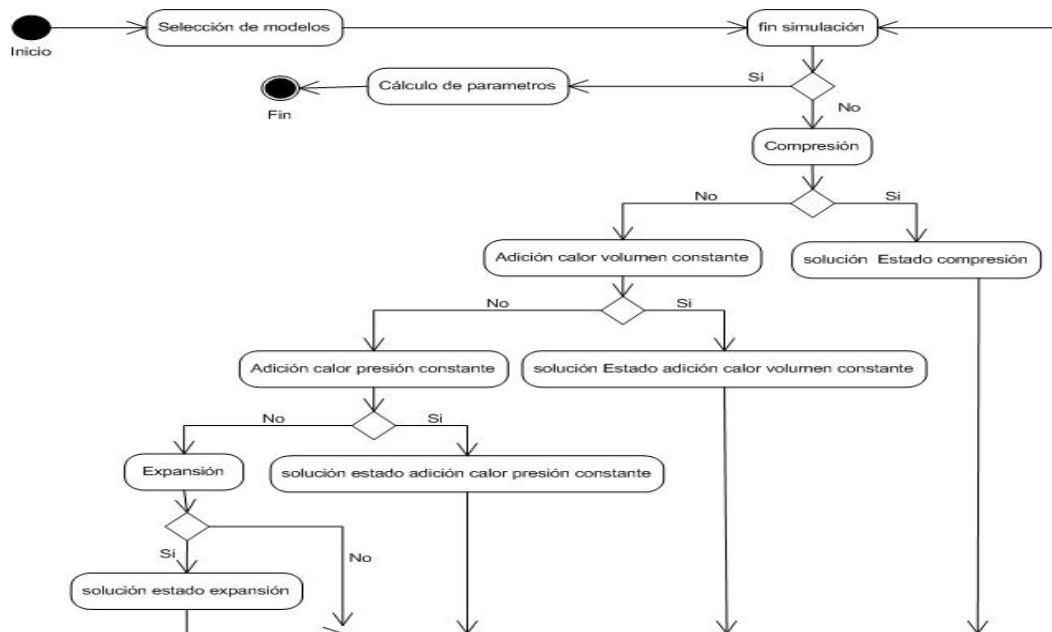


Autores proyecto.

En el anterior diagrama observamos que el ciclo dual es una combinación del ciclo ideal Otto y el ciclo ideal diesel. Inicialmente se entra a un estado de compresión, dado por el viaje del pistón del PMI al PMS, luego se pasa a un estado de adición de calor a volumen constante, dado cuando el pistón se encuentra en el PMS, posteriormente se pasa al estado de adición de calor a presión constante, marcado por el viaje del pistón desde el PMS hasta el punto marcado por el ángulo del cigüeñal dado por la cantidad de calor adicionada, y finalmente se pasa al estado de expansión dado por el viaje del pistón del punto de finalización del estado de adición de calor a volumen constante hasta el PMI.

De lo anterior podemos concluir que el ciclo dual recoge las características generales del ciclo ideal Otto y el ciclo ideal diesel. Según esto, hemos realizado el diagrama de actividades que describe en forma general el proceso de simulación de un escenario de cualquier tipo de ciclo ideal estudiado hasta este punto.

Figura 19. Diagrama de actividades del caso de uso simular escenario



Autores proyecto.

En la figura 19, podemos notar que al inicio del caso de uso simular escenario, para el evento de la simulación de cualquiera de los tipos ideales ya sea Otto, diesel o dual, se realiza una actividad de selección de modelos, en la cual según el tipo de escenario se seleccionan los modelos a resolver para cada una de las iteraciones posteriores presentes durante el estado de solución de tiempos. En esta actividad de selección de modelos, se deben tener en cuenta los tiempos presentes para cada tipo de escenario y crear los modelos correspondientes a cada uno de estos tiempos. Es importante darnos cuenta que la actividad de selección de modelos coincide con el estado que tiene su mismo nombre.

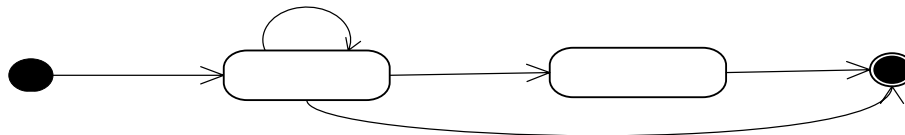
Posteriormente, se pasa al estado de ejecución de tiempos, el cual engloba varias actividades. Inicialmente se realiza la actividad de validar si se ha llegado al fin de la simulación, esto verificando si el ángulo actual de simulación coincide con el ángulo final de la simulación. En caso que no se halla llegado al final de la simulación, se verifica el tiempo actual de simulación. Si este es compresión, se realiza la actividad solución estado compresión, en la cual se resuelven los modelos que describen las características del MCI 4T en cuestión para este tiempo. En caso de que el estado no sea compresión se valida si es adición calor volumen constante, caso en el cual se realiza la actividad solución estado adición calor volumen constante donde se resuelven los modelos seleccionados para este tiempo. De la misma manera se procede con la validación de los estados adición calor presión constante y expansión.

Con el fin del proceso iterativo en el que se valida y resuelven cada uno de los modelos concernientes a los diversos tiempos del motor, también finaliza el estado de ejecución de tiempos del caso de uso simular escenario, y se entra al estado de cálculo de parámetros, descrito en el diagrama de actividades anterior por la actividad que lleva el mismo nombre. Durante esta actividad se realiza el cálculo de la eficiencia térmica del motor y de la potencia del mismo.

➤ **Crear escenario simulacion:**

Flujo de sucesos: Los estados identificados para este caso de uso son presentados en el siguiente diagrama.

Figura 20. Diagrama de estados del caso de uso "crear escenario"



Autores proyecto.

Camino básico:

Capturar datos: En este estado, el sistema presenta la interfaz para que el actor de un nombre y seleccione un tipo de escenario. Posteriormente se espera que el actor dé la orden final de crear el escenario.

Crear escenario: El sistema se encarga de crear un escenario de simulación de un MCI 4T de tipo ideal (ciclo Otto, ciclo diesel, ciclo dual) o tipo real (ciclo ideal Otto).

Caminos alternativos:

Capturar datos escenario - Capturar datos escenario: Este camino se presenta cuando el actor no cumple con las condiciones básicas de dar un nombre o seleccionar un tipo de escenario de simulación y da la orden de la creación del escenario, Caso en el cual el sistema mostrará el respectivo mensaje de error y quedará en el mismo estado de capturar datos escenario.

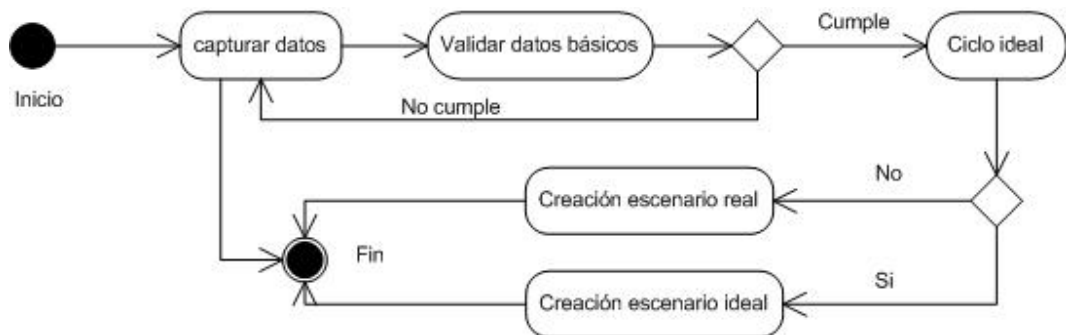
Capturar datos escenario - fin: Este camino se presenta cuando el actor desiste de la realización del caso de uso y por ende lo cancela.

Actividades relacionadas: Las actividades relacionadas con este caso de uso se muestran en el siguiente diagrama.

Capturar datos

Inicio

Figura 21. Diagrama de actividades del caso de uso "crear escenario"



Autores proyecto.

El sistema inicia el caso de uso con la captura de los datos básicos para la creación del escenario y espera la orden para la creación definitiva del mismo, estos datos son validados, y en caso de pasar la prueba de validación, se verifica el tipo de escenario a crear y finalmente se crea el escenario con los datos respectivos de acuerdo a si el escenario creado es de tipo ideal o real. En caso tal de no cumplir la validación de datos básicos, el sistema vuelve a la actividad de captura de datos básicos, punto desde el cual se puede dar la cancelación del caso de uso o su nuevo intento.

➤ **Editar datos geométricos:**

Flujo de sucesos: Los sucesos identificados para este caso de uso son presentados en el siguiente diagrama.

Figura 22. Diagrama de Estados Para el caso de Uso "Editar Datos"



Autores proyecto.

Camino básico:

Espera de datos: En este estado el sistema aguarda a que el usuario cambie los datos Geométricos que desee.

Validación datos: En este estado el sistema verifica el tipo de escenario al que va a realizar el proceso de cálculo y carga de datos ya sea escenario ideal o real, y realiza la validación de formatos y rangos.

Carga de datos: Durante este estado el sistema realiza el cálculo de otros datos geométricos tomando como base los datos editados y hace la carga de los nuevos datos al escenario de simulación al que se le esté aplicando el caso de uso.

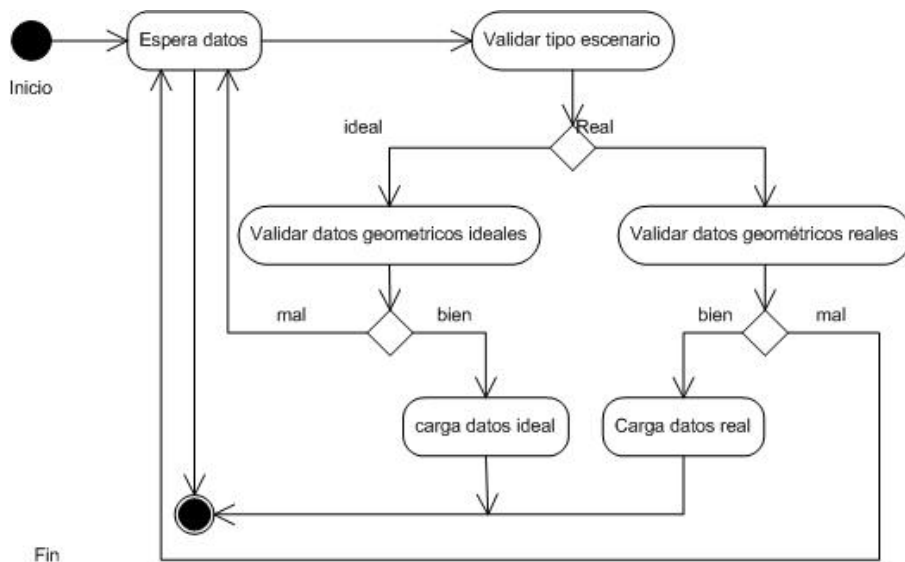
Caminos alternativos:

Validación datos – Espera datos: Este camino se presenta cuando después de haber editado los datos geométricos, estos no cumplen con las condiciones de formato y rango validados en el estado *validación datos*, caso en el cual el sistema vuelve al estado *espera datos*, para que estos sean modificados.

Espera datos – Fin: Este camino se presenta cuando el actor desiste de la realización del caso de uso durante el estado de espera de datos y lo cancela.

Actividades relacionadas: Las actividades relacionadas con este caso de uso se muestran en el siguiente diagrama.

Figura 23. Diagrama de actividades para el caso de uso “Editar Datos Geométricos”



Autores proyecto.

Este caso de uso se inicia con el estado de espera de datos, donde el actor realiza la edición de los datos geométricos y acepta el cambio. Con esta orden el sistema entra a validar si el tipo de escenario es ideal, caso en el cual se entra al estado *validar datos geométricos ideales* o en caso que el tipo de escenario sea real, el sistema entra al estado *validar datos Geométricos reales*. Si los nuevos datos geométricos son correctos en formato y rango el sistema ingresa al estado *carga datos real* o *carga datos ideal*, donde se realiza el cálculo de otros datos geométricos teniendo como base los datos editados y se hace la carga de los nuevos datos (editados y calculados) al escenario. En caso de que los datos editados no pasen la validación de formato y rango, el sistema volverá al estado de *espera de datos* donde se puede intentar de nuevo el proceso de edición o se puede cancelar la realización del caso de uso.

- **Editar datos termodinámicos y de simulación:** El Análisis de estos casos de uso se rige por los mismos diagramas de estados y actividades obtenidos en el análisis del caso de uso Editar datos geométricos, por lo cual no se consignan en este documento.

4.3 FLUJO DE DISEÑO

En esta sección ampliaremos la arquitectura del sistema, mostrando un diseño de clases inicial centrado en el modelo visto al inicio del flujo de análisis. El modelo de clases obtenido en este punto junto con el modelo de casos de uso, nos darán una arquitectura base del sistema, que será ampliada en posteriores fases, principalmente en la de elaboración, donde obtendremos la totalidad de los casos de uso, y completaremos los diagramas de clases para obtener así una arquitectura consistente para el sistema en desarrollo. A continuación se explicarán algunas ideas que nos permiten definir un modelo de clases básico.

Los diagramas de clases que se muestran mas adelante, nos presenta la abstracción hecha de un motor para ser utilizada de la manera más pertinente en el sistema en desarrollo. El caso de uso principal del proyecto es **Simular Escenario** para lo cual es importante diseñar las clases necesarias que contengan los atributos y métodos para poder llevar a cabo este caso de uso. Cada descripción de clases se encuentra a continuación dividida por ámbitos. (Ámbito el motor, ámbito de simulación, etc.)

4.3.1 Descripción del ámbito del motor.

Para iniciar con la explicación detallada del diagrama de clases, es importante dejar claro que se busca simular el funcionamiento de tres tipos de escenarios que representan motores diferentes, entre estos el motor Ideal, Ideal Isentrópico y un motor Real. Estos tres tipos de motor cuentan con atributos especiales, que finalmente son los que van a guiar y definir el proceso de simulación y los resultados del mismo. Estos atributos se modelan mediante diversas clases que también contienen los métodos necesarios para poder acceder a ellos.

Al analizar los datos se observó, que estos se pueden dividir en tres grupos como son los Datos Geométricos, Datos Termodinámicos y los Datos de Simulación. Algunos datos geométricos se encuentran en los tres tipos de motores como por ejemplo el Diámetro del cilindro, la carrera del pistón, la longitud de la biela, etc. Y otros como por ejemplo el ángulo de Apertura de la válvula de escape, el ángulo de apertura de la válvula de admisión, el ángulo de retardo en el cierre de la válvula de escape entre otros, corresponden solo al escenario de un motor real, por esta razón se generaron diferentes clases que representan los datos geométricos de los diferentes tipos de motores a modelar, lo mismo ocurre con los datos termodinámicos, a diferencia de los datos de simulación, que son los mismos para todos los tipos de escenarios a simular.

Otro punto importante en el diseño del proyecto es observar que de acuerdo a los valores de cada una de las variables, se puede presentar una forma diferente de simulación para cada escenario. Por ejemplo, un escenario ideal, tiene entre otros el aumento de calor a

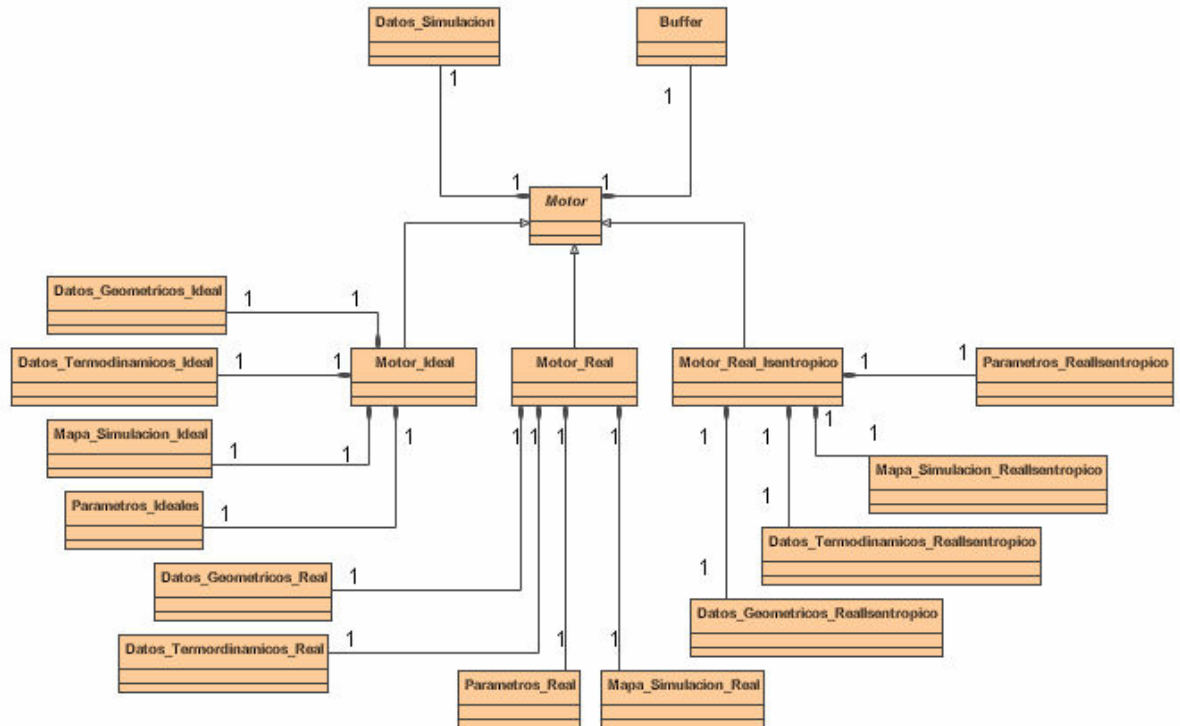
volumen constante y el aumento de calor a presión constante como atributos que forman parte de los datos termodinámicos de este tipo de motor, por lo cual si ambos atributos son mayores que cero entonces la simulación debe utilizar modelos que representen el proceso de compresión, adición de calor a volumen constante, adición de calor a presión constante y expansión, pero en el caso que un atributo como por ejemplo la adición de calor a presión constante sea cero entonces no se utilizaría un modelo para simular este proceso, ahora estos modelos deben ser ejecutados para cada paso de simulación entre unos ángulos de giro del cigüeñal específicos. Por lo anterior, se creó una clase llamada **Mapa_Simulacion**, que contiene la información necesaria para saber que modelos y en que momento se deben simular. Cada tipo de escenario tiene su propio Mapa_Simulacion: Mapa_Simulacion_Ideal, Mapa_Simulacion_Reallsentropico, Mapa_Simulacion_Real ya que cada escenario tiene diferentes atributos los cuales definen diferentes tiempos de simulación.

Así mismo, el proceso de simulación define en su última etapa, el cálculo de los parámetros del escenario que permiten observar el funcionamiento del motor. Estos parámetros también están representados en clases llamadas **Parámetros_Ideal**, **Parámetros_Reallsentropico** y **Parámetros_Real** que contienen como su nombre lo indica los valores de los parámetros de los diferentes tipos de escenarios y los métodos para calcularlos.

Para poder calcular los parámetros de los cuales hablamos en el párrafo anterior, se utilizan los valores de cada una de las variables obtenidas durante la solución de cada uno de los modelos que simulan el proceso del motor, por lo cual estos valores deben ser almacenados en la memoria del computador donde se realice la simulación. Para esto, se creó la clase **buffer** que contiene los métodos y atributos necesarios para almacenar y obtener la información calculada para cada variable en cada paso de simulación, tras la solución de los modelos.

En el diagrama de clases siguiente, podemos ver dos tipos de relaciones, ellas son la relación de composición y la generalización o herencia. La composición indica que cada componente puede pertenecer tan solo a un todo, y la generalización o herencia dicta que una clase (clase secundaria o subclase) puede heredar los atributos y operaciones de otra (clase principal o superclase).

Figura 24. Diagrama de clases del *Ámbito Motor*



Autores proyecto.

De acuerdo a las anteriores definiciones y observando el diagrama de clases podemos decir que una instancia de la clase **Motor_Ideal** esta compuesta instancias de las clases **Datos_Geometricos_Ideal**, **Datos_Termodinamicos_Ideal**, **Mapa_Simulacion_Ideal** y **Parametros_Ideales**. De la misma forma las instancias de las clases **Motor_Real_Isentropico** y **Motor_Real** están compuestas por las clases correspondientes y que se muestran en el diagrama de clases anterior.

También podemos ver que las tres clases de motores heredan de una súper clase llamada **Motor** la cual esta compuesta por una instancia de la clase **Datos_Simulacion** y **Buffer**, así las clases **Motor_Ideal**, **Motor_Real** y **Motor_Real_Isentropico** también están compuestas por instancias de las clases **Datos_Simulacion** y **Buffer**.

Para finalizar la descripción del diagrama de clases anterior, la clase **Motor** es una clase abstracta, por eso su nombre se encuentra en letra cursiva, y esto indica que no se crearan instancias (objetos) de esta clase, ya que las tipos de motores que vamos a simular son instancias de las clases **Motor_Ideal**, **Motor_Real** y **Motor_Real_Isentropico**.

4.3.2 Descripción del ámbito de simulación.

El objetivo fundamental del proyecto es simular el funcionamiento de los motores mediante la solución de modelos matemáticos que permitan describir el funcionamiento del motor en los diferentes instantes definidos por el ángulo de giro del cigüeñal. Estos instantes de los que acabamos de hablar los llamaremos en este proyecto tiempos de simulación, con el fin de entender de una mejor manera el término.

Pero una de las características que se buscan es que en posteriores proyectos, se pueda incrementar el universo de modelos y por que no de escenarios, de una forma sencilla, teniendo como base una plantilla que mostrara las clases de las que cada modelo debe heredar y la manera como se deben implementar para incorporar mas funcionalidades y detalle al sistema.

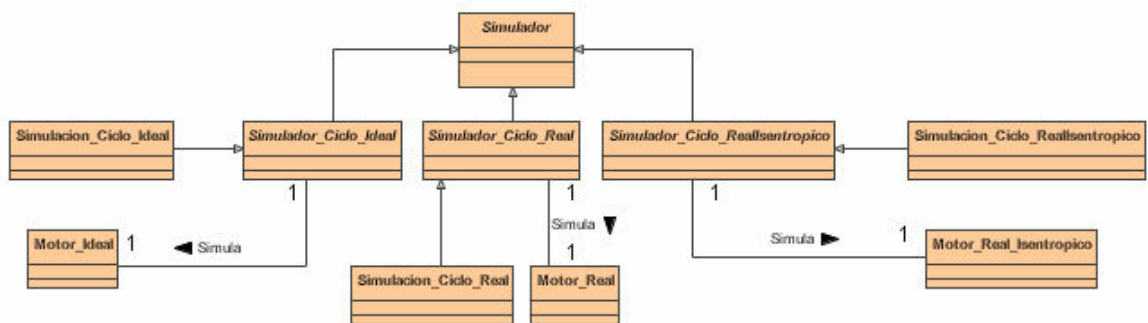
La simulación de una instancia de la clase `Motor_Ideal`, tiene básicamente cuatro hitos fundamentales como son la compresión, la adición de calor a volumen constante, la adición de calor a presión constante y la expansión, así mismo se pueden presentar tres escenarios diferentes de simulación , los cuales son:

- Ciclo Ideal Otto: Este escenario define tres tiempos de simulación como son el de compresión, adición de calor a volumen constante y expansión, el tiempo de adición de calor a presión constante no se presenta debido a que la variable que lo define tiene valor cero en el escenario a simular.
- Ciclo Ideal Diesel: Este escenario al igual que el anterior define también tres tiempos que son compresión, adición de calor a presión constante y expansión, el tiempo de adición de calor a volumen constante no se presenta debido a que la variable que lo define tiene valor de cero en el escenario.
- Ciclo Ideal Dual: Este escenario define cuatro tiempos de simulación que son compresión, adición de calor a volumen constante, adición de calor a presión constante y expansión. En los motores que se presenta este tipo de simulación, las variables de adición de calor a volumen constante y adición de calor a presión constante son mayores que cero.

Según lo anterior es necesario para llevar a cabo la simulación, controlar los tiempos de simulación y solucionar para cada uno de estos tiempos los modelos que los describen. Estos tiempos deben ser tomados de la clase `Mapa_Simulacion_Ideal` ya que esta clase contiene los tiempos a simular y los ángulos del cigüeñal de inicio y fin para cada uno de estos. Una de las características que se buscan es que el motor de simulación que controla los tiempos de simulación sea independiente de los modelos a simular, de tal manera que el anexar, eliminar o cambiar un modelo, se pueda realizar de una manera sencilla. Según lo descrito, es necesario definir dos niveles básicos en el ámbito de simulación, uno donde se encuentre el motor de simulación y el otro donde se definan los modelos a utilizar par cada tiempo que en últimas será la clase que se modificará en caso de querer realizar cambios en la simulación.

La misma descripción del funcionamiento de la clase **Simulador_Ciclo_Ideal** del párrafo anterior se aplica para las clases **Simulador_Ciclo_Real** y **Simulador_Ciclo_RealIsentropico**, resaltando que cada una de estas clases maneja tiempos de simulación diferentes, ya que estos principalmente se obtienen de acuerdo al valor de los atributos de los diferentes tipos de motor. A continuación veremos el diagrama que define el ámbito de simulación.

Figura 25. Diagrama de clases del ámbito simulador



Autores proyecto.

En el diagrama de clases anterior, podemos ver una súper clase base llamada **Simulador**, esta clase es abstracta y fue definida ya que es necesario de que las clases que simulan el funcionamiento de los motores se ejecuten como hilos (threads) y haciendo que esta clase herede de la clase Thread del API de java y que al mismo tiempo las clases **Simulador_Ciclo_Ideal**, **Simulador_Ciclo_Real** y **Simulador_Ciclo_RealIsentropico** hereden de la clase **Simulador**, podemos lograr que las clases simuladoras que acabamos de nombrar hereden el comportamiento de los hilos.

Los dos niveles del ámbito de simulación descritos anteriormente, están representados por las clases de tipo Simulador (**Simulador_Ciclo_Ideal**, **Simulador_Ciclo_Real** y **Simulador_Ciclo_RealIsentropico**) y las clases de tipo Simulación (**Simulacion_Ciclo_Ideal**, **Simulacion_Ciclo_Real** y **Simulacion_Ciclo_RealIsentropico**). Las clases de tipo Simulador implementan los métodos y atributos que ejecutan el motor de simulación, el cual se encarga de controlar los tiempos de simulación y hacer el llamado a cada uno de los métodos que se deben resolver en dichos tiempos de acuerdo al ángulo de giro del cigüeñal. Y las clases de tipo Simulación definen los métodos que describen a cada tiempo de simulación haciendo el llamado a los modelos respectivos.

En caso tal que se quiera adicionar un modelo específico al ámbito de simulación, solo bastaría con definir la clase que represente al modelo y hacer el llamado de una instancia de dicho modelo en los métodos que describen los tiempos de simulación y que se encuentran definidos en las clases **Simulacion_Ciclo_Ideal**, **Simulación_Ciclo_Real** y **Simulación_Ciclo_RealIsentropico**, respectivamente. Los modelos utilizados en el desarrollo del proyecto serán descritos en la siguiente fase (fase de elaboración).

5 FASE DE ELABORACION DEL SOFTWARE

En esta fase, realizaremos los flujos de requisitos, análisis, diseño, implementación y pruebas y esperamos obtener un diagrama final de casos de uso, un diagrama final de clases, la descripción del proceso de la simulación del funcionamiento de un escenario real por medio de diagramas de actividades, así mismo se obtendrán algunos diagramas de secuencia, que describan la dinámica del desarrollo de algunos casos de uso.

En el flujo de requisitos, se obtendrá y describirán otros casos de uso que unidos con los listados en la fase de inicio, nos den como resultado el modelo final de casos de uso del sistema.

En el flujo de Análisis, se describirá el proceso de simulación de un escenario de un motor real y un motor real Isentrópico, por medio de sus respectivos diagramas de actividades.

Durante el desarrollo del flujo de diseño, se mostrarán y describirán los diagramas de clases, del ámbito de los modelos necesarios para llevar a cabo cada tipo de simulación, así como el diagrama que describe el ámbito de la interfaz de usuario a utilizar en el sistema. Con esto se completara la vista de clases del sistema.

En el flujo de implementación, se mostrará y describirán los diagramas de secuencia de algunos casos de uso, que nos permitan observar la dinámica del sistema por medio del intercambio de mensajes entre las diferentes clases modeladas en la fase de inicio y la actual.

Para finalizar este fase, en el flujo de pruebas, donde ya se debe contar con la implementación de algunos de los casos de uso descritos, simularemos un escenario ideal y se realizarán las correspondientes validaciones de los resultados.

5.1 FLUJO DE REQUISITOS

Aparte de los casos de uso registrados en la fase de inicio, es necesario agregar los casos de uso **Consultar Datos** y **Graficar Variables**. La ficha técnica de estos casos de uso, las veremos a continuación.

5.1.1 Consultar datos.

Descripción: El caso de uso Consultar Datos le permite al usuario ver los valores obtenidos durante la simulación de una o más de las variables que describen el funcionamiento del escenario simulado, como por ejemplo la presión, la temperatura, la entropía, la entalpía, entre otras.

Tabla 8. Ficha técnica caso de uso consultar datos.

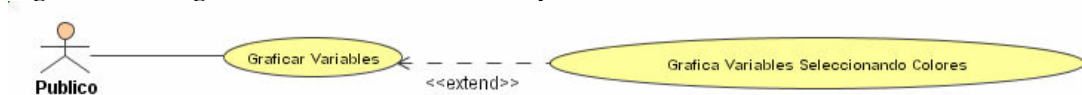
Actores: Usuario Público.
Precondiciones: El usuario debe haber creado un escenario de tipo ideal, Real o Real Isentrópico y haberlo simulado.
Flujo Normal: <ol style="list-style-type: none"> 1. El usuario selecciona un escenario de tipo ideal. 2. El usuario selecciona la pestaña Tablas. 3. El usuario selecciona la variable que quiere ver. 4. El sistema realiza el proceso de listar los datos en una tabla que se muestra al usuario.
Flujo Alternativo: 3. El usuario decide no llevar a cabo el caso de uso y selecciona otra pestaña u otro escenario.
Post-condición: El sistema muestra una tabla con los valores de las variables que el actor quiere ver.

Autores proyecto.

5.1.2 Graficar variables.

La siguiente es la sección del diagrama de casos de uso, que muestra la graficación de variables.

Figura 26. Diagrama del caso de Uso "Graficar Variables"



Autores proyecto.

Descripción: El caso de uso **Graficar Variables** le permite al usuario como su nombre lo indica observar una gráfica con los valores de una variable listados en el eje X y los valores de una o mas variables listadas en el eje Y. El caso de uso **Graficar variables** implica el proceso de selección de la o las variables a graficar en cada uno de los ejes y el proceso de graficación como tal, y el caso de uso **Graficar Variables Seleccionando Colores** extiende al caso de uso **Graficar Variables**, desde el punto de vista que el usuario puede en el proceso de selección de variables seleccionar también el color con que quiere que se grafiquen.

Tabla 9. Ficha técnica caso de uso graficar variables.

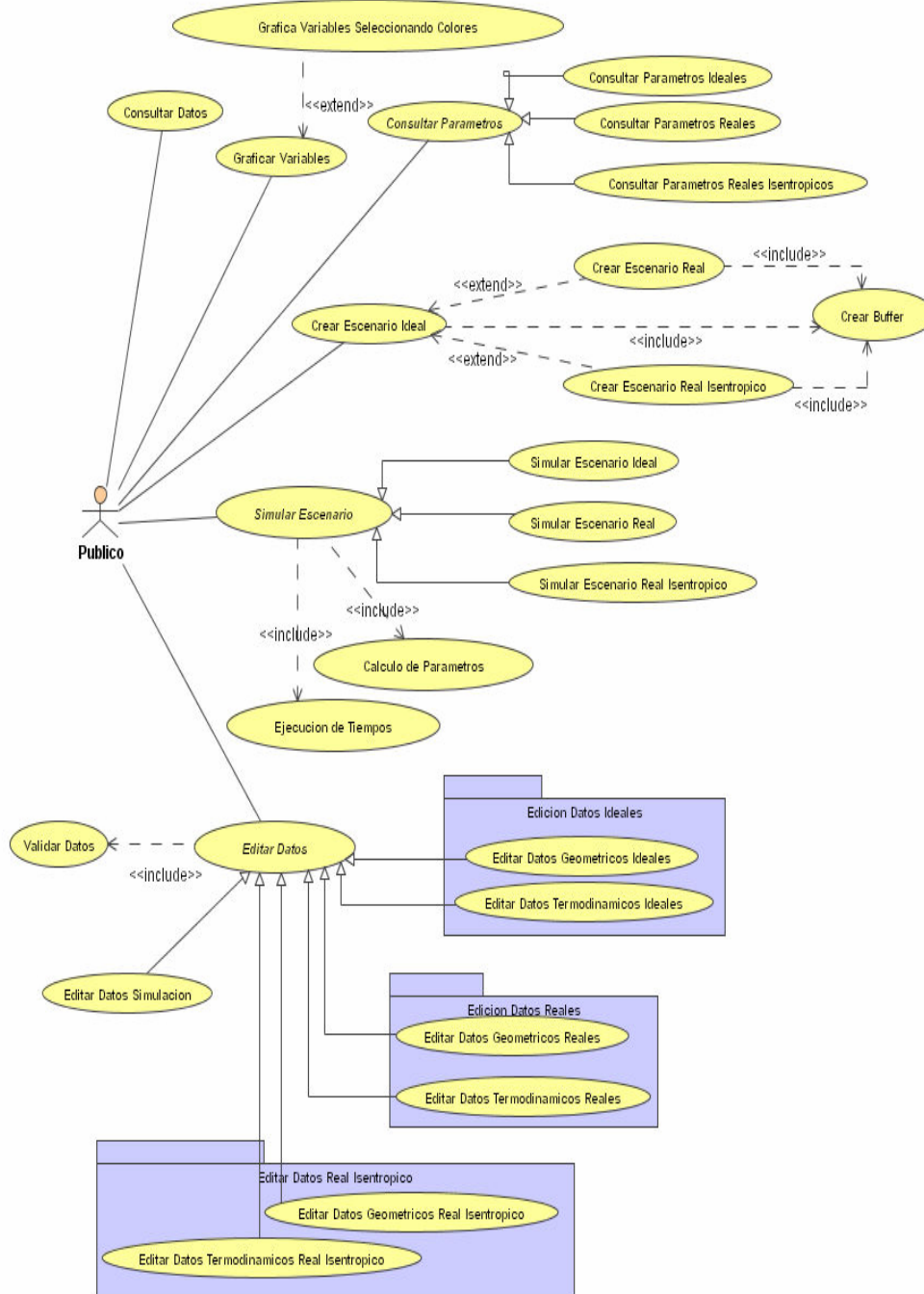
Actores: Usuario Público.
Precondiciones: El usuario debe haber creado un escenario de tipo ideal, Real o Real Isentrópico y haberlo simulado.
Flujo Normal: <ol style="list-style-type: none">1. El usuario selecciona un escenario de tipo ideal.2. El usuario selecciona la pestaña de nombre Gráficas.3. El usuario selecciona la variables que quiere graficar tanto en el eje X como Y.4. El sistema realiza las graficas y las muestra al actor por medio de su interfaz.
Flujo Alternativo: <ol style="list-style-type: none">3. El usuario decide no llevar a cabo el caso de uso y selecciona otra pestaña u otro escenario.
Post-condición: El sistema muestra la o las graficas que el actor quiere ver.

Autores proyecto.

5.1.3 Diagrama de casos de uso final.

El siguiente es el diagrama de casos de uso final del sistema, resultado de unir los casos de uso descritos en la fase de inicio y los descritos en esta fase.

Figura 27. Diagrama de casos de uso final del sistema



Autores proyecto.

5.2 FLUJO DE ANALISIS

En este flujo, vamos a describir el proceso de simulación de un escenario real, para completar el análisis del caso de uso Simular Escenario cuya descripción se inició en el flujo de análisis de la fase anterior. La descripción de este proceso la vamos a realizar por medio de un diagrama de actividades.

5.2.1 Simular escenario real.

Para realizar el análisis de la simulación de un Escenario Real, es importante observar la incidencia de algunas variables en el proceso de simulación, Estas variables son:

- Angulo de adelanto de apertura de la válvula de escape (AAE)
- Angulo de adelanto de apertura de la válvula de admisión (AAA)
- Angulo de retraso en el cierre de la válvula de escape (RCE)
- Angulo de retraso en el cierre de la válvula de Admisión (RCA)
- Angulo de retraso de la chispa de combustión (RCH)
- Angulo de duración de la combustión (ADC)

Normalmente se definen los procesos internos del motor, según el ángulo de giro del cigüeñal de la siguiente forma. Entre los ángulos de giro del cigüeñal 0 y 180 grados, se presenta el proceso de admisión, entre 180 y 360 grados se presenta el proceso de compresión, entre 360 y 540 grados se presenta el proceso de expansión y entre 540 y 720 grados se presenta el proceso de escape. Durante el proceso de admisión, se tiene abierta la válvula de admisión y cerrada la válvula de escape, y esta entrando mezcla al cilindro, en el proceso de compresión están cerradas las válvulas tanto de admisión como escape y se esta comprimiendo la mezcla, en el proceso de expansión, luego de la combustión de la mezcla, se expande la misma y en el proceso de escape se encuentra cerrada la válvula de admisión y abierta la de escape, por lo cual se da la salida de los productos de la combustión.

Realmente los procesos no se sincronizan de la forma expuesta en el párrafo anterior, ya que las válvulas no se abren o cierran en los momentos precisos descritos, si no que se adelanta o retrasan unos grados la apertura o cierre de las mismas, por esto para efectos del sistema que estamos analizando, vamos a dividir los procesos internos presentes en el ciclo de un cilindro en 11 procesos definidos de acuerdo a las variables listadas en el inicio de este numeral.

Los procesos internos que vamos a tener en cuenta para la simulación de un escenario de tipo real son:

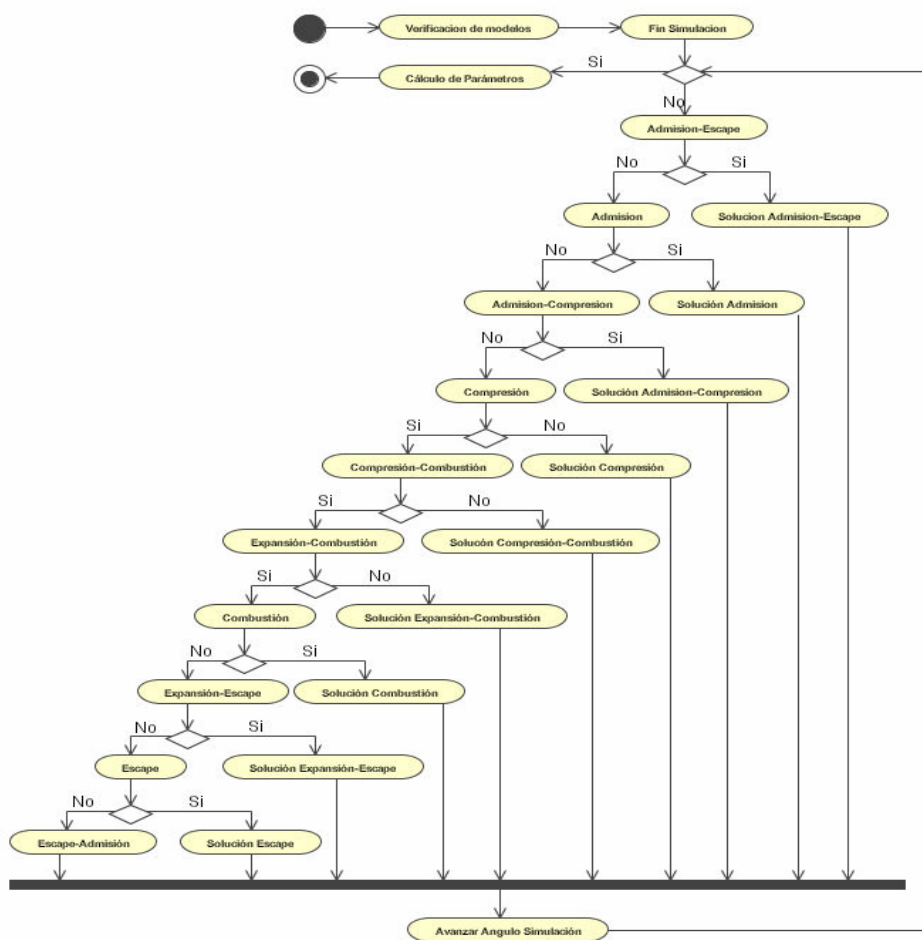
- **Admisión-Escape:** Este proceso se presenta cuando el ángulo de giro del cigüeñal es mayor que cero y menor que 180 grados y además la variable RCE es mayor que cero, lo cual indica que las válvulas de admisión y escape van a estar abiertas durante un lapso de tiempo, presentándose tanto el ingreso de mezcla, como la salida de productos de la combustión del cilindro.

- **Admisión:** Este es el proceso contiguo al proceso de Admisión-Escape. En caso de no presentarse el proceso de Admisión-Escape por que el RCE es cero, entonces el primer proceso será el de admisión.
- **Admisión-Compresión:** Normalmente se espera que la válvula de admisión se cierre a los 180 grados de giro del cigüeñal para dar inicio al proceso de compresión, pero si la variable $RCA > 0$, entonces se solapan los procesos de admisión y compresión, ya que durante un tiempo del proceso de compresión también se va a presentar el ingreso de mezcla al cilindro.
- **Compresión:** Este proceso se inicia inmediatamente después del proceso de Admisión-Compresión o Admisión de acuerdo al valor de RCA, ya que si $RCA > 0$ entonces se presenta proceso de Admisión-Compresión, pero si $RCA = 0$ entonces inmediatamente después del proceso de admisión iniciará el de Compresión.
- **Compresión-Combustión:** Este proceso se presenta cuando la variable $RCH > 0$, lo que quiere decir que la combustión realmente iniciaría RCH grados antes de los 360 grados de giro del cigüeñal, por lo cual la combustión empieza cuando se esta presentando el proceso de Compresión. Si $RCH = 0$ entonces no se presenta este proceso en el ciclo del cilindro.
- **Expansión-Combustión:** Este proceso se presenta cuando la variable $ADC > 0$ y así mismo $(360 - RCH + ADC) > 360$ grados de giro del cigüeñal. Si la variable $ADC = 0$, entonces se asume una combustión puntual y no se presentaría este proceso. De la misma forma si $(360 - RCH + ADC) \leq 360$ entonces todo el proceso de combustión se presenta durante el proceso de Compresión-Combustión.
- **Combustión:** Este proceso es excluyente con los procesos de Compresión-Combustión y Expansión-Combustión, lo que quiere decir que este proceso solo se presentaría en el caso en que $RCE = 0$ y $ADC = 0$, es decir este proceso es puntual, ya que solo se resolvería a los 360 grados de giro del cigüeñal.
- **Expansión:** Este proceso se inicia después del proceso de Compresión, Compresión-Combustión, Expansión-Combustión o Combustión, de acuerdo a los valores de las variables RCH y ADC , ya que si $RCH = 0$ y $ADC > 0$ entonces tendremos procesos de Compresión y Expansión-Combustión antes del proceso de Expansión, así mismo si $RCH > 0$ y $ADC > 0$ y $(360 - RCH + ADC) > 360$ entonces se presentaran en su orden los procesos de Compresión, Compresión-Combustión, Expansión-Combustión seguidos del proceso de Expansión, entre otros ejemplos.
- **Expansión-Escape:** Este proceso se presenta cuando la variable $AAE > 0$, lo que indica que la válvula de escape, se abrirá AAE grados antes de los 540 grados de giro del cigüeñal, es decir durante el proceso de Expansión.

- **Escape:** Este proceso se presenta después del proceso de Expansión-Escape o de Expansión, de acuerdo al valor de AAE, ya que si $AAE > 0$, entonces se presenta el proceso de Expansión-Escape seguido del proceso de Escape, pero si $AAE = 0$ entonces no se presenta proceso de Expansión-Escape y el proceso de Escape se presentara luego del proceso de Expansión.
- **Escape-Admisión:** Este proceso se presenta cuando la variable $AAA > 0$, lo que indica que la válvula de admisión se abrirá antes de los 0 grados del ángulo del giro del cigüeñal, es decir durante el proceso de Escape. De esta manera se solapan los procesos de Expansión y Admisión, ya que ambas válvulas estarán abiertas durante un tiempo.

Ahora veremos el diagrama de actividades relacionado al proceso de simulación de un escenario real.

Figura 28. Diagrama de actividades de simulación de un escenario real.



Autores proyecto.

Antes de iniciar con la descripción del diagrama anterior, es importante dejar claro que el proceso de simulación de un escenario de tipo real, sigue los mismos pasos básicos descritos en el diagrama de estados del numeral 4.2.1.1 *Simular Escenario*.

Al momento de crear un escenario de tipo real, se crea al mismo tiempo un mapa de simulación de dicho escenario, el cual describe los procesos que se van a ejecutar en la simulación del escenario y los ángulos de inicio y fin de cada uno de estos procesos. Durante la ejecución de cada uno de los procesos contenidos por el mapa de simulación, se deben resolver algunos modelos que describirán el funcionamiento del motor en cada proceso específico. A la creación de dichos modelos es a lo que se refiere la actividad llamada verificación de modelos, mostrada inmediatamente después del inicio del diagrama de actividades anterior.

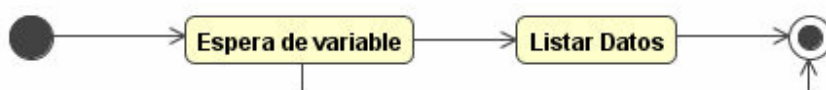
Posterior a esto, la simulación pasa al estado de ejecución de tiempos, en el cual se verifica, según el ángulo de giro del cigüeñal, en que proceso se encuentra actualmente la simulación y se resuelven los modelos definidos para el proceso actual. Luego de resolver los modelos del proceso actual, se hace un avance en el ángulo de giro del cigüeñal y se vuelven a repetir los pasos hasta que el ángulo de giro del cigüeñal sea igual al un ángulo de fin de simulación.

Para finalizar, antes de terminar con la simulación, se realiza la actividad de calculo de parámetros, el cual como su nombre lo indica calcula los parámetros básicos de simulación, tomando como base los datos recientemente obtenidos durante la ejecución de tiempos.

5.2.2 Consultar datos.

Flujo de sucesos: El siguiente es el diagrama de estados para este caso de uso.

Figura 29. Diagrama de estados del caso de uso "Consulta de Datos"



Autores proyecto.

Camino básico:

Espera de variable: En este estado, el sistema presenta la interfaz para que el actor seleccione las variables que quiere ver en tablas. Posteriormente se espera que el actor dé la orden final para ver la tabla que contiene las variables seleccionadas y sus respectivos valores.

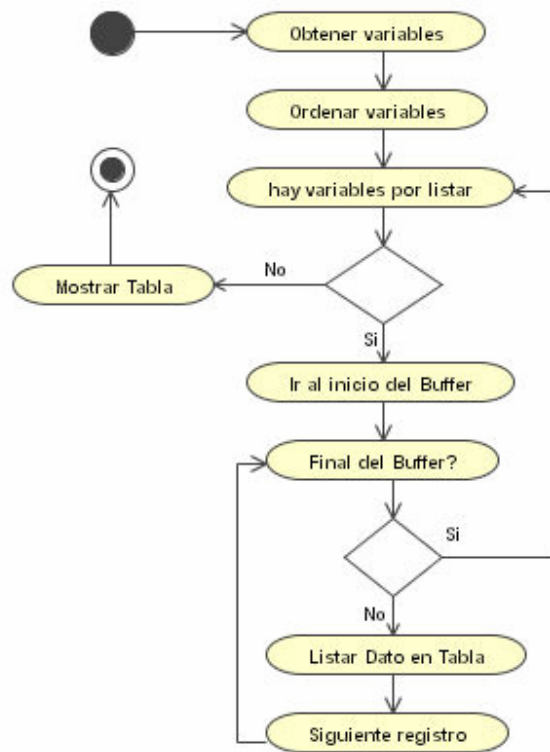
Crear escenario: El sistema se encarga de crear una tabla y listar en ella en orden alfabético según su nombre, las variables seleccionadas por el usuario, finalmente esta tabla es mostrada al usuario por la misma interfaz de usuario donde este seleccionó las variables.

Caminos alternativos:

Espera de variable – fin: Este camino se presenta cuando el actor desiste de ver los datos de las variables seleccionadas en tablas y antes de dar la orden para mostrar la tabla, decide ejecutar otro caso de uso.

Actividades relacionadas: Las actividades relacionadas con este caso de uso se muestran en el siguiente diagrama.

Figura 30. Diagrama de actividades del caso de uso “Consulta de Datos”



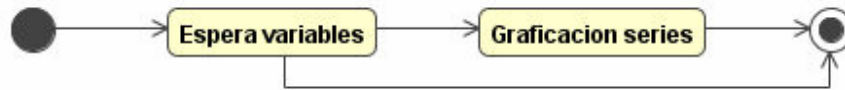
Autores proyecto.

El sistema inicia con la obtención de las variables que el actor quiere ver listadas, luego esas variables son ordenadas alfabéticamente que es la manera como van a ser mostradas al actor, este proceso se realiza en la actividad *Ordenar Variable*, seguido a esto se inicia un proceso iterativo, donde se verifica si hay variables por listar, caso en el cual se va al inicio del Buffer y se itera registro por registro del Buffer buscando el valor de la variable y listándolo en la tabla que finalmente será mostrada al actor, cuando sean finalizadas las iteraciones mencionadas y que se pueden ver en el diagrama de actividades anterior.

5.2.3 Graficar variables.

Flujo de sucesos: El siguiente es el diagrama de estados para este caso de uso.

Figura 31. Diagrama de estados del caso de uso "Graficar Variables"



Autores proyecto.

Camino básico:

Espera de variables: En este estado, el sistema presenta la interfaz para que el actor seleccione las variable que quiere sea representada en el eje X y la o las variables que quiere sean representadas en el eje Y. Posteriormente se espera que el actor dé la orden final para iniciar el proceso de graficación.

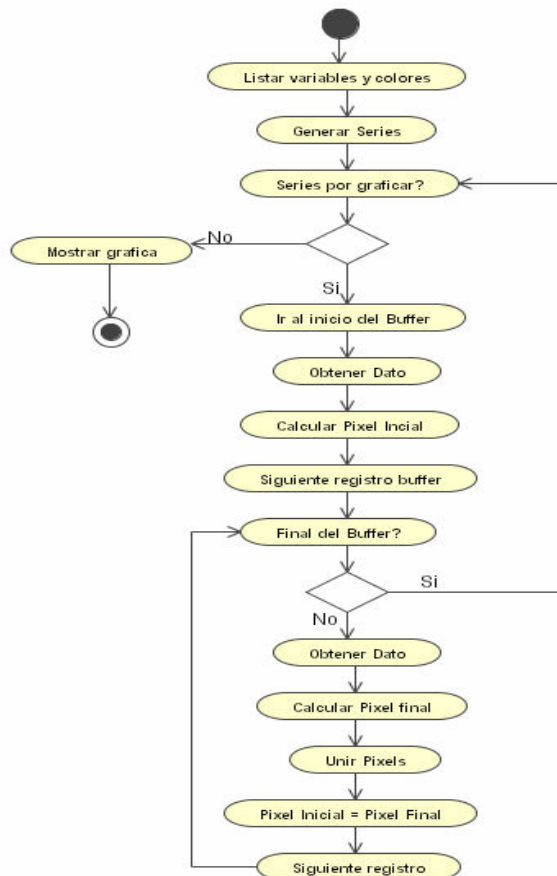
Graficar series: El sistema se encarga de separar una a una las series, y graficarlas con los colores respectivos, para finalmente ser mostradas en el Frame correspondiente. Una serie contiene la información de una variable del eje X y una del eje Y, así como el color con que se quiere sea representada la gráfica, es importante ver que en la ejecución del caso de uso, se pueden graficar varias series, ya que el usuario puede seleccionar mas de una variable para que sean graficadas en el eje Y, y sean mostradas en un mismo Frame. Cada una de estas gráficas son llamadas Series.

Caminos alternativos:

Espera de variables - fin: Este camino se presenta cuando el actor desiste de realizar las gráficas de las variables seleccionadas y decide ejecutar otro caso de uso.

Actividades relacionadas: Las actividades relacionadas con este caso de uso se muestran en el siguiente diagrama.

Figura 32. Diagrama de actividades del caso de uso "Graficar Variables"



Autores proyecto.

Para iniciar el proceso, se listan las variables y los colores que el actor ha elegido para realizar las gráficas, seguido a esto se generan las series que contienen la información de la variable a graficar en el eje X y la variable a graficar en el eje Y, junto con el color de la gráfica, como se dijo anteriormente en la ejecución de este caso pueden crearse varias series. Luego se realiza un proceso iterativo pasando por cada una de las series y realizando el respectivo gráfico. Para realizar la gráfica, se va al inicio del Buffer donde están contenidos los datos obtenidos luego de la simulación, se obtiene el dato para cada una de las variables de la serie (Eje X y Eje Y) y se calcula el píxel que representa el valor de esta coordenada en el área de dibujo, luego se avanza al siguiente registro del buffer y se realiza el mismo paso, después de tener los 2 puntos iniciales, se unen estos píxeles por medio de una línea del color especificado y se igualan el píxel final al inicial, para así avanzar en los registros del Buffer y obtener el siguiente píxel que será unido con el ultimo píxel del proceso anterior. Este proceso se repite por cada Serie mientras hallan datos en el buffer.

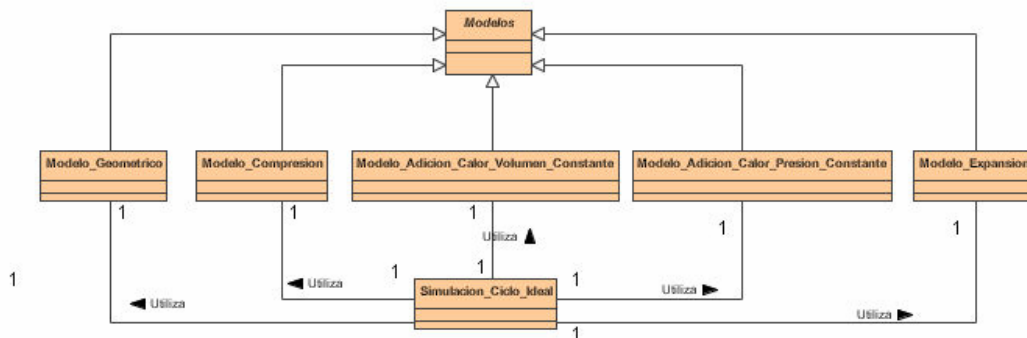
5.3 FLUJO DE DISEÑO

En el flujo de diseño de la fase anterior, se hizo la descripción del ámbito del motor donde se presentó la estructura de los escenarios que contienen los diversos tipos de motor (Ideal, Real Isentrópico y Real), y el ámbito de la simulación, donde se mostró la estructura que sustenta el proceso de simulación del sistema. En este flujo, ampliaremos dichos diagramas de clases, mostrando el ámbito de los modelos a utilizar en los procesos de simulación, de acuerdo al tipo de escenario a simular, y de la misma forma se mostrará el diagrama de clases que nos describe el ámbito de la interfaz de usuario implementada. El objetivo fundamental para este punto es completar la vista general del diagrama de clases, el cual junto con el diagrama de casos de uso presentado en el flujo de requisitos de esta fase, conforman la arquitectura base del sistema.

5.3.1 Ámbito de los modelos de la simulación Ideal.

En el numeral 4.2.1 se presentó el análisis del caso de uso simular escenario Ideal, y en el respectivo diagrama de actividades, se puede ver el proceso de simulación de los tiempos de Compresión, adición de calor a volumen constante, adición de calor a presión constante y expansión. A continuación se muestra el diagrama de clases que nos ilustra las diferentes clases implementadas y cuya solución resuelve los modelos de los diferentes procesos que se presentan durante el proceso de simulación de escenarios de tipo ideal.

Figura 33. Diagrama de clases usadas para la solución de la Simulación de escenarios de tipo ideal.



Autores proyecto.

En el anterior diagrama de clases podemos ver que la clase **Simulacion_Ciclo_Ideal**, utiliza a las clases **Modelo_Geometrico**, **Modelo_Compresion**, **Modelo_Adicion_Calor_Volumen_Constante**, **Modelo_Adicion_Calor_Presion_Constante** y **Modelo_Expansion**, para realizar la simulación del funcionamiento del motor ideal, y al mismo tiempo estos modelos mencionados, heredan de una súper clase llamada **Modelos** la cual declara un método abstracto llamado **Solución**, que por el echo de ser abstracto debe ser implementado por las clases que hereden de esta súper clase. Este método **Solución**, es llamado durante la

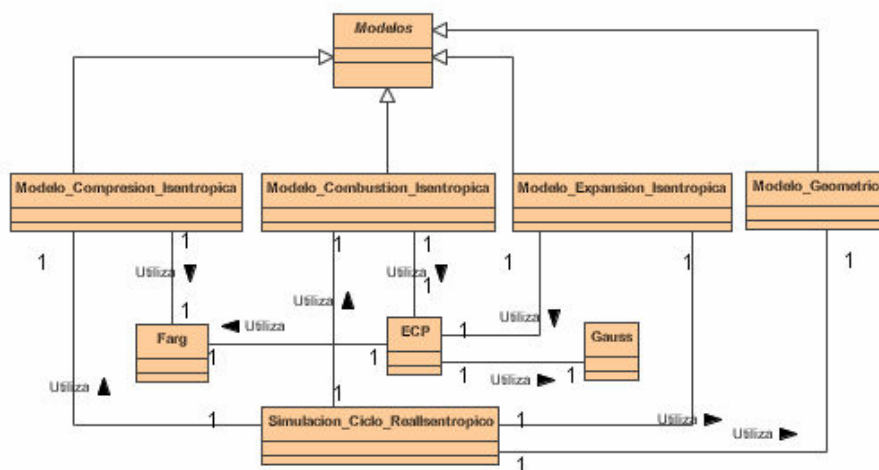
ejecución de la simulación y resuelve los modelos implementados en cada una de las clases.

Los modelos citados en el párrafo anterior los cuales describen el funcionamiento de un motor de tipo ideal, se encuentran detallados en la sección 2.1.5.

5.3.2 **Ámbito de los modelos de la Simulación Real Isentrópica.**

El siguiente diagrama muestra las clases que participan en el proceso de simulación de un escenario de un motor de tipo Real Isentrópico.

Figura 34. Diagrama de clases usadas para la solución de la Simulación de escenarios de tipo Real Isentrópico.



Autores proyecto.

En el diagrama anterior, podemos ver que las clases `Modelo_Compresion_Isentropica`, `Modelo_Combustion_Isentropica`, `Modelo_Expansion_Isentropica` y `Modelo_Geometrico`, heredan de la clase `Modelos` y son utilizadas por la clase `Simulacion_Ciclo_Reallisentropico` que es la clase encargada de resolver dichos modelos para cada paso de simulación.

La clase `Modelo_Geometrico` (ver sección 3.1) se encarga de calcular datos geométricos como el volumen del cilindro, la posición y velocidad del pistón para cada paso de simulación y es llamada durante todo el proceso de simulación del motor.

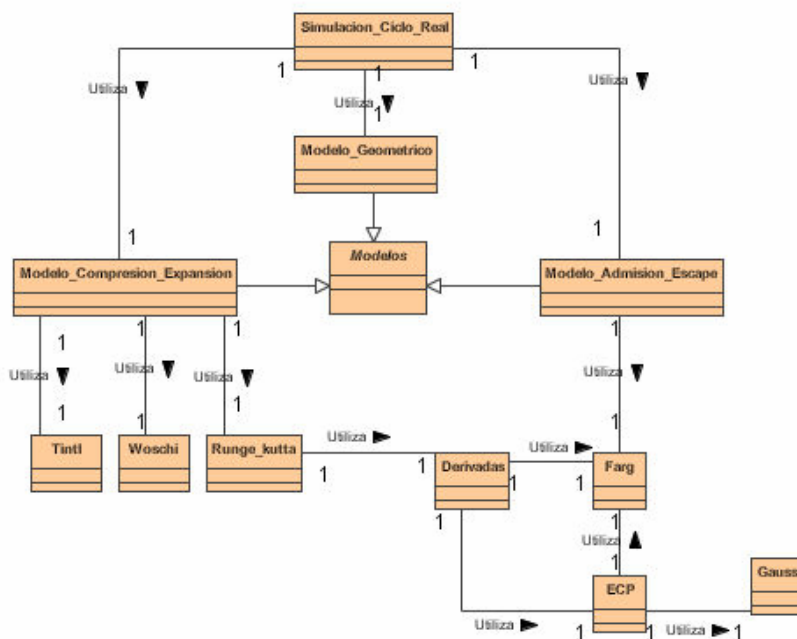
La clase `Compresión_Isentropica` utiliza a la clase `Farg` (Fuel air residual gas, ver sección 3.2.1) que es la encargada de calcular las fracciones molares y el valor de la entropía, entalpía, energía interna y el calor específico de la mezcla aire-combustible y gases residuales, a partir de la presión y temperatura de entrada; El valor de las fracciones y propiedades calculadas permiten obtener los valores de presión y temperatura para el siguiente paso de simulación.

La clase `Modelo_Combustion_Isentropica` y `Modelo_Expansion_Isentropica` emplea a la clase ECP (Equilibrium Combustion products, ver sección 3.2.1) que calcula las mismas propiedades que el Farg sobre la mezcla producto de la combustión en equilibrio para cada paso de simulación, para esto se vale de la implementación del método Newton Raphsón que a la vez emplea a la clase Gauss encargada de resolver sistemas de ecuaciones lineales de nxn; En caso que la temperatura sea menor a 1000 K, el modelo ECP utiliza al modelo Farg.

5.3.3 Ámbito de los modelos de la simulación real.

El siguiente diagrama muestra las clases que participan en el proceso de simulación de un escenario de un motor de tipo real.

Figura 35. Diagrama de clases usadas para la solución de la Simulación de escenarios de tipo Real.



Autores proyecto.

Para empezar, podemos ver que la clase `Simulacion_Ciclo_Real` utiliza a las clases `Modelo_Geometrico`, `Modelo_Compresion_Expansion` y `Modelo_Admission_Escape`, para realizar el proceso de simulación de un escenario de un motor tipo real. Como se vio en la sección No 3.2.2, durante los procesos de compresión y expansión, incluyendo el proceso de combustión, es necesario resolver un sistema de 6 ecuaciones diferenciales parciales que nos dan como resultado el valor de la Presión, Temperatura de mezcla quemada, temperatura de la mezcla no quemada, calor transferido al sistema, entalpía perdida y el trabajo, para cada paso de simulación, es por esto que la clase

Modelo_Compresion_Expansion utiliza una clase llamada Runge_Kutta, la cual implementa el método de solución de un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden con condiciones iniciales utilizando el método de Runge Kutta - Verner de Quinto y Sexto orden, que permite obtener aproximaciones numéricas de la solución en un punto determinado (cada paso de simulación), teniendo en cuenta una tolerancia. Así mismo la clase Runge_Kutta utiliza a la clase derivadas la cual permite calcular el cambio de cada una de las variables en cada paso, y para esto se vale de la clase Farg (Fuel air residual gas, ver sección 3.2.1) y ECP (Equilibrium Combustion products, ver sección 3.2.1) descritas en el numeral anterior.

La clase Modelo_Compresion_Expansion, también utiliza el modelo Woschi el cual permite calcular la fracción de mezcla quemada durante la combustión, y también utiliza la clase llamada Tintl que permite encontrar la temperatura inicial de quemado para el proceso de combustión.

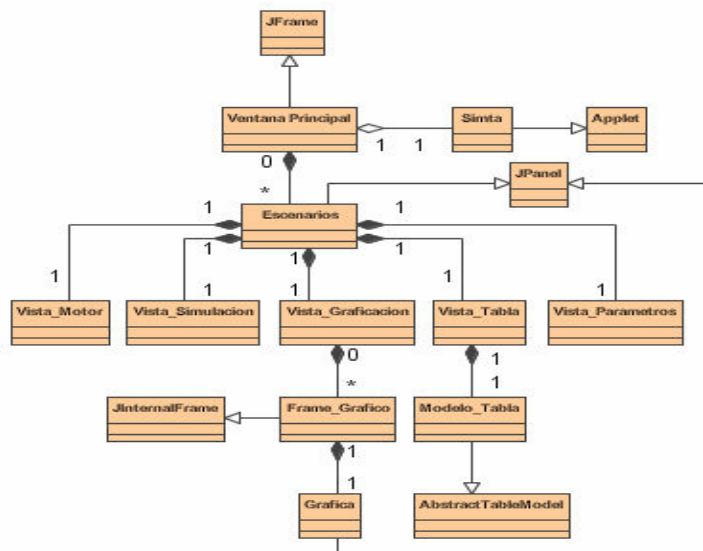
La clase Simulacion_Ciclo_Real emplea a la clase Modelo_Admission_Escape, la cual se encarga de calcular los valores de las variables para los procesos de Admisión y Escape y para esto se apoya de la clase Farg, que como ya dijimos entrega la composición y propiedades de la mezcla aire-combustible y residuos para cada paso de simulación. Así mismo se utiliza la clase Modelo_Geometrico (ver sección 3.1) que se encarga de calcular datos geométricos como el volumen del cilindro, la posición y velocidad del pistón para cada paso de simulación.

Para finalizar es importante observar que todas las clases utilizadas por las clases Simulacion_Ciclo_Ideal, Simulacion_Ciclo_Real y Simulacion_Ciclo_Real_Isentropico heredan de la súper clase Modelos, por lo cual deben implementar el método Solución, lo cual hace que la clase Modelos se convierta en una especie de plantilla, pensando en la implementación de futuras clases.

5.3.4 Ámbito de interfaz de usuario.

Una de las partes fundamentales de un sistema es la Interfaz de Usuario, ya que ésta permite al Usuario interactuar con el sistema y ejecutar los diversos casos de uso del mismo. A continuación describiremos el diagrama de clases que modela el ámbito de la Interfaz de Usuario diseñada para el software SIMTA 1.0.

Figura 36. Diagrama de clases del ámbito Interfaz de usuario.



Autores proyecto.

Iniciaremos citando que algunas de las clases mostradas en el diagrama anterior son clases del API de java, por lo cual no fue necesaria su implementación y nos sirvieron como base para el diseño del diagrama de clases de la Interfaz de Usuario del software SIMTA 1.0; Estas clases son Applet, JPanel, JFrame, AbstractTableModel y JInternalFrame, Las clases mencionadas son mostradas en el diagrama anterior, pero de la misma forma es importante decir que hay otras clases mas del API de java que no fueron reseñadas en el anterior diagrama, por ser elementales e inherentes a las interfaces de usuario, como es el caso de JButton, JText, etc.

Todo programa hecho en Java que deba ser ejecutado desde la web debe heredar de la clase Applet ya que esta posee todos los métodos y atributos que permiten que un programa java pueda insertarse como tal en una pagina web. La clase Simta hereda de la clase Applet y por esto, esta clase debe ser referenciada en la pagina web desde donde se vaya a ejecutar el software.

La clase Ventana_Principal, es junto con la clase Simta una de las clases mas importantes, ya que representa la ventana básica desde donde el usuario del sistema va a interactuar con el mismo, esta clase Ventana_Principal esta relacionada con la clase Simta por medio de una agregación, lo cual indica que en caso de destruir una instancia de la clase Ventana_Principal, no necesariamente se destruirá la instancia de la clase Simta que la agrega, uno de los objetivos básicos de esta relación es proveer a la clase Ventana_Principal de algunos iconos, entre otras particularidades que se pueden obtener por medio de métodos de la clase Applet, esto con el fin de mostrar una Interfaz grafica

mas amigable al usuario; Así mismo la clase Ventana_Principal hereda de la clase JFrame, la cual provee las características fundamentales de las ventanas.

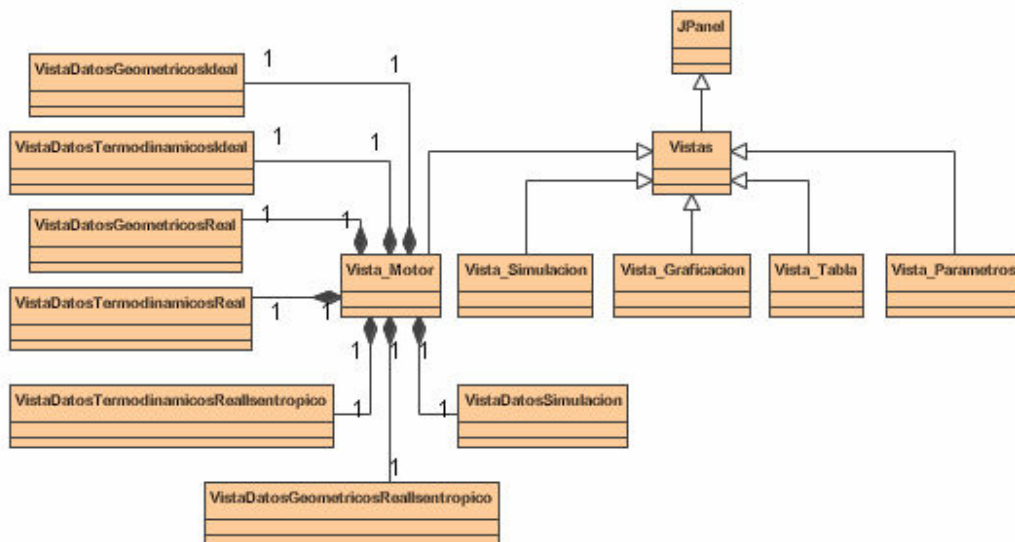
La clase Ventana_Principal esta compuesta de ninguna o muchas instancias de la clase Escenarios, la cual al mismo tiempo esta compuesta por las clases Vista_Motor, Vista_Simulacion, Vista_Graficacion, Vista_Tabla y Vista_Parametros que son las encargadas de mostrar la información de los motores contenidos por el escenario y de permitir la ejecución de los diversos casos de uso por parte del usuario.

La clase Vista_Graficacion esta compuesta por ninguna o muchas instancias de la clase Frame_Grafico que hereda de la clase JInternalFrame (Esta clase permite mostrar ventanas internas donde se realizan las diversas graficas). Esta clase Frame_Grafico esta compuesta por una instancia de la clase Grafica, que provee el lienzo y los métodos para realizar el respectivo grafico.

La clase Vista_Tabla esta compuesta por una instancia de la clase Modelo_Tabla que hereda de la clase AbstractTableModel, la cual provee los métodos para mostrar los datos que listemos en una tabla.

Para finalizar, es importante decir que las clases Vista_Motor, Vista_Simulacion, Vista_Graficacion, Vista_Tabla y Vista_Parametros, heredan de la clase Vistas la cual declara algunos métodos abstractos que se definen en cada clase hija, con esto se logra que la clase Vista haga las veces de plantilla para todas aquellas clases que hereden de ella. Este detalle lo podemos ver en el siguiente diagrama.

Figura 37. Diagrama de clases heredadas a partir de la clase Vista_Motor.



Autores proyecto.

Por ultimo, la clase Vista_Motor permite al usuario ver y editar los datos del tipo de motor contenido por un escenario, y por esta razón esta compuesta por instancias de las clases VistaDatosGeometricosIdeal, VistaDatosTermodinamicosIdeal, VistaDatosGeometricosReal, VistaDatosTermodinamicosReal, VistaDatosTermodinamicosReallentropico, VistaDatosGeometricosReallentropico y VistaDatosSimulacion, cada uno de los cuales muestra los datos del motor respectivo.

5.4 FLUJO DE PRUEBAS

Ahora vamos a ver dos ejemplos de los resultados obtenidos para la simulación de los motores ideales. Estas pruebas se realizaron comparando los datos obtenidos por SIMTA 1.0 con los datos obtenido por el software disponible en la pagina web de la universidad de Colorado (CSU) para Motores Ideales.⁷

Datos ingresados al software

Presión de entrada : 0,8 Bar
 Temperatura de inicio : 300 K
 Radio de Compresión : 10
 Exponente politrópico Adiabático : 1,3
 Calor ingresado : 2500 kj/Kg combustible

Tabla 10. Resultados primera prueba escenario ideal.

Resultados obtenidos	CSU Engine	UIS Simta	%Error
Al inicio de la compresión			
Presión (Bar)	0,8	0,8	0
Temperatura (K)	328	300	8
Al inicio de la combustión			
Presión (Bar)	15,96	15,96	0
Temperatura (K)	656,1	598,58	8
Al final de la combustión			
Presión (Bar)	79,30	71,67	9
Temperatura (K)	3259,9	2687,72	17
Al final de la expansión			
Presión (Bar)	3,9749	5,56	26
Temperatura (K)	1633,8	2083,48	21
Eficiencia Térmica	0,49	0,59	16

Autores proyecto.

Datos ingresados al software

Presión de entrada : 0,5 Bar
 Temperatura de inicio : 300 K

⁷ <http://www.engr.colostate.edu/%7Eallan/engines.html>

Radio de Compresión : 10
 Exponente politrópico Adiabático : 1,4
 Calor ingresado : 3000 kj/Kg combustible

Tabla 11. Resultados segunda prueba escenario ideal.

Resultados obtenidos	CSU Engine	UIS Simta	%Error
Al inicio de la compresión			
Presión (Bar)	0,5	0,5	0
Temperatura (K)	328	300	8
Al inicio de la combustión			
Presión (Bar)	12,55	12,56	0
Temperatura (K)	656,1	753,57	14
Al final de la combustión			
Presión (Bar)	75,08	82,2	9
Temperatura (K)	4923,1	4931,84	0
Al final de la expansión			
Presión (Bar)	2,989	3,27	9
Temperatura (K)	1959,8	1963,4	0
Eficiencia Térmica	0,602	0,6	0

Autores proyecto.

La disminución del exponente politropico y el aumento en la presión del ambiente aumentaban el error en el proceso de expansión, durante el resto del ciclo los errores por lo general no superaron el 10% de error.

Por lo que podemos estar seguros del buen comportamiento y la fidelidad de los datos para el análisis en simulaciones de tipo ideal.

6 FASE DE CONSTRUCCION

Durante el desarrollo de esta fase de construcción, se trabajará en los flujos de implementación y pruebas.

En el flujo de implementación, se mostraran los diagramas de secuencia de los casos de uso mas importantes como son "Crear Escenario", "Editar Escenario", "Simular Escenario Ideal", "Simular Escenario Real" y "Consultar Datos", pues se consideran estos casos de uso como los mas trascendentales en el desarrollo del proyecto, Cada diagrama de secuencia va acompañado de su respectiva explicación. Y para finalizar la documentación de la fase de construcción se mostraran algunas pruebas realizadas al software SIMTA 1.0 y se compararan los resultados con los obtenidos de otros software.

6.1 FLUJO DE IMPLEMENTACION

Durante el desarrollo de este flujo vamos a mostrar los respectivos diagramas de secuencias de los casos de uso más trascendentales para el proyecto SIMTA 1.0.

Un diagrama de secuencias consta de objetos que se presentan como rectángulos con su nombre subrayado, mensajes representados por líneas continuas con una punta de flecha y el tiempo representado como una progresión vertical.

6.1.1 Crear escenario.

A continuación se mostrara la descripción del diagrama representado en la figura 38.

1 - Ejecutar (): El actor público envía el respectivo mensaje de ejecución al objeto IU (Interfaz de Usuario), con el cual se inicia el proceso de creación de un escenario.

2 - Ventana Selección (): El objeto IU, luego de recibir el mensaje ejecutar del actor público, envía este mensaje, por medio del cual muestra al actor público la ventana de selección del tipo de escenario a crear.

3 - Selección (Tipo Escenario): El actor público envía este mensaje con un parámetro correspondiente al tipo de escenario a crear.

4 - Validar Datos (): El objeto IU, valida si el usuario pasó el Tipo de escenario y el nombre correspondiente para este escenario.

5 - Crear Gestor (): Si los datos del paso 4 fueron validos, entonces el objeto IU crea una instancia de la clase Gestor Escenario.

6 - Return Error: Si los datos del paso 4 no son validos, entonces se retorna el respectivo mensaje de error al actor público.

7- Nuevo Motor (Tipo Escenario): el objeto IU envía la orden de creación del motor al objeto del tipo Gestor Escenario.

8 - Calcular Datos Faltantes (): el objeto Gestor Escenario, genera los datos geométricos, termodinámicos y de simulación por omisión para el tipo de escenario pasado como parámetro en el punto 7.

9 - Crear Motor Ideal (Datos): Este método se ejecuta si el tipo de escenario pasado como parámetro al Gestor Escenarios es de tipo ideal, en este caso se crea una instancia del tipo Motor Ideal, pasando los respectivos datos al constructor de esta clase.

10 - Crear Motor Real (Datos): Este método se ejecuta si el tipo de escenario pasado como parámetro al Gestor Escenarios es de tipo Real, en este caso se crea una instancia del tipo Motor Real, pasando los respectivos datos al constructor de esta clase.

11 - Crear Motor Isentrópico (Datos): Este método se ejecuta si el tipo de escenario pasado como parámetro al Gestor Escenarios es de tipo Isentrópico, en este caso se crea una instancia del tipo Motor Real Isentrópico, pasando los respectivos datos al constructor de esta clase.

12 - Return Motor: Luego de crear el Motor respectivo, la instancia de Gestor Escenario retorna el motor creado a la IU.

13 - Crear (Motor): Si el tipo de Escenario es "Ideal", se crea una instancia de la clase Escenario Ideal, asignando a este el motor ideal creado en el paso 9.

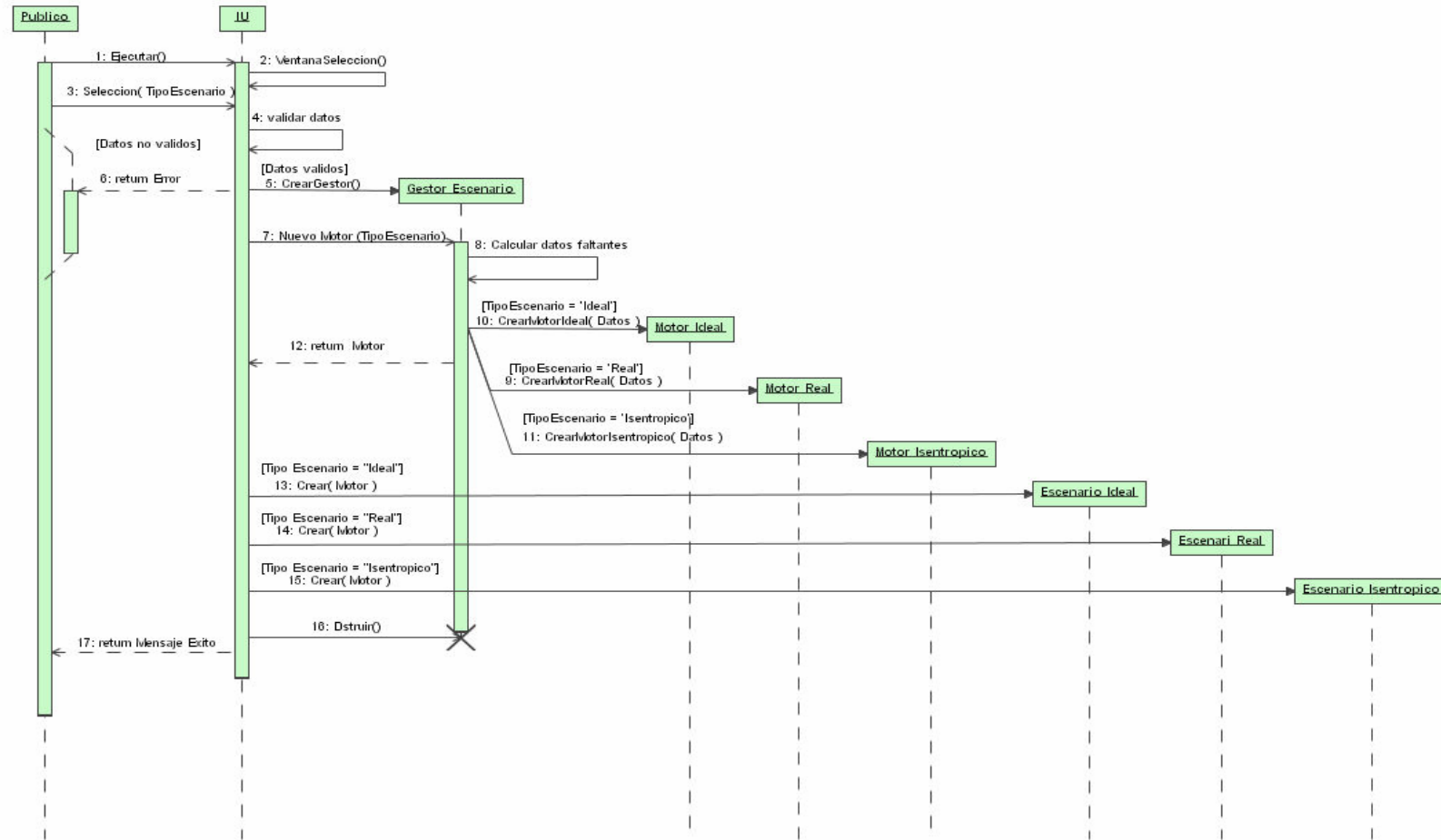
14 - Crear (Motor): Si el tipo de Escenario es "Real", se crea una instancia de la clase Escenario Real, asignando a este el motor real creado en el paso 10.

15 - Crear (Motor): Si el tipo de Escenario es "Isentrópico", se crea una instancia de la clase Escenario Real Isentrópico, asignandole el motor real isentrópico creado en el paso 10.

16. - Destruir (): Luego de haber creado el escenario respectivo, La IU destruye la instancia de Gestor Escenario.

17 - Return Mensaje éxito: La IU retorna el mensaje de éxito correspondiente al actor público.

Figura 38. Diagrama de secuencia del caso de uso Crear Escenario

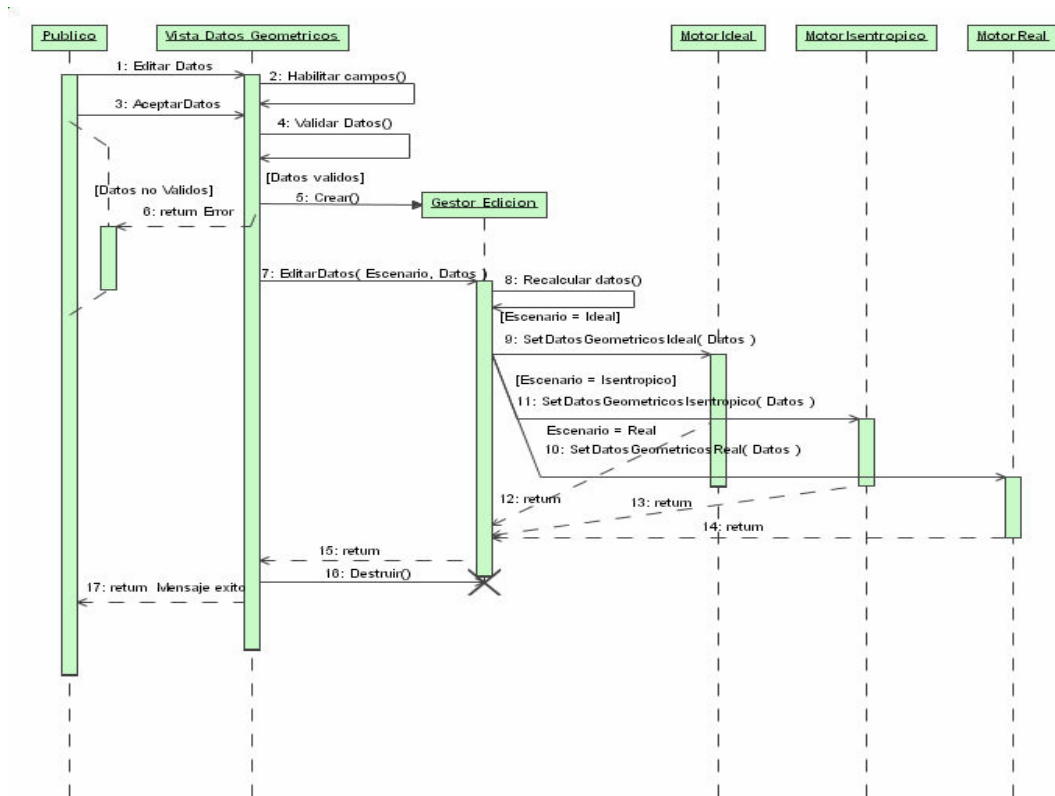


Autores Proyecto

6.1.2 Editar escenario.

El siguiente es el respectivo diagrama de secuencia del caso de uso Editar Escenario, en este diagrama se muestra el proceso de la edición de los datos geométricos de cualquier tipo de motor, ya sea ideal, real o real isentrópico, este diagrama también aplica para la edición de datos termodinámicos y de simulación.

Figura 39. Diagrama de secuencia del caso de uso Editar Escenario



Autores Proyecto.

La descripción del proceso es la siguiente:

1 - Editar Datos (): El actor público envía el correspondiente mensaje con el cual se inicia el caso de uso Editar Datos Geométricos, este mensaje es enviado en el momento que el actor público da clic sobre el botón Editar de la vista de datos geométricos del respectivo escenario ubicado en la Interfaz de usuario.

2 - Habilitar Campos (): La instancia de la clase Vista Datos Geométricos, luego de recibir el mensaje del numeral 1, procede a habilitar lo campos text de su vista, para que el usuario pueda editar los datos necesarios.

3 - Aceptar Datos (): Luego que el actor publico edita los datos necesarios, da clic en el botón Aceptar de la vista datos geométricos, con lo cual se envía el correspondiente mensaje y se continua con la ejecución del caso de uso.

4 - Validar Datos (): La instancia de la clase Vista Datos Geométricos valida en formato y rango los datos editados por el actor publico.

5 - Return Error: Se envía el correspondiente mensaje de error al usuario en caso tal que los datos editados por él, no hayan superado la validación del punto 4.

6 - Crear (): En caso que los datos editados por el usuario hayan superado la validación realizada en el punto 4, entonces se procede a crear una instancia de la clase Gestor Edición, que finalmente es la encargada de realizar el proceso de edición.

7 - Editar Datos (Escenario, Datos): la vista datos geométricos envía el mensaje de edición de datos al gestor de edición, y entrega como parámetros el tipo de escenario y los datos editados.

8 - Recalcular Datos (): el gestor de edición, por medio del tipo de escenario y los datos pasados como parámetros en el punto 7, realiza el calculo de otros datos importantes para la simulación.

9 - setDatosGeometricosIdeal (Datos): Si el tipo de escenario pasado como parámetro en el punto 7 es "Ideal", se asignan al motor ideal contenido en este escenario los datos pasados como parámetro en el punto 7 y los obtenidos en el punto 8.

10 - setDatosGeometricosIsentropico (Datos): Si el tipo de escenario pasado como parámetro en el punto 7 es "Real Isentrópico", se asignan al motor real isentrópico contenido en este escenario los datos pasados como parámetro en el punto 7 y los obtenidos en el punto 8.

11 - setDatosGeometricosReal (Datos): Si el tipo de escenario pasado como parámetro en el punto 7 es "Real", se asignan al motor real contenido en este escenario los datos pasados como parámetro en el punto 7 y los obtenidos en el punto 8.

12-13-14 - Return: En estos puntos se retorna el control al gestor de edición, después de que cada tipo de motor ejecuta el respectivo llamado de los puntos 9, 10 y 11.

15 - Return: El Gestor de edición retorna el control a la instancia de la clase Vista Datos Geométricos, avisando a esta que se ha llevado a cabo con éxito la tarea de edición requerida.

16 - Destruir (): La instancia de la clase Vista Datos Geométricos destruye a la instancia de la clase Gestor Edición, luego de que este ha concluido su trabajo.

17 - Return mensaje éxito: La Vista Datos Geométricos retorna un mensaje al actor público, indicando que la edición de datos ha sido finalizada con éxito.

6.1.3 Simular escenario ideal.

En las siguientes dos pagina vemos el respectivo diagrama de secuencia del caso de uso Simular Escenario Ideal, en este diagrama se muestra el proceso llevado a cabo para simular un escenario Ideal, ya sea ciclo Otto, Diesel o Dual.

La descripción del proceso es la siguiente:

1- Simular (): El actor Publico envía el mensaje de simular a la interfaz de usuario que para este caso de uso es una instancia de la clase Vista Simulación.

2 - Crear (Motor Ideal): La IU llama al constructor de la clase Simulador y pasa como parámetro el motor ideal a simular.

3,4,5,6,7,8 - Crear (): El simulador crea los modelos a utilizar en la simulación, para esto llama a los constructores de las clases Modelo Geométrico, Modelo Compresión, Modelo Expansión, Modelo Adición Calor Volumen constante, Modelo Adición Calor Presión constante, Parámetros Ideales.

9 - Return: El simulador retorna el control de la ejecución la IU.

10 - Simular (): La IU envía este mensaje al simulador para iniciar el proceso de simulación.

11 - get Angulo Inicio Fin (): La clase Simulador ejecuta este método con el cual obtiene el ángulo de inicio y fin de la simulación.

Nota: En el diagrama se puede ver un cuadro de color azul el cual encierra el proceso repetitivo completo de simulación que se ejecuta mientras el ángulo actual de simulación sea menor que el ángulo de fin de simulación.

12 - Solución (): El simulador envía este mensaje al Modelo Geométrico para iniciar la solución de este. Es importante decir que este modelo se resuelve para todos los tiempos de simulación.

13 - Calcular Variables (): El Modelo Geométrico se auto envía este mensaje con el cual calcula los valores de las variables "CARRERA DEL PISTON" y "VOLUMEN".

14 - set Dato ("CARRERA PISTON", valor, Angulo Actual): Por medio de este mensaje la clase Modelo Geométrico envía al Motor Ideal el nombre de la variable que para este caso es "CARRERA PISTON", el valor de la misma y el ángulo de simulación para el cual se obtuvo. Estos datos serán guardados por el Motor Ideal en su Buffer.

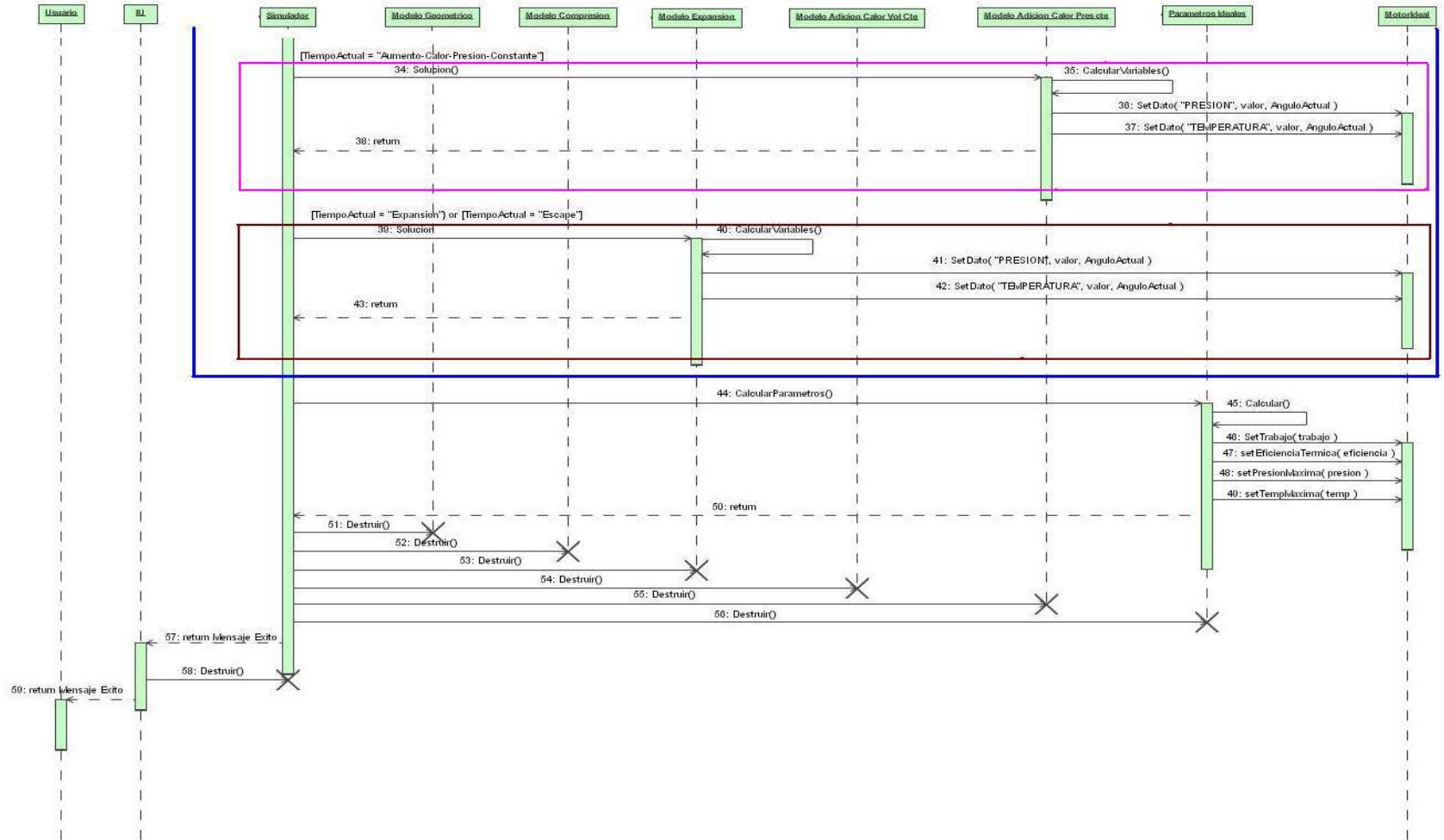
15 - set Dato ("VOLUMEN", Valor, Angulo Actual): Se guarda en el buffer del Motor Ideal el valor del "VOLUMEN" y el ángulo para el cual se obtuvo dicho valor.

16 - Return: El Modelo Geométrico devuelve el control del proceso al Simulador.

17 - get Tiempo Actual (Angulo Actual): El simulador pide por medio de este método al Motor Ideal el tiempo actual de simulación (Admisión, Compresión, Adición Calor Volumen Constante, Adición Calor Presión Constante, Expansión, Escape) pasando como parámetro el ángulo actual de simulación.

18 - Return Tiempo Actual: El Motor Ideal retorna el Tiempo Actual de simulación y por ende entrega el control de la ejecución al Simulador.

Figura 40. Diagrama de secuencia del caso de uso Simular Escenario Ideal



Autores Proyecto.

Nota: Los mensajes de ejecución del 19 al 23 (cuadro color rojo) se realizan si se cumple la condición de que el tiempo actual de simulación es "ADMISION" o "COMPRESION".

19 - Solución (): El simulador envía este mensaje al Modelo Compresión para iniciar la solución de este.

20 - Calcular Variables (): El Modelo Compresión se auto envía este mensaje con el cual calcula los valores de las variables "PRESION" y "TEMPERATURA".

21,22 - set Dato ("NOMBRE VARIABLE", Valor, Angulo Actual): Se envía este mensaje para guardar en el buffer del Motor Ideal las variables obtenidas en el punto 20.

23 - Return: El Modelo Compresión devuelve el control del proceso al Simulador.

Nota: Los mensajes de ejecución del 24 al 33 (cuadro color verde) se realizan si se cumple la condición de que el tiempo actual de simulación sea "AUMENTO CALOR VOLUMEN CONSTANTE".

24, 25, 26, 27, 28 - La ejecución de estos mensajes muestra el mismo proceso descrito entre los numerales 19 y 23 respectivamente.

29 - Solución (): El simulador envía este mensaje al Modelo Adición Calor Volumen Constante para iniciar la solución de este.

30 - Calcular Variables (): El Modelo Adición Calor Volumen Constante se auto envía este mensaje con el cual calcula los valores de las variables "PRESION" y "TEMPERATURA".

31, 32 - set Dato ("NOMBRE VARIABLE", Valor, Angulo Actual): El Modelo Adición Calor Volumen Constante, envía este mensaje para guardar en el buffer del Motor Ideal las variables obtenidas en el punto 30.

33 - Return: El Modelo Adición Calor Volumen Constante devuelve el control del proceso al Simulador.

Nota: Los mensajes de ejecución del 34 al 38 (cuadro de color morado) se realizan si se cumple la condición de que el tiempo de simulación sea "AUMENTO CALOR PRESION CONSTANTE".

34 - Solución (): El simulador envía este mensaje al Modelo Adición Calor Presión Constante para iniciar la solución de este.

35 - Calcular Variables (): El Modelo Adición Calor Presión Constante se auto envía este mensaje con el cual calcula los valores de las variables "PRESION" y "TEMPERATURA".

36, 37 - set Dato ("NOMBRE VARIABLE", Valor, Angulo Actual): El Modelo Adición Calor Presión Constante, envía este mensaje para guardar en el buffer del Motor Ideal las variables obtenidas en el punto 35.

38 - Return: El Modelo Adición Calor Presión Constante devuelve el control del proceso al Simulador.

Nota: Los mensajes de ejecución del 39 al 43 (cuadro de color marrón) se realizan si se cumple la condición de que el tiempo de simulación sea "EXPANSION" o "ESCAPE".

39 - Solución (): El simulador envía este mensaje al Modelo Expansión para iniciar la solución de este.

40 - Calcular Variables (): El Modelo Expansión se auto envía este mensaje con el cual calcula los valores de las variables "PRESION" y "TEMPERATURA".

41, 42 - set Dato ("NOMBRE VARIABLE", Valor, Angulo Actual): El Modelo Expansión, envía este mensaje para guardar en el buffer del Motor Ideal las variables obtenidas en el punto 40.

43 - Return: El Modelo Expansión devuelve el control del proceso al simulador.

Nota: En este punto finaliza el proceso repetitivo descrito en la nota anterior al punto 12.

44 - Calcular Parámetros (): El simulador envía este mensaje a la instancia de la clase Parámetros Ideales para iniciar el calculo de estos.

45 - Calcular (): La instancia de Parámetros Ideales ejecuta el cálculo del Trabajo, la Eficiencia Térmica y el mayor valor de las variables Presión y Temperatura.

46 - set Trabajo (Trabajo): La instancia de la clase parámetros Ideales envía este mensaje a la clase Motor Ideal, pasando como parámetro el trabajo calculado en el punto 45, para que este sea guardado en el buffer.

47 - set Eficiencia Térmica (Eficiencia): La instancia de la clase parámetros Ideales envía este mensaje a la clase Motor Ideal, pasando como parámetro la Eficiencia Térmica calculada en el punto 45, para que este sea guardado en el buffer.

48 - set Presión Máxima (Presion): La instancia de la clase parámetros Ideales envía este mensaje a la clase Motor Ideal, pasando como parámetro el valor máximo de la presión encontrado en el punto 45, para que este sea guardado en el buffer.

49 - set Temperatura Maxima (temp): La instancia de la clase parámetros Ideales envía este mensaje a la clase Motor Ideal, pasando como parámetro la temperatura máxima encontrada en el punto 45, para que este sea guardado en el buffer.

50 - Return: La instancia de la clase Parámetros Ideales devuelve el control del proceso de ejecución al Simulador.

51, 52, 53, 54, 55, 56 - Destruir (): Con el fin de liberar memoria, mediante la ejecución de estos mensajes el Simulador destruye cada uno de los objetos creados entre los puntos 3 y 8, estas instancias respectivamente son el Modelo Geométrico, Modelo Compresión, Modelo Expansión, Modelo Adición Calor Volumen constante, Modelo Adición Calor Presión constante y Parámetros Ideales.

57 - Return Mensaje Éxito: El Simulador retorna un mensaje de éxito y finalización del proceso de simulación a la IU.

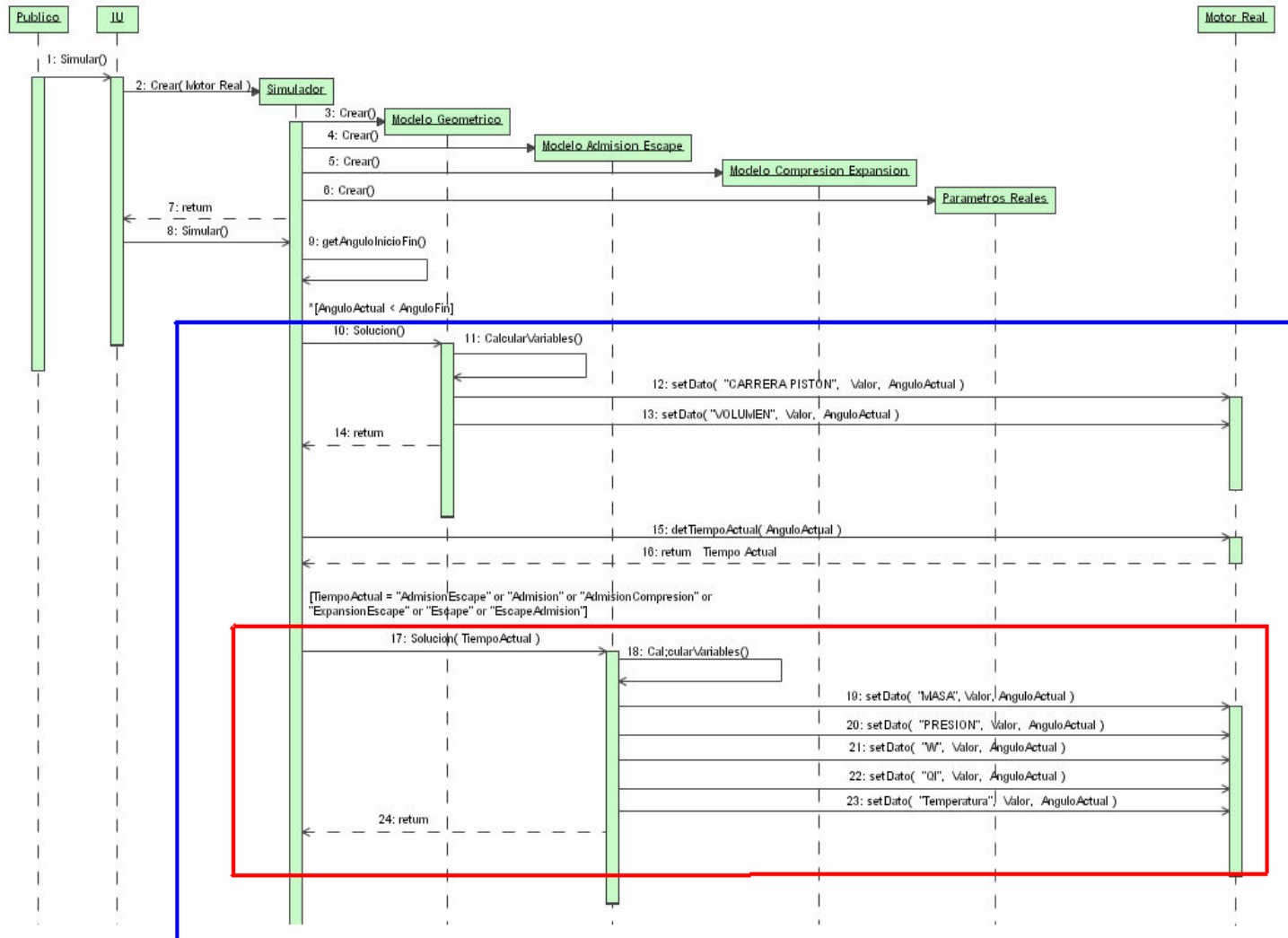
58 - Destruir (): Con el fin de liberar memoria, la IU destruye a la instancia de la clase Simulador, tras haber terminado su labor de simular el escenario ideal encomendado.

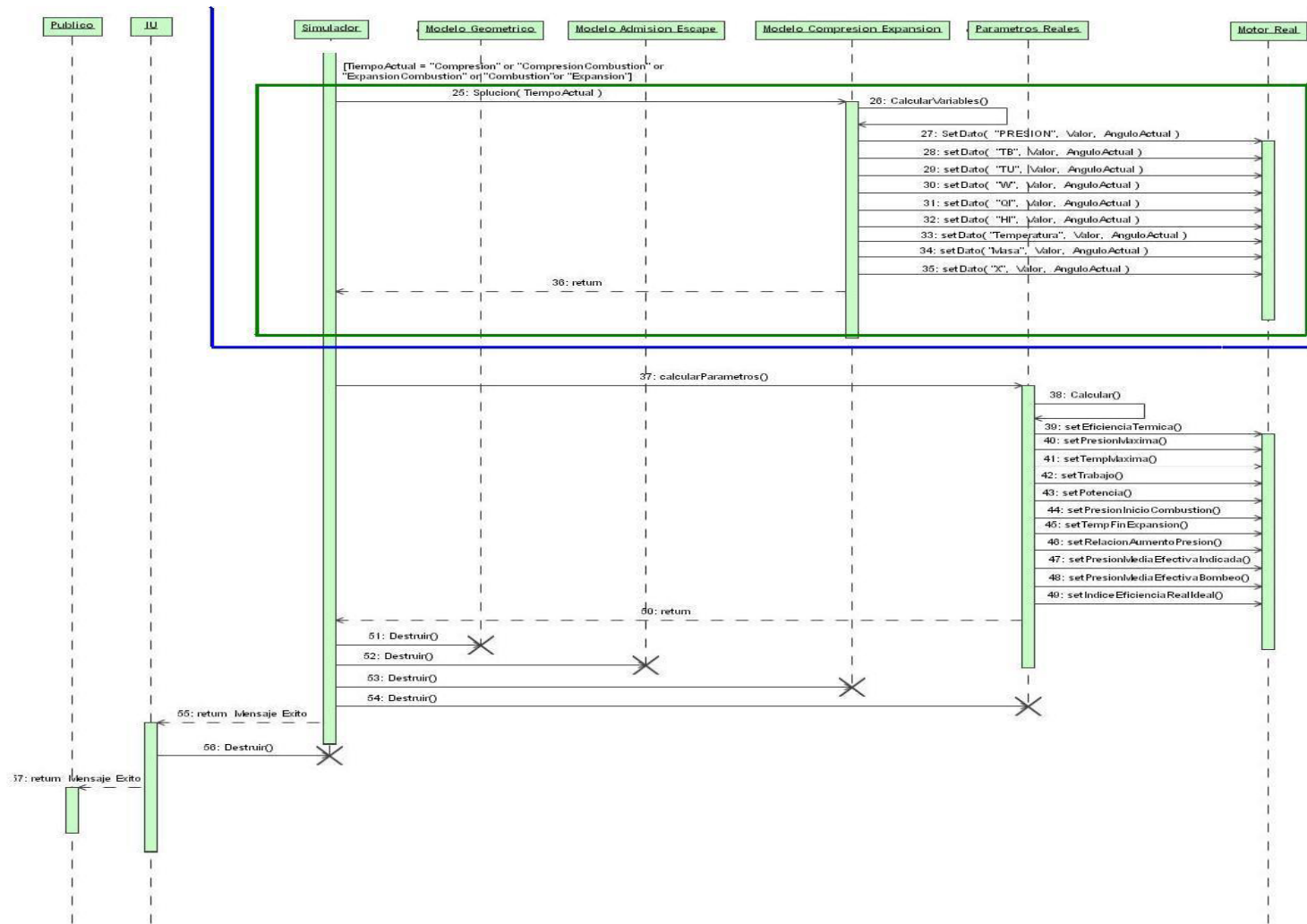
59 - Return Mensaje Éxito: La IU muestra en pantalla al actor Público el respectivo mensaje de éxito y finalización de la simulación.

6.1.4 Simular escenario real.

El siguiente es el respectivo diagrama de secuencia del caso de uso Simular Escenario Real. Para la simulación de este tipo de escenario, se trabaja con tres modelos básicos como son el Modelo Geométrico que se ejecuta durante todo el proceso de simulación, el Modelo Compresión Escape que se utiliza durante los procesos de compresión y escape así como durante el solapamiento de los mismos, es decir cuando están abiertas tanto las válvulas de admisión como de escape y se presenta tanto la entrada de la mezcla como la salida de los productos de la combustión y por ultimo el Modelo de Compresión Expansión el cual se ejecuta durante los procesos de compresión y expansión incluyendo el proceso de combustión y el solapamiento de este con la compresión y expansión, que se da cuando el ángulo de giro del cigüeñal esta entre 180 y 360 grados y el ángulo de adelanto de la chispa es mayor que cero (Compresión-Combustión) o cuando el ángulo de giro del cigüeñal es mayor que 360 y menor que 540 grados y la duración de la combustión contada desde el inicio de la misma se extienda mas allá de los 360 grados de giro del cigüeñal (Combustión - Expansión). Para la solución de los modelos nombrados se utilizan las clases FARG y Runge Kutta, por medio de los cuales se resuelven los sistemas de ecuaciones propuestos para la solución de motores reales, estas últimas clases no se muestran en el diagrama de secuencias con el fin de hacer este lo mas simple y entendible posible.

Figura 41. Diagrama de secuencia del caso de uso Simular Escenario Real





Autores proyecto.

La descripción del proceso es la siguiente:

1- Simular (): El actor Público envía el mensaje de simular a la interfaz de usuario que para este caso de uso es una instancia de la clase Vista Simulación.

2 - Crear (Motor Real): La IU llama al constructor de la clase Simulador y pasa como parámetro el motor ideal a simular.

3,4,5,6 - Crear (): El simulador crea los modelos a utilizar en la simulación, para esto llama a los constructores de las clases Modelo Geométrico, Modelo Admisión Escape, Modelo Compresión Expansión y Parámetros Reales.

7 - Return: El simulador retorna el control de la ejecución la IU.

8 - Simular (): La IU envía este mensaje al simulador para iniciar el proceso de simulación.

9 - get Angulo Inicio Fin (): La clase Simulador ejecuta este método con el cual obtiene el ángulo de inicio y fin de la simulación.

Nota: En el diagrama se puede ver un cuadro de color azul el cual encierra el proceso repetitivo completo de simulación que se ejecuta mientras el ángulo actual de simulación sea menor que el ángulo de fin de simulación.

10 - Solución (): El simulador envía este mensaje al Modelo Geométrico para iniciar la solución de este. Es importante decir que este modelo se resuelve para todos los tiempos de simulación.

11 - Calcular Variables (): El Modelo Geométrico se auto envía este mensaje con el cual calcula los valores de las variables "CARRERA DEL PISTON" y "VOLUMEN".

12 - set Dato ("CARRERA PISTON", valor, Angulo Actual): Por medio de este mensaje la clase Modelo Geométrico envía al Motor Real el nombre de la variable que para este caso es "CARRERA PISTON", el valor de la misma y el ángulo de simulación para el cual se obtuvo. Estos datos serán guardados por el Motor Ideal en su Buffer.

13 - set Dato ("VOLUMEN", Valor, Angulo Actual): Se guarda en el buffer del Motor Real el valor del "VOLUMEN" y el ángulo para el cual se obtuvo dicho valor.

14 - Return: El Modelo Geométrico devuelve el control del proceso al Simulador.

15 - get Tiempo Actual (Angulo Actual): El simulador pide por medio de este método al Motor Real el tiempo actual de simulación (Admisión-Escape, Admisión, Admisión-Compresión, Compresión, Compresión-Combustión, Expansión-Combustión, Combustión, Expansión, Expansión-Escape, Escape, Escape-Admisión) pasando como parámetro el ángulo actual de simulación.

16 - Return Tiempo Actual: El Motor Real retorna el Tiempo Actual de simulación y por ende entrega el control de la ejecución al Simulador.

Nota: Los mensajes de ejecución del 17 al 24 (cuadro color rojo) se realizan si se cumple la condición de que el tiempo actual del simulación es "ADMISION-ESCAPE" o "ADMISION" o "ADMISION-COMPRESION" o "EXPANSION-ESCAPE" o "ESCAPE" o "ESCAPE-ADMISION".

17 - Solución (): El simulador envía este mensaje al Modelo Admisión Escape para iniciar la solución de este.

18 - Calcular Variables (): El Modelo Admisión Escape se auto envía este mensaje con el cual calcula los valores de las variables "MASA" (mezcla), "PRESION", "W" (trabajo), "QL" (calor perdido), "TEMPERATURA".

19,20,21,22,23 - set Dato ("NOMBRE VARIABLE", Valor, Angulo Actual): Se envía este mensaje para guardar en el buffer del Motor Real las variables obtenidas en el punto 18.

24 - Return: El Modelo Admisión Escape devuelve el control del proceso al Simulador.

Nota: Los mensajes de ejecución del 25 al 36 (cuadro color verde) se realizan si se cumple la condición de que el tiempo actual del simulación es "COMPRESION" o "COMPRESION-COMBUSTION" o "EXPANSION-COMBUSTION" o "COMBUSTION" o "EXPANSION".

25 - Solución (): El simulador envía este mensaje al Modelo Compresión Expansión para iniciar la solución de este.

26 - Calcular Variables (): El Modelo Compresión Expansión se auto envía este mensaje con el cual calcula los valores de las variables "PRESION", "TB" (temperatura de la mezcla quemada), "TU" (temperatura de la mezcla no quemada), "W" (trabajo), "QL" (calor perdido), "HL" (entalpía), "TEMPERATURA", "MASA", "X" (proporción de mezcla no quemada).

27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 - set Dato ("NOMBRE VARIABLE", Valor, Angulo Actual): Se envía este mensaje para guardar en el buffer del Motor Real las variables obtenidas en el punto 26.

36 - Return: El Modelo Compresión Expansión devuelve el control del proceso al Simulador.

Nota: En este punto finaliza el proceso repetitivo descrito en la nota anterior al punto 10.

37 - Calcular Parámetros (): El simulador envía este mensaje a la instancia de la clase Parámetros Reales para iniciar el cálculo de estos.

38 - Calcular (): La instancia de Parámetros Reales ejecuta el cálculo de la eficiencia térmica, la presión máxima, la temperatura máxima, el trabajo, la potencia, la presión al inicio de la combustión, la temperatura al fin de la expansión, la relación de aumento de presión, la presión media efectiva indicada, la presión media efectiva de bombeo y el índice de eficiencia Real-Ideal.

39 - set Eficiencia Térmica (Eficiencia): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro la eficiencia térmica calculada en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

40 - set Presión Máxima (Presión): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro la presión máxima encontrada en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

41 - set Temperatura Máxima (Temperatura): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro la temperatura máxima encontrada en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

42 - set Trabajo (Trabajo): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro el trabajo calculado en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

43 - set Potencia (Potencia): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro la potencia calculada en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

44 - set Presión Inicio Combustión (Presión): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro la presión de inicio de combustión obtenida en el proceso de simulación y encontrada en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

45 - set Temperatura Fin Expansión (Presión): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro la temperatura al fin de la expansión encontrada en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

46- set Relación Aumento Presión (Relación): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro la relación de Aumento de presión calculada en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

47- set Presión Media Efectiva Indicada (Presión): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro la presión media efectiva indicada calculada en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

48- set Presión Media Efectiva Bombeo(Presión): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro la presión media efectiva de bombeo calculada en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

49- set Índice Eficiencia Real Ideal (Índice): La instancia de la clase parámetros Reales envía este mensaje a la clase Motor Real, pasando como parámetro el índice de eficiencia real-ideal calculada en el punto 38, para que este sea guardado en el buffer.

50 - Return: La instancia de la clase Parámetros Reales devuelve el control del proceso de ejecución al Simulador.

51, 52, 53, 54 - Destruir (): Con el fin de liberar memoria, mediante la ejecución de estos mensajes el Simulador destruye cada uno de los objetos creados entre los puntos 3 y 6, estas instancias respectivamente son el Modelo Geométrico, Modelo Admisión Escape, Modelo Compresión Expansión y Parámetros Reales.

55 - Return Mensaje Éxito: El Simulador retorna un mensaje de éxito y finalización del proceso de simulación a la IU.

56 - Destruir (): Con el fin de liberar memoria, la IU destruye a la instancia de la clase Simulador, tras haber terminado su labor de simular el escenario real encomendado.

57 - Return Mensaje Éxito: La IU muestra en pantalla al actor Público el respectivo mensaje de éxito y finalización de la simulación.

6.1.5 Graficar variables.

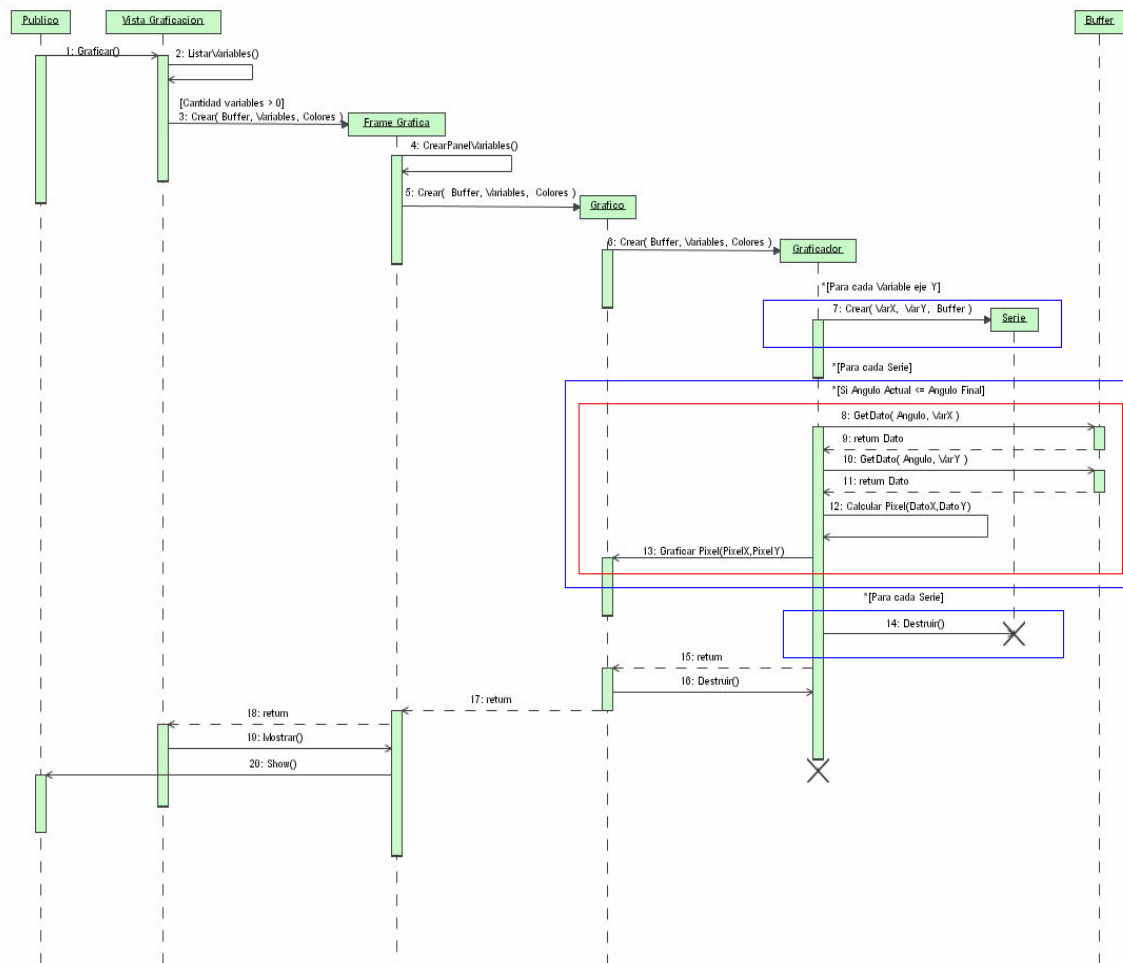
El siguiente es el respectivo diagrama de secuencia del caso de uso Graficar Variables, en este diagrama se muestra el proceso llevado a cabo para realizar y mostrar las gráficas según las variables seleccionadas por el actor público para el eje X y Y.

La descripción del proceso es la siguiente:

1 - Graficar (): Luego que el actor Público ha seleccionado las variables del eje X y Y que quiere ver graficadas, entonces envía este mensaje a la instancia de la clase Vista Graficación para que esta inicie el proceso.

2 - Listar Variables (): La instancia de la clase Vista Graficación, ejecuta este método, donde se valida el listado de variables mostrado al actor Público por medio de la interfaz de esta vista y se revisa cuales variables fueron seleccionadas por dicho actor para ser graficadas en el eje X y Y, así como los colores con que el actor quiere que se realicen las respectivas gráficas.

Figura 42. Diagrama de secuencia del caso de uso Graficar Variables



Autores Proyecto.

3 - Crear (Buffer, Variables, colores): La instancia de Vista Graficación, llama al constructor de la clase Frame Grafico, para crear una instancia de esta, pasando como parámetros el Buffer donde se encuentran los datos a graficar, las variables tanto del eje X como Y y el listado de colores obtenidos en el punto 2.

4 - Crear Panel Variables (): Es importante decir que la clase Frame Grafico esta compuesta de 2 paneles internos, uno donde se listan las variables del eje X y Y pasadas como parámetros en su constructor, y otro panel donde se realizan las respectivas gráficas. En este punto la instancia de la clase Frame Grafico crea el respectivo panel para listar las variables.

5 - Crear (Buffer, Variables, Colores): La clase Frame Grafico llama al constructor de la clase Grafico que es el panel donde se van a mostrar las curvas de las respectivas gráficas, para esto pasa como parámetros el Buffer, las variables a graficar y sus respectivos colores.

6 - Crear (Buffer, Variables, Colores): La clase Grafico llama al constructor de la clase Graficador que es la encargada de generar las series y realizar las curvas respectivas sobre el panel contenido por la instancia de la clase Grafico.

Nota: El rectángulo azul que encierra al punto 7 indica un ciclo repetitivo que se ejecuta para cada variable del eje Y pasada como parámetro al Graficador en el punto 6.

7- Crear (VarX, VarY, Buffer): La clase Graficador llama al constructor de la clase Serie pasando como parámetros la variable X y Y de cuyos datos se obtendrá un gráfico, así como un puntero a la clase Buffer, de donde este constructor toma datos importantes como el valor máximo y mínimo del par de variables ya que con estos se calcula el paso de graficación que sirve para hacer la conversión del dato representado por las variables a su respectivos pixels X y Y que se ubicaran en el respectivo panel de la clase Grafico.

Nota: El segundo rectángulo azul, me representa un ciclo repetitivo que se ejecuta para cada una de las series generadas en el punto 7. Así mismo el rectángulo rojo interno, indica otro ciclo repetitivo que se ejecuta para cada uno de los ángulos para los cuales hay datos representativos de las variables X y Y, dentro de este rectángulo rojo se muestra el proceso llevado a cabo para finalmente realizar el trazo de cada uno de los datos representados por las variables contenidas en cada una de las series.

8 - GetDato (Angulo, VarX): La clase Graficador, hace la petición al buffer que le fue pasado como parámetro en el punto 6, del valor contenido por la variable X en un ángulo específico.

9 - Return Dato: El Buffer retorna el dato pedido en el punto 8 al Graficador.

10 - GetDato (Angulo, VarY): La clase Graficador, hace la petición al buffer que le fue pasado como parámetro en el punto 6, del valor contenido por la variable Y en un ángulo específico.

11 - Return Dato: El Buffer retorna el dato pedido en el punto 10 al Graficador.

12 - Calcular Píxel (DatoX, DatoY): El Graficador calcula los respectivos pixels correspondientes al valor del dato de la variable X y Y.

13 - Graficar Píxel (PixelX, PixelY): El Graficador se encarga de realizar el trazo indicado según los pixels X y Y obtenidos en el punto 12. Este trazo es realizado sobre el panel contenido por la instancia de la clase Grafica, y va desde un punto P1 base hasta el punto P2 representado por los parámetros pasados en este método, después de esto, el punto P2 pasara a ser el punto base (P1) para el próximo trazo.

Nota: El tercer y último rectángulo azul del diagrama indica un ciclo repetitivo que se ejecuta para cada serie contenida por la instancia de la clase Graficador.

14 - Destruir (): El Graficador envía un mensaje de destrucción a las series contenidas por él, con lo cual se libera memoria que puede ser utilizada en otros procesos.

15 - Return: Este mensaje se ejecuta luego de que los ciclos repetitivos anteriores han terminado y hemos obtenido las respectivas graficas requeridas por el actor Público. Este mensaje retorna el control de ejecución a la instancia de la clase Grafico.

16 - Destruir (): La instancia de la clase Grafico envía el respectivo mensaje de destrucción a la instancia de la clase Graficador, con el fin de liberar memoria.

17 - Return: La instancia de la clase Grafico retorna el control de la ejecución al Frame Grafico.

18 - Return: El Frame Grafico retorna el control de ejecución a la Vista de Graficación.

19 - Mostrar (): La Vista de Graficación envía este mensaje al Frame Grafico con el fin de que este Frame sea mostrado al actor Público.

20 - Show (): El Frame Grafico realiza los procesos de pintado en pantalla y muestra las graficas dibujadas al actor Público.

6.1.6 Consultar datos.

Ahora analizamos el diagrama de secuencia del caso de uso Consultar Datos (Pagina siguiente), en este diagrama se muestra el proceso llevado a cabo para realizar y mostrar al actor una tabla que contiene los valores de las variables a las cuales el actor quiere realizar seguimiento.

La descripción del proceso es la siguiente:

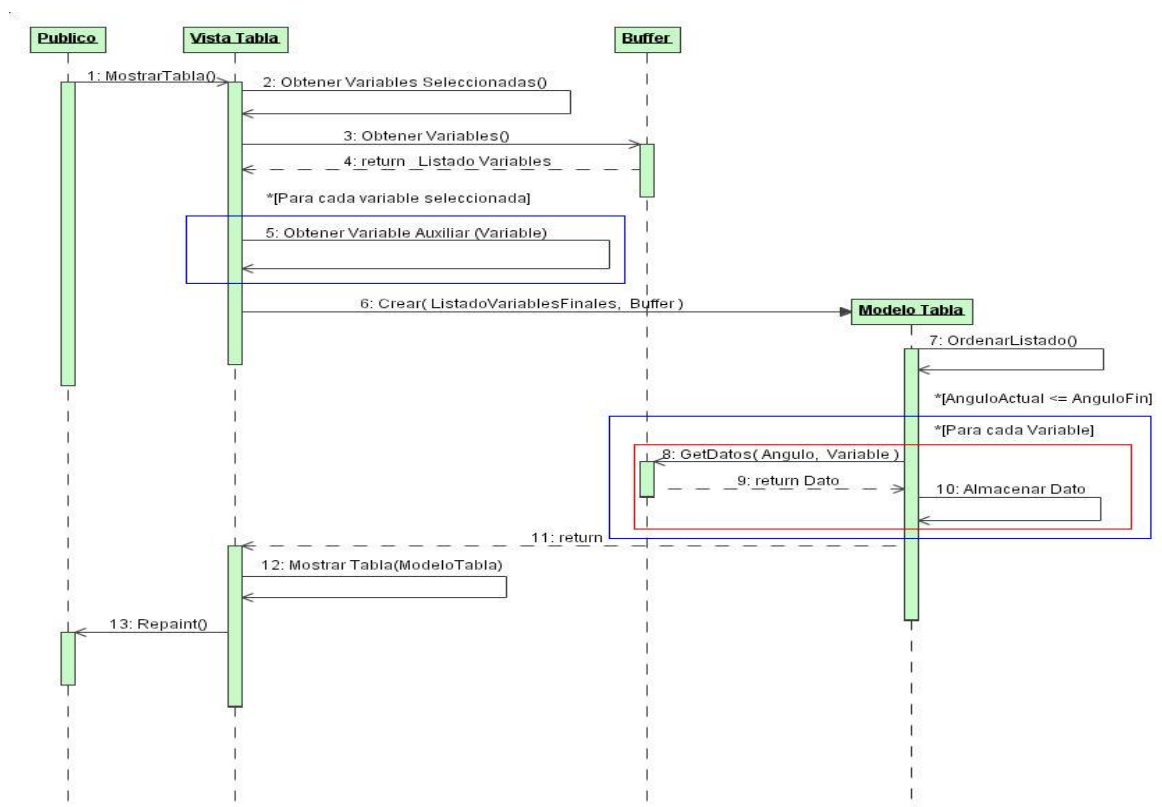
1 - Mostrar Tabla (): Cuando el actor Público selecciona una variable con el fin de ver los datos de esta obtenidos durante el proceso de simulación, automáticamente se envía este mensaje a una instancia de la clase Vista Tabla.

2- Obtener Variables Seleccionadas (): La instancia de la clase Vista Tabla hace el llamado a este metodo, en el cual se validan uno a uno los checks seleccionados por el usuario, para obtener el listado de las variables que el actor Publico quiere ver.

3 - Obtener Variables ():Es importante explicar que una variable puede tener variables auxiliares en el Buffer, por ejemplo en la simulación de un motor Otto, al llegar al ángulo del cigüeñal de 360 grados, se obtienen dos valores distintos para

la presión, por lo cual el primer valor se guarda en la variable "PRESION", y el segundo valor se guarda en una variable llamada "PRESION^1", la cual es la variable auxiliar de "PRESION". Según lo anterior, la Vista Tabla envía este mensaje a la clase Buffer, en espera de que le sea devuelto el listado completo (variables reales y auxiliares) de las variables que contiene.

Figura 43. Diagrama de secuencia del caso de uso Consultar Datos



Autores proyecto.

4 - Return Listado Variables: La instancia de la clase Buffer retorna el listado total de variables a la instancia de la clase Vista Tabla.

Nota: El primer rectángulo azul mostrado en el diagrama anterior, representa un ciclo repetitivo que se ejecuta para cada una de las variables seleccionadas por el usuario. Durante este ciclo repetitivo se ejecuta el punto 5.

5- Obtener Variable Auxiliar (Variable): La Vista Tabla hace un llamado a un método contenido por ella misma, donde se verifica si en el listado retornado en el punto 4 se encuentra la variable auxiliar, de la variable pasada como parámetro en

este mensaje. Esto con el fin de obtener el listado real de variables a listar, que esta compuesto de las variables seleccionadas por el actor Publico y sus variables auxiliares en caso que estas existan.

6- Crear (ListadoVariablesFinales, Buffer): La Vista Tabla hace un llamado al constructor de la clase Modelo Tabla, pasando como parámetros el listado de variables a mostrar y el buffer de donde se deben sacar los datos.

7- Ordenar Listado (): La instancia de la clase Modelo Tabla, ordena alfabéticamente el listado de variables a mostrar.

Nota: El segundo rectangulo azul que se ve en el diagrama indica un ciclo repetitivo que se ejecuta para cada uno de los angulos contenidos en el Buffer ya para los cuales se realizo la simulacion. El rectangulo de color rojo indica un ciclo repetido interno que se ejecuta para cada una de las variables a mostrar. Según lo anterior, por cada angulo de simulacion se listan los datos de las variables a mostrar.

8- GetDato(Angulo,Variable): Se hace la petición al Buffer de el valor contenido por una variable en un determinado angulo de simulacion.

9- return dato: El Buffer retorna el dato solicitado a la instancia de la clase Modelo Tabla.

10- Almacenar Dato: La instancia de Modelo Tabla lista el dato obtenido en el punto 9.

11- return: En este punto han finalizado los anteriores ciclos repetitivos y ya se tienen listadas las variables a mostrar, por lo cual se retorna el control de ejecución a la Vista Tabla.

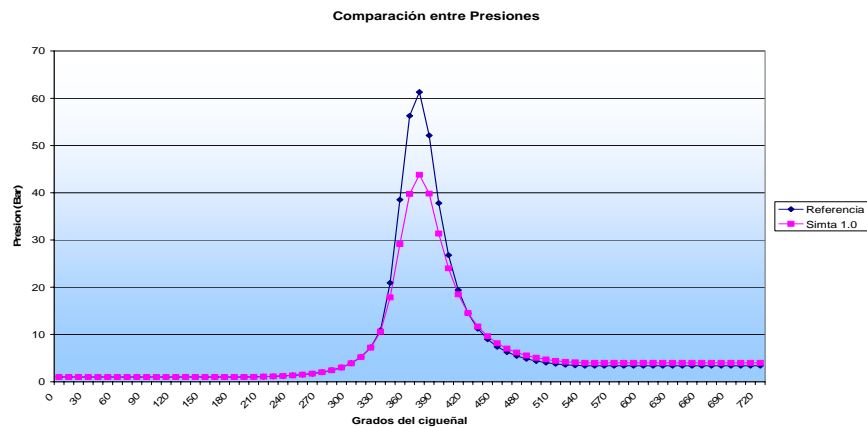
12- Mostrar Tabla (Modelo Tabla): La instancia de la clase Vista Tabla se envia este mensaje con el fin de crear la tabla donde se van a mostrar los datos y asignarle a esta los datos listados en la instancia de la clase Modelo Tabla.

13- Repaint(): La Vista Tabla hace un llamado a este metodo con el fin de refrescar la interfaz de usuario y de esta manera mostrar la tabla al actor Publico.

6.2 FLUJO DE PRUEBAS

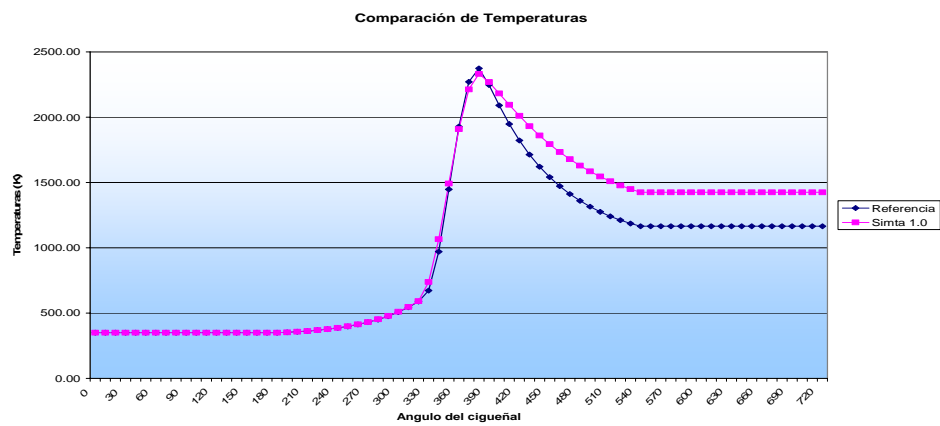
Las curvas de color azul se obtuvieron de datos de la universidad de Purdue consignados en el libro Internal Combustion Engines de Colin R. Ferguson y las curvas de color fucsia se obtuvieron con el software "SIMTA 1.0" desarrollado en este proyecto.

Figura 44. Comparación entre presiones



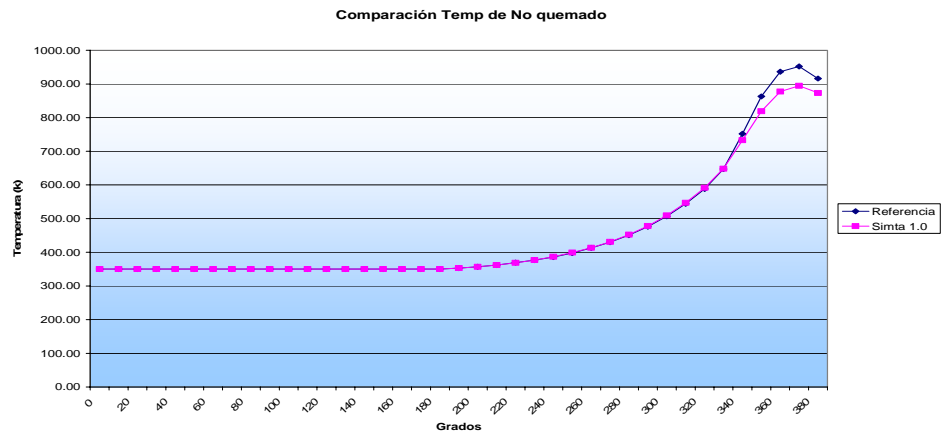
Autores proyecto.

Figura 45. Comparación de temperaturas



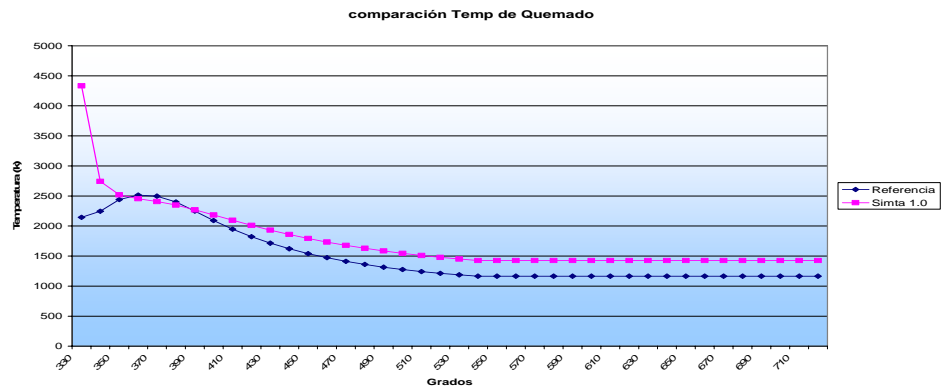
Autores proyecto.

Figura 46. Comparación Temo de No quemado



Autores proyecto

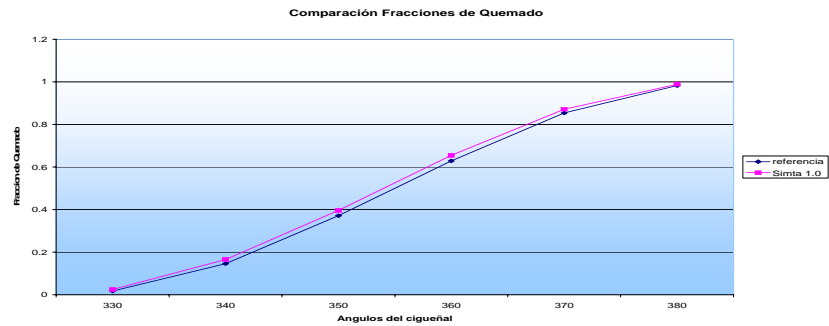
Figura 47. Comparación de temperaturas de quemado



Autores proyecto.

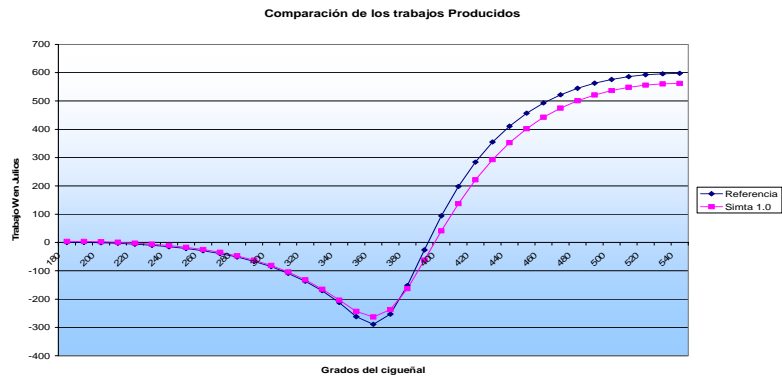
Comportamiento durante la combustión.

Figura 48. Comparación entre las Fracciones de Quemado



Autores proyecto.

Figura 49. Comparación de los trabajos producidos



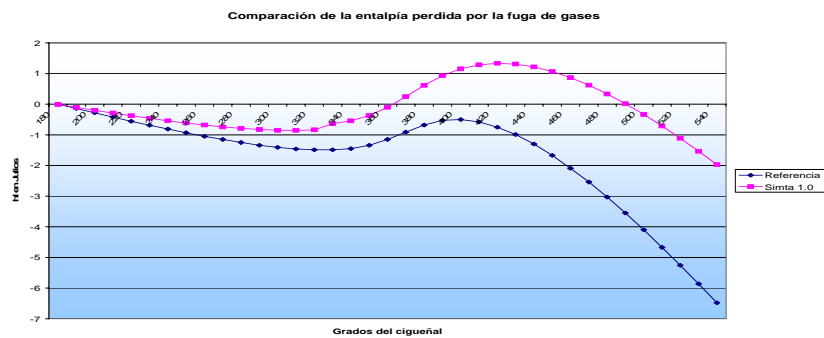
Autores proyecto.

Figura 50. Comparación de las pérdidas de calor



Autores Proyecto.

Figura 51. Comparación de la entalpía perdida por la fuga de gases



Autores proyecto.

Como se puede apreciar en las graficas, los resultados de ambos programas demuestran tener resultados muy similares y comportamientos idénticos.

En las siguientes graficas vamos a comparar los resultados de SIMTA 1.0 con otro software similar de la universidad Nacional de Trujillo, Universidad Nacional de Jorge Basadre Grohmann de Taca. Realizado por el Dr. Guillermo Lira Cacho y el Ing.Yury Vasquez Charcape.

DATOS DE ENTRADA: DATOS DEL MOTOR:

Relación de compresión= 8;
Numero de cilindros= 1;
Relación biela manivela= 1/4.25;
Régimen de velocidad= 2500;
Carrera= 111
Diámetro= 76.2
Angulo de adelanto de la chispa: 0,15,30,45,60;
Coeficiente de exceso de aire=0.862;

VALVULA DE ADMISION.

Angulo de apertura: AAA=9;
Angulo de cierre: RCA=36;

VALVULA DE ESCAPE.

Angulo de apertura: AAE= 42;
Angulo de cierre: RCE= 8;

Estos datos pueden ser cambiados, antes de ejecutar nuevamente el programa y así ver la influencia de aquellos sobre la conducta del motor; la cual se evalúa tanto por resultados numéricos como gráficos.

RESULTADOS OBTENIDOS

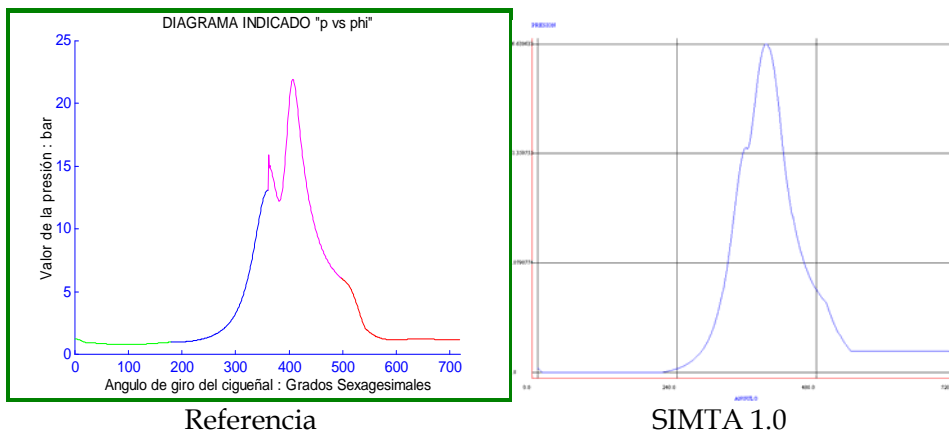
Tabla 12. Valores estimados de la presión media efectiva, potencia efectiva calculada y presión máxima, para cada valor del ángulo de adelanto de chispa:

Propiedades evaluadas	ANGULO DE ADELANTO DE CHISPA				
	0	15	30	45	60
pme (bar) Referencia	8,2890	9,947	10,968	10,686	9,2014
pme (bar) SIMTA 1.0	7,1241	7,9796	8,0599	7,1920	6,2668
pmax (bar) Referencia	21,901	31,839	45,958	59,248	65,472
pmax (bar) SIMTA 1.0	16,63	23,6624	30,5619	28,3877	35,5192

Autores proyecto.

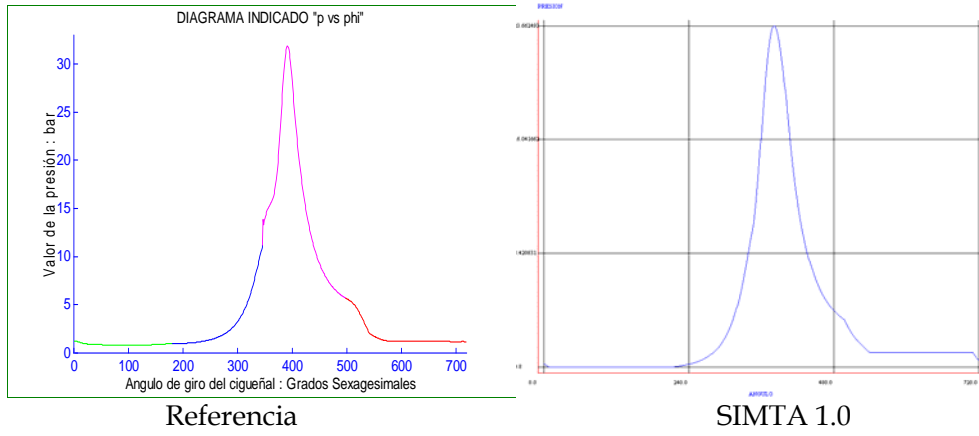
A continuación se presentan los diagramas indicados para cada adelanto de chispa.

Figura 52. Diagrama indicado "presión ángulo de giro" para un adelanto de chispa de 0 grados.



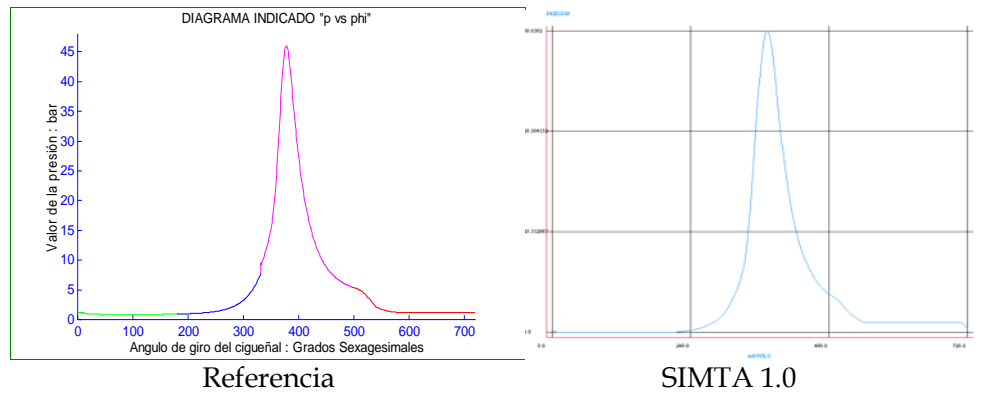
Autores proyecto.

Figura 53. Diagrama indicado "presión ángulo de giro" para un adelanto de chispa de 15 grados.



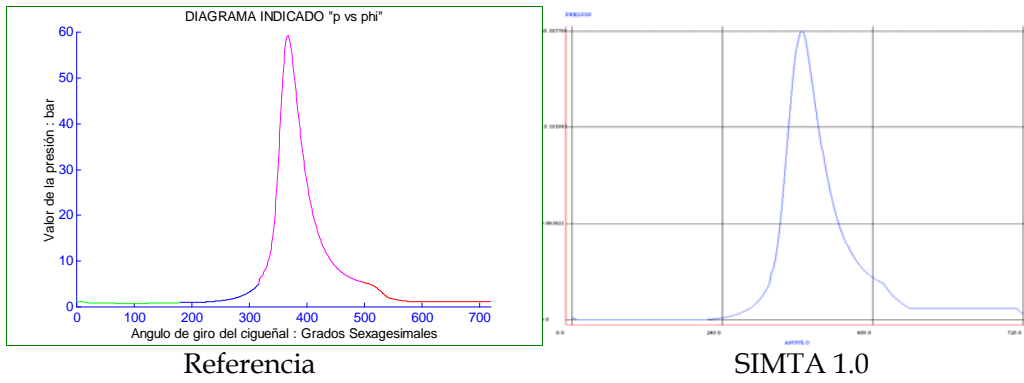
Autores Proyecto.

Figura 54. Diagrama indicado "presión ángulo de giro" para un adelanto de chispa de 30 grados.



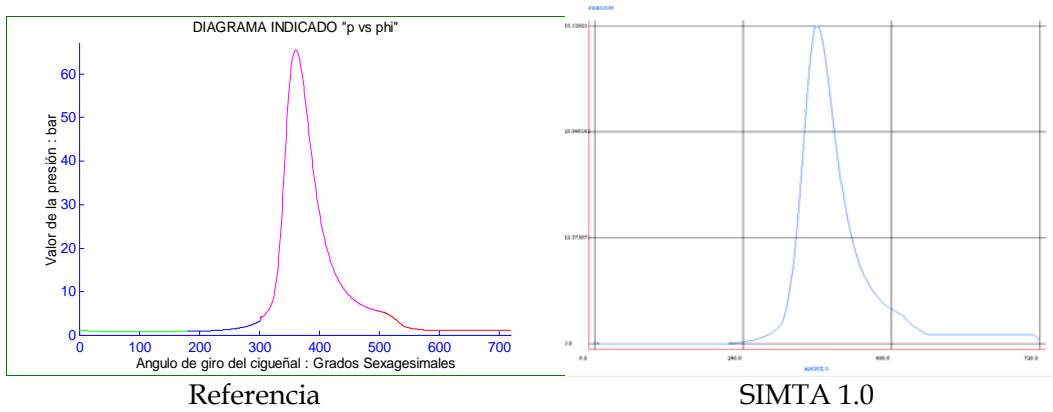
Autores Proyecto.

Figura 55. Diagrama indicado "presión ángulo de giro" para un adelanto de chispa de 45 grados.



Autores Proyecto.

Figura 56. Diagrama indicado "presión ángulo de giro" para un adelanto de chispa de 60 grados.



Autores Proyecto.

7 HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA

Para el desarrollo del material educativo informático SIMTA 1.0 se utilizó un equipo de las siguientes características:

7.1 Hardware.

- Procesador Pentium II 500 MHz
- Memoria RAM 192 MB.
- Disco Duro 10 GB.
- Tarjeta de Red.
- Monitor a color de 14''.
- Unidad de CD ROM 40X o superior.
- Unidad de Disquete 3 ½.
- Mouse.
- Teclado.
- Punto de Conexión a la red LAN.
- Servidor Linux

7.2 Software.

- Sistema Operativo Windows XP
- Entorno de programación Java JCreator LE.
- Base de datos Postgres.
- Driver InterClient 2.5.
- Internet Information Server 5.0.
- Power Designer 7.0.0.
- Microsoft Internet Explorer 5.0.
- Macromedia suite Mx.
- Plataforma MEI (Material Educativo Informático).

8 CONCLUSIONES

- Se observó similitud entre los resultados obtenidos por la herramienta SIMTA 1.0 al compararlos con pruebas experimentales realizadas por investigaciones del mismo nivel alrededor del mundo, por lo cual se concluye que los modelos empleados para el desarrollo de la herramienta, son adecuados para la predicción del comportamiento de los ciclos ideales y reales de los motores encendidos por chispa, .
- La metodología de proceso unificado para desarrollo de software es compatible con el lenguaje de modelado unificado (UML) y demostró ser una buena alternativa para el desarrollo de proyectos de simulación.
- El desarrollo de proyectos con las características de acceso web, multiplataforma e independencia del hardware con las que cuenta la tecnología java utilizada en la implementación de "SIMTA 1.0", fortalece el posicionamiento de la universidad como centro de investigación a nivel nacional e internacional.
- La tecnología java empleada es buena alternativa para el desarrollo de proyectos de investigación y simulación en los cuales se presenta una alta exigencia computacional en la solución de modelos matemáticos complejos debido a su gran eficiencia y respuesta a través de la web.
- Los grupos de trabajo interdisciplinario permiten ampliar el horizonte de conocimiento de cada uno de sus integrantes en áreas diferentes de su carrera y son una buena alternativa para el desarrollo de proyectos especializados.

9 RECOMENDACIONES

- Los resultados obtenidos por medio del modelo propuesto pueden mejorarse profundizando en el análisis de los procesos de admisión y escape. El modelo actual esta basado en un modelo cuasi-estacionario con el cual se puede analizar el flujo a través de restricciones y la caída de la carga en dichos elementos. Si empleáramos modelos de llenado (carga y descarga) modelos no estacionarios obtendríamos la variación temporal de la temperatura y la presión sin describir el campo de velocidades ni las variaciones espaciales de presión, este tipo de modelos será útil para observar la variación de la eficiencia volumétrica con respecto a las revoluciones del motor. El modelo mas complejo de implementar será el modelo de dinámica de gases, este nos proporcionará información detallada del campo de velocidades y presión, estos modelos permitirán calcular las dimensiones y geometrías específicas para los ductos de admisión y escape, pero debido a la complejidad de sus cálculos y análisis requiere de un proyecto independiente para lograr su entendimiento e implementación.
- Para el desarrollo de proyectos que modelen el comportamiento de otros motores, se recomienda tomar como base el código fuente de la herramienta SIMTA 1.0, con el fin de disminuir el tiempo de implementación y además contribuir con el crecimiento de la herramienta al utilizar , ampliar y complementar las clases y modelos matemáticos empleados por ella.

El software SIMTA 1.0 es una herramienta web, que permite simular el funcionamiento de MCI 4T ECH y como tal recomendamos su uso bajo la tutoria de personal experto en el tema con el fin de que la información suministrada por la herramienta.

BIBLIOGRAFÍA

- **FERGUSON, C. R.** Internal Combustion Engines. New York: John Wiley and Sons. 1986. 546 p.
- **FOX, M.** Introducción a la Mecánica de Fluidos. México: Mc Graw Hill. 1990. 632 p.
- **HEYWOOD, J.B.** Internal Combustion Engines Fundamentals. New York: Mc Graw Hill. 1988. 928 p.
- **JOVAJ, M S.** Motores de Automóvil. Moscú: MIR. 1982. 65 p.
- **MARADEY, Juan.** Termodinámica Aplicada. Bucaramanga: Ediciones UIS. 2002. 641 p.
- **VAN WYLEN, G. y SONNTAG, R.** Fundamentos de Termodinámica. México: Limusa. 1967. 536 p.
- **CAMPBELL, A.** Thermodynamic analysis of Combustion Engines. Malabar-Florida, Robert E. Krieger, 1^{ra} Ed. 1985.
- **NIGRIO Norberto, SORTI Mario, AMBROGGI Leonardo** Modelización numérica de un motor de combustión Interna Monocilíndrico encendido por chispa. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Calculo y Diseño en Ingeniería, Vol 15, N°1, 21-54, 1999.
- **BURDEN, Richard L. y FAIRES, J. Douglas.** Análisis numérico. Editorial Alfaomega, 2002. 839 p.
- **MOHR, Jim.** Linux, Recursos para el usuario. Primera edición. Prentice Hall. México, 1999.
- **JACOBSON, Ivar. BOOCH, Grady. RUMBAUGH, James.** El Proceso Unificado de Desarrollo de Software. Primera edición. Addison Wesley. España, 2000.
- **JACOBSON, Ivar. BOOCH, Grady. RUMBAUGH, James.** El Lenguaje Unificado de Modelado. Addison Wesley. España, 1999.
- **MOMJIAN, Bruce.** PostgrSQL: Introduction and Concepts. Addison-Wesley. 2000.

- **GONZALES Esteban, DUQUE Jorge**, Simulación Cero dimensional de un motor de combustión interna Monocilíndrico de cuatro tiempos de encendido por chispa Trabajando con Gasolina.Revista Tecnológica. Vol 15, No 1, Diciembre 2002.
- **LIRA Guillermo, CHARCAPE Yury**, Modelo Matemático del ciclo real de un motor de encendido por chispa, en función de sus parámetros constructivos y de operación. Proyecto de Grado Universidad Nacional de Trujillo, Universidad de Ingeniería, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna Facultad de Ingenierías, Escuela académico profesional de Ingeniería Mecánica
- **www.rational.com/uml**. Sitio Web de los desarrolladores del software para el manejo de UML Rational Rose. Contiene gran información sobre UML y el proceso unificado de desarrollo de software.
- **www.redhat.com**. Página Web de la empresa distribuidora de Linux más conocida en el mundo. En ella se encuentra información sobre manejo y configuración de las distintas versiones de Linux distribuidas por dicha empresa, así como información sobre mejoras y contenidos de nuevas versiones del sistema operativo.

Anexo A. Ecuaciones de estado para gases ideales.

La masa de una mezcla es la suma de la masa de todos los componentes de J

$$m = \sum_{i=1}^J m_i \quad (A17)$$

La fracción de masa de cualquier especie dada está definida como

$$x_i = m_i / m \quad (A.2)$$

y debe estar claro que

$$1 = \sum_{i=1}^J x_i \quad (A.3)$$

La energía interna de una mezcla es la suma de la energía de todos los componentes J

$$U = \sum_{i=1}^J m_i u_i \quad (A.4)$$

donde los u_i son tomados como la masa intensiva diferente a la molar intensiva.

La energía interna intensiva es:

$$u = \sum_{i=1}^J x_i u_i \quad (A.5)$$

Las relaciones análogas para la entalpía son

$$H = \sum_{i=1}^J m_i h_i \quad (A.6)$$

$$h = \sum_{i=1}^J x_i h_i \quad (A.7)$$

Las moles de mezcla son la suma de las moles de todos los componentes J

$$N = \sum_{i=1}^J N_i \quad (2.44)$$

y la fracción de mol de cualquier especie dada es

$$y_i = N_i / N \quad (A.8)$$

La energía interna de una mezcla también puede escribirse como

$$U = \sum_{i=1}^J N_i u_i \quad (A.9)$$

donde ahora el u_i se toma como la energía interna molar intensiva. Por lo tanto

$$u = \sum_{i=1}^J y_i u_i \quad (A.10)$$

Igualmente la entalpía es

$$H = \sum_{i=1}^J N_i h_i \quad (\text{A.11})$$

$$h = \sum_{i=1}^J y_i h_i \quad (\text{A.12})$$

Note que se han adoptado las letras mayúsculas para las variables extensivas y las minúsculas son reservadas para las variables intensivas. No se ha hecho ningún esfuerzo por distinguir entre las cantidades molares y másicas intensivas así que el contexto indicará cuál se está empleando.

El peso molecular de una mezcla es

$$M = \sum_{i=1}^J y_i M_i \quad (\text{A.13})$$

El factor de conversión requerido entre el intensivo molar y las unidades de masa intensiva. Por ejemplo, la masa intensiva (específico) con el gas constante se relaciona al intensivo molar (universal) por medio de la constante del gas

Por medio de la constante del gas nosotros encontramos una relación entre los valores intensivos molares y los valores intensivos másicos. Por ejemplo, usando la constante del gas tendremos:

$$R = R_u / M \quad (\text{A.14})$$

Donde R_u es la constante universal de los gases la cual emplea una relación intensiva molar, y la masa molar específica que emplea una relación intensiva másica.

El subíndice u puede o no ser usado de nuevo siempre y cuando el uso de R esté claro en el contexto.

Las relaciones familiares entre la presión, temperatura, y volumen son

$$\begin{aligned} PV &= NRT \\ PV &= mRT \\ P_v &= RT \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

La entropía de una mezcla también es la suma de las entropías de cada componente

$$S = \sum_{i=1}^J m_i s_i = \sum_{i=1}^J N_i s_i \quad (\text{A.16})$$

pero es una entropía diferente donde la entropía de un componente se evalúa a una presión total ($h_i = u_i + Pv_i$), la entropía de un componente se evalúa en su presión parcial.

La presión parcial de un componente es

$$P_i = y_i P \quad (\text{A.17})$$

Y la entropía de cualquier componente es

$$s_i = s_i^o - R_i \ln\left(\frac{P_i}{P_o}\right) \quad (\text{A.18})$$

Donde s_i^o sólo depende de la temperatura y es la entropía de ese componente cuando $P_i = P_o$. La sustitución de la Eq. (A.18) en la Eq. (A.16) da como resultado las relaciones siguientes:

$$s = -R \ln\left(\frac{P}{P_o}\right) + \sum_{i=1}^J x_i (s_i^o - R_i \ln y_i) \quad (\text{A.19})$$

$$s = -R \ln\left(\frac{P}{P_o}\right) + \sum_{i=1}^J y_i (s_i^o - R \ln y_i) \quad (\text{A.20})$$

Los datos termodinámicos para los elementos, los productos de la combustión, y muchos contaminantes están disponibles en una recopilación publicada por el National Bureau of Standards, llamada las tablas de JANAF (1971). Para los datos de las componentes de los combustibles son presentados por Stull, Westrum y Sinke, (1969) y están en el mismo formato que las tablas de JANAF. Además de estas dos referencias una recopilación hecha por Rossini (1953) es útil para los combustibles de los hidrocarburos a temperaturas tan altas como 1500 K.

Para los cálculos de computación no es eficiente tratar de tabular los datos. Por esta razón los calores específicos son aproximados a una curva polinómica minimizando el error de los mínimos-cuadrados. La función que nosotros emplearemos para cualquier especie dada es

$$\frac{c_p}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 \quad (\text{A.21})$$

De igual forma, la entalpía y entropía a la presión atmosférica se determinan respectivamente mediante:

$$\frac{h}{RT} = a_1 + \frac{a_2}{2} T + \frac{a_3}{3} T^2 + \frac{a_4}{4} T^3 + \frac{a_5}{5} T^4 + \frac{a_6}{T} \quad (\text{A.22})$$

$$\frac{s^o}{R} = a_1 \ln T + a_2 T + \frac{a_3}{3} T^2 + \frac{a_4}{4} T^3 + \frac{a_5}{5} T^4 + a_7 \quad (\text{A.23})$$

Donde el a_6 y a_7 son las constantes de integración determinadas coincidiendo en la entalpía y entropía a alguna temperatura de referencia. Se dan los valores de las constantes para varias especies de interés en la tabla 1. Elegimos la temperatura

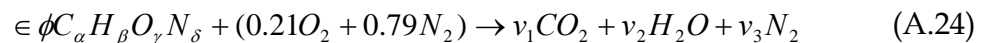
298 K como temperatura de referencia con la entalpía de, H_2, O_2, N_2 y $C(s)$ asumiendo que su valor es cero.

Tabla 1. Valores de las constantes necesarias para los cálculos termodinámicos en temperaturas de 300K y 1000K

I	Especie	a_{i1}	a_{i2} (E-02)	a_{i3} (E-05)	a_{i4} (E-08)	a_{i5} (E-12)	a_{i6} (E05)	a_{i7}
0	C_7H_{17}	4,06	6,01	-0,188	-0	0	-0,4053	-2,8325
1	CO_2	2,4007797	0,87350957 E-03	-0,66070878	0,20021861	0,63274039 E-03	-0,48377527	9,6951457
2	H_2O	4,0701275	-0,11084499	0,41521180	-0,29637404	0,80702103	-0,30279722	-0,32270046
3	N_2	3,6748261	-0,12081500	0,23240102	-0,63217559 E-01	-0,22577253	-1,0611588	2,3580424
4	O_2	3,6255985	-0,18782184	0,70554544	-0,67635137	0,021555993	-1,0475226	4,3052778
5	CO	3,7100928	-0,16190964	0,36923594	-0,20319674	0,23953344	-0,14356310	2,955535
6	H_2	3,0574451	0,26765200	-0,58099162	0,55210391	0,018122739	-988,90474	-2,2997056
7	H	2,5	0	0	0	0	0,25471627	-0,46011762
8	O	2,9464287	-0,16381665	0,24210316	-0,16028432	0,38906964	0,29147644	2,9639949
9	OH	3,8375943	-0,10778858	0,96830378 E-01	0,18713972 E-01	-0,22571094	3,6412823	0,49370009
10	NO	4,0459521	-0,34181783	0,79819190	-0,61139316	0,015919076	9,7453934	2,9974988

ESTEQUIOMETRÍA Y COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA DE AIRE-COMBUSTIBLE Y GAS RESIDUAL

Vamos a representar la fórmula química de un combustible como $C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\delta$. Una reacción estequiométrica está definida tal que los únicos productos son dióxido de carbono y agua:



Y se resuelve para ϵ , la proporción molar combustible-aire, y los coeficientes v_i desde $i= 1,2,3$ que describen la composición del producto. Nosotros sabemos que se conservan los átomos, por lo tanto podemos escribir:

$$C \in \alpha = v_1$$

$$H \in \beta = 2v_2$$

$$O \in \gamma + 2(0.21) = 2v_1 + v_2$$

$$N \in \delta + 2(0.79) = 2v_3$$

La solución de estas cuatro ecuaciones da:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= 0.210\alpha / (\alpha + 0.25\beta - 0.5\gamma) \\
 v_2 &= 0.105\beta / (\alpha + 0.25\beta - 0.5\gamma) \\
 v_3 &= 0.790 + 0.105\delta / (\alpha + 0.25\beta - 0.5\gamma) \\
 \epsilon &= 0.210 / (\alpha + 0.25\beta - 0.5\gamma)
 \end{aligned}
 \tag{A.25}$$

Por tanto, la relación estequiométrica de la proporción aire-combustible en masa es:

$$F_s = \frac{mc}{me} = \frac{1}{A/C} = \frac{\epsilon(12.01\alpha + 1.008\beta + 16.00\gamma + 14.01\delta)}{28.85}
 \tag{A.26}$$

Donde 28.85 es la masa molar del aire. Para combustibles típicos la relación aire combustible estequiométrica es de 15 o un $F_s \approx 0.067$.

También, tenemos la fracción molar y másica del combustible en la estequiometría de una mezcla aire-combustible como:

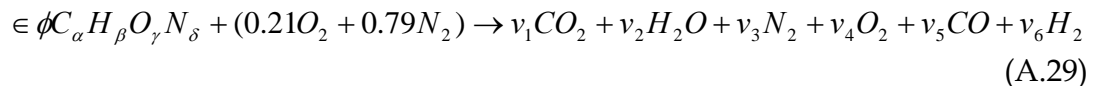
$$y_s = \frac{\epsilon}{1 + \epsilon} \quad x_s = \frac{F_s}{1 + F_s}
 \tag{A.27}$$

La relación combustible-aire equivalente está definida como la relación combustible-aire real dividida por la estequiometría

$$\phi = \frac{F}{F_s}
 \tag{A.28}$$

Si $\phi < 1$ la mezcla es llamada pobre, si $\phi > 1$ se dice que la mezcla es rica y si, $\phi = 1$ se dice que la mezcla es estequiométrica.

A bajas temperaturas, como en la descarga, y con relaciones carbón oxígeno menores de uno, la reacción de la combustión global puede escribirse



Para proporciones de los reactantes C/O mayores de uno se adiciona el carbono sólido C(s) y otras especies.

Podemos hacer ciertas aproximaciones convenientes para combustiones pobres y ricas.

$$\phi < 1 = v_5 = v_6 = 0$$

$$\phi > 1 = v_4 = 0$$

Para casos pobres o estequiométricos, las ecuaciones de balance atómico son suficientes para determinar la composición del producto (cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas). Para el caso de combustión rica introducimos una constante de equilibrio para la reacción



$$K = \frac{v_2 v_5}{v_1 v_6} \quad (A.30)$$

Las soluciones para ambos casos están dadas en la Tabla 2

Tabla 2. Productos de la combustión a baja temperatura, v_i (moles /moles de aire)

i	Especie	$\Phi \leq 1$	$\Phi > 1$
1	CO ₂	$\alpha\Phi\epsilon$	$\alpha\Phi\epsilon - v_5$
2	H ₂ O	$\beta\phi\epsilon/2$	$0.42 - \Phi\epsilon(2\alpha - \gamma) + v_5$
3	N ₂	$0.79 + \delta\Phi\epsilon/2$	$0.79 + \delta\Phi\epsilon/2$
4	O ₂	$0.21(1 - \Phi)$	0
5	CO	0	v_5
6	H ₂	0	$0.42(\Phi - 1) - v_5$

Hires, Ekchian, Heywood, Tabezynsky, y Wall.

En el caso de mezclas ricas el parámetro v_5 está dada por la solución de una ecuación cuadrática

$$v_5 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (A.31)$$

Donde:

$$a = 1 - K$$

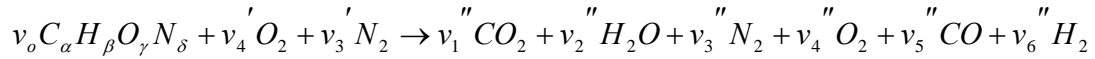
$$b = 0.42 - \phi \epsilon (2\alpha - \gamma) + K[0.42(\phi - 1) + \alpha\phi \epsilon]$$

$$c = -0.42\alpha\phi \epsilon (\phi - 1)K$$

Con este conjunto de ecuaciones podemos determinar la composición de las mezclas combustible-aire, y los productos de su combustión a bajas temperaturas. En motores reciprocantes hemos observado que existe gas residual que se mezcla con la mezcla combustible aire. Necesitamos determinar la composición de tal

mezcla para el análisis de la carrera de compresión y posteriormente para el comportamiento de la mezcla no quemada delante del frente de llama.

El fragmento de masa residual f es un parámetro conveniente. Reescribamos la ecuación de la combustión como



Donde:

$$v_i' = \text{Coeficiente reactante}$$

$$v_i'' = \text{Coeficiente del producto}$$

Adoptando una notación similar a otros símbolos, debe ser claro que para una mezcla de gas residual y premezcla de combustible-aire hacemos

$$x_i = (1-f)x_i' + fx_i'' \quad i = 6 \quad (\text{A.32})$$

Las fracciones molares están dadas por

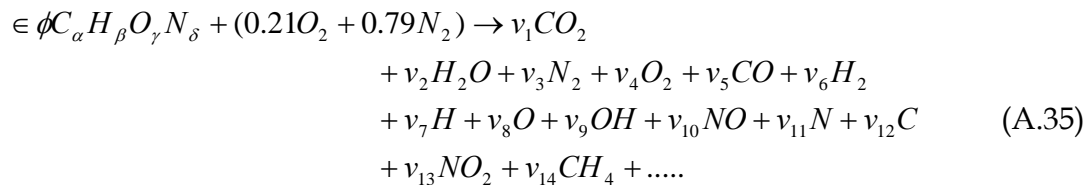
$$y_i = (1-y_r)y_i' + y_r y_i'' \quad (\text{A.33})$$

Donde la fracción molar de mol residual es

$$y_r = \left[1 + \frac{M''}{M'} \left(\frac{1}{f} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (\text{A.34})$$

PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN EN EQUILIBRIO.

Vamos ahora a estudiar el caso de combustión a altas temperaturas. En general, consideramos un problema donde T, P se especifican de acuerdo a:



Para una mezcla de n especies, la energía libre de Gibbs es

$$g = \sum_{j=1}^n \mu_j v_j \quad (\text{A.36})$$

Donde el potencial químico de las especies j es definido por

$$\mu_j = \left(\frac{\partial g}{\partial v_j} \right)_{T,P,v} \quad (\text{A.37})$$

El estado de equilibrio es determinado minimizando la energía libre de Gibbs sujeta a las restricciones impuestas por la ley de conservación de la masa, que es,

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^n a_{ij}v_j &= b_i^o & i = 1, \dots, l \\ b_i - b_i^o &= 0 & i = 1, \dots, l\end{aligned}\quad (\text{A.38})$$

Donde, a_{ij} es el número de átomos del elemento i en especies j , b_i^o es el número de átomos del elemento i en el reactante,

$$b_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}v_j = b \quad (\text{A.39})$$

Definiendo el término G como

$$G = g + \sum_{i=1}^l \lambda_i (b_i - b_i^o) \quad (\text{A.40})$$

donde λ_i , son multiplicadores de Lagrange, la condición de equilibrio pasa a ser

$$0 = \delta G = \sum_{i=1}^l \left(\mu_j + \sum_{i=1}^l \lambda_i a_{ij} \right) \delta v_j + \sum_{i=1}^l (b_i - b_i^o) \delta \lambda_i \quad (\text{A.41})$$

Tratando las variaciones δv_j y $\delta \lambda_j$ como dadas independientemente

$$\mu_j + \sum_{i=1}^l \lambda_i a_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (\text{A.42})$$

Para gases ideales

$$\mu_j = \mu_j^o + RT \ln \left(\frac{v_j}{v} \right) + RT \ln \left(\frac{P}{P_o} \right) \quad j = 1, \dots, n \quad (\text{A.43})$$

Para que

$$\frac{\mu_j^o}{RT} + \ln \left(\frac{v_j}{v} \right) + \ln \left(\frac{P}{P_o} \right) + \sum_{i=1}^l \pi_i a_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (\text{A.44})$$

Donde $\pi_i = \lambda_i / RT$

Para una temperatura y presión dadas (T, P) Ec. (A.44) es un conjunto de n ecuaciones para n incógnitas $v_{j,l}$ incógnitas π , y v .

La ecuación (2.74) proporciona una l cantidad de ecuaciones adicionales y cerramos con

$$v = \sum_{j=1}^n v_j \quad (\text{A.45})$$

Por lo tanto se tiene que resolver un grupo de $n+l+1$ ecuaciones.

Se recalca que el estado termodinámico puede ser especificado por dos propiedades independientes. Por ejemplo, para la combustión a presión constante,

la temperatura es desconocida pero la de entalpía es conocida. En este caso se añade una ecuación al conjunto de ecuaciones.

$$H = \sum_{j=1}^n v_j h_j \quad (\text{A.46})$$

Para un proceso isentrópico de compresión o expansión a una presión específica, la entropía se da en lugar de la entalpía o la temperatura. En este caso se añade

$$S = \sum_{j=1}^n v_j \left(s_j^o - R \ln \left(\frac{v_j}{v} \right) + R \ln P \right) \quad (\text{A.47})$$

Finalmente, si en cualquier caso el volumen específico es conocido en lugar de la presión, entonces tenemos que minimizar la energía libre de Helmholtz. En este caso un análisis similar (Gordon y McBride,) muestra que la Ec. (A.44) es reemplazada por

$$\frac{\mu_j^o}{RT} + \ln \left(\frac{v_j}{v} \right) + \ln \left(\frac{RT}{v} \right) + \sum_{i=1}^l \pi_i a_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (\text{A.48})$$

Para una combustión a volumen constante incluimos

$$U = \sum_{j=1}^n v_j (h_j - RT) \quad (\text{A.49})$$

Para una expansión o compresión isentrópica a un volumen específico incluimos

$$S = \sum_{j=1}^n v_j \left(s_j^o - R \ln \left(\frac{v_j}{v} \right) + R \ln \left(\frac{RT}{v} \right) \right) \quad (\text{A.50})$$

En la tabla 3 encontramos un resumen de los conjuntos apropiados de ecuaciones a resolver según las variables termodinámicas dadas.

Tabla .3 Ecuaciones requeridas para resolver los estados termodinámicos según las propiedades dadas

Propiedad dada	Ecuaciones requeridas
T, P	(2.74) (2.81) (2.80)
H, P	(2.74) (2.81) (2.80) (2.82)
S, P	(2.74) (2.81) (2.80) (2.83)
T, V	(2.74) (2.81) (2.84)
U, V	(2.74) (2.81) (2.84) (2.85)
S, V	(2.74) (2.81) (2.84) (2.86)

La solución de estos problemas para aplicaciones prácticas requiere iteración numérica en un computador. Afortunadamente, ahora hay varios programas disponibles.

A bajas presiones, la disociación es aún mayor, así que a una presión atmosférica la Tabla 1 es válida para temperaturas menores de 1500 K. Note que a altas temperaturas existe una cantidad significativa de óxidos de nitrógeno (NO).

Si algún gas en el cilindro se aumenta a estas temperaturas, ese gas tenderá hacia el equilibrio en una proporción determinada por la cinética química.

El óxido de nitrógeno es significativo porque es un contaminante del aire. A diferencia de especies de importancia termodinámica, su química no es lo suficientemente rápida para asumir que se encuentra en concentraciones equilibradas. Igualmente, una vez formada, su química se congela durante la carrera de expansión así que incluso en una descarga de baja temperatura se hallan los óxidos de nitrógeno.

Formulación práctica del equilibrio químico

La composición como una función del radio de equivalencia esta ilustrada en la figura 1, Donde vemos que si el radio de equivalencia es mayor de 4 la lista de las especies se vuelve mas larga e incluye carbón Sólido C(s), hidrogeno cianidico HCN, Acetileno C₂H₂, y metano CH₄. Estas especies también tienen la tendencia de a aparecer (así como óxidos de nitrógeno) con la existencia de bolsas de aire de combustible en alguna parte del cilindro, como en motores Diesel o estratificados, donde encontraremos Φ mayores de 3.

La observación de la figura (Figura 1) encontramos que con un $\phi < 3$, la única especie de importancia por disociación es O, H, OH, y NO. Así la lista de especies de acuerdo a la Ec. (A.35) pueden ser determinada en $i = 10$; es decir, que necesitamos considerar sólo 10 especies. Es importante aclarar que no es algo conocido a priori; es conocido a partir de datos computados con una lista mucho más larga de especies y luego de inspeccionar los resultados.

Por tanto, se considera el siguiente problema de acuerdo a la siguiente expresión :

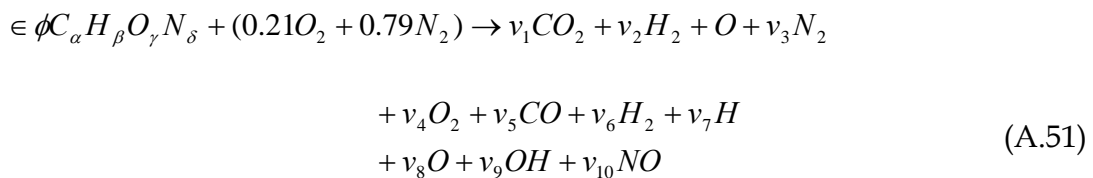
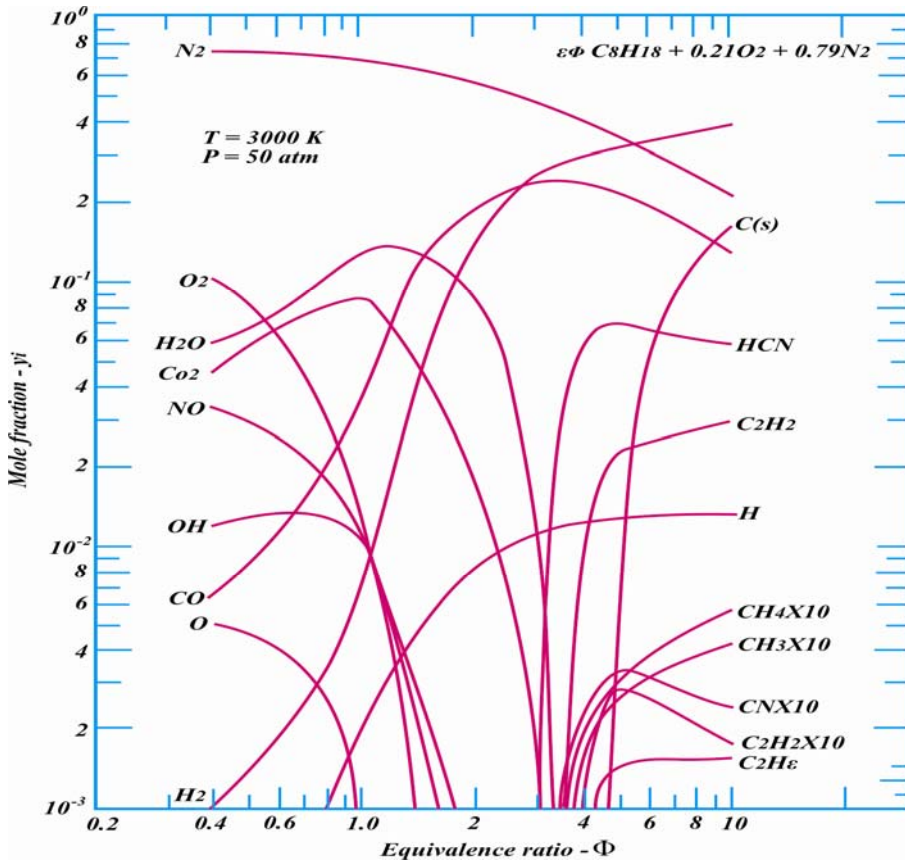


Figura 1. Composición en equilibrio de la mezcla aire-octano a $T=3000\text{ K}$, $P=50\text{ atm}$



INTERNAL COMBUSTION ENGINES de Colin R. Ferguson, página 120.

Del balance de masa obtenemos

$$C \in \phi\alpha = (y_1 + y_5)N \quad (A.52)$$

$$H \in \phi\beta = (2y_2 + 2y_6 + y_7 + y_9)N \quad (A.53)$$

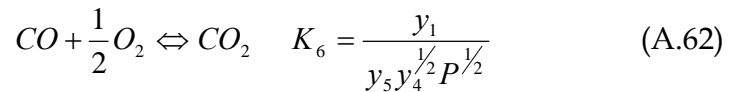
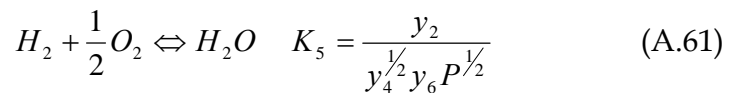
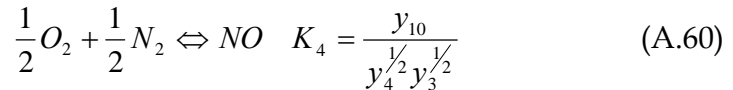
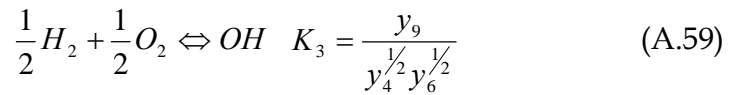
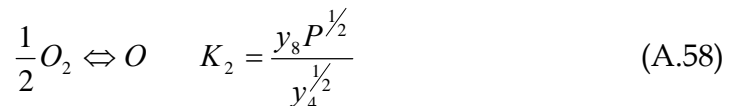
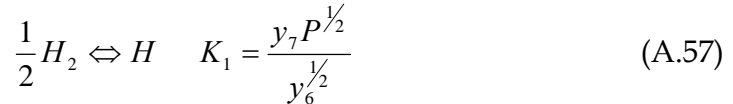
$$O \in \phi\gamma + 0.42 = (2y_1 + y_2 + 2y_4 + y_5 + y_8 + y_9 + y_{10})N \quad (A.54)$$

$$N \in \phi\delta + 1.58 = (2y_3 + y_{10})N \quad (A.55)$$

donde $N = \sum_{i=1}^{10} v_i$ es el número total de moles. Por definición, se puede decir lo siguiente

$$\sum_{i=1}^{10} y_i - 1 = 0 \quad (\text{A.56})$$

La introducción de seis constantes de equilibrio nos proporciona once ecuaciones para las diez incógnitas de fracciones molares y_i y el número de moles N . Para las reacciones, se considera de acuerdo a las siguientes ecuaciones.



Usar las constantes de equilibrio es igual a maximizar la entropía del gas. Este método es más simple cuando se consideran listas de restricción de especies como en el presente caso.

Con la composición conocida, se puede proceder a computar las propiedades termodinámicas de interés: entalpía, entropía, volumen específico, y energía interna.

Anexo B. Manual de usuario e instalación

Este manual muestra la forma de instalar y operar la herramienta software "SIMTA 1.0".

Este software fue diseñado para el uso del público en general que esté interesado en conocer más sobre el funcionamiento de los motores de combustión interna y para los ingenieros que quieran observar el comportamiento de los parámetros de algún motor particular a partir de sus datos de diseño.

INSTALACIÓN

La herramienta "SIMTA 1.0", esta diseñada para ser accedida vía web, por lo cual es necesario tener una conexión a Internet y un browser o navegador que cuente con el plugin necesario para correr programas implementados con tecnología java. Entre los browser mas conocidos tenemos el Internet Explorer que actualmente esta en su versión 7 y el Mozilla Firefox que actualmente esta en su versión 2.006 .

El plugin que se requiere para correr software desarrollado con tecnología java es una versión especifica de la máquina virtual de java para cada navegador, la cual ejecuta en el equipo cliente cada una de las instrucciones compiladas en lenguaje java y será la encargada de correr el Software SIMTA 1.0, por esto es importante obtener el plugin necesario según el tipo de browser o navegador desde el cual se quiera acceder a la herramienta y el sistema operativo en el cual se este trabajando.

Para la instalación del plugin para el browser Firefox bajo plataforma Windows, remitirse a la siguiente página web:

http://www.java.com/es/download/windows_xpi.jsp

Para la instalación del plugin para el browser Firefox bajo plataforma Linux, remitirse a la siguiente página web:

http://java.com/es/download/linux_manual.jsp

OPERACIÓN

Para ejecutar el software SIMTA 1.0 es necesario acceder primero que todo a la página web donde se encuentra alojada herramienta, para esto debemos por medio de un browser acceder a la siguiente dirección:

<http://gavilan.uis.edu.co/~jchacon/docencia/asignatura1/SIMTA/simta.htm>

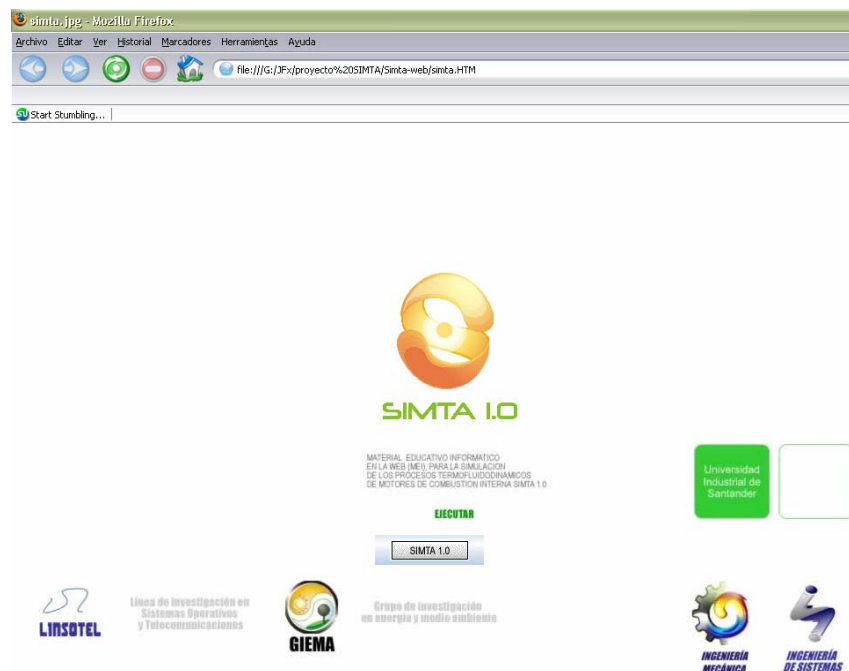
o si prefiere desde cualquier equipo miembro de la red de la UIS ingresar por medio de la siguiente dirección:

<http://192.168.85.64/simta/simta.htm>

Es importante dejar claro que las direcciones listadas anteriormente son sitios de alojamiento momentáneo para la página.

Al ingresar a la pagina principal de SIMTA 1.0, encontraremos los logos de las empresas que nos patrocinan como son LINSOTEL y GIEMA, los créditos correspondientes a los creadores y a los directores del proyecto, así como el logo de La UIS de Ingeniería Mecánica y de ingeniería de sistemas (Figura 1).

Figura 1. Ventana de ingreso al programa



SIMTA 1.0

En la zona central de la pagina se encuentra el logo de SIMTA 1.0 así como el botón de inicio o ejecución de la herramienta, el cual nos descargará y abrirá el applet, esta descarga puede tardar algunos segundos, dependiendo de la velocidad de la conexión a Internet y del hardware con el que cuente el equipo desde donde estemos haciendo la conexión.

Es recomendable tener una versión actualizada de la máquina virtual de Java (versión 5 o superior) que viene con el navegador y deshabilitar el bloqueo a las ventanas emergentes al menos para esta página ya que la herramienta SIMTA 1.0 se abre en una ventana nueva.

Una vez se de clic sobre el botón “SIMTA 1.0” de la pagina principal, se abrirá una ventana emergente que contiene en la parte superior el menú principal (Figura 2), el cual consta de cuatro botones, los cuales permiten crear un escenario, eliminar un escenario creado, enlazar con una página web que contiene la teoría correspondiente a los MCI 4T ECH y ver la información sobre los autores y directores del proyecto respectivamente en orden de izquierda a derecha.

Figura 2. Menú Principal



SIMTA 1.0

- **Crear escenario**

1. dar clic en el botón crear escenario ubicado en la esquina superior izquierda de la herramienta, con lo cual se abre una ventana de selección de escenario.

Figura 3. botón crear escenario



SIMTA 1.0

2. Escribir el nombre del nuevo escenario en la caja de texto “Nombre del Escenario” y seleccionar el tipo de motor a simular dando clic en una de las

opciones mostradas (Ciclo Ideal, Ciclo Real Isentrópico, Ciclo Real), finalmente dar clic en el botón “Aceptar”.

Figura 4. Selección tipo escenario

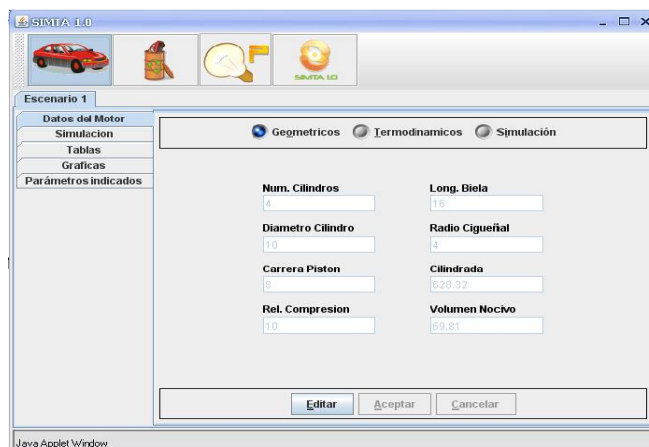


SIMTA 1.0

Si se quiere cancelar la creación del escenario basta con dar clic en el botón “Cancelar”.

Finalmente se obtiene el escenario creado como podemos ver en la siguiente figura.

Figura 5. Escenario creado



SIMTA 1.0

- **Eliminar escenario**

1. Seleccionar el escenario que se quiere eliminar dando clic sobre el nombre del mismo.

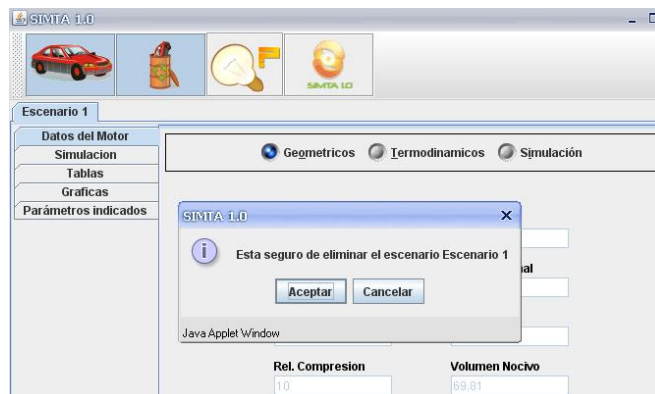
Figura 6. Eliminar Escenario.



SIMTA 1.0

2. Dar clic en el botón “Eliminar Escenario” del menú principal de la aplicación, con lo cual se abre una ventana de confirmación, como se ve en la figura 7 y aceptar o cancelar la eliminación del escenario.

Figura 7. Confirmar eliminación de escenario

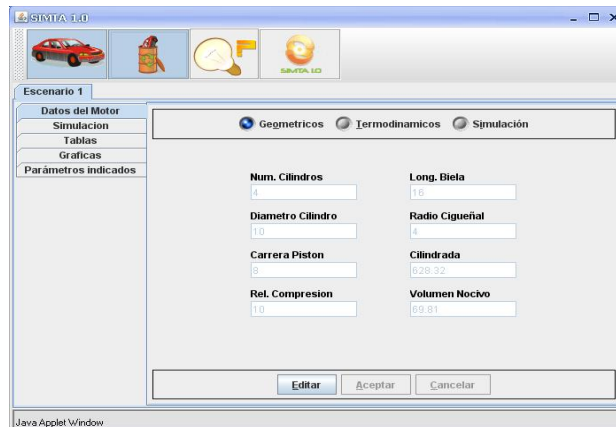


SIMTA 1.0

- **Editar datos Geométricos**

1. Seleccionar el escenario a editar y seguidamente dar clic en la pestaña “Datos del Motor”, que aparece en la lista de pestañas verticales del escenario seleccionado, con lo cual se va a mostrar la vista de datos Geométricos del motor respectivo donde aparece habilitado el botón “Editar” en la parte inferior de la ventana.

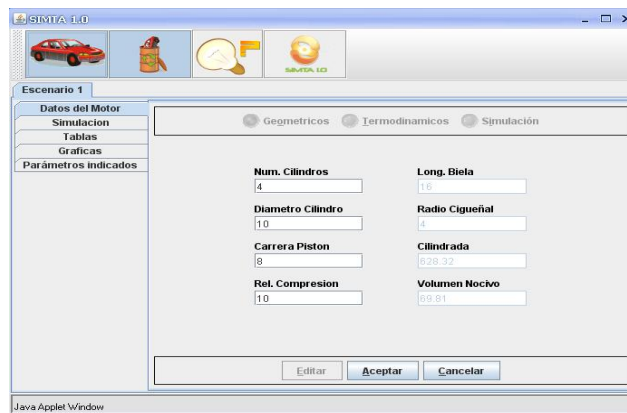
Figura 8. Datos geométricos del motor



SIMTA 1.0

2. Dar clic en el botón Editar, con lo cual se activan los botones “Aceptar”, “Cancelar” y las cajas de texto donde se encuentran los datos que se pueden editar.

Figura 9. Vista habilitada para la edición.



SIMTA 1.0

3. Editar los datos geométricos necesarios y dar clic en el botón “Aceptar” para guardar los cambios en el escenario. En caso de no querer guardar los cambios, dar clic en el botón “Cancelar”.

- **Editar datos Termodinámicos y de Simulación**

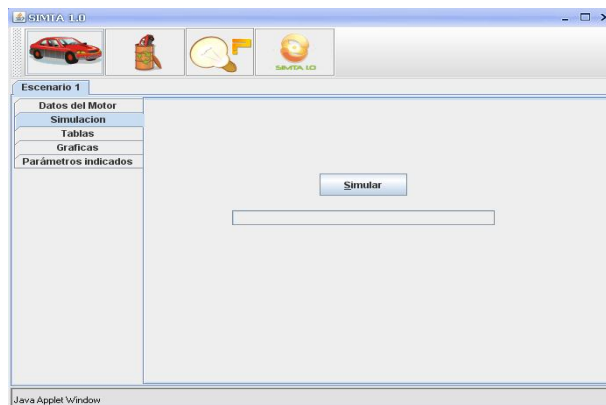
La edición de datos termodinámicos y de simulación se hace siguiendo los mismos pasos de la edición de datos Geométricos, pero teniendo la precaución de

seleccionar el tipo de datos que se quiere editar antes de dar clic en el botón “editar”.

- **Simular Escenario**

1. Seleccionar el escenario a editar y seguidamente dar clic en la pestaña “Simulación”, que aparece en la lista de pestañas verticales del escenario seleccionado, con lo cual se va a mostrar la vista de simulación del motor respectivo donde aparece habilitado el botón “Simular” y una barra que nos mostrara el progreso de la simulación.

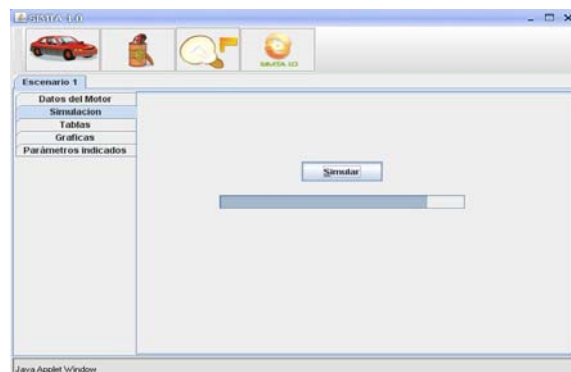
Figura 10. Vista de simulación



SIMTA 1.0

1. Dar clic al botón “Simular” para iniciar el proceso de simulación, el cual se puede verificar observando el avance de la barra de progreso.

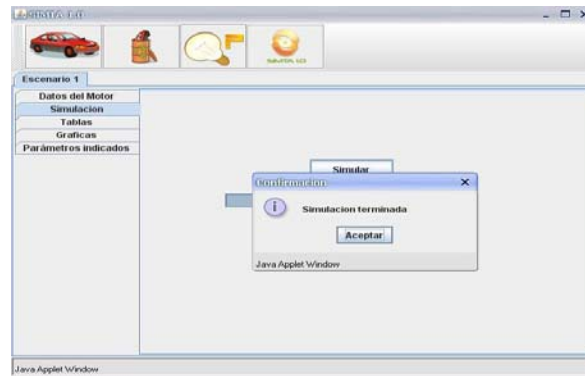
Figura 11. Simulación del escenario.



SIMTA 1.0

3. Al concluir la simulación del escenario, se mostrara un mensaje de finalización del proceso, al cual se debe dar clic en el botón "Aceptar".

Figura 12. Finalización de la simulación



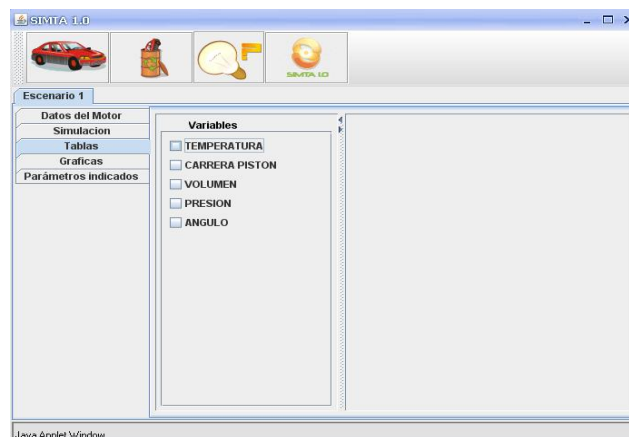
SIMTA 1.0

- **Ver Tablas**

La precondition para la ejecución de este proceso es haber realizado la simulación de un escenario.

1. Seleccionar un escenario simulado y seguidamente dar clic en la pestaña "Tablas", que aparece en la lista de pestañas verticales del escenario seleccionado, donde se mostrará el listado de variables obtenidas durante la simulación.

Figura 13. Vista para la generación de datos tabulados



SIMTA 1.0

2. Dar clic sobre la/las variables que se quiera/n tabular, con lo cual aparecerá en la parte derecha de la ventana los datos obtenidos para cada una de las variables en cada paso de simulación.

Figura 14. Datos tabulados.

The screenshot shows the SIMTA 1.0 Java Applet window. On the left, there are navigation tabs: 'Datos del Motor', 'Simulacion', 'Tablas', 'Graficas', and 'Parámetros indicados'. The 'Tablas' tab is active. In the center, a 'Variables' list has checkboxes for 'TEMPERATURA', 'CARRERA PISTON', 'VOLUMEN', 'PRESION', and 'ANGULO'. The 'PRESION' and 'ANGULO' checkboxes are checked. On the right, a table displays the data for these variables.

	ANGULO	PRESION	PRESION*1
180	1		Null
181	1		Null
182	1		Null
183	1		Null
184	1		Null
185	1		Null
186	1		Null
187	1		Null
188	1		Null
189	1.01		Null
190	1.01		Null
191	1.01		Null
192	1.01		Null
193	1.01		Null
194	1.01		Null
195	1.02		Null
196	1.02		Null
197	1.02		Null
198	1.02		Null
199	1.03		Null
200	1.03		Null

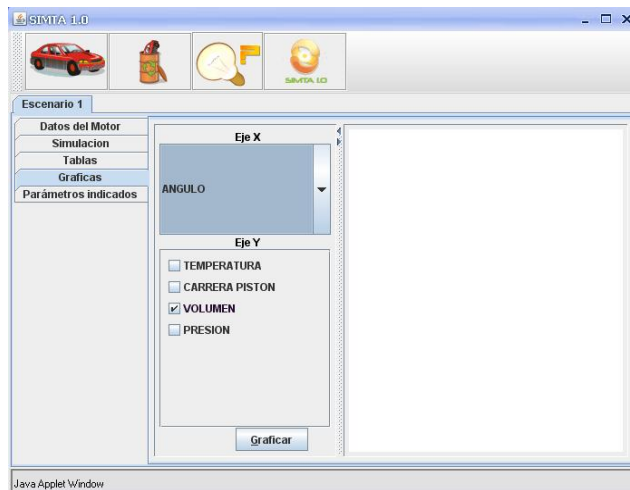
SIMTA 1.0

- **Graficar**

La precondition para la ejecución de este proceso es haber realizado la simulación de un escenario.

1. Seleccionar un escenario simulado y seguidamente dar clic en la pestaña "Graficas" que aparece en la lista de pestañas verticales del escenario seleccionado, donde se mostrará por defecto elegidas para el eje X la variable "ANGULO" y par el eje Y la variable "VOLUMEN".

Figura 15. Vista de graficación

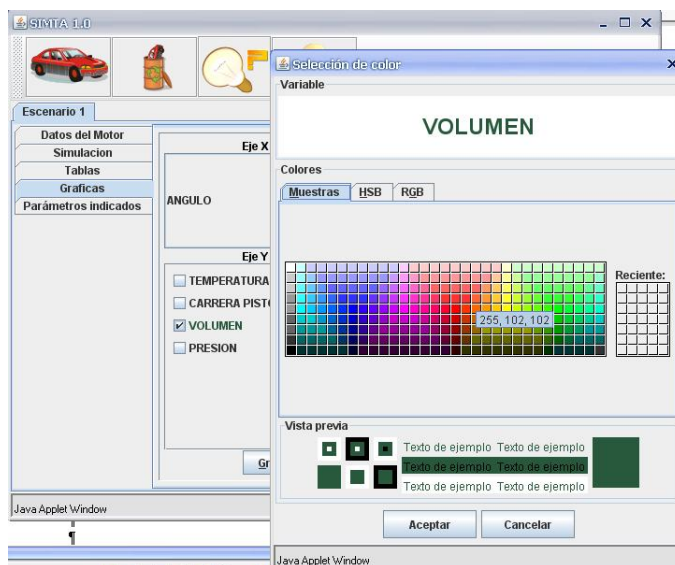


SIMTA 1.0

2. Seleccionar la variable que será parte del eje X de una lista que aparecerá al dar clic en la flecha de despliegue del combo titulado "Eje X". Así mismo seleccionar la/las variables que se quiere aparezcan en el eje Y de la grafica, dando clic sobre sus respectivos nombres.

3. Si se quiere obtener el gráfico de una variable específica con un color especial, basta con dar doble clic al nombre de la variable después que esta esté seleccionada, lo que implica ejecutar primero el paso 2. De esta manera se mostrará una ventana de selección de colores, donde se puede escoger el color según la necesidad y finalmente dar clic al botón aceptar para aplicar el color.

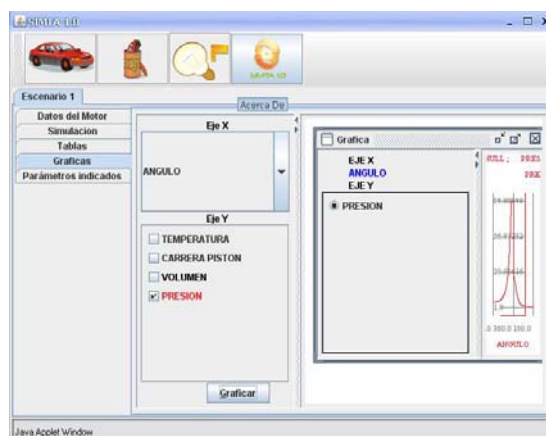
Figura 16. Selección de color para una variable específica.



SIMTA 1.0

4. Después de seleccionar la/las variables a graficar en los ejes X y Y, se procede a dar clic en el botón “Graficar”, con lo cual se obtendrá el grafico requerido en una nueva ventana que saldrá situada en la parte derecha de la ventana principal.

Figura 17. Gráfica generada

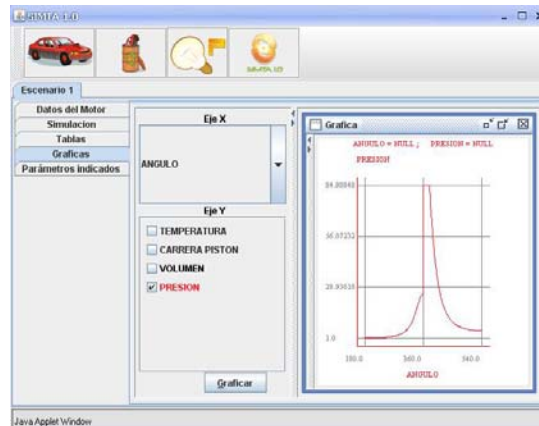


SIMTA 1.0

La grafica se mostrara recogida, por lo cual es necesario dar clic en la flecha que apunta a la izquierda y que se encuentran en la parte superior entre la lista de

variables y el gráfico, con el fin de minimizar la lista de variables y ampliar el panel de graficación, también es aconsejable maximizar la ventana de la grafica.

Figura 18. Grafica ampliada

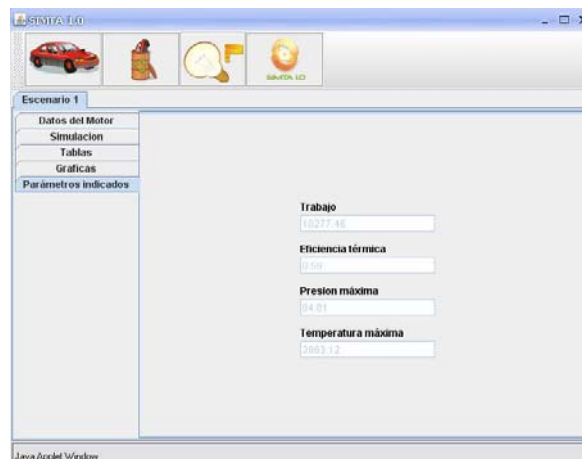


SIMTA 1.0

- **Ver Parámetros**

1. Seleccionar un escenario simulado y dar clic en la pestaña “Parámetros indicados” que aparece en la lista de pestañas verticales del escenario. Con lo cual se podrán ver los valores de los parámetros calculados durante el proceso de simulación.

Figura 19. Vista de parámetros del motor.



SIMTA 1.0