



**Universidad  
de La Laguna**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

***Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica***

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

Análisis y modelado de Motor de Combustión Interna Alternativo (MCIA) mediante software específico (OpenWAM) y validación experimental en banco de ensayos.

**Autor**

Diego Jesús Galván Febles

**Tutores**

Óscar García Afonso

Agustín Manuel Delgado Torres





**Universidad  
de La Laguna**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

*Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica*

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

Análisis y modelado de motor de combustión interna alternativo mediante software específico y validación experimental en banco de ensayos.

**ÍNDICE GENERAL**

Diego Jesús Galván Febles



# ÍNDICE

Capítulo 1 - INTRODUCCIÓN .....	11
1. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO.....	11
2. OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	11
3. ALCANCE Y ANTECEDENTES .....	12
4. REFERENCIAS .....	13
4.1. BIBLIOGRAFÍA.....	13
4.2. SOFTWARE EMPLEADO.....	13
Capítulo 2 – TEORÍA DEL MODELADO DE MOTORES.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. MODELADO DE LOS FLUJOS DE GASES DE UN MOTOR.....	16
2.1. MODELOS DE VALOR MEDIO.....	17
2.2. MODELOS DE LLENADO Y VACIADO (0D) .....	18
2.3. MODELO UNIDIMENSIONAL DE ACCIÓN DE ONDAS (1D).....	19
2.4. CÁLCULO DE COEFICIENTE DE DESCARGA PARA FLUJOS DEL MOTOR .....	24
3. MODELADO DE LA COMBUSTIÓN .....	25
3.1. ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN .....	26
3.2. MODELOS PREDICTIVOS.....	26
3.3. LEY DE LIBERACIÓN DE CALOR POR APROXIMACIÓN DE WIEBE.....	27
4. MODELADO TEÓRICO PARA EL CÁLCULO DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR EN EL CILINDRO .....	28
4.1. INTRODUCCIÓN .....	28
4.2. AJUSTE DEL MODELO DE WOSCHNI.....	30
Capítulo 3 – METODOLOGÍA DEL MODELADO CON OPENWAM.....	33
1. INTRODUCCIÓN AL MODELADO CON OPENWAM .....	33
2. WAMER .....	34
2.1. CONSTRUCCIÓN DEL ESQUEMA UNIDIMENSIONAL DEL MODELO.....	36
2.2. CONFIGURACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL MOTOR EN EL MODELADO.....	36
2.3. CARACTERIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN PARA EL MODELO CON OPENWAM.....	37
2.4. CONFIGURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE.....	38
2.5. CONFIGURACIÓN DE LAS PÉRDIDAS MECÁNICAS DEL MOTOR EN OPENWAM.....	40
3. SIMULACIÓN DEL MODELO EN OPENWAM .....	46
Capítulo 4 – METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	49
1. OBJETO DE ESTUDIO.....	49

2. EQUIPOS .....	49
2.1. MOTOR HATZ 1B20 .....	49
2.2. BANCO DE ENSAYOS GUNT CT-159 .....	53
3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO EXPERIMENTAL .....	56
3.1. INTRODUCCIÓN .....	56
3.2. OBJETIVO Y TIPOS DE ENSAYOS REALIZADOS .....	57
3.3. PLANIFICACIÓN DE AGENDA PARA LAS SESIONES DE ENSAYOS EXPERIMENTALES ....	58
3.4. MÉTODO DE ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES EN EL ENSAYO EXPERIMENTAL.....	59
3.5. FASE DE PREPARACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MOTOR HATZ 1B20 Y BANCO DE ENSAYOS GUNT CT-159.....	60
3.6. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO .....	62
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	65
4.1. DATOS DE ENTRADA EN ENSAYO: .....	66
4.2. DATOS DE ENSAYO DEL MÉTODO DE ARRASTRE DEL MOTOR PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS MECÁNICAS:.....	66
4.3. DATOS DE ENSAYO DE CARGAS PARCIALES PARA PARÁMETROS DE REVOLUCIONES Y PAR MOTOR FIJADOS: .....	67
Capítulo 5 – MODELADO DEL MOTOR HATZ 1B20 .....	69
1. INTRODUCCIÓN .....	69
2. MODELADO DEL MOTOR CON OPENWAM .....	69
2.1. DATOS INICIALES DEL MOTOR DISPONIBLES .....	70
2.2. CONSTRUCCIÓN DEL ESQUEMA DEL MOTOR CON WAMER.....	71
2.3. CONFIGURACIÓN DEL MODELO DEL MOTOR HATZ 1B20 EN WAMER .....	72
2.4. CONFIGURACIÓN DE LAS LEYES DE LIBERACIÓN DE CALOR EN EL MODELO CON WAMER .....	73
2.5. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN Y DIAGRAMA DE ALZAMIENTO DE LAS VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE CON WAMER .....	75
2.6. CONFIGURACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR CON WAMER .....	78
3. SIMULACIÓN DEL MODELO DEL MOTOR HATZ 1B20 CON OPENWAM .....	80
Capítulo 6 – ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	83
1. INTRODUCCIÓN.....	83
2. RESULTADOS COMPARATIVOS DEL MODELO-ENSAYO EXPERIMENTAL.....	84
2.1. ANÁLISIS DEL PAR MOTOR EFECTIVO.....	85
2.2. ANÁLISIS DE LA POTENCIA EFECTIVA .....	87
2.3. ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO .....	89
2.4. ANÁLISIS DEL DOSADO .....	91

2.5. ANÁLISIS DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE.....	93
2.6. ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE .....	95
2.7. ANÁLISIS DEL LAZO DE BOMBEO CON EL DIAGRAMA P-V .....	98
2.8. CONCLUSIONES EN LOS RESULTADOS.....	100
Capítulo 7 – PROPUESTAS DE IMPLEMENTACIÓN AL MOTOR HATZ 1B20 .....	101
1. INTRODUCCIÓN .....	101
2. MODELADO DE LAS CONDICIONES DE PLENA CARGA EN EL MOTOR HATZ 1B20 Y COMPARACIÓN CON LAS CURVAS APORTADAS POR EL FABRICANTE.....	101
2.1. PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN PARA EL MODELO EN CONDICIONES DE PLENA CARGA .....	102
2.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DEL MODELO EN CONDICIONES DE PLENA CARGA.....	104
2.3. CONCLUSIONES .....	107
3. ANÁLISIS DE PROPUESTA DE SOBREALIMENTACIÓN TEÓRICA .....	109
3.1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....	109
3.2. PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN DE SOBREALIMENTACIÓN DESDE EL MODELO INICIAL .....	112
3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DEL MODELO EN CONDICIONES DE SOBREALIMENTACIÓN TEÓRICA .....	114
3.4. CONCLUSIONES .....	122
Capítulo 8 – CONCLUSIONES .....	123
1. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO .....	123
2. TRABAJOS FUTUROS.....	125





# ÍNDICE

ANEXO DE CÁLCULOS .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. RESULTADOS GLOBALES DEL ENSAYO EXPERIMENTAL.....	1
2.1. Tabla de valores teóricos de entrada para el ensayo experimental .....	1
2.2. Tablas de resultados calculados en el ensayo experimental a 1500 rpm. ....	2
2.3. Tablas de resultados calculados en el ensayo experimental a 2250 rpm. ....	3
2.4. Tablas de resultados calculados en el ensayo experimental a 3000 rpm. ....	4
2.5. Tablas de resultados de las pérdidas mecánicas calculadas en el ensayo experimental y el modelo. ....	5
3. RESULTADOS GLOBALES CALCULADO EN EL MODELO .....	5
3.1. Tablas de resultados de parámetros característicos del motor exportados por el modelo realizado en OpenWAM.....	5
4. RESULTADOS GLOBALES DEL ESTUDIO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE PLENA CARGA CON EL MODELO.....	6
4.1. Tabla de valores para la configuración de puntos de operación de las simulaciones con OpenWAM.....	6
4.2. Tabla de resultados comparativos de parámetros característicos de las curvas de plena carga. ....	7
5. RESULTADOS GLOBALES DE LA PROPUESTA DE ESTUDIO DE SOBREALIMENTACIÓN .....	7
5.1. Tabla de datos de gastos máxicos calculados para los puntos de operación. ....	7
5.2. Tablas de resultados comparativos de parámetros de operación para los intervalos de presión de sobrealimentación definidos.....	8
5.3. Tabla de resultados comparativos del parámetro de potencia específica. ....	10
5.4. Tabla de resultados comparativos del parámetro de presión máxima en cámara.....	11
5.5. Tabla de resultados comparativos del parámetro de carga térmica. ....	11
ANEXO DE PROCEDIMIENTOS PARA EL MODELO.....	13
1. PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE MOTOR HATZ 1B20 .....	13
1.2. Construcción del esquema del motor con WAMer .....	13
1.3. Configuración del modelo del motor HATZ 1B20 en WAMer .....	14
1.3.1. Configuración del cuadro de ejecución.....	15
1.3.2. Calibración del cuadro de ajustes generales del motor.....	17
1.3.3. Configuración del cilindro N°1 .....	22
1.3.4. Configuración de la válvula de admisión de aire.....	23
1.3.5. Configuración de la válvula de escape para los gases de combustión.....	26

1.3.6. Configuración del depósito de estabilización del aire de admisión (Nº1) .....	28
1.3.7. Configuración de la caja de filtro de aire de admisión del motor (Nº2) .....	28
1.3.8. Configuración del silenciador de escape para los gases de combustión (Nº3).....	29
1.3.9. Configuración del conducto de entrada al sistema del aire de admisión (nodo Nº1) .....	29
1.3.10. Configuración del conducto de aspiración entre los depósitos del sistema del aire de admisión (nodo Nº2) .....	34
1.3.11. Configuración del conducto de entrada del aire de admisión al motor (nodo Nº3) .....	36
1.3.12. Configuración del conducto de salida de los gases de combustión del motor (nodo Nº4) .....	38
1.3.13. Configuración del conducto de evacuación de los gases de combustión (nodo Nº5) .....	40
1.3.14. Configuración de la tobera de entrada del aire atmosférico .....	42
1.3.15. Configuración de la tobera de salida del aire atmosférico .....	42
1.4. Simulación del modelo en OpenWAM .....	43
1.5. Tratamiento de los resultados obtenidos en la simulación .....	46
1.5.1. Documentos de registro del proceso de cálculo con OpenWAM .....	47
1.5.2. Documentos para el tratamiento de datos extraídos en la simulación .....	48
ANEXO DE DOCUMENTACIÓN TÉCNICA .....	51
1. DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DE EQUIPOS UTILIZADOS .....	51
1.1. Ficha técnica de motor HATZ 1B20 .....	53
1.2. Catálogo del banco de pruebas modular para motores GUNT CT-159.....	61
1.3. Catálogo de la unidad de accionamiento y frenado GUNT HM 365 .....	64

# ÍNDICE

PRESUPUESTO.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. COSTE DE LA MANO DE OBRA.....	1
3. COSTE DE LA MAQUINARIA UTILIZADA.....	2
4. COSTE DEL EQUIPAMIENTO INFORMÁTICO Y SOFTWARE.....	2
5. PRESUPUESTO TOTAL DEL ESTUDIO.....	3





**Universidad  
de La Laguna**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

*Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica*

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

Análisis y modelado de motor de combustión interna alternativo mediante software específico y validación experimental en banco de ensayos.

**MEMORIA**

Diego Jesús Galván Febles



# FICHA DE IDENTIFICACIÓN

## PROYECTO

**Título:** Análisis y modelado de motor de combustión interna alternativo mediante software específico y validación experimental en banco de ensayos.

## PETICIONARIO

**Razón social:** Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna.

**Dirección:** Camino San Francisco de Paula, s/n, apartado 456, C.P. 38200.  
San Cristóbal de La Laguna, Tenerife.

**Teléfono:** +34 922 94 50 31

## AUTOR

**Nombre:** Diego Jesús Galván Febles

**DNI:** 78567556Q

**email:** [alu0100664843@ull.edu.es](mailto:alu0100664843@ull.edu.es)

## TUTORES

**Área:** Departamento Ingeniería Industrial. Área de Máquinas y Motores Térmicos

**Nombre:** Óscar García Afonso

**email:** [ogarciaa@ull.edu.es](mailto:ogarciaa@ull.edu.es)

**Nombre:** Agustín Manuel Delgado Torres

**email:** [amdelga@ull.edu.es](mailto:amdelga@ull.edu.es)





## RESUMEN

Este proyecto plantea un estudio y análisis de un modelado teórico de un MCIA para comparar los resultados obtenidos en un ensayo experimental, con el objetivo de validar el modelo y posteriormente proponer aplicaciones para uso docente.

El estudio se centrará en un motor diésel monocilíndrico de cuatro tiempos, del fabricante HATZ, modelo 1B20, instalado en un banco de ensayos que permitirá la realización de pruebas en diferentes condiciones.

Los objetivos específicos son:

- Diseño del modelo de motor a estudiar, utilizando el software OpenWAM.
- Realizar simulación en condiciones de funcionamiento determinadas y obtener datos de salida.
- Realizar diferentes ensayos experimentales en el banco de pruebas con el motor a estudiar en las condiciones de funcionamiento establecidas para la obtención de datos.
- Analizar y comparar los datos modelo-ensayo para la validación de los mismos.
- Proponer estudios de rendimiento a plena carga e implementación de sistema de sobrealimentación desde el modelo original.



## ABSTRACT

This project proposes a study and analysis of a theoretical modeling of an MCIA to compare the results obtained in an experimental trial, with the aim of validating the model and subsequently proposing applications for teaching use.

The study will focus on a four-stroke single-cylinder diesel engine, from manufacturer HATZ, model 1B20, installed in a test bench that will allow testing under different conditions.

The specific objectives are:

- Design of the engine model to be studied, using OpenWAM software.
- Perform simulation under certain operating conditions and obtain output data.
- Perform different experimental tests on the test bench with the engine to be studied under the operating conditions established for obtaining data.
- Analyze and compare model-test data for validation.
- Propose performance studies at full load and implementation of the supercharging system from the original model.



# ÍNDICE

Capítulo 1 - INTRODUCCIÓN .....	11
1. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO.....	11
2. OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	11
3. ALCANCE Y ANTECEDENTES .....	12
4. REFERENCIAS .....	13
4.1. BIBLIOGRAFÍA.....	13
4.2. SOFTWARE EMPLEADO.....	13
Capítulo 2 – TEORÍA DEL MODELADO DE MOTORES.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. MODELADO DE LOS FLUJOS DE GASES DE UN MOTOR.....	16
2.1. MODELOS DE VALOR MEDIO.....	17
2.2. MODELOS DE LLENADO Y VACIADO (0D) .....	18
2.3. MODELO UNIDIMENSIONAL DE ACCIÓN DE ONDAS (1D).....	19
2.4. CÁLCULO DE COEFICIENTE DE DESCARGA PARA FLUJOS DEL MOTOR .....	24
3. MODELADO DE LA COMBUSTIÓN .....	25
3.1. ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN .....	26
3.2. MODELOS PREDICTIVOS.....	26
3.3. LEY DE LIBERACIÓN DE CALOR POR APROXIMACIÓN DE WIEBE.....	27
4. MODELADO TEÓRICO PARA EL CÁLCULO DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR EN EL CILINDRO .....	28
4.1. INTRODUCCIÓN .....	28
4.2. AJUSTE DEL MODELO DE WOSCHNI.....	30
Capítulo 3 – METODOLOGÍA DEL MODELADO CON OPENWAM.....	33
1. INTRODUCCIÓN AL MODELADO CON OPENWAM .....	33
2. WAMER .....	34
2.1. CONSTRUCCIÓN DEL ESQUEMA UNIDIMENSIONAL DEL MODELO.....	36
2.2. CONFIGURACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL MOTOR EN EL MODELADO.....	36
2.3. CARACTERIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN PARA EL MODELO CON OPENWAM.....	37
2.4. CONFIGURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE.....	38
2.5. CONFIGURACIÓN DE LAS PÉRDIDAS MECÁNICAS DEL MOTOR EN OPENWAM.....	40
3. SIMULACIÓN DEL MODELO EN OPENWAM .....	46
Capítulo 4 – METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	49
1. OBJETO DE ESTUDIO.....	49

2. EQUIPOS .....	49
2.1. MOTOR HATZ 1B20 .....	49
2.2. BANCO DE ENSAYOS GUNT CT-159 .....	53
3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO EXPERIMENTAL .....	56
3.1. INTRODUCCIÓN .....	56
3.2. OBJETIVO Y TIPOS DE ENSAYOS REALIZADOS .....	57
3.3. PLANIFICACIÓN DE AGENDA PARA LAS SESIONES DE ENSAYOS EXPERIMENTALES ....	58
3.4. MÉTODO DE ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES EN EL ENSAYO EXPERIMENTAL.....	59
3.5. FASE DE PREPARACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MOTOR HATZ 1B20 Y BANCO DE ENSAYOS GUNT CT-159.....	60
3.6. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO .....	62
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	65
4.1. DATOS DE ENTRADA EN ENSAYO: .....	66
4.2. DATOS DE ENSAYO DEL MÉTODO DE ARRASTRE DEL MOTOR PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS MECÁNICAS:.....	66
4.3. DATOS DE ENSAYO DE CARGAS PARCIALES PARA PARÁMETROS DE REVOLUCIONES Y PAR MOTOR FIJADOS: .....	67
Capítulo 5 – MODELADO DEL MOTOR HATZ 1B20 .....	69
1. INTRODUCCIÓN .....	69
2. MODELADO DEL MOTOR CON OPENWAM .....	69
2.1. DATOS INICIALES DEL MOTOR DISPONIBLES .....	70
2.2. CONSTRUCCIÓN DEL ESQUEMA DEL MOTOR CON WAMER.....	71
2.3. CONFIGURACIÓN DEL MODELO DEL MOTOR HATZ 1B20 EN WAMER .....	72
2.4. CONFIGURACIÓN DE LAS LEYES DE LIBERACIÓN DE CALOR EN EL MODELO CON WAMER .....	73
2.5. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN Y DIAGRAMA DE ALZAMIENTO DE LAS VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE CON WAMER .....	75
2.6. CONFIGURACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR CON WAMER .....	78
3. SIMULACIÓN DEL MODELO DEL MOTOR HATZ 1B20 CON OPENWAM .....	80
Capítulo 6 – ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	83
1. INTRODUCCIÓN.....	83
2. RESULTADOS COMPARATIVOS DEL MODELO-ENSAYO EXPERIMENTAL.....	84
2.1. ANÁLISIS DEL PAR MOTOR EFECTIVO.....	85
2.2. ANÁLISIS DE LA POTENCIA EFECTIVA .....	87
2.3. ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO .....	89
2.4. ANÁLISIS DEL DOSADO .....	91

2.5. ANÁLISIS DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE.....	93
2.6. ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE .....	95
2.7. ANÁLISIS DEL LAZO DE BOMBEO CON EL DIAGRAMA P-V .....	98
2.8. CONCLUSIONES EN LOS RESULTADOS.....	100
<b>Capítulo 7 – PROPUESTAS DE IMPLEMENTACIÓN AL MOTOR HATZ 1B20 .....</b>	<b>101</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	101
2. MODELADO DE LAS CONDICIONES DE PLENA CARGA EN EL MOTOR HATZ 1B20 Y COMPARACIÓN CON LAS CURVAS APORTADAS POR EL FABRICANTE.....	101
2.1. PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN PARA EL MODELO EN CONDICIONES DE PLENA CARGA .....	102
2.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DEL MODELO EN CONDICIONES DE PLENA CARGA.....	104
2.3. CONCLUSIONES .....	107
3. ANÁLISIS DE PROPUESTA DE SOBREALIMENTACIÓN TEÓRICA .....	109
3.1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....	109
3.2. PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN DE SOBREALIMENTACIÓN DESDE EL MODELO INICIAL .....	112
3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DEL MODELO EN CONDICONES DE SOBREALIMENTACIÓN TEÓRICA .....	114
3.4. CONCLUSIONES .....	122
<b>Capítulo 8 – CONCLUSIONES .....</b>	<b>123</b>
1. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO .....	123
2. TRABAJOS FUTUROS.....	125





## ÍNDICES DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Ejemplos de soluciones del flujo en un tubo con ondas de choque mediante métodos de distinta precisión.....	21
<b>Figura 2:</b> Influencia de los parámetros de Wiebe en la dFQL y FQL .....	27
<b>Figura 3:</b> Cuadro de configuración de HRL con OpenWAM .....	28
<b>Figura 4:</b> Logotipo de OpenWAM .....	33
<b>Figura 5:</b> Ejemplo 1 de modelo de motor monocilíndrico de dos tiempos .....	35
<b>Figura 6:</b> Ejemplo 2 de motor de cuatro cilindros y cuatro tiempos diésel.....	35
<b>Figura 7:</b> Ejemplo de perfil dFQL.....	37
<b>Figura 8:</b> Cuadro de configuración con ejemplo de representación de dFQL configurada en OpenWAM.....	38
<b>Figura 9:</b> Diagrama teórico de distribución de válvulas.....	39
<b>Figura 10:</b> Cuadro de configuración del perfil de alzamiento de una válvula con OpenWAM.....	39
<b>Figura 11:</b> Representación gráfica de las curvas de pérdidas mecánicas obtenidas por el método de arrastre .....	43
<b>Figura 12:</b> Cuadro de configuración de los coeficientes de pérdidas mecánicas con OpenWAM .....	45
<b>Figura 13:</b> Diagrama de flujo conceptual del procedimiento de cálculo de las pérdidas mecánicas .....	46
<b>Figura 14:</b> Imagen del motor HATZ 1B2O.....	49
<b>Figura 15:</b> Representación gráfica de curvas de plena carga de parámetros de $N_e$ , $M_e$ y $SFC_e$ .....	52
<b>Figura 16:</b> Ejemplo de aplicación real del motor HATZ.....	52
<b>Figura 17:</b> Vista general del banco de ensayos GUNT CT-159.....	53
<b>Figura 18:</b> Vista general del módulo de accionamiento y frenado HM 365 .....	54
<b>Figura 19:</b> Vista general del conjunto funcional GUNT CT-159 y HM 365 .....	55
<b>Figura 20:</b> Vista del visor graduado para la medición de consumo de combustible .....	56
<b>Figura 21:</b> Vista general de los visualizadores instalados en el banco de ensayos GUNT CT-159 .....	59

<b>Figura 22:</b> Vista del equipo de ensayos en el ensayo experimental .....	63
<b>Figura 23:</b> Representación gráfica del mapa de calibración del modelo .....	64
<b>Figura 24:</b> Representación gráfica de la curva de pérdidas de carga en término de potencias .....	65
<b>Figura 25:</b> Esquema representativo del modelo de motor HATZ 1B20 planteado .....	71
<b>Figura 26:</b> Cuadro de configuración de HRL con el perfil dFQL utilizado en el modelo .....	74
<b>Figura 27:</b> Cuadro de configuración de coeficientes de descarga en el conducto de la válvula de admisión del modelo .....	76
<b>Figura 28:</b> Cuadro de configuración del perfil de alzamiento de la válvula de admisión del modelo .....	77
<b>Figura 29:</b> Cuadro de configuración del perfil de alzamiento de la válvula de escape del modelo .....	78
<b>Figura 30:</b> Representación gráfica de los puntos de operación para el cálculo de pérdidas de carga con el modelo .....	82
<b>Figura 31:</b> Representación gráfica del par efectivo medido-modelado .....	86
<b>Figura 32:</b> Representación gráfica de las curvas ensayo- modelo del par motor a 2250 rpm	87
<b>Figura 33:</b> Representación gráfica de la potencia efectiva medido-modelado .....	88
<b>Figura 34:</b> Representación gráfica de las curvas de potencia efectiva medido-modelado .....	89
<b>Figura 35:</b> Representación gráfica del rendimiento volumétrico medido-modelado .....	90
<b>Figura 36:</b> Representación gráfica de las curvas de rendimiento volumétrico medido-modelado .....	90
<b>Figura 37:</b> Representación gráfica de las curvas de dosado medido-modelado .....	92
<b>Figura 38:</b> Representación gráfica del rendimiento volumétrico medido-modelado .....	94
<b>Figura 39:</b> Representación gráfica de las curvas de consumo específico de combustible medido-modelado .....	94
<b>Figura 40:</b> Representación gráfica de las curvas ensayo- modelo del consumo específico de combustible a 3000 rpm .....	95
<b>Figura 41:</b> Representación gráfica de la temperatura de gases de escape medido-modelado .....	96
<b>Figura 42:</b> Representación gráfica de las curvas de temperatura de gases de escape medido-modelado .....	97

<b>Figura 43:</b> Representación gráfica de las curvas de la temperatura de los gases de escape frente al dosado.....	97
<b>Figura 44:</b> Ejemplo gráfico teórico del diagrama P-V.....	98
<b>Figura 45:</b> Representación gráfica del diagrama P-V obtenido en el modelo.....	99
<b>Figura 46:</b> Representación gráfica del diagrama P-V ampliado obtenido en el modelo.....	99
<b>Figura 47:</b> Representación gráfica de curvas de plena carga de parámetros de Ne, Me y SFCe.....	102
<b>Figura 48:</b> Representación gráfica de la curva de par efectivo a plena carga.....	105
<b>Figura 49:</b> Representación gráfica de la curva de potencia efectiva a plena carga.....	106
<b>Figura 50:</b> Representación gráfica de la curva del consumo específico de combustible a plena carga.....	107
<b>Figura 51:</b> Esquema conceptual para el estudio de eficiencia del enfriador del aire de admisión.....	110
<b>Figura 52:</b> Efecto del enfriamiento sobre la densidad del aire tras su compresión.....	111
<b>Figura 53:</b> Representación gráfica de las curvas de potencia específica a 1500 rpm.....	118
<b>Figura 54:</b> Representación gráfica de las curvas de potencia específica a 3000 rpm.....	118
<b>Figura 55:</b> Representación gráfica de las curvas de presión máxima en cámara a 1500 rpm.....	119
<b>Figura 56:</b> Representación gráfica de las curvas de presión máxima en cámara a 3000 rpm.....	120
<b>Figura 57:</b> Representación gráfica de las curvas de carga térmica a 1500 rpm.....	121
<b>Figura 58:</b> Representación gráfica de las curvas de presión máxima en cámara a 3000 rpm.....	121



## ÍNDICES DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Datos de entrada para el cálculo de parámetros de operación del motor .....	66
<b>Tabla 2:</b> Valores del parámetro de pérdidas mecánicas obtenidos en el ensayo experimental .....	66
<b>Tabla 3:</b> Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 1500 rpm .....	67
<b>Tabla 4:</b> Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 2250 rpm .....	67
<b>Tabla 5:</b> Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 3000 rpm .....	67
<b>Tabla 6:</b> Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 1500 .....	81
<b>Tabla 7:</b> Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 2250 .....	81
<b>Tabla 8:</b> Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 3000 .....	81
<b>Tabla 9:</b> Resultados comparativos principales (1) del ensayo - modelo .....	84
<b>Tabla 10:</b> Resultados comparativos principales (2) del ensayo - modelo .....	85
<b>Tabla 11:</b> Resultados comparativos de ensayo-modelo del par efectivo .....	85
<b>Tabla 12:</b> Resultados comparativos de ensayo-modelo de la potencia efectiva.....	87
<b>Tabla 13:</b> Resultados comparativos de ensayo-modelo del rendimiento volumétrico .....	89
<b>Tabla 14:</b> Resultados comparativos de ensayo-modelo del dosado .....	92
<b>Tabla 15:</b> Resultados comparativos de ensayo-modelo del consumo específico de combustible .....	93
<b>Tabla 16:</b> Resultados comparativos de ensayo-modelo de los gases de escape.....	96
<b>Tabla 17:</b> Datos de entrada para la simulación de los puntos de operación a plena carga...	103
<b>Tabla 18:</b> Resultados comparativos de parámetros de plena carga fabricante-modelo .....	104
<b>Tabla 19:</b> Valores entrada de gastos máxicos de aire y combustible para 1500 rpm .....	113
<b>Tabla 20:</b> Valores entrada de gastos máxicos de aire y combustible para 3000 rpm .....	114

<b>Tabla 21:</b> Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo a presión atmosférica .....	115
<b>Tabla 22:</b> Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo a presión atmosférica .....	115
<b>Tabla 23:</b> Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,05bar) .....	115
<b>Tabla 24:</b> Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,05bar) .....	115
<b>Tabla 25:</b> Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,10bar) .....	116
<b>Tabla 26:</b> Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,10bar) .....	116
<b>Tabla 27:</b> Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,15bar) .....	116
<b>Tabla 28:</b> Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,15bar) .....	116
<b>Tabla 29:</b> Valores de potencia específica de los puntos de operación .....	117
<b>Tabla 30:</b> Valores de presión máxima en cámara de los puntos de operación .....	119
<b>Tabla 31:</b> Valores de carga térmica de los puntos de operación .....	121

# **Capítulo 1 - INTRODUCCIÓN**

## **1. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO**

La realización de este estudio está motivada por dos razones principales: la primera razón es de carácter académico, en la que se demuestran los conocimientos adquiridos en el Grado de Ingeniería Mecánica con este Trabajo Final. La segunda razón tiene una finalidad profesional, debido a que el presente estudio permite al autor introducirse en el campo de desarrollo de motores térmicos antes de acceder al mercado laboral.

Este Trabajo de Fin de grado permite estudiar el campo de motores térmicos de combustión internos alternativos (MCIA), teniendo acceso a ensayos experimentales con un motor real, además de realizar el desarrollo de un motor virtual (modelo). Otra característica importante del estudio es que se realiza un amplio análisis de los múltiples componentes de un motor, de tipo mecánicos, eléctricos o químicos.

Otra motivación destacada, es la posibilidad de realizar ensayos experimentales de un motor de combustión, utilizando un banco de pruebas habilitado para este fin, lo que permite el análisis de las condiciones de operación de un motor de forma precisa y segura, siendo una actividad propia en el campo de la ingeniería.

En el desarrollo de motores de combustión interna alternativos, la simulación de modelos virtuales de motores presenta importantes ventajas al ser herramientas muy potentes para la investigación de los fenómenos físicos internos del motor, además de ahorrar importantes costes económicos debido a que posibilita reducir el número de ensayos experimentales y reduce costes de materiales o fabricación.

## **2. OBJETIVO DEL ESTUDIO**

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo, realizar el análisis y estudio de un modelado teórico de un MCIA y comparar los resultados obtenidos con los ensayos experimentales para validar el modelo y posteriormente proponer aplicaciones para uso docente.

El estudio se centrará en un motor diésel monocilíndrico de cuatro tiempos, del fabricante HATZ, modelo 1B20, instalado en un banco de ensayos que permitirá la realización de pruebas en diferentes condiciones.

Los objetivos específicos son:

- Diseño del modelo de motor a estudiar, utilizando el software OpenWAM.
- Realizar simulación en condiciones de funcionamiento determinadas y obtener datos de salida.
- Realizar diferentes ensayos experimentales en el banco de pruebas con el motor a estudiar en las condiciones de funcionamiento establecidas para la obtención de datos.
- Analizar y comparar los datos modelo-ensayo para la validación de los mismos.
- Proponer estudios de rendimiento a plena carga e implementación de sistema de sobrealimentación desde el modelo original.

Como objetivo general, en el presente estudio se desarrollan las competencias obtenidas en el grado, con el propósito de que pueda ser evaluado en el ámbito académico para la obtención del Título de Grado de Ingeniería Mecánica.

### **3. ALCANCE Y ANTECEDENTES**

El proyecto propuesto se encuadra dentro del ámbito de la ingeniería Industrial, concretamente en el entorno de diseño y estudio de máquinas térmicas. La idea del proyecto se debe a la necesidad de potenciar las posibilidades de estudio del banco de ensayos ubicado en el aula-taller de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología.

El estudio permite implementar un software de análisis y desarrollo de motores térmicos utilizando un modelo unidimensional, como es la herramienta informática OpenWAM, que puede ofrecer al alumnado el acceso a un programa de simulación de motores virtuales y generar nuevas vías de estudio en este campo.

Siendo un campo novedoso en la Escuela, el estudio tiene la finalidad de determinar parámetros característicos de funcionamiento y obtener una imagen representativa de las variaciones modelo-experimental.

Por lo tanto, se considera un proyecto viable por las amplias posibilidades de estudio de los motores térmicos utilizando una herramienta informática de modelado de motores.



## 4. REFERENCIAS

### 4.1. BIBLIOGRAFÍA.

[1] - Motores de combustión interna alternativos, Prof. F.Payry & J.M.Desantes 2011, Editorial Reverté. Editorial UPV.

[2] - Diseño y optimización del sistema de renovación de la carga de un motor dual fuel para transporte pesado mediante sobrealimentación de doble etapa. R. Sirvent Sanjosé. Trabajo Final de Carrera de UPV.

[3] – Modelo unidimensional de un motor con doble sobrealimentación secuencial. J. Parra Martinez. Trabajo Final de Carrera de UPV.

[4] – Modelado de ciclos de homologación mediante un Motor Virtual. J.Martín Díaz. Trabajo Final de Máster de UPV.

[5] - <http://openwam.webs.upv.es/docs/>

[6] – Apuntes de la asignatura: Motores térmicos.

[7] - <https://www.hatz-diesel.com/es/productos/motores-diesel/serie-b/1b20/>

[8] - <https://www.qunt.de/es/productos/ingenieria-termica/motores-de-combustion-interna/banco-de-pruebas-para-motores-ct-159/glct-1:pa-150:ca-111>

### 4.2. SOFTWARE EMPLEADO.

Durante la elaboración del proyecto se han empleado distintos programas con el fin de realizar los cálculos y las representaciones gráficas necesarios.

- **OpenWAM:** Es un software de código libre desarrollado por CMT Motores Térmicos de la Universidad de Valencia que permite el modelado unidimensional de motores de combustión interna alternativos (MCIA). Para el modelado de un motor, OpenWAM puede calcular fenómenos físicos como los flujos en los conductos del motor, la transmisión de calor por los conductos y cilindros, o la ley de liberación de calor en el proceso de combustión.
- **Microsoft Office Excel 2016:** En un software de elaboración de hojas de cálculo que permite realizar tablas y representaciones con los datos obtenidos en el modelado y ensayos experimentales del motor estudiado.



## Capítulo 2 – TEORÍA DEL MODELADO DE MOTORES

### 1. INTRODUCCIÓN

El modelado de motores se define como el cálculo matemático computacional de sistemas de motor, en los que se emplean determinados modelos que permiten resolver las ecuaciones de un modelo físico para representar los fenómenos más relevantes del motor a estudiar o desarrollar. El grado de fidelidad de representación del modelo a los fenómenos físicos que se producen en un motor dependerá de las hipótesis simplificadoras planteadas en el propio modelo.

El modelado de motores tiene como objetivo principal el análisis de un motor, para predecir sus prestaciones y evaluar diferentes opciones de diseño, como puede ser la implementación de sistemas que permitan aumentar sus prestaciones o eficiencia. En la actualidad, los programas de modelado se han convertido en una herramienta fundamental en el diseño de motores debido a que permite el estudio de estos con cierta rapidez sin realizar grandes inversiones económicas.

En el desarrollo de motores habitualmente se suele combinar el modelado con ensayos experimentales para optimizar los resultados, siendo la mejor estrategia para el análisis de motores porque el modelado permite analizar el comportamiento teórico y sintetizar una configuración óptima y los ensayos experimentales evalúan y validan los resultados obtenidos en el modelado. Con esta combinación es posible reducir los costes de ensayos los plazos de desarrollo.

Otra aplicación del modelado de motores es la de poder ser integrado en el motor, orientado a funciones de control, diagnóstico u optimización del punto de funcionamiento del motor en tiempo real. Para ello, se integra una unidad de control electrónica que gestiona la información con actuadores y sensores, instalados en los diferentes elementos relevantes del motor.

Por todo lo comentado anteriormente, en la ingeniería, el modelado de motores se ha convertido en una de las herramientas de desarrollo más importantes, ya que permite simular el comportamiento termo fluidodinámico de los motores y predecir su funcionamiento con un alto grado de fidelidad, proporcionando variables medias o instantáneas (temperaturas, presiones, transmisión de calor, etc.) para cada ciclo de simulación.

En la simulación virtual de motores existen diferentes tipos de modelos, clasificados por criterios relacionados con el propósito del modelo, el método de resolución, el tipo de variables o las hipótesis adoptadas. Por ello, hay modelos que analizan los siguientes apartados:

- El proceso de combustión dentro del cilindro.
- La transmisión de calor a las paredes de los conductos.
- Los fenómenos físicos de los flujos de los gases.
- El proceso de renovación de la carga.

También se pueden encontrar submodelos que simulan fenómenos tales como pérdidas mecánicas, refrigeración o la inyección de combustible.

En los siguientes apartados se describirán los modelos más relevantes que permiten el cálculo de los procesos más importantes que se producen en los MCIA.

## 2. MODELADO DE LOS FLUJOS DE GASES DE UN MOTOR

El manejo de modelos de flujo de gases permite el cálculo los flujos no reactivos de un motor, ya sean modelos sencillos que realizan el cálculo en tiempo real, o modelos más complejos que realizan el cálculo detallado del flujo en elementos determinados del motor. Un modelo de flujo de gases debe considerar los fenómenos que se producen cuando un gas fluye a través de un conducto [1].

En primer lugar, se deben tener en cuenta las pérdidas de carga en todos los elementos, especialmente donde más se producen en MCIA, tales como sistemas de postratamiento, válvulas, filtros de partículas o intercooler.

En segundo lugar, el modelo debe tener en cuenta las pérdidas de energía por transmisión de calor que el fluido cede o absorbe a través de las paredes de los conductos que atraviesa, especialmente en los intercambiadores de calor y en los conductos de escape por encontrarse éstos a una temperatura elevada.

En tercer lugar, el modelo debe considerar los efectos de compresibilidad que se producen en las zonas donde el flujo puede alcanzar grandes velocidades (toberas, válvulas de admisión y escape, turbocompresores, EGR, etc.).

Por último, considerar el flujo pulsante producido por la apertura secuencial de las válvulas de admisión y escape, y que se transmite posteriormente al resto del sistema, teniendo una influencia importante sobre el rendimiento volumétrico y el trabajo de bombeo, pudiéndose optimizar hasta un 25% el rendimiento volumétrico si se realiza de forma adecuada.

Para el desarrollo de este estudio, se emplea el software OpenWAM, que utiliza un modelo de acción de ondas con resolución matemática mediante volúmenes finitos, donde el modelo del motor está compuesto por conductos unidimensionales, depósitos y elementos cero dimensionales.

A continuación, se describirán los modelos de flujo de gases de motores más utilizados, con diferentes grados de precisión y tiempo de cálculo empleado. Adicionalmente, estos modelos combinan distintos tipos de submodelos para los diferentes componentes del modelo [1].

## **2.1. MODELOS DE VALOR MEDIO**

Los modelos de valor medio plantean la hipótesis de que el flujo de gases permanece constante durante todo el ciclo de motor, en las que las propiedades del flujo operan con valores promediados en cada punto del del motor. La mayoría de los elementos del motor se calculan empleando correlaciones empíricas o semiempíricas. Comparando con otros modelos de flujos de los gases, el modelo de valor medio requiere un tiempo de cálculo reducido debido a que no emplea las ecuaciones de conservación de flujo.

Este tipo de modelos es muy adecuado para el análisis y evaluación de estrategias para el control del motor, posibilitando la implementación de modelos de operación en una unidad de gestión electrónica del motor.

En el modelo de valor medio, los elementos del motor se calculan partiendo de la información obtenida previamente con los ensayos experimentales en condiciones estacionarias. Para calcular las pérdidas de carga de los flujos en el motor (producidas por filtros, conductos, silenciadores, etc.) se introduce en el modelo un mapa de pérdida de carga dependiente del gasto corregido obtenido en un banco de flujos estacionario.

Estos modelos tienen un procesamiento de cálculo muy rápido debido a su sencillez, pero tienen el inconveniente de ser incapaces de reproducir muchos fenómenos físicos relevantes de forma adecuada. No pueden contemplar fenómenos transitorios, al estar basados en mapas de comportamiento obtenidos de forma estacionaria.

En resumen, el modelo de valor medio tiene las siguientes características:

- Geométricamente no dimensional, sin acumulación de masa ni de ondas.
- Se resuelven ecuaciones algebraicas no lineales.
- Comportamiento estacionario o cuasi estacionario.
- Necesidad de información experimental.

## 2.2. MODELOS DE LLENADO Y VACIADO (0D)

Los modelos de llenado y vaciado permiten el cálculo de los fenómenos de acumulación de masa en componentes del motor. Este tipo de modelos están formados por una combinación de depósitos interconectados en los que se modela con mapas de comportamiento (modelos de valor medio). Se diferencian de los modelos de valor medio, al permitir la obtención de la evolución de las propiedades del flujo a lo largo del ciclo del motor. De este, se pueden analizar variables tales como la temperatura, la velocidad del gas o la presión en los colectores de admisión y escape o en el interior del cilindro [2].

En este tipo de modelos, el elemento principal es el depósito, considerándolo como un sistema abierto que intercambia flujo con los demás componentes del motor. Los depósitos pueden tener un volumen variable y transmitir calor al entorno. Las hipótesis adoptadas en estos modelos suponen que el flujo es estacionario para cada instante de cálculo, sin tener en cuenta la dinámica de ondas.

Es posible combinar los modelos de llenado y vaciado junto a los modelos de acción de ondas para calcular el proceso de renovación de la carga, utilizando los primeros como submodelos para el cálculo de la acumulación de masa en los cilindros.

Para el cálculo de los cilindros, se realiza el planteamiento con las siguientes ecuaciones (otros volúmenes son tratados como casos particulares de éstos):

$$d(m \cdot u)_{cyl} = \sum(h_{oinlet} \cdot dm_{inlet}) - \sum(h_{oinlet} \cdot dm_{outlet}) + dQ_{cyl} - dW_{cyl} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

En el que al aplicar el primer principio de la termodinámica queda:

$$dQ_{cyl} = dQ_{heattransf} + dQ_{comb} + dW_{cyl} = (p_{cyl} \cdot dV_{cyl}) + du_{cyl} = c_v \cdot T_{cyl} \quad (\text{Ecuación 2})$$

En el balance de energía planteado anteriormente, se puede considerar la combustión en el cilindro de dos formas diferentes:

En el primer caso, se puede considerar el calor liberado debido al proceso de combustión como un flujo de calor desde el entorno. Así, el término de calor (Q) estaría formado por dos componentes, una debida al calor liberado durante el proceso de combustión y otra, debida al calor transmitido a las paredes del cilindro.

En el segundo caso, dado que el proceso de combustión implica un cambio de composición de las especies químicas presentes en el interior del cilindro (conservándose su masa), la conversión de energía química en térmica propia al proceso de combustión no necesita ser considerada como un término adicional expresando de forma absoluta la energía interna de los reactivos y productos. Por último, el factor  $d(mu)$  incluye tanto el calor liberado en el proceso de combustión como la variación de la energía sensible debida a cambios en la temperatura del sistema.

En el planteamiento de modelo predictivo de volumen, se escoge la primera opción, al obtenerse los resultados de la evolución de las propiedades termo fluidodinámicas del gas en su interior.

### 2.3. MODELO UNIDIMENSIONAL DE ACCIÓN DE ONDAS (1D)

El modelo unidimensional aporta el cálculo del flujo en conductos, incluyendo los efectos de inercia y de transmisión de ondas. En este modelo, el motor se construye por conductos unidimensionales, depósitos cerodimensionales y elementos no dimensionales. Esta hipótesis es consistente cuando se considera el flujo unidimensional en los conductos de un motor cuando no se producen variaciones de sección y curvaturas excesivas. En otros elementos del motor no es posible utilizar esta hipótesis, por lo que deben ser calculados por modelos no dimensionales o bien multidimensionales [1].

Se utiliza el modelo de conducto como la base de los modelos de acción de ondas considerando la geometría y las condiciones del flujo en los extremos del conducto como variables de entrada. Las variables de salida del modelo de conducto serían los valores de densidad, presión, temperatura y la velocidad del fluido en función del tiempo y de la

posición dentro del conducto. Se resuelven las ecuaciones de estado y de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento. En el modelo, se plantea un caso particular del sistema de ecuaciones de Navier-Stokes para un dominio cuasiunidimensional con fluido ideal no viscoso, siendo el siguiente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + u \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho u}{s} \cdot \frac{ds}{dx} = 0 \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + G = 0$$

Donde:

$$G = f \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \frac{u}{|u|} \cdot \frac{4}{D} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] - a^2 \cdot \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] - (\gamma - 1) \cdot \rho \cdot (q + uG) = 0$$

- $\rho$  – Densidad
- $u$  – Velocidad del fluido
- $x$  – Posición del fluido en el interior del conducto
- $t$  – Tiempo
- $G$  – Fricción del fluido con las paredes del conducto
- $q$  – Calor transmitido a través de los conductos

Es un sistema de ecuaciones de tipo hiperbólico debido a que se desprecia el término viscoso, además de ser un sistema no homogéneo debido a que los términos de fricción, transmisión de calor y cambio de sección no son lineales. En algunos casos, estos términos se desprecian para facilitar la resolución, tratándose como un caso de modelo homentrópico.

Para los modelos unidimensionales existen distintos métodos de resolución para el problema hiperbólico del flujo en un conducto [1]. Los métodos de resolución generalmente se clasifican en función de la precisión en la solución obtenida, siendo de primer orden, de segundo orden o de alta resolución. Como ejemplo de cálculo, en la figura 1 siguiente se muestran diferentes gráficas de cálculo de transmisión de ondas



de presión en un conducto con los distintos métodos de resolución al ser comparados con una solución teórica.

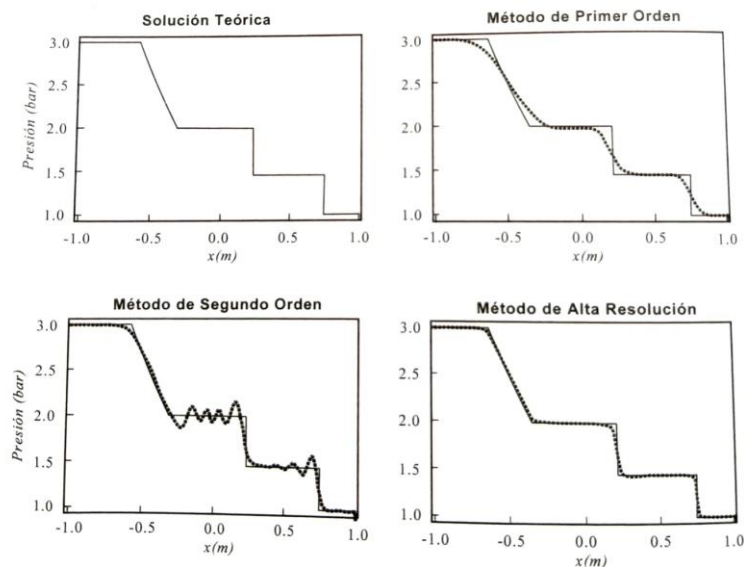


Figura 1: Ejemplos de soluciones del flujo en un tubo con ondas de choque mediante métodos de distinta precisión

Utilizando la clasificación descrita para el modelado unidimensional, los métodos de resolución son:

- **Método de primer orden:** Introducen una difusión numérica para suavizar las discontinuidades de presión, siendo muy perjudicial en cálculos acústicos al eliminar la información de alta frecuencia. Los métodos de primer orden son:
  - Método de las características
  - Lax-Friedrichs
  - Lax-Wendroff de un paso
  - Volúmenes finitos
  
- **Método de segundo orden:** Son capaces de obtener una representación de las discontinuidades de presión mejorada si se comparan los métodos de primer orden, aunque tienen el inconveniente de producir sobreoscilaciones en la proximidad de la discontinuidad. Los métodos de segundo orden son:

- Lax-Wendroff de dos pasos
  - McCormack predictor-corrector
  - Godunov
- **Método de alta resolución:** Permiten obtener una solución optimizada, sin sobreoscilaciones ni difusiones. Sin embargo, requieren unos recursos computacionales elevados. Los métodos de alta resolución utilizados son:
- FCT (Flux Corrected Transport)
  - TVD (Total Variation Diminution)
  - CE-SE (Conservation Element-Solution Element)
  - MUSCL (Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws)

Otra alternativa que permite el cálculo del flujo en un conducto es realizar una aproximación lineal de propagación de ondas, considerándola como un modelo acústico unidimensional o de onda plana. Este método se adapta bien en los flujos de los colectores de admisión o los silenciadores de escape, al disponer de oscilaciones de presión con amplitud reducida.

En el modelado unidimensional, uno de los problemas principales es imponer las condiciones de contorno en los extremos del conducto, que pueden estar conectados a su vez con otros conductos, depósitos o elementos dimensionales. Para imponer las condiciones de contornos, se utiliza generalmente el método de las características (primer orden).

Por lo tanto, en el modelado unidimensional de un motor, la clasificación de elementos es el siguiente:

- Conductos calculados como dominios 1D.
- Depósitos calculados como modelos de llenado y vaciado.
- Elementos no dimensionales para los componentes en los que el flujo no puede considerarse ni cero ni unidimensional.
- Las condiciones de contorno situados entre los tipos de elementos anteriores.

### 2.3.1. MÉTODO DE LAX-WENDROFF

Debido a que, en el presente estudio, el modelado del motor se realiza con el programa OpenWAM, y se planteará un modelo unidimensional de acción de ondas en el que se utilizará principalmente el método de Lax-Wendroff, se profundizará en el marco teórico de este método para una mejor interpretación del modelado para los flujos de los gases.

El método de Lax-Wendroff se utiliza para la resolución de problemas hiperbólicos del flujo en un conducto. Es un método de resolución de segundo orden el cual requiere realizar dos pasos debido a la derivada temporal.

En el primer paso se calculan las propiedades del flujo en las fronteras de las celdas en un tiempo intermedio ( $n + \frac{1}{2}$ ) entre el instante actual y el futuro:

$$W_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \cdot [W_j^n + W_{j+1}^n] - \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{F_{j+1}^n - F_j^n}{\Delta x} - \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{C_j^n + C_{j+1}^n}{2} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Con estos valores intermedios es posible estimar los valores de los flujos entre celdas y del término fuente en ese instante intermedio. Las propiedades en el instante siguiente se pueden obtener a partir del instante anterior en la propia celda y de los flujos y término fuente calculados en el instante intermedio.

$$W_j^{n+1} = W_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \left[ F_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - F_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right] - \Delta t \cdot \frac{C_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + C_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{2} \quad (\text{Ecuación 6})$$

El método de Lax-Wendroff es explícito debido a que al conocer las magnitudes que definen al flujo  $n$  es posible calcular las del instante  $n+1$  sin necesidad de utilizar ningún modelo iterativo. Para ello, es necesario disponer de información adicional en las condiciones de contorno del dominio.

### 2.3.2. CONCLUSIÓN

Los modelos unidimensionales de acción de ondas se convierten en herramientas potencialmente útiles al disponer de una relación precisión-tiempo óptima, permitiendo la realización de las diferentes tareas de desarrollo del sistema de renovación de la carga, sobrealimentación, sistemas de recirculación de gases de escape (EGR), etc.

Por el contrario, para estos modelos es necesario disponer de información experimental que permita caracterizar aquellos fenómenos que no pueden resolverse con las ecuaciones de Euler, como pueden ser la fricción o la transferencia de calor en los conductos, de los que no es posible estimar al no considerarse una resolución espacial en la dirección normal a la pared. El coeficiente de transmisión de calor se obtiene utilizando correlaciones experimentales de convección, mientras que el coeficiente de fricción se obtiene mediante la analogía de Reynolds-Colburn a partir del coeficiente de transmisión de calor.

Adicionalmente, los modelos 1D tienen como inconveniente la imposibilidad de calcular el flujo de forma apropiada cuando se analizan elementos en las que el flujo no es unidimensional, como es el caso de los difusores, turbinas, compresores, etc.

Para calcular estos elementos normalmente se plantea un balance algebraico de la conservación de la masa y energía, además de plantear un balance de cantidad de movimiento imponiendo unas diferencias de presión caracterizadas experimentalmente.

### 2.4. CÁLCULO DE COEFICIENTE DE DESCARGA PARA FLUJOS DEL MOTOR

El coeficiente de descarga es la relación entre la masa de aire descargado y la masa teórica en condiciones de temperatura y presión idénticas, representado en un valor entre 0 y 1 (valor máximo). Por lo tanto, se puede considerar como un cociente de la eficacia del flujo. El parámetro de coeficiente de descarga toma diferentes valores según el incremento de presión al que esté sometido el elemento.

Matemáticamente el coeficiente de descarga puede estar relacionado con el caudal másico de un fluido a través de un tubo recto de área de sección transversal constante a través de la siguiente ecuación:

$$Cd = \frac{\dot{m}}{\rho V} = \frac{\dot{m}}{\rho A u} = \frac{\dot{m}}{\rho A \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

- $Cd$  - Coeficiente de descarga.
- $\dot{m}$  - Tasa de masa del flujo.
- $\rho$  - Densidad del flujo.
- $V$  - Tasa de volumen del flujo.
- $A$  - Área transversal del conducto.
- $u$  - Velocidad del flujo a través del conducto.
- $\Delta P$  - Caída de presión a través del conducto.

El coeficiente de descarga es útil para determinar las pérdidas de carga asociadas con algún elemento (conducción de una válvula, por ejemplo) o la "resistencia" que impone un elemento del equipo sobre el flujo.

El parámetro de resistencia sobre flujo se representa a menudo como un parámetro 'K', en el que se relaciona con el coeficiente de descarga a través de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{1}{cd^2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

En el estudio, no será necesario utilizar el parámetro de resistencia sobre el flujo 'K', por lo que se utilizará el coeficiente de descarga para simular las caídas de presión producidas en los conductos o elementos.

### 3. MODELADO DE LA COMBUSTIÓN

En la simulación del comportamiento de un motor, es muy importante el modelado del proceso de combustión, pero es uno de los procesos más complejos debido al carácter transitorio, a la dificultad de calcular las reacciones dentro de la cámara de combustión y la extrema complejidad de posibles mediciones experimentales en el proceso.

Teniendo en cuenta las dificultades planteadas, en el proceso de modelado de la combustión se pueden plantear, principalmente, dos opciones, dependiendo de la información experimental disponible, siendo las siguientes:

- El empleo de perfiles de combustión obtenidos, utilizando las leyes de presión en cámara.
- El empleo de modelos predictivos implementados en los programas de modelado.

### 3.1. ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN

En la aplicación de las leyes de liberación de calor es necesario disponer de información relativa a algunos parámetros geométricos y de funcionamiento del motor.

Para obtener las leyes de liberación de calor, el dato más importante es el de la presión instantánea en cámara, debido a que con este parámetro es posible obtener los perfiles de variación de Calor Liberado ( $dFQL$ ), de manera que se puede establecer en el modelo la combustión en términos de calor liberado. Si el proceso de análisis se ha efectuado de forma correcta, se obtienen resultados coherentes en la cámara de combustión, al no tener que calcularse el calor liberado a partir de parámetros como la tasa de inyección, sino que éste este impuesto. En consecuencia, esta opción requiere un menor tiempo de cálculo que en los modelos predictivos, suponiendo un menor coste computacional.

### 3.2. MODELOS PREDICTIVOS

Cuando no se dispone de la información de la presión en cámara, y en consecuencia, no es posible obtener los perfiles  $dFQL$ , es preciso utilizar alguno de los modelos predictivos implementados en los programas de simulación para el cálculo del modelo de combustión. En estos modelos, la tasa de quemados ( $dFQL$ ) se predice a partir de unos datos experimentales de entrada, que pueden variar en función del submodelo predictivo que se vaya a aplicar (por ejemplo, parámetros de inyección o temperaturas), teniendo como inconveniente que requieren una gran cantidad de parámetros como son leyes de inyección, turbulencia, evaporación, etc.

Los modelos predictivos exigen un coste computacional mayor, por lo que se requiere invertir un tiempo de cálculo mayor.

Para el estudio, se utilizará una función de tipo Wiebe que puede describir la ley de liberación de calor obtenida tras medirla experimentalmente, el cual se describe en el apartado siguiente.

### 3.3. LEY DE LIBERACIÓN DE CALOR POR APROXIMACIÓN DE WIEBE

Mediante las leyes de Wiebe es posible describir la tasa de quemado en los MCIA, sin tener que definir la combustión, el tipo de combustible o el sistema de inyección empleado, utilizando una función matemática definida por sus parámetros característicos [3].

$$FQL(\alpha) = 1 - \exp \left[ -\alpha \left( \frac{a - \alpha_0}{\Delta\alpha} \right)^m \right] \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde la fracción de calor liberado (FQL) viene definida por los parámetros:

- $a$  - valor constante para el grado de completitud de combustión con el que se trabaje (por ejemplo 90%).
- $\alpha_0$  - ángulo en el cual se alcanza un determinado grado de completitud de combustión del calor total.
- $\Delta\alpha$  - incremento o duración, en grados de cigüeñal, para la combustión fijada.
- $m$  - exponente adimensional denominado parámetro de forma.

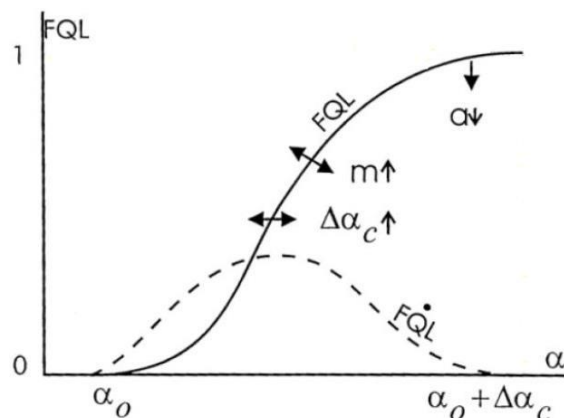


Figura 2: Influencia de los parámetros de Wiebe en la  $dFQL$  y  $FQL$  [3]

Cada proceso de combustión queda determinado, por tanto, por tres variables. Sin embargo, para el presente estudio se requiere una variable más, el porcentaje de masa de cada ley, lo que permite establecer una aproximación mediante un sistema *MultiWiebe*. OpenWAM utiliza un subsistema de modelado de la combustión que permite, a partir de cada perfil de combustión dFQL, obtener 4 leyes de Wiebe con su correspondiente porcentaje de masa. Es decir, de cada ley en un punto de operación de motor, se extraen 20 parámetros. En la figura 3 se muestra un ejemplo del cuadro de configuración de las leyes de liberación de calor, aplicando los parámetros de la función de Wiebe.

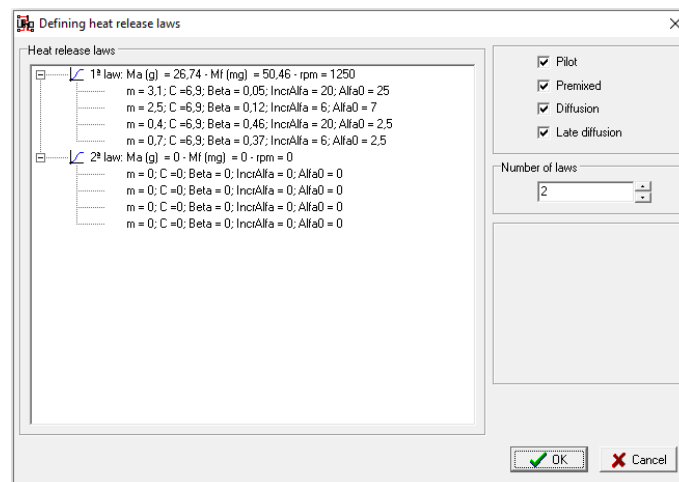


Figura 3: Cuadro de configuración de HRL con OpenWAM

## 4. MODELADO TEÓRICO PARA EL CÁLCULO DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR EN EL CILINDRO

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En un motor de combustión interna alternativo (MCIA) el calor transmitido a las paredes de la cámara se debe fundamentalmente a dos fenómenos físicos.

- 1) La compresión ejercida por el pistón sobre los gases que entran en la cámara de combustión, aumentando la temperatura y presión de los gases en el proceso.



- 2) La liberación de calor producida por la combustión en la cámara, debido a la liberación de energía en forma de calor tras la reacción del combustible inyectado (diésel o gasolina) con el oxígeno disponible en la cámara, produciendo una reacción química exotérmica.

Como caso particular, en los ensayos experimentales utilizando el método de arrastre, la variación de la temperatura y de la energía interna del gas dependerá únicamente de la compresión, debido a que en estos ensayos no se inyecta combustible a la cámara de combustión. Por este motivo, es necesario considerar ambos fenómenos en el modelo teórico para el cálculo del coeficiente de transmisión de calor. Esta es la principal razón para ajustar el modelo de transmisión de calor para el motor testeado con ensayos de arrastre.

El cálculo de la transmisión de calor entre el gas y las paredes internas del cilindro es complejo, por lo que en la actualidad existen numerosos planteamientos teóricos para su resolución. Existen modelos que son descritos a través de la ley de convección de Newton, la cual asegura que el flujo de calor por unidad de superficie es proporcional a la diferencia de temperatura que existe entre la pared del cilindro y los gases, donde a través de correlaciones experimentales se adquiere un coeficiente de transmisión de calor.

El flujo de calor instantáneo se puede expresar en función de este coeficiente de transmisión de calor como:

$$\dot{Q} = S \cdot h \cdot \Delta T = S \cdot h \cdot (T_{gas} - T_{pared}) \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

- $S$  - Superficie de intercambio.
- $h$  - Coeficiente de transmisión de calor (el cual puede variar tanto espacial como temporalmente).
- $T_{gas}$  - Temperatura del gas más próximo a la pared.
- $T_{pared}$  - Temperatura de la pared.

El modelo de transmisión de calor propuesto para este estudio es una variante de modelo de Woschni adaptado para el cálculo de transmisión de calor en OpenWAM. Este modelo modificado usa otra serie de constantes a las que se propusieron inicialmente y que ha sido validada con distintos motores en el CMT - Departamento de Motores y Máquinas Térmicas de la Universidad Politécnica de Valencia.

En el primer modelo propuesto por Woschni, para simplificar el modelo utiliza la hipótesis de combinar el término explícito de la radiación junto a la convección. Así Woschni incluye un término que contabilizaba implícitamente el calor transmitido. En estudios experimentales se ha demostrado que la contribución de la radiación en el calor total transmitido no alcanza un 10% del en la mayoría de los casos.

## 4.2. AJUSTE DEL MODELO DE WOSCHNI

En el modelo de transmisión de calor que fue presentado por Woschni, las correlaciones experimentales muestran unas constantes que deben ser ajustadas en el modelo termodinámico del motor. Estas constantes denominadas  $C_{W1}$  y  $C_{W2}$ , posibilita el cálculo del coeficiente de transmisión de calor, el cual se define según la siguiente ecuación [4]:

$$h = C \cdot D^{b-1} \cdot P^b \cdot T_g^{0,75-1,62 \cdot b} \cdot v_g^b \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

- $C, b$  - Constantes de valor 0.012 y 0.8, respectivamente.
- $D$  - Diámetro del cilindro.
- $P$  - Presión instantánea del cilindro.
- $T_g$  - Temperatura del gas más próximo a la pared.
- $v_g$  - Velocidad del gas.

El valor de coeficiente de transmisión de calor es considerado como un valor medio para todas las superficies en las que se produce transferencia de calor, sin embargo, no se puede considerar la variación espacial de este coeficiente.

Del mismo modo, se puede expresar la velocidad del gas en función de la velocidad lineal del pistón, de la velocidad tangencial del movimiento del gas en el interior del cilindro, del volumen desplazado y de las condiciones en el cierre de la válvula de admisión. Aquí es donde toman importancia las constantes de Woschni.

$$v_g = C_{W1} \cdot c_m + C_{W2} \cdot c_u + C_2 \cdot \frac{V_d \cdot T_{IVC}}{V_{IVC} \cdot P_{IVC}} \cdot (P - P_0) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

- $C_{W1}, C_{W2}, C_2$  - Constantes.
- $c_m$  - Velocidad lineal promedio del pistón.
- $c_u$  - Velocidad tangencial del gas en el interior del cilindro.
- $V_d$  - Volumen total desplazado.
- $T, V, P$  (IVC) - Temperatura, volumen y presión al cierre de la válvula de admisión (Intake Valve Close).
- $P$  - Presión instantánea en el interior del cilindro.
- $P_0$  - Presión instantánea en condiciones de arrastre del motor.

Finalmente, al combinar la ecuación de la velocidad del gas en la ecuación del coeficiente de transmisión de calor, la ecuación queda expresada puede de forma completamente desarrollada como:

$$h = C \cdot D^{0,2} \cdot P^{0,2} \cdot T_g^{0,53} \cdot \left[ C_{W1} \cdot c_m + C_{W2} \cdot c_u + C_2 \cdot \frac{V_d \cdot T_{IVC}}{V_{IVC} \cdot P_{IVC}} \cdot (P - P_0) \right]_g^{0,8} \quad (\text{Ecuación 13})$$

En el modelo, el valor de la constante  $C_{W1}$  se ajustará para aproximar el calor de Woschni con el calor calculado por el método del exponente politrópico; el parámetro  $C_{W2}$  siempre será proporcional a  $C_{W1}$ , con una relación de velocidad de transmisión ( $r_t$ ) constante:

$$r_t = \frac{C_{W1}}{C_{W2}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Esta relación, al tener un valor fijo, se debe determinar experimentalmente. La razón para no ajustar ambos parámetros a la vez es que solo tenemos una ecuación para ajustar y, por tanto, solo es posible ajustar un solo parámetro con exactitud.

En los ensayos experimentales realizados en diferentes motores de combustión por CMT - Departamento de Motores y Máquinas Térmicas de la Universidad Politécnica de Valencia, se determinó que el valor fijo de la relación de la velocidad de transmisión dependerá del tipo del movimiento del gas dentro de la cámara de combustión, siendo:

- Movimiento tipo swirl (movimiento rotatorio del aire alrededor de un eje perpendicular a la cámara de combustión):

$$r_t = 2$$

- Movimiento tipo tumble (el giro se da en un eje transversal a la cámara de combustión):

$$r_t = 1,7$$

En cuanto a  $C_2$  siempre toma un valor constante de 0,012. Tanto  $r_t$  como  $C_2$  han sido ajustadas experimentalmente con la comparación de resultados en distintos motores y para distintas condiciones de ensayo. Por lo tanto, estos valores se considerarán como válidas en este trabajo.

## Capítulo 3 – METODOLOGÍA DEL MODELADO CON OPENWAM

### 1. INTRODUCCIÓN AL MODELADO CON OPENWAM

Para el análisis y modelado del motor estudiado, la herramienta utilizada ha sido **OpenWAM**, desarrollado por el departamento CMT- Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia [5]. Se trata de un modelo de software de código abierto destinado al modelado dinámico de gases, para el análisis de Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA).



Figura 4: Logotipo de OpenWAM

OpenWAM utiliza una combinación de métodos de resolución de ecuaciones que permiten resolver el modelado de los fenómenos físicos que se producen en un motor. Para ello, en el modelado del motor, el software realiza el cálculo de sistemas del motor empleando modelos matemáticos que pueden representar los fenómenos físicos relevantes de los flujos de forma muy aproximada, dependiendo de las hipótesis que se planteen en el modelado.

Con OpenWAM es posible:

- Evaluar las diferentes alternativas de diseño
- Analizar los fenómenos físicos de los flujos
- Identificar las variables de control de los procesos.
- Predecir las prestaciones iniciales del motor.
- Determinar las tendencias y sensibilidades de las variables de salida al modificar las variables de entrada.

## VENTAJAS

Estos recursos permiten el estudio de distintas opciones de rendimiento de un motor en un tiempo razonable y con costes reducidos, ya que realiza el análisis de comportamiento de un sistema y permite obtener una configuración óptima inicial para posteriormente contrastar y validar los resultados obtenidos mediante ensayos experimentales posteriores.

## REPRESENTACION DEL MODELO

OpenWAM utiliza un modelo transitorio, considerando las variaciones de entrada y las propiedades físicas dependientes de tiempo. El método de representación de OpenWAM es de un modelo unidimensional (1D) de acción de ondas, utilizados para el diseño del sistema de renovación de la carga de los motores.

Desde su página web <http://openwam.webs.upv.es/docs/> es posible encontrar toda la información relacionada con el programa, tutoriales y documentos. Adicionalmente dispone de un apartado de descargas con varias versiones compatibles para Sistemas Operativos de Windows y Linux. En el apartado de descargas también se incluyen algunos archivos de ejemplos de aplicación en el programa.

El software dispone del ejecutable OpenWAM para la simulación del modelo y un segundo programa denominado **WAMer** que es una herramienta fundamental para el desarrollo del presente estudio, por lo que en el siguiente apartado se explicarán las características principales.

## 2. WAMER

El programa WAMer consiste en una interfaz gráfica que tiene como función diseñar un modelo de motor (1D) con una gran variedad de elementos y conductos del motor predefinidos, como por ejemplo cilindros, válvulas, turbocompresores, etc. En WAMer también se imponen las características de diseño del motor, siendo las siguientes:

- Condiciones constructivas (parámetros geométricos, materiales, etc.)
- Condiciones de funcionamiento (régimen, grado de carga, etc.)
- Condiciones ambientales (temperatura, presión, etc.)
- Métodos numéricos (leyes de combustión, pérdidas de carga, etc.)

En el análisis, se utiliza la versión de WAMer 2.2.0 para Windows, con una interfaz gráfica muy sencilla y representativa, disponible exclusivamente en el idioma inglés.

El modelado unidimensional con WAMer se representa gráficamente mediante un esquema compuesto por varios elementos ordenados, unidos por nodos (conductos), en el que se muestra adicionalmente el tipo y dirección del flujo. En las figuras 5 y 6 se muestran dos ejemplos de modelado en el que se diferencia la complejidad del esquema según su estructura y sistemas auxiliares instalados, como puede ser el sistema de sobrealimentación o el sistema de recirculación de gases de escape.

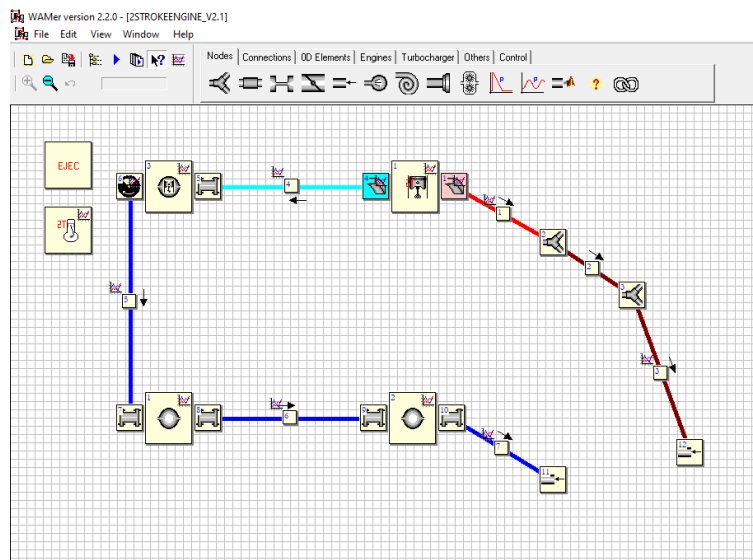


Figura 5: Ejemplo 1 de modelo de motor monocilíndrico de dos tiempos

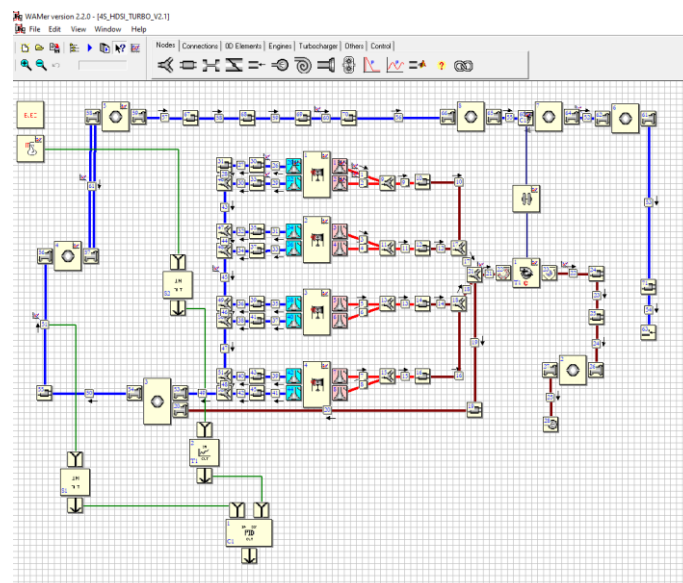


Figura 6: Ejemplo 2 de motor de cuatro cilindros y cuatro tiempos diésel

El procedimiento de modelado con WAMer se puede clasificar en dos etapas importantes, el primer apartado es la construcción del esquema del modelo y el segundo apartado es la configuración de características y condiciones de cada uno de los elementos.

## **2.1. CONSTRUCCIÓN DEL ESQUEMA UNIDIMENSIONAL DEL MODELO**

La construcción del esquema del modelo es relativamente rápido y sencillo, pero es imprescindible analizar previamente que elementos dispone el motor y cuál es su configuración en términos constructivos para poder representar con la mayor fidelidad posible el modelo.

Para el desarrollo de construcción de un modelo de motor con WAMer, simplemente hay que seleccionar desde la barra de tareas el elemento y arrastrarlo a la posición deseada. También es posible realizar copias de los elementos y arrastrarlos para facilitar el procedimiento.

Para la unión de elementos basta con clicar sobre el primer elemento y mantenerlo pulsado hasta el segundo elemento, generando inmediatamente el nodo de forma gráfica. A esta unión se le considera un conducto, por lo que dispone de una celdilla donde se puede configurar posteriormente sus características constructivas, tipo y sentido del flujo y otras propiedades. En el siguiente apartado se profundizará sobre este tema, pero cabe destacar que los conductos diferencian el fluido por el color mostrado en la interfaz gráfica, lo que permite identificar si se trata de flujo de aire de admisión o de gases de combustión.

## **2.2. CONFIGURACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL MOTOR EN EL MODELADO**

Cuando el esquema constructivo del motor está realizado, el siguiente paso es configurar todos los elementos del modelo introduciendo todos los parámetros relevantes que permitan ejecutar posteriormente una simulación correcta con OpenWAM. Esta fase del procedimiento suele ser más compleja y lenta que la del apartado de construcción del esquema, por lo que debe revisarse minuciosamente cada operación que realicemos en el proceso de configuración.



No hay un procedimiento fijado para el modelado de un motor con WAMer, por lo que pueden existir procedimientos alternativos que realicen el modelado cumpliendo el objetivo. En el presente estudio se expondrá un documento anexo con una propuesta de procedimiento de configuración del modelo realizado sobre la base del motor HATZ 1B20, objeto de este estudio.

### 2.3. CARACTERIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN PARA EL MODELO CON OPENWAM

En OpenWAM no es posible introducir directamente los perfiles de dFQL que puedan ser proporcionados por el fabricante o en un planteamiento de desarrollo previo, por lo que para caracterizar la combustión del motor es necesario parametrizar las leyes de calor mediante una aproximación matemática, utilizando las leyes de Wiebe, descritas en el apartado 3.2. del capítulo 2.

Si se han medido los parámetros característicos de la combustión en un ensayo experimental (especialmente la presión instantánea en la cámara de combustión), es posible obtener posteriormente los coeficientes de las leyes de Wiebe, utilizando herramientas de cálculo (por ejemplo, MATLAB), que permitan realizar una aproximación bastante representativa del perfil dFQL. En la figura 7 se muestra un ejemplo de representación de los perfiles dFQL, siendo la curva característica roja la ley de liberación real, mientras que la curva característica azul representa la ley aproximada por Wiebe [2].

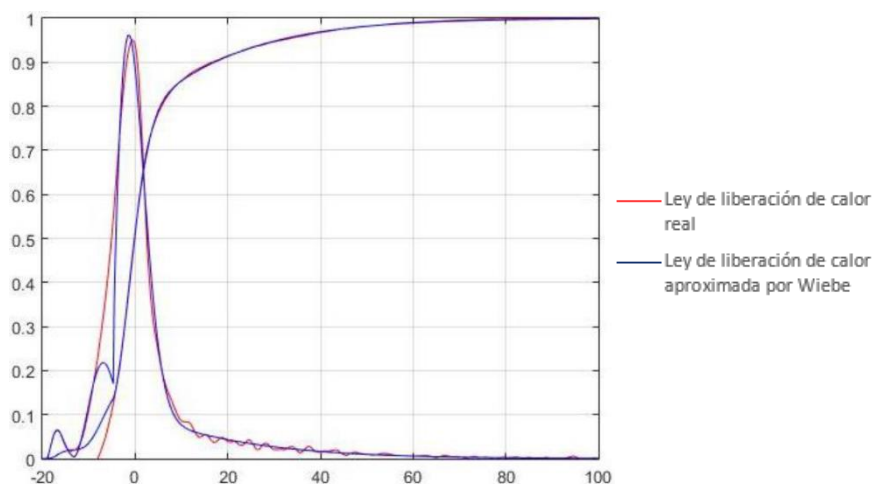


Figura 7: Ejemplo de perfil dFQL

Para introducir los coeficientes obtenidos en el modelo, OpenWAM dispone de un apartado de configuración específico (figura 8) con el que se pueden introducir las leyes de Wiebe en diferentes condiciones de funcionamiento. Teniendo en cuenta que el proceso de combustión se puede dividir en cuatro fases (multiWiebe), se pueden introducir hasta 20 coeficientes, por lo que para interpretar el perfil dFQL aproximado, el programa dispone de una ventana en el que se puede visualizar la representación de las curvas características de las leyes de liberación de calor adoptadas.

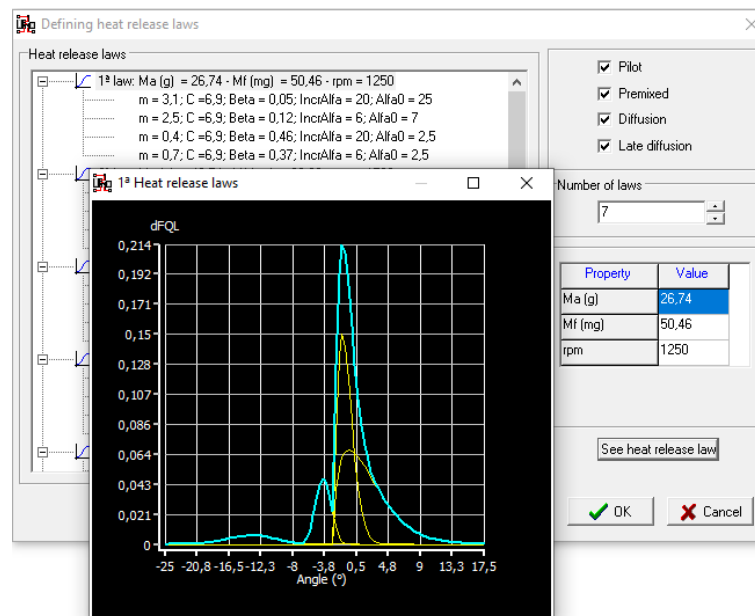


Figura 8: Cuadro de configuración con ejemplo de representación de dFQL configurada en OpenWAM

## 2.4. CONFIGURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

En un motor es fundamental determinar el comportamiento de las válvulas que controlan la entrada y salida de los flujos de los gases con el fin de optimizar la renovación de la carga y el proceso de combustión. Los parámetros que definen el comportamiento de las válvulas en un motor son los siguientes:

- Ángulo de apertura y cierre de la válvula con respecto al cigüeñal.
- Alzamiento de la válvula.
- Dimensiones geométricas de la cabeza de la válvula.
- Cruce de válvulas de admisión y escape (apertura simultanea).
- Coeficientes de descarga del flujo tras el paso de la válvula.

Para ello, es fundamental disponer de un diagrama de distribución de válvulas que represente el proceso de aperturas y cierres con respecto al cigüeñal. En la figura 9 se muestra un ejemplo de representación de un diagrama de distribución de válvulas [6].

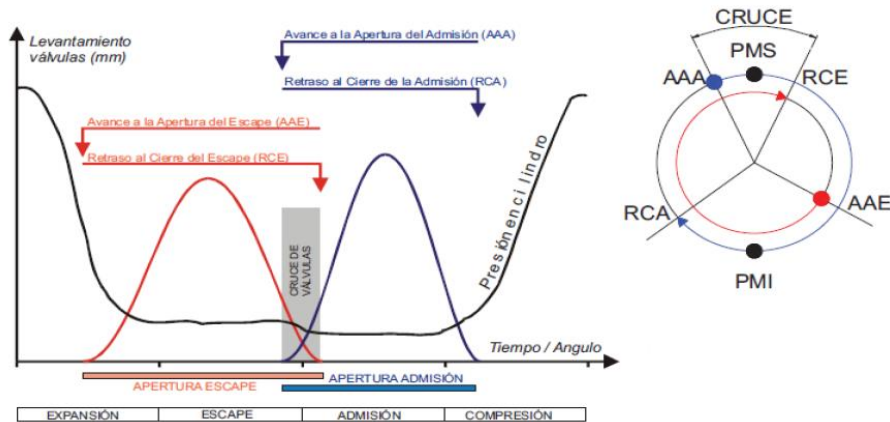


Figura 9: Diagrama teórico de distribución de válvulas

Los parámetros característicos de las válvulas se configuran de forma independiente en un cuadro específico de OpenWAM, en el cual se debe configurar el perfil de la válvula punto a punto para obtener una representación fidelizada del modelo real. En OpenWAM es posible cargar modelos desarrollados previamente o asignar los modelos a las válvulas deseadas del motor para diferenciarlas (admisión o escape, tamaños, etc.) y clasificarlas de forma adecuada. En la figura 10 se muestra un ejemplo de configuración de una válvula en el que se representa la curva característica de alzamiento de la válvula.

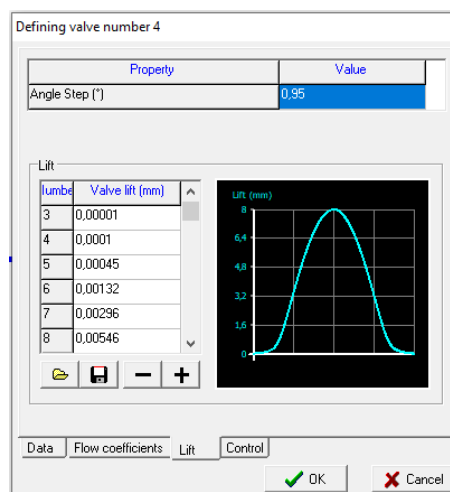


Figura 10: Cuadro de configuración del perfil de alzamiento de una válvula con OpenWAM

## 2.5. CONFIGURACIÓN DE LAS PÉRDIDAS MECÁNICAS DEL MOTOR EN OPENWAM

Para el proceso de calibración de las pérdidas mecánicas con OpenWAM, es necesario realizar una breve introducción teórica para relacionar los conceptos teóricos con el método de calibración adoptado en el modelado.

### 2.5.1. Introducción teórica

En el desarrollo de motores de combustión interna alternativa, uno de los objetivos prioritarios es reducir las pérdidas entre el trabajo que transfieren los gases al pistón y el trabajo mecánico disponible en el eje de salida, para obtener un incremento del rendimiento de los motores. Este concepto se define como la diferencia entre el trabajo indicado y el trabajo efectivo, como se muestra en la siguiente expresión [1]:

$$W_{pm} = W_i - W_e \quad (\text{Ecuación 15})$$

También se pueden expresar las pérdidas mecánicas en términos de potencia o términos de trabajo específico de presiones medias, como se muestra a continuación:

$$N_{pm} = N_i - N_e \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$p_{mpm} = p_{mi} - p_{me} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Para cuantificar las pérdidas mecánicas de forma no dimensional, se utiliza el término de rendimiento mecánico, que se define con la siguiente expresión:

$$\eta_m = \frac{p_{me}}{p_{mi}} = \frac{p_{mi} - p_{mpm}}{p_{mi}} = 1 - \frac{p_{mpm}}{p_{mi}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Las pérdidas mecánicas producidas en el motor se clasifican en tres tipos, dependiendo del proceso que las origina:

- Pérdidas de bombeo [ $N_b$ ,  $pmb$ ]: El origen de las pérdidas se deben al trabajo mecánico realizado por el pistón contra los gases en el proceso de renovación de la carga.
- Pérdidas de fricción [ $N_R$ ,  $pmR$ ]: Se obtienen por el rozamiento de los elementos móviles que componen los mecanismos del motor.
- Pérdidas de accionamientos auxiliares [ $N_a$ ,  $pma$ ]: Se obtienen del accionamiento de elementos auxiliares que dispone el motor, como son las bombas de combustible, de lubricante o de refrigerante.

Por lo tanto, las pérdidas mecánicas totales son el resultado de la suma de las pérdidas descritas, como el de la siguiente expresión:

$$pmpm = pmR + pmb + pma \quad \text{(Ecuación 19)}$$

Para determinar las pérdidas mecánicas de un motor en un ensayo experimental existen diversos procedimientos que permiten la evaluación de pérdidas globales o pérdidas en elementos por separado. Los procedimientos más utilizados son los siguientes:

- Método de deceleración libre.
- Rectas de Willians.
- Método de arrastre.
- Método Morse.
- Diagrama de indicador.

El método utilizado para la obtención de las pérdidas mecánicas del motor en los ensayos experimentales planteados en este estudio es el Método de arrastre, que consiste en determinar la potencia necesaria para arrastrar el motor sin proceso de combustión (suministro de combustible interrumpido). Para que el ensayo pueda realizarse en las condiciones de operación de motor aproximadas, las pruebas deben

hacerse inmediatamente después de haber tenido el motor el funcionamiento a temperatura de servicio, para que el lubricante y el refrigerante se mantengan con las propiedades de servicio adecuadas.

Para el estudio, uno de los puntos de evaluación en el modelado es el cálculo de las pérdidas mecánicas producidas en el motor, el cual se debe reproducir fielmente la curva de arrastre obtenida en el ensayo experimental.

### 2.5.2. Calibración de las pérdidas mecánicas con OpenWAM

OpenWAM dispone de un cuadro de configuración específico para el cálculo de las pérdidas mecánicas. En el modelo se utiliza un método de cálculo que consiste en aplicar una ecuación en el que intervienen unos coeficientes de pérdidas, el régimen de giro del motor y la presión media indicada en el cilindro. El cuadro de ajustes para las pérdidas mecánicas muestra las ecuaciones que permiten el cálculo, siendo:

$$pmpm = K1 \cdot \frac{n}{60} - K2 \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 + K3 \cdot pmi + K0 \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

- $n$  = revoluciones del motor (rpm)
- $pmi$  = presión media indicada

$$\text{Par de pérdidas mecánicas} = \frac{pmpm \cdot R_{cyl}^2 \cdot S}{40000} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde:

- $R_{cyl}$  = radio del cilindro
- $S$  = carrera del pistón

$$\text{Par efectivo } (Me_{efec}) = \text{Par neto} - \text{Par de pérdidas mecánicas} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Debido a que en el ensayo experimental no es posible obtener las pérdidas mecánicas de los elementos por separado, el calibrado de las pérdidas mecánicas en el modelo debe adaptarse a estas condiciones. Por este motivo, para poder reproducir las pérdidas mecánicas obtenidas en el ensayo experimental se ha realizado el siguiente procedimiento de calibrado.

Con los resultados obtenidos en el ensayo experimental del cálculo de pérdidas mecánicas aplicando el método de arrastre, se realiza una representación gráfica de la curva característica de arrastre del ensayo. Posteriormente se agrega una línea de tendencia polinómica de segundo grado para obtener una ecuación representativa con una función dependiente de las revoluciones del motor que pueda aplicarse en el modelo de WAMer.

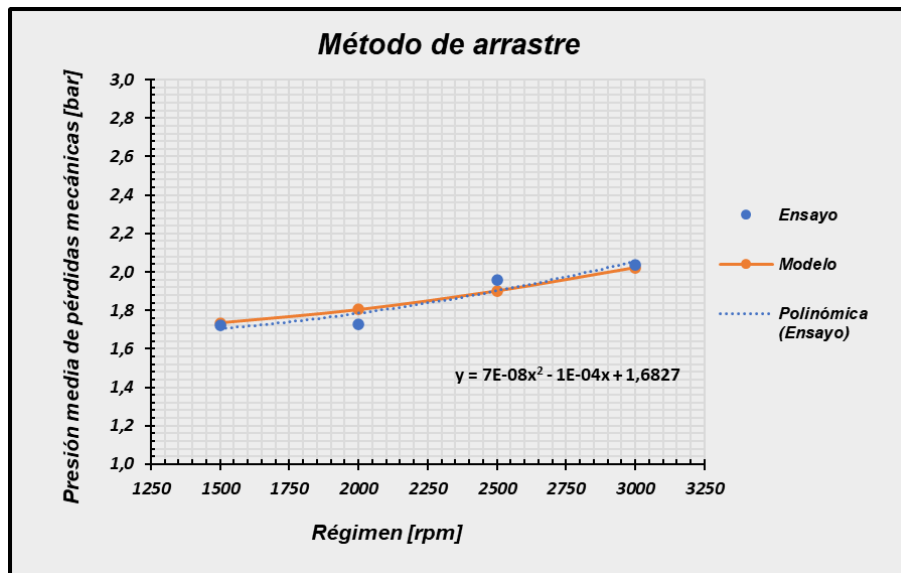


Figura 11: Representación gráfica de las curvas de pérdidas mecánicas obtenidas por el método de arrastre

Para poder reproducir la ecuación característica de la curva de pérdidas mecánicas del ensayo experimental, es necesario simplificar el método de cálculo del modelo en OpenWAM anulando el término de la presión media indicada ( $p_{mi}$ ) de la ecuación de la presión media de pérdidas mecánicas implementada en WAMer. Con este cambio, la ecuación tendrá unos coeficientes dependientes únicamente de las revoluciones de motor, como se muestra en la siguiente expresión:

$$pmpm = K1 \cdot \frac{n}{60} - K2 \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 + K3 \cdot pmi + K0 = K0 + K1 \cdot \frac{n}{60} - K2 \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \quad (\text{Ecuación 23})$$

Para la obtención de los coeficientes de pérdidas mecánicas que se introducen en el cuadro de configuración de WAMer, se debe realizar la conversión de tiempo en la ecuación de la curva característica de pérdidas mecánicas del ensayo, para anular el término de tiempo en segundos de la ecuación planteada en WAMer:

- Cambio de la unidad de tiempo de las revoluciones a segundos.

$$Y = 1,6827 - 1x10^{-4} \cdot (rpm) \cdot (60 s) + 7x10^{-8} \cdot (rpm)^2 \cdot (60 s)^2$$

→

$$Y = 1,6827 - 6x10^{-3} \cdot (rpm) + 2,52x10^{-4} \cdot (rpm)^2$$

Finalmente se obtiene una ecuación de la curva de pérdidas mecánicas obtenida en el ensayo experimental utilizando el método de arrastre que simula fielmente el método de cálculo planteado en WAMer. De esta ecuación se obtienen los valores de los resultados coeficientes de pérdidas mecánicas y que posteriormente se introducen en el cuadro de configuración de OpenWAM para nuestro modelo:

- **Coefficiente de pérdidas K0:** 1.6827
- **Coefficiente de pérdidas K1:**  $-6 \times 10^{-3}$
- **Coefficiente de pérdidas K2:**  $-2.5 \times 10^{-4}$
- **Coefficiente de pérdidas K3:** 0



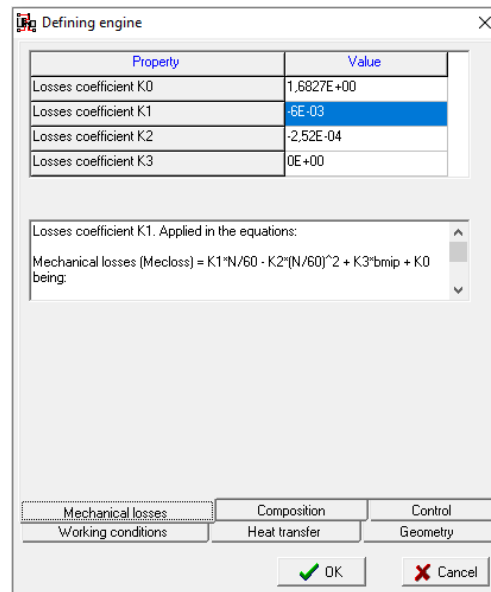


Figura 12: Cuadro de configuración de los coeficientes de pérdidas mecánicas con OpenWAM

En consecuencia, OpenWAM no considerará en el cálculo de la presión media de pérdidas mecánicas el término asociado al lazo de bombeo asociado a la renovación de carga, por lo que debe tener en cuenta posteriormente en el análisis de resultados. Esta configuración permite modelar la curva con un grado de precisión alto, considerando únicamente las revoluciones de motor, sin que afecte al resto de parámetros del motor, ya que el método de cálculo de pérdidas mecánicas es impuesto.

Por lo tanto, con este método se calculan las pérdidas mecánicas asociadas a la fricción y a los elementos auxiliares en conjunto, es decir, la suma de las pérdidas mecánicas de fricción y auxiliares serán calculadas por el modelo como un único término (fricción). Esta acción no afecta al resultado de pérdidas mecánicas globales ni a los parámetros netos del motor (Par, presiones medias, potencias, etc.), debido a que OpenWAM predice independientemente los resultados de pérdidas mecánicas por bombeo.

Con lo comentado anteriormente, en el análisis posterior de las pérdidas mecánicas, simplemente se requiere realizar la suma de los resultados obtenidos en el modelo, siguiendo el criterio utilizado en la ecuación siguiente:

$$pmpm_{(TOT)} = pmpm_{(MOD)} + pmpm_{(BOMBEO)} \quad (\text{Ecuación 24})$$

A continuación, se adjunta un esquema conceptual del procedimiento planteado para el cálculo de las pérdidas mecánicas que se producen en el motor a analizar.

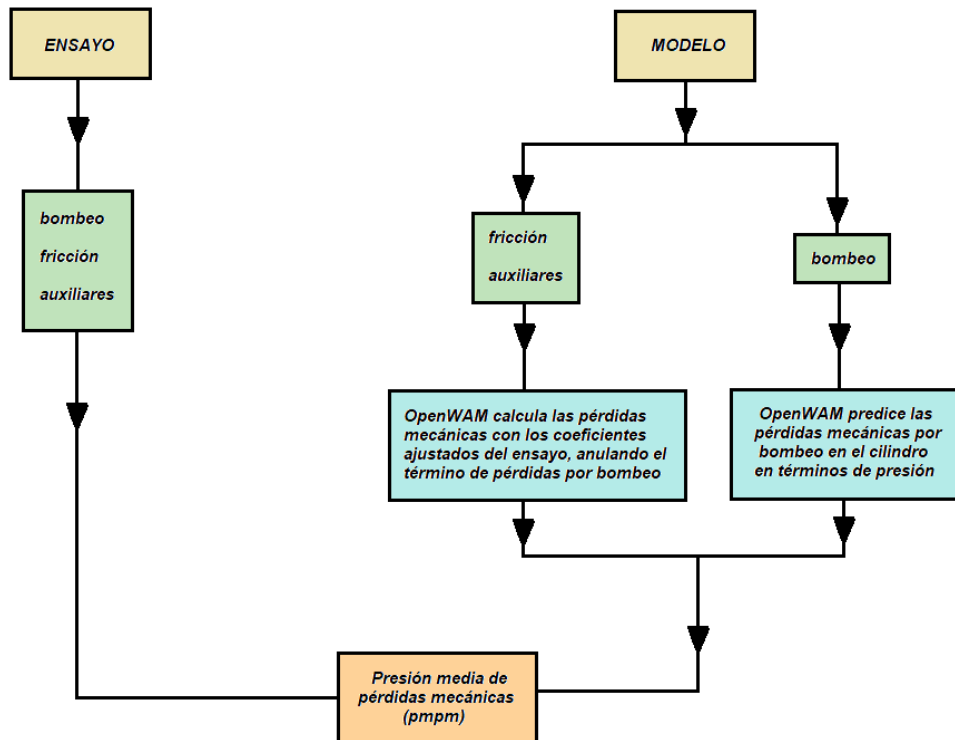


Figura 13: Diagrama de flujo conceptual del procedimiento de cálculo de las pérdidas mecánicas

### 3. SIMULACIÓN DEL MODELO EN OPENWAM

Cuando se ha completado el modelo unidimensional del motor, es posible realizar la simulación del modelo, teniendo en cuenta que previamente deben fijarse las variables de entrada que reproduzca el funcionamiento del motor en condiciones estacionarias sobre el número de ciclos programados para la evaluación posterior. Las variables de deben ser manejadas en cada simulación son:

- Revoluciones de motor (rpm).
- Presión atmosférica (bar)
- Temperatura atmosférica (°C)
- Presión del aire en el sistema de admisión (bar)
- Temperaturas iniciales de las paredes de los elementos del motor (°C)

- Masa de aire inicial consumida por ciclo de motor (g/ciclo)
- Masa de combustible inyectado por ciclo de motor (g/ciclo)

Para ejecutar una simulación del modelo, es necesario el programa OpenWAM, pero dicho programa no se puede ejecutar directamente, sino que se utiliza sobre el soporte de WAMer. Esto quiere decir que todo el proceso de simulación se realiza en la interfaz gráfica de WAMer, para definir posteriormente la ejecución desde el archivo de OpenWAM.



## Capítulo 4 – METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 1. OBJETO DE ESTUDIO

El objetivo del ensayo experimental en el presente estudio es desarrollar un procedimiento que permita obtener la información necesaria con el fin de poder contrastar los parámetros reales con los datos obtenidos en el modelado realizado en el software OpenWAM 1D. Se trata de un método de evaluación y validación del modelo.

El estudio está especialmente dirigido al análisis de Motores de Combustión Interno Alternativo (MCIA). Para el estudio se ha seleccionado un motor monocilíndrico Diésel del fabricante HATZ, instalado en un banco de ensayos para la realización de pruebas necesarias.

Adicionalmente, durante los diferentes ensayos experimentales realizados, se obtendrán distintos valores de entrada, necesarios para configuración del modelado del motor. Los valores de entrada están relacionados con temperaturas de los fluidos (aire, gases de combustión y combustible), par motor, revoluciones de motor, etc.

### 2. EQUIPOS

#### 2.1. MOTOR HATZ 1B20

Para la realización del estudio se ha seleccionado un motor monocilíndrico Diésel, refrigerado por aire, con una potencia efectiva máxima de 3.5KW del fabricante HATZ modelo 1B20 [7], instalado en un banco de ensayos destinado a la formación y situado en el aula-taller de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna.



Figura 14: Imagen del motor HATZ 1B2

**2.1.1. Datos técnicos.**

A continuación, se muestran los datos técnicos del motor HATZ 1B20 aportados por el fabricante en la ficha técnica, adjunto adicionalmente en el documento anexo.

<b>Datos técnicos</b>		<b>1B20</b>
Tipo de construcción		
Cilindros		
Sistema de Inyección		
Posición del cigüeñal		horizontal
Sistema de postratamiento de gases de escape sólo EPA Tier IV final de EE. UU.		—
Perforación x carrera [mm]		69 x 65
Motor	Cilindrada [l]	0,243
	Velocidad media del pistón @ 3000 min <sup>-1</sup> [m/s]	6,5
	Relación de compresión	22:1
	Consumo de aceite lubricante en relación con la plena carga	
	Llenado de aceite lubricante	máx. [l] 0,9 mín. [l] 0,4
Regulador de revoluciones	Régimen de ralentí más bajo [min <sup>-1</sup> ]	
	Variación de rotación estática @ 3000 min <sup>-1</sup>	
Datos de instalación	Cantidad de aire de combustión @ 3000 min <sup>-1</sup> aprox. [kg/h] <sup>1</sup>	25,2
	Cantidad de aire de refrigeración @ 3000 min <sup>-1</sup> aprox. [kg/h] <sup>1</sup>	306
	Motor de arranque [V]	
	Corriente de carga del alternador @ 3000 / 1500 rpm [A]	
	Capacidad de la batería mín. / máx. [Ah]	
Dimensiones	Peso del motor con partida por cuerda retráctil [kg]	28,0
	Peso del motor con partida eléctrica 12 V o 24 V [kg]	32,8
	L x A x H [mm]	304 x 361 x 401

Potencia del motor máx. [kW/hp] <sup>2</sup>	[min <sup>-1</sup> ]	1B20
<b>Potencia vehicular según DIN ISO 1585.</b>	3600	3,5 / 4,7
	3000	3,1 / 4,2
	2600	2,8 / 3,8
	2300	2,5 / 3,4
	2000	2,2 / 3,0
	1800	1,9 / 2,6
	1500	1,6 / 2,2
<b>Potencia útil ISO (IFN) bloqueada para carga discontinua según ISO 3046-1.</b> EPA 2 velocidades	3600	3,4 / 4,6
	3000	3,1 / 4,2
	2600	2,8 / 3,8
	2300	2,5 / 3,4
	2000	2,1 / 2,9
	1800	1,9 / 2,6
	1500	1,5 / 2,0
<b>Potencia standard ISO (ICXN) [10 % sobrecargable].</b> EPA variable; EPA constante	3600	3,1 / 4,2
	3000	2,8 / 3,8
	2600	2,5 / 3,4
<b>Potencia standard ISO bloqueada (no sobrecargable) según ISO 3046-1. Válida para la rotación constante y la carga constante (ICFN).</b>	2300	2,2 / 3,0
	2000	1,9 / 2,6
	1800	1,7 / 2,3
	1500	1,4 / 1,9

### 1B20

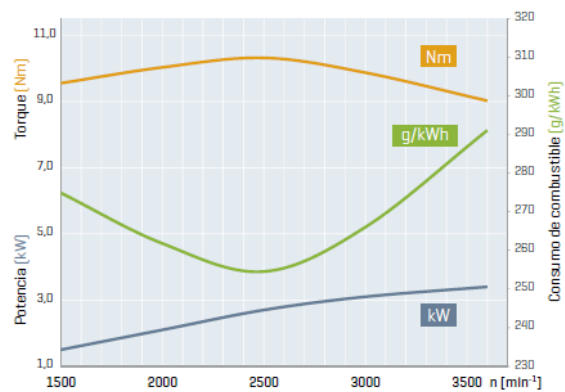


Figura 15: Representación gráfica de curvas de plena carga de parámetros de  $N_e$ ,  $M_e$  y  $SFC_e$

#### 2.1.2. Aplicaciones.

El motor HATZ 1B20 destaca por ofrecer la posibilidad de instalarse en aplicaciones fijas como en aplicaciones móviles al disponer de unas dimensiones compactas y un peso reducido [7]. Este motor puede instalarse en máquinas agrícolas de pequeñas dimensiones, maquinaria de jardinería, grupos de bombeo, grupos electrógenos, etc.



Figura 16: Ejemplo de aplicación real del motor HATZ

Otra característica importante de este motor es que posee de una gran robustez, fiabilidad y durabilidad, lo que proporciona que pueda soportar condiciones de uso severas. Adicionalmente, requiere un mantenimiento de motor relativamente bajo.



## 2.2. BANCO DE ENSAYOS GUNT CT-159

Para la realización del ensayo práctico del motor HATZ 1B20 se ha utilizado este banco de pruebas, diseñado específicamente para la medición de potencia de motores de combustión interna de hasta 3Kw [8]. Es un banco de pruebas modular que incluye un software específico para la adquisición de datos con el que es posible:

- Registrar curvas características de par y potencia
- Determinar el consumo específico de combustible.
- Determinar el rendimiento y el valor lambda (relación aire-combustible).
- Determinar la pérdida por fricción (en funcionamiento de remolque).

El banco de pruebas GUNT CT-159 dispone de los siguientes sistemas:

- Sistema de alojamiento anti vibratorio y mando del motor sobre un bastidor móvil. El sistema incorpora soportes
- Sistema de abastecimiento de aire de admisión con depósito de estabilización.
- Sistema de abastecimiento de combustible con depósito independiente.
- Panel de indicadores de medición relevantes.



Figura 17: Vista general del banco de ensayos GUNT CT-159

Para el control del motor, es necesario acoplar un módulo móvil independiente con una unidad universal de accionamiento y frenado HM 365. El motor de ensayo se conecta a la unidad de accionamiento a través de una correa de transmisión [8].

La unidad HM 365 tiene la función de realizar el giro de arranque del motor para posteriormente actuar como freno en la aplicación de carga al motor de ensayo, posibilitando el ajuste del número de revoluciones o par de motor al disponer de controles.



Figura 18: Vista general del módulo de accionamiento y frenado HM 365

En la figura 19 se muestra una vista general del banco de ensayos con el módulo de unidad de accionamiento y freno acoplado. El equipo dispone de una tubería en la parte superior del motor para la evacuación de los gases de combustión, conexiones eléctricas tomadas desde el armario de control. También se muestra la conexión del conducto de aire de admisión desde el depósito de estabilización hasta la caja de filtro de aire del motor, las conexiones eléctricas tomadas desde el armario de control. Por último, para el suministro de combustible, se dispone de un pequeño depósito de combustible situado en la parte inferior del módulo en las que las tuberías de suministro y retorno van conectados al armario de control, que contiene un sistema de bombeo por aspiración, una válvula de corte de suministro y un visor que permite el cálculo del caudal de combustible consumido en función del tiempo.



Figura 19: Vista general del conjunto funcional GUNT CT-159 y HM 365

Los datos experimentales que se pueden obtener con el banco de ensayos son los siguientes:

- Temperatura del aire de admisión (°C)
- Temperatura de combustible (°C)
- Temperatura de los gases de combustión (°C)
- Caudal volumétrico de aire de admisión (litros/min)
- Consumo de combustible (Kg/h)
- Par motor (Nm)
- Revoluciones de motor (rpm)

**Nota:** Para el cálculo del consumo de combustible, el banco de ensayos dispone de un visor graduado que permite realizar un cálculo aproximado del consumo de combustible al contabilizar el tiempo transcurrido al descender el volumen de combustible entre las marcas de referencia de graduación. En la figura 20 se muestra el visualizador integrado en el equipo.



Figura 20: Vista del visor graduado para la medición de consumo de combustible

El banco de ensayos GUNT CT-159 dispone de una conexión con puerto USB para posibilitar la evaluación y grabación de datos por medio de un software específico para este equipo que debe ser instalado previamente en un PC con Sistema Operativo Windows compatible. De forma alternativa, los diferentes indicadores instalados en los paneles de control permiten la recogida de datos necesarios para el análisis del motor a ensayar.

### 3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO EXPERIMENTAL

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

Para la realización de un ensayo experimental del motor HATZ 1B20 con el banco de pruebas GUNT CT-159 es necesario plantear un procedimiento claro y ordenado, con el objetivo de obtener con éxito los resultados requeridos en un margen de tiempo óptimo y sin generar costes adicionales, ya que, durante los diferentes ensayos, se producen consumos energéticos (combustible, electricidad) como la generación de emisiones contaminantes producidos por los gases de combustión.

Para ello, previamente se debe planificar el procedimiento a seguir, clasificándolo en los siguientes apartados:

- Determinar cuál es el objetivo de los ensayos experimentales y cuáles son los datos que se plantean obtener.
- Tipo de ensayos experimentales necesarios para la obtención de datos requeridos.
- Planificación de agenda con la duración estimada de cada uno de los ensayos experimentales a realizar.
- Determinar qué tipo de proceso de adquisición de datos se va a realizar (estudio del software a utilizar o elaboración previa de tablas)
- Requerimientos para la preparación y puesta a punto del motor y banco de ensayos.

Para el presente estudio, analizaremos cual ha sido el procedimiento utilizado en los ensayos experimentales realizados en el aula-taller donde estaba ubicado el banco de pruebas.

### 3.2. OBJETIVO Y TIPOS DE ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos experimentales realizados tienen la finalidad de poder obtener datos de funcionamiento reales del motor HATZ 1B20 para compararlos posteriormente con los datos extraídos del modelado teórico con el software. Con este método es posible validar el modelado teórico al evaluar si los resultados obtenidos reflejan fielmente el comportamiento del motor analizado durante las diferentes pruebas.

Para ello, en el estudio se ha definido que el tipo de ensayos experimentales realizados son los siguientes:

- **Ensayo N°1:** Ajuste de calibración del modelo, donde se toman los resultados obtenidos fijando como datos de entrada el par motor y las revoluciones de motor (valores constantes).
- **Ensayo N°2:** Aplicación del método de arrastre para el cálculo de pérdidas mecánicas del motor.

En la realización de los ensayos experimentales, la unidad de accionamiento y frenado HM 365 permite el control absoluto de las revoluciones y par motor, por lo que inicialmente se plantea el siguiente intervalo de mediciones:

### Ensayo N°1

- Revoluciones de motor (rpm): 1500, 2250, 3000.
- Par motor (Nm): 2, 4, 6, 8.

### Ensayo N°2

- Revoluciones de motor (rpm): 1500, 2000, 2500, 3000.

Con los ensayos realizados se obtendrán los datos suficientes para la realización de las tablas y gráficos relacionados el funcionamiento de motor (flujos, temperaturas, potencias, rendimiento, etc.).

## 3.3. PLANIFICACIÓN DE AGENDA PARA LAS SESIONES DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los ensayos en el banco de pruebas se han dividido en tres sesiones de 2 horas/sesión, con un cómputo total de 6 horas, en las que se realizaron las siguientes tareas:

### Sesión 1:

- Asignado a la recogida de información relativa a los elementos auxiliares del motor como son dimensiones de depósitos o conductos de admisión de aire y gases de combustión.
- Puesta a punto del motor (revisión de niveles, comprobación de filtros y estado general).

### Sesión 2:

- Puesta en marcha del motor y el banco de ensayos para primera evaluación de funcionamiento y detección de posibles anomalías o averías.
- Arranque del sistema para evaluación inicial de datos de salida en temperatura de servicio.
- Verificación y manejo del software del banco de ensayos para la grabación de datos en tiempo real.

### Sesión 3:

- Arranque del sistema para evaluación inicial de datos de salida en temperatura de servicio.
- Verificación y manejo del software del banco de ensayos para la grabación de datos en tiempo real.
- Realización del ensayo N°1.
- Realización del ensayo N°2.

### 3.4. MÉTODO DE ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES EN EL ENSAYO EXPERIMENTAL

Con Excel, se configuraron previamente las tablas necesarias. Durante las sesiones de ensayo, los datos se introducen en cada celda correspondiente a medida que se realizaba cada una de las pruebas en las condiciones de entrada seleccionada. Los valores de salida se obtienen de los diferentes visualizadores en los paneles de control. La figura 21 muestra un ejemplo de los visualizadores en las que refleja algunos de los datos de salida durante las pruebas realizadas.



Figura 21: Vista general de los visualizadores instalados en el banco de ensayos GUNT CT-159

### 3.5. FASE DE PREPARACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL MOTOR HATZ 1B20 Y BANCO DE ENSAYOS GUNT CT-159

Para la realización de los ensayos experimentales es estrictamente necesario realizar previamente un procedimiento de diagnóstico y verificación del banco de ensayos y del motor a estudiar, con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento de todos los sistemas durante el desarrollo de las pruebas planificadas. El procedimiento de verificaciones previas son las siguientes:

#### 3.5.1. Verificaciones del banco de ensayos GUNT CT159.

El banco de pruebas GUNT CT-159 disponible en el aula-taller se utiliza en diferentes ensayos prácticos para motores de combustión interna de tipo MEP (motores de encendido provocado) y MEC (motores de encendido por compresión). El equipo es sometido a ensayos eventualmente, presentando un estado de conservación, dispone de todos sus elementos, incluyendo los conductos y depósitos independientes para el combustible a utilizar.

El procedimiento de verificaciones y preparación del banco de ensayos ha sido el siguiente:

- Comprobación de estado y aprietes en las fijaciones del motor instalado en los soportes del banco de pruebas.
- Comprobación del correcto acoplamiento de la unidad móvil de la unidad de accionamiento y frenado con el bastidor móvil del banco de ensayos.
- Verificación del estado y tensión de la correa de transmisión del motor con la unidad de accionamiento y frenado.
- Examinar las conexiones de los conductos de aire de admisión y gases de combustión.
- Examinar el sistema de alimentación y retorno del combustible, desde el depósito de suministro hasta las tomas en el motor.
- Comprobación de estado de los visualizadores, interruptores y accionadores en el panel de control del banco de ensayos.



Posteriormente, tomando las medidas de seguridad indicadas por el fabricante, es necesario conectar los equipos y verificar el estado de los instrumentos para detectar posibles anomalías en la puesta en servicio del banco de ensayo.

### **3.5.2. Verificaciones del motor HATZ 1B20.**

El motor HATZ 1B20 disponible en el aula-taller está destinado exclusivamente para actividades relativas a la formación, por lo que su utilización es esporádica, sin estar sometido a uso severo ni tiempos de funcionamiento largos. El motor presenta un estado de conservación bueno y dispone de todos sus elementos, por lo que inicialmente está apto para su uso, pero requiere previamente la realización de verificaciones del estado de mantenimiento general.

Para las verificaciones del motor HATZ 1B20, es recomendable acudir al manual de instrucciones del usuario para estudiar toda la información disponible, especialmente a los temas relacionados como:

- Medidas de seguridad.
- Manejo y operación.
- Mantenimiento.
- Diagnóstico de averías.

El manual de usuario se suministra con el material adjunto al motor, aunque si fuese necesario, el fabricante aporta los diferentes manuales del motor en su página web <https://www.hatz-diesel.com/es/productos/motores-diesel/serie-b/1b20/>.

Adicionalmente, en el documento anexo del presente estudio se adjunta el manual de usuario del motor HATZ 1B20.

Teniendo en cuenta las medidas de seguridad descritas en el manual de usuario y las señalizaciones informativas disponibles en las placas de advertencia del motor, antes de practicar la primera puesta en marcha se realizan las siguientes tareas de mantenimiento:

- Comprobación de estado y nivel del aceite de motor.
- Comprobación de estado del filtro de combustible Diesel.

- Comprobación de nivel de llenado y estado del combustible Diesel en el depósito.
- Comprobación de estado de los filtros de aire en el motor y en el depósito de estabilización del aire de admisión.
- Localización de posibles fugas de aceite en el motor.
- Verificación de la palanca de aceleración del motor.

Realizadas las comprobaciones previas de estado y mantenimiento del motor, es posible proceder al arranque de motor, para comprobar su funcionamiento, donde se tiene en cuenta las condiciones siguientes:

- Estabilización de las revoluciones de motor en régimen de ralentí y diferentes cargas.
- Comprobación de los gases de combustión (estado y coloración).
- Localización de posibles fugas de aceite o combustible durante el ciclo de funcionamiento.
- Control de temperaturas.

Finalizadas las comprobaciones descritas, se puede considerar que el motor está en las condiciones adecuadas para realizar los ensayos experimentales.

### **3.6. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO**

Con el banco de ensayos y el motor disponibles y operativos tras las verificaciones previas, se puede iniciar los ensayos experimentales previstos en el estudio, por lo que se hará una descripción del procedimiento realizado en las sesiones programadas.

Inicialmente, deben realizarse las siguientes acciones:

- Conectar el suministro eléctrico del banco de pruebas y la unidad de accionamiento y frenado HM 365.

- Ceban el circuito de alimentación de combustible. Para ello debemos presionar el pulsador de activación de la bomba de combustible eléctrica y abrir la válvula de corte de combustible integrados en el panel de control del banco de pruebas. En el proceso de cebado del combustible, comprobaremos que el medidor graduado de combustible se va llenado hasta el nivel deseado (cerrando la válvula de corte en ese momento), por lo que nos permitirá realizar una lectura del consumo de combustible en función del tiempo transcurrido y el nivel de combustible descendido.
- Se configura la unidad HM 365 en modo de arranque del motor, seleccionando el sentido de giro correcto. En este momento se puede realizar la puesta en servicio del motor presionando el pulsador correspondiente.
- En el momento que el motor inicia el arranque y gira de forma autónoma, debemos ajustar el grado de carga para obtener la velocidad de ralentí. Debe mantenerse el tiempo suficiente para que el motor HATZ 1B20, con refrigeración por aire, pueda alcanzar la temperatura de servicio. Para ello se utiliza un termómetro infrarrojo, comprobando que estas condiciones se obtenga una temperatura estable (entre 80 °C).
- Con el motor en funcionamiento, se debe comprobar constantemente el nivel de combustible en el medidor graduado y realizar cebados para evitar que el motor deje de succionar el combustible necesario.

El motor en este momento ya está preparado para el comienzo de los ensayos.



Figura 22: Vista del equipo de ensayos en el ensayo experimental

### 3.6.1. Procedimiento del ensayo experimental N°1.

En el primer ensayo experimental, el objetivo es obtener los parámetros de salida del motor cuando se somete a unas condiciones de par motor y revoluciones prefijadas. Para ello, en el ensayo, configuramos las revoluciones de motor a una velocidad constante y posteriormente se va aplicando los distintos valores de par motor. En esas condiciones, con los parámetros estabilizados se obtendrán las temperaturas, caudales y consumos de combustible. Los intervalos de los datos de entrada son los siguientes:

- Revoluciones de motor (rpm): 1500, 2250, 3000.
- Par motor (Nm): 2, 4, 6, 8.

Con este ensayo se obtiene un mapa de calibración del motor en distintas situaciones de carga ejercida y permitirá poder representar las curvas características experimentales de los parámetros, asumiendo las condiciones ambientales. Los puntos de medición establecidos cubren un amplio rango de operación del motor, siendo muy positivo de cara a la validación del modelo.

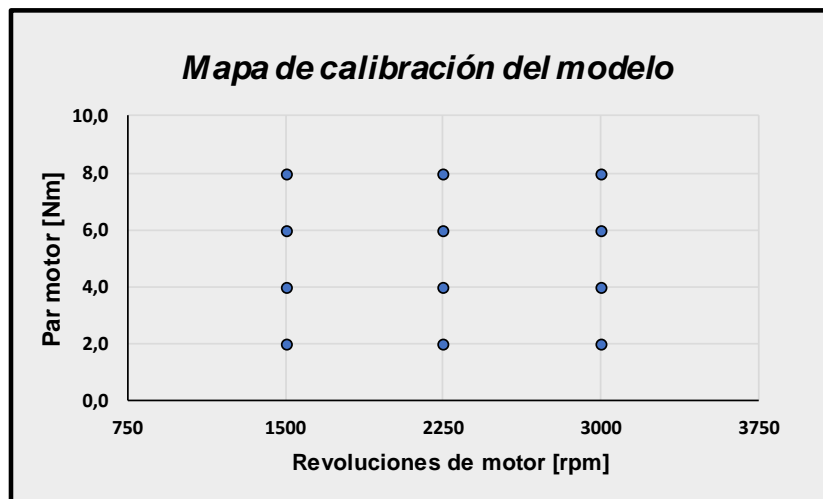


Figura 23: Representación gráfica del mapa de calibración del modelo

### 3.6.2. Procedimiento del ensayo experimental N°2.

En el segundo ensayo, se aplica el método de arrastre al motor para determinar los valores de pérdidas mecánicas en los intervalos de revoluciones determinados, siendo:

- Revoluciones de motor (rpm): 1500, 2000, 2500, 3000.

Para realizar este ensayo, previamente debe configurarse la unidad HM 365 en modo de arrastre de motor y debe hacerse girar en vacío (sin combustión). En este caso, el parámetro relevante a tomar es el par motor generado por la unidad de accionamiento para hacer girar el motor a las revoluciones prefijadas. Con los resultados obtenidos es posible representar la curva característica de arrastre por pérdidas mecánicas, como el del ejemplo del siguiente gráfico:

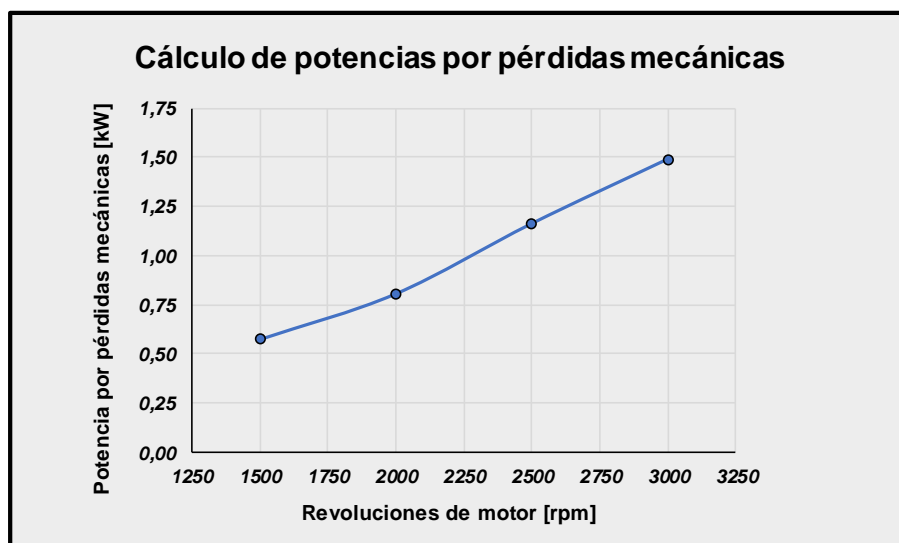


Figura 24: Representación gráfica de la curva de pérdidas de carga en término de potencias

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Realizados los ensayos experimentales en las sesiones programadas, se registraron los datos de las pruebas utilizando dos métodos:

- Grabación de datos con el software del banco de pruebas GUNT CT-159.
- Lectura y registro de datos de los visualizadores en el banco de pruebas utilizando una hoja de cálculo de Excel.

A continuación, se adjuntan las tablas de las distintas pruebas realizadas:

#### 4.1. DATOS DE ENTRADA EN ENSAYO:

$T_{amb}$	21	[°C]
$P_{amb}$	0,955	[bar]
Densidad aire ( $\rho_a$ )	1,132	[Kg/m <sup>3</sup> ]
Densidad comb. ( $\rho_c$ )	830	[Kg/m <sup>3</sup> ]
PCI	42470	[KJ/Kg]
Vol. comb. consumido	4,52	[cm <sup>3</sup> ]
Diámetro pistón ( $D_p$ )	69	[mm]
Carrera pistón ( $S_p$ )	62	[mm]

Tabla 1: Datos de entrada para el cálculo de parámetros de operación del motor

#### 4.2. DATOS DE ENSAYO DEL MÉTODO DE ARRASTRE DEL MOTOR PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS MECÁNICAS:

ARRASTRE ENSAYO				
1500	2000	2500	3000	[rpm]
3,66	3,85	4,44	4,74	[Nm]
0,57	0,81	1,16	1,49	[KW]
1,72	1,73	1,96	2,04	[bar]

Tabla 2: Valores del parámetro de pérdidas mecánicas obtenidos en el ensayo experimenta

### 4.3. DATOS DE ENSAYO DE CARGAS PARCIALES PARA PARÁMETROS DE REVOLUCIONES Y PAR MOTOR FIJADOS:

	Par efectivo [N·m]	Régimen [rpm]	Caudal volumétrico de aire de admisión [l/min]	Temperatura del de admisión [°C]	Tiempo [s]	Temperatura del combustible [°C]	Temperatura gases de escape [°C]	Dosado
Nº 1	2,0	1500	123	24,5	78	35,3	161	0,021
Nº 2	4,0	1500	122	24,7	58	37,7	214	0,028
Nº 3	6,0	1500	117	24,7	46	39,7	278	0,037
Nº 4	8,0	1500	111	25	38	40,1	348	0,046

Tabla 3: Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 1500 rpm

	Par efectivo [N·m]	Régimen [rpm]	Caudal volumétrico de aire de admisión [l/min]	Temperatura del de admisión [°C]	Tiempo [s]	Temperatura del combustible [°C]	Temperatura gases de escape [°C]	Dosado
Nº 1	2,0	2250	165	25,7	50	45,3	206	0,024
Nº 2	4,0	2250	163	25,6	38	43	278	0,032
Nº 3	6,0	2250	159	25,5	29	36,1	341	0,043
Nº 4	8,0	2250	159	25,3	25	40,8	400	0,050

Tabla 4: Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 2250 rpm

	Par efectivo [N·m]	Régimen [rpm]	Caudal volumétrico de aire de admisión [l/min]	Temperatura del de admisión [°C]	Tiempo [s]	Temperatura del combustible [°C]	Temperatura gases de escape [°C]	Dosado
Nº 1	2,0	3000	193	25,9	35	51,2	254	0,030
Nº 2	4,0	3000	190	26,3	27	51,1	321	0,039
Nº 3	6,0	3000	188	26,4	22	51,1	397	0,048
Nº 4	8,0	3000	182	26,8	18	53	477	0,061

Tabla 5: Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 3000 rpm

Con el registro de valores de los ensayos realizados, se calcularon el resto de los parámetros característicos del motor que permitirán el análisis comparativo de los resultados del ensayo con los obtenidos en el modelo. En el documento anexo de cálculos se proporcionan los datos ampliados de las tablas mostradas en el presente apartado de resultados experimentales.





## Capítulo 5 – MODELADO DEL MOTOR HATZ 1B20

### 1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo se centrará en la realización del modelo del motor asignado en el estudio (HATZ 1B20), en el cual se describirá el procedimiento de configuración de los parámetros relevantes del modelo y cuáles son los puntos de operación que deben asignarse para la realización de las simulaciones necesarias que permitan comparar los resultados obtenidos en el modelo con la información obtenida experimentalmente.

Tal como se ha descrito en los capítulos anteriores, el modelado del motor planteado en el estudio se realizará con el software OpenWAM, el cual requiere disponer de unos conocimientos mínimos de sus características de programación para poder manejar el programa con fluidez y sin cometer errores que influyan en el proceso de cálculo y resultados del modelo. En este apartado solo se describirán los procesos de configuración relevantes, pero adicionalmente se adjunta un documento anexo con el procedimiento detallado de configuración del motor HATZ 1B20, con la aportación de cuadros de ajustes de los elementos implementados en el esquema de construcción del motor diseñado.

### 2. MODELADO DEL MOTOR CON OPENWAM

El modelado unidimensional del motor HATZ 1B20 utilizando el software OpenWAM representa el capítulo principal del estudio, debido a que el objetivo principal es realizar una simulación teórica que reproduzca con precisión los parámetros característicos del motor en diferentes condiciones de funcionamiento. Se entiende que el modelo es desarrollado con la misma base constructiva del motor, por lo que debe contener todos los componentes y sistemas instalados, además de introducir las características técnicas marcadas por el fabricante (parámetros geométricos, materiales, etc.).

Pero para que el modelo realice las simulaciones con éxito, también es necesario estudiar previamente que métodos teóricos se van a plantear en el estudio de los flujos, ya que deben configurarse adecuadamente en el proceso de modelado. Como ejemplos, la correcta configuración de las leyes de liberación de calor para la combustión o del

diagrama de distribución de válvulas provocarán una mayor fidelización de los resultados de modelo-ensayo.

En el modelado del motor planteado, el procedimiento realizado ha sido el de la obtención de los datos técnicos del motor, la construcción y calibración del modelo utilizando la interfaz gráfica WAMer, la realización y obtención de resultados de las simulaciones del modelo en las condiciones de funcionamiento planificadas. A continuación, se describe cada uno de los procesos.

## **2.1. DATOS INICIALES DEL MOTOR DISPONIBLES**

Es necesario disponer de toda la información del motor posible, ya que en el proceso de construcción del motor en el modelo se requieren datos geométricos o constructivos de elementos internos, muy complicados de obtener en mediciones u otro tipo de inspecciones.

El fabricante HATZ aporta en sus distintos manuales los datos técnicos básicos, descritos en el apartado 2.1.1. del capítulo 4. Desafortunadamente, estos datos no son suficientes para completar la calibración del modelo, por lo que para la adquisición del resto de datos fue necesario realizar las siguientes acciones:

- Mediciones de componentes instalados en las partes externas del motor, ya que el desarmado del motor (operativo) para la recogida de datos era inviable para el estudio.
- Solicitud de información técnica al fabricante y distribuidores, proporcionando datos del manual de taller del motor. No fue posible la aportación de datos relevantes de componentes internos, diagramas de alzamiento de válvulas o de inyección, al tratarse de información confidencial para el fabricante.
- Toma de datos técnicos de un motor con las mismas características al motor HATZ 1B20. Se pudieron extraer información de un manual de usuario del motor KOHLER KD225. Este motor dispone de unas características técnicas similares, inclusive en términos de consumo de combustible y potencias, por lo que se pudo realizar una estimación aproximada de algunos datos nos disponibles en el resto de las acciones.

Adicionalmente, es necesario conocer las características técnicas de los sistemas auxiliares del motor instalados en el banco de ensayos, como es el depósito de estabilización del aire de admisión y los conductos de admisión y gases de escape. Para ello, se realizaron las mediciones necesarias en la sesión de preparación para los ensayos.

## 2.2. CONSTRUCCIÓN DEL ESQUEMA DEL MOTOR CON WAMER

Desde la interfaz gráfica de WAMer se ha construido el esquema del modelo del motor HATZ 1B20, representado en la siguiente figura.

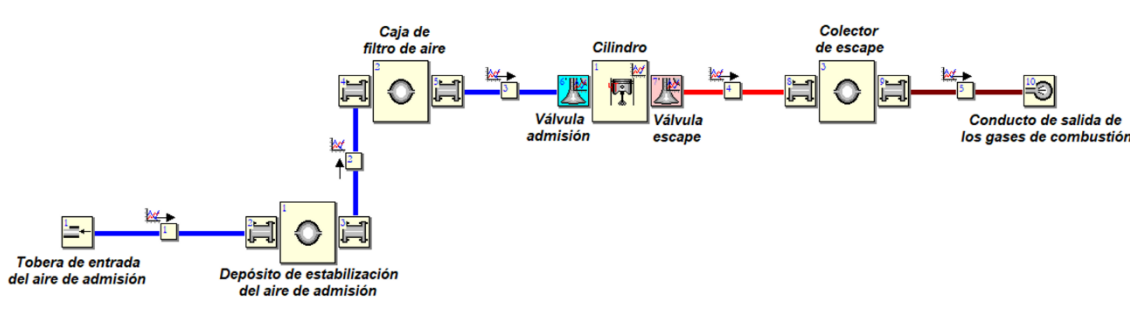


Figura 25: Esquema representativo del modelo de motor HATZ 1B20 planteado

En el modelo se puede apreciar que dispone una estructura sencilla debido que se trata de un motor monocilíndrico de cuatro tiempos con una válvula de admisión de aire y una válvula de escape para los gases de combustión. El modelo incorpora adicionalmente tres depósitos utilizados para:

- Depósito N°1: Depósito estabilizador de aire de admisión ubicado en la parte inferior del bastidor móvil del banco de pruebas. En este depósito se encuentra la tobera calibrada para la medición de gasto de aire
- Depósito N°2: Caja de filtro de aire de admisión ubicado en la parte superior del motor (lado admisión).
- Depósito N°3: Colector de escape unitario para la línea de evacuación de los gases de combustión situado en la parte superior del motor (lado escape)

El modelo incorpora varios conductos para la circulación controlada de los flujos y el análisis de los mismos. En el esquema, se puede apreciar que los conductos se pueden diferenciar por el color representado en el nodo, debido a que en el modelo podemos diferenciar el conducto en pipas o puertos, como es el ejemplo del sistema de flujos de los gases de combustión, donde se tiene la siguiente configuración:

- El nodo N°4 representa un conducto tipo pipa de los gases de escape (color rojo intenso) al disponer el motor HATZ de un silenciador de escape acoplado en la misma culata.
- El nodo N°5 representa un conducto de los gases de escape (color marrón) al disponer el motor HATZ de una tubería corrugada con capa externa de malla reforzada de acero inoxidable para aportar flexibilidad y evacuar los gases de combustión a una zona exterior controlada.

Adicionalmente se implementa en el modelo dos sondas en la entrada y salida del esquema que permite fijar los valores de los parámetros atmosféricos a cada flujo correspondiente.

### 2.3. CONFIGURACIÓN DEL MODELO DEL MOTOR HATZ 1B20 EN WAMER

Para describir el proceso de calibración del modelo construido para el motor seleccionado en el estudio se clasificará cada elemento en apartados diferenciados con el objetivo de exponer detalladamente cada ajuste realizado para una mejor interpretación del modelo final, con el que se han realizado las simulaciones posteriores. El orden de prioridad establecido para describir cada uno de los elementos implementados en el modelo será el siguiente:

#### Cuadros auxiliares de parámetros generales del motor

- Cuadro de ejecución.
- Cuadro de ajustes generales del motor.

### Elementos instalados en el esquema de construcción del motor

- Cilindro N°1
- Válvula de admisión de aire
- Válvula de escape para los gases de combustión
- Depósito de estabilización del aire de admisión (N°1)
- Caja de filtro de aire de admisión del motor (N°2)
- Silenciador de escape para los gases de combustión (N°3)
- Conducto de entrada al sistema del aire de admisión (nodo N°1)
- Conducto de aspiración entre los depósitos del sistema del aire de admisión (nodo N°2)
- Conducto de entrada del aire de admisión al motor (nodo N°3)
- Conducto de salida de los gases de combustión del motor (nodo N°4)
- Conducto de evacuación de los gases de combustión (nodo N°5)
- Sonda de entrada del aire atmosférico
- Sonda de salida del aire atmosférico

A continuación, se describirán los ajustes más importantes en el proceso de configuración del modelo donde se detallará las propiedades específicas del modelado del motor seleccionado.

### 2.4. CONFIGURACIÓN DE LAS LEYES DE LIBERACIÓN DE CALOR EN EL MODELO CON WAMER

Para definir las leyes de liberación de calor es necesario disponer o desarrollar los perfiles dFQL que actúan en el proceso de combustión del motor en las condiciones de operación requeridas por el fabricante.

Para el presente estudio, el fabricante no aporta en sus diferentes manuales información relacionada con los perfiles de liberación de calor, por lo que no es posible cargar estos datos en el modelo.

Otra alternativa posible es modelar los perfiles de liberación de calor después de haber medido la presión instantánea en la cámara de combustión en un ensayo experimental. Desafortunadamente, en el ensayo experimental realizado para el estudio, no se disponía de un sensor de presión que midiera este término, por lo que tampoco fue posible modelar los perfiles de liberación de calor del motor HATZ 1B20.

Debido a que no es posible introducir los perfiles dFQL del motor, se tomó la decisión de introducir un perfil obtenido de un modelo realizado en otro motor Diésel con especificaciones similares al motor HATZ para todas las condiciones de operación definidas en el estudio. De este perfil se estimó que podría obtener un comportamiento similar a las condiciones reales del motor experimental debido a que disponía un porcentaje elevado de fase de difusión, reproduciendo el comportamiento de un ciclo de inyección de combustible propia de un sistema de inyección mecánica accionado por leva.

Explicadas las condiciones de aplicación del perfil dFQL empleado, se muestra en la figura 26 el cuadro de configuración de la ley de liberación de calor empleado para el modelo.

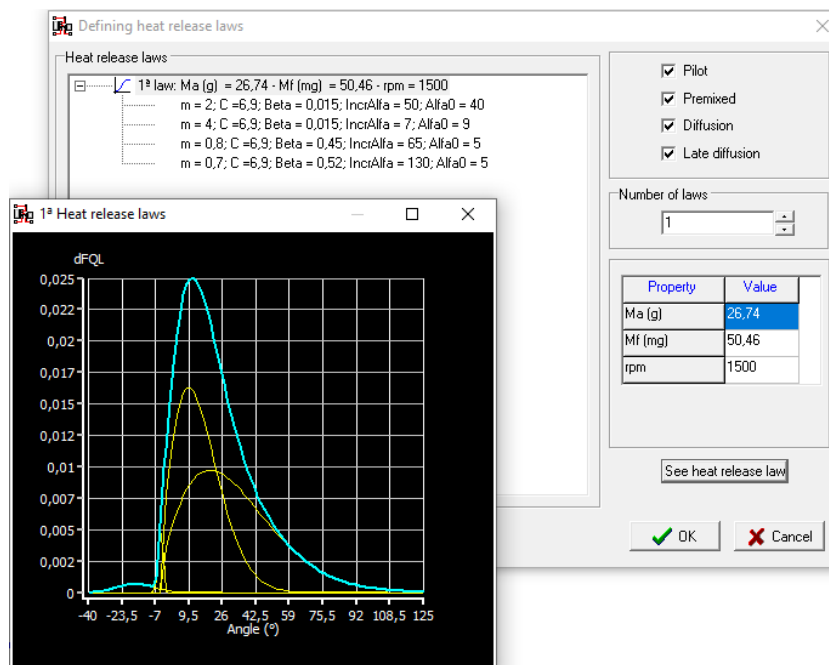


Figura 26: Cuadro de configuración de HRL con el perfil dFQL utilizado en el modelo

En la figura se puede apreciar la representación del perfil empleado para el modelo, que dispone de las cuatro fases de combustión, siendo las principales las de difusión y difusión tardía.

Es importante destacar que este perfil no fue seleccionado al azar, sino que se realizaron previamente pruebas con diferentes perfiles dFQL para seleccionar el perfil más adecuado para el modelo del motor estudiado.

## **2.5. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN Y DIAGRAMA DE ALZAMIENTO DE LAS VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE CON WAMER**

El proceso de configuración del diagrama de sincronización y alzamiento de las válvulas se realizan de forma independiente para cada válvula instalada en el motor. En el caso del motor HATZ 1B20 se dispone de una válvula de admisión y una válvula de escape, lo que simplifica el proceso de configuración al mínimo.

Para configurar cada una de las válvulas del motor en WAMer, generalmente se introducen los datos aportados por el fabricante, siendo principalmente el grado de apertura de la válvula seleccionada, los valores de alzamiento de la válvula por cada intervalo de ángulo de giro (normalmente el intervalo se sitúa en un grado) y los coeficientes de descarga del flujo por el paso de la válvula para cada intervalo de alzamiento.

Para este trabajo no fue posible obtener la información del funcionamiento de las válvulas para el motor HATZ, por lo que no se cargan los valores de diseño realizados por el fabricante. Por este motivo, al igual que en el apartado anterior, se tuvo que introducir una configuración de otro motor con especificaciones similares.

Los archivos de configuración de las válvulas de admisión y escape cargados en el modelo fueron verificados previamente para comprobar que el modelo disponía de un comportamiento adecuado y los parámetros característicos de funcionamiento eran coherentes con las simulaciones planteadas.

Debido al importante volumen de datos que se introducen en la configuración de las válvulas (especialmente los coeficientes de descarga y el alzamiento de la válvula al tener que introducir un valor por cada intervalo), se muestra para cada válvula los ajustes generales realizados en el modelo del motor analizado.

### 2.5.1. Configuración de la válvula de admisión.

❖ **Parámetros de cuadro de datos de la válvula de admisión (Data):**

- **Diámetro de la cabeza de la válvula (mm):** 27
- **Ángulo de apertura de la válvula (º):** 330
- **Control de velocidad de la válvula:** Engine (el motor dispone una leva que actúa sobre la válvula mecánicamente por medio de una varilla empujadora)
- **Relación de velocidad de la válvula:** 1 (por defecto)

❖ **Parámetros de coeficientes del flujo (Flow coefficients):**

- **Intervalo de alzamiento de la válvula (mm):** 1
- **Diámetro de referencia del cálculo de coeficiente de descarga (mm):**  
22.7

En la figura 27 se muestra una captura de imagen del cuadro de ajustes de los coeficientes de los flujos en la válvula.

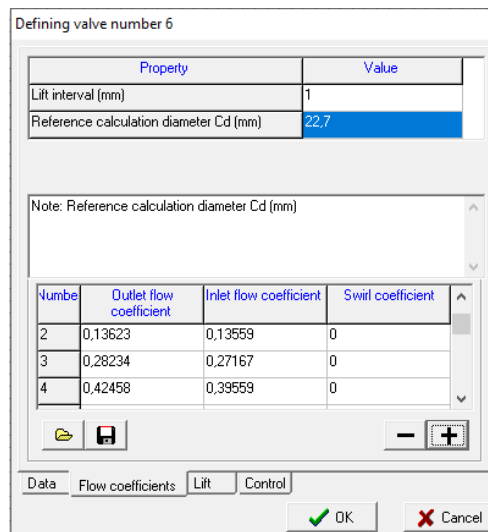


Figura 27: Cuadro de configuración de coeficientes de descarga en el conducto de la válvula de admisión del modelo



❖ **Parámetros de alzamiento de la válvula (Lift):**

En este apartado de configuración se introducen los valores de alzamiento de la válvula de admisión para el intervalo del ángulo fijado en el cuadro de propiedades. Para nuestro modelo, el valor de intervalo para registrar los valores de alzamiento es de 1°. En la figura 28 se muestra una captura de imagen de este apartado para la válvula de admisión, en la que se puede ver que dispone de un gráfico representando la curva característica de alzamiento de la válvula configurada.

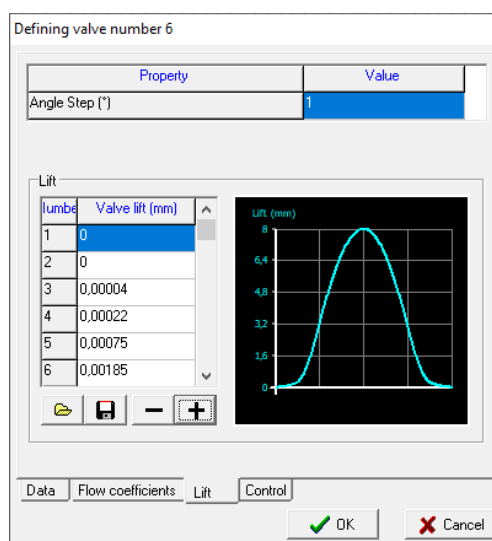


Figura 28: Cuadro de configuración del perfil de alzamiento de la válvula de admisión del modelo

**2.5.2. Configuración de la válvula de escape.**

❖ **Parámetros de cuadro de datos de la válvula de escape (Data):**

- **Diámetro de la cabeza de la válvula (mm):** 24
- **Ángulo de apertura de la válvula (°):** 120
- **Control de velocidad de la válvula:** Engine (el motor dispone una leva que actúa sobre la válvula mecánicamente por medio de una varilla empujadora)
- **Relación de velocidad de la válvula:** 1

❖ **Parámetros de coeficientes del flujo (Flow coefficients):**

- Intervalo de alzamiento de la válvula (mm): 1
- Diámetro de referencia del cálculo de coeficiente de descarga (mm): 22

❖ **Parámetros de alzamiento de la válvula (Lift):**

En este apartado de configuración se introducen los valores de alzamiento de la válvula de escape para el intervalo del ángulo fijado en el cuadro de propiedades. Para nuestro modelo, el valor de intervalo para registrar los valores de alzamiento es de 0.95°. En la figura 29 se muestra una captura de imagen de este apartado para la válvula de escape, en la que se puede ver que dispone de un gráfico representando la curva característica de alzamiento de la válvula configurada.

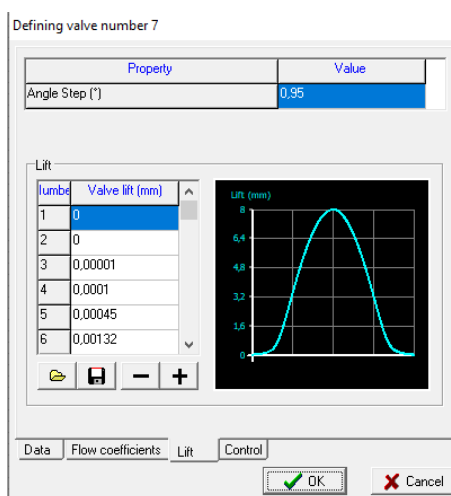


Figura 29: Cuadro de configuración del perfil de alzamiento de la válvula de escape del modelo

## 2.6. CONFIGURACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR CON WAMER

En el modelo, la configuración de la transferencia de calor se divide en dos partes. En primer lugar, se configuran los parámetros relacionados con los materiales utilizados en los componentes internos que están en contacto con la fuente de calor. Los parámetros son los siguientes:

- **Espesor de pared del cilindro (mm): 4**
- **Conductividad del material del cilindro (W K/m): 82.5**
- **Densidad del material del cilindro (Kg/m<sup>3</sup>): 6750**
- **Calor específico del material del cilindro (J K/ Kg): 405**
- **Espesor de pared del pistón (mm): 17.25**
- **Conductividad del material del pistón (W K/m): 204**
- **Densidad del material del pistón (Kg/m<sup>3</sup>): 2700**
- **Calor específico del material del pistón (J K/ Kg): 900**
- **Espesor de pared de la cabeza del cilindro (mm): 6.5**
- **Conductividad del material de la cabeza del cilindro (W K/m): 204**
- **Densidad del material de la cabeza del cilindro (Kg/m<sup>3</sup>): 2700**
- **Calor específico del material de la cabeza del cilindro (J K/ Kg): 900**
- **Área del pistón (cm<sup>2</sup>): 130**
- **Temperatura media del pistón (°C): 260**
- **Área de la cabeza del cilindro (cm<sup>2</sup>): 37.39**
- **Temperatura media del cilindro: 240**

En segundo lugar, se realizan las configuraciones relacionadas con los coeficientes de corrección de la transmisión de calor. En este apartado se incluyen los coeficientes de Woschni, del modelo teórico descrito en el capítulo 2. Los parámetros son los siguientes:

- **Ajuste de transferencia de calor del coeficiente de admisión: 1**
- **Ajuste de transferencia de calor del coeficiente de escape: 1**
- **Coeficiente de transferencia de calor por Woschni (CW1): 0,45**
- **Coeficiente de transferencia de calor por Woschni (CW2): 0,265**
- **Coeficiente de transferencia de calor por Woschni (Xpe): 1**
- **Par de motor a potencia máxima (Nm): 10.5 (Valor máximo para el motor seleccionado)**

Para el motor HATZ 1B20 se ha introducido unos valores de coeficientes de Woschni bajos, manteniendo la relación de transferencia de calor  $r_t = 1,7$  descrito para el movimiento de los flujos dentro del cilindro del tipo tumble. Debido a que OpenWAM no discrimina el tipo de fluido de refrigeración utilizado en el motor es necesario reducir los valores de los coeficientes CW1 y CW2 para ajustar la consideración del modelo refrigerado por agua.

### **3. SIMULACIÓN DEL MODELO DEL MOTOR HATZ 1B20 CON OPENWAM**

Después de haber finalizado las configuraciones del modelo en las distintas condiciones de operación previstas, se generaron todos los archivos necesarios para la realización de las simulaciones del modelo utilizando el programa ejecutable OpenWAM, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 1.4 del documento anexo de procedimiento de configuración.

Cabe destacar, que el estado de simulación planteado en el modelo se realiza en condiciones de funcionamiento constantes en el número de ciclos definido por el desarrollador, por lo que cada punto de operación se estudia de forma independiente.

Los datos de entrada de las condiciones de operación que se introducen en el modelo son el régimen de motor (rpm), la masa de aire consumida inicial por ciclo de motor (g/ciclo) y la masa de combustible inyectado por ciclo de motor (g/ciclo).

En las distintas simulaciones planteadas, los valores de entrada se imponen después de haberse obtenido en el ensayo experimental para poder contrastar los resultados obtenidos en el modelo con los resultados de los ensayos con las mismas condiciones de operación. A continuación, se adjuntan las tablas en las que se muestran los parámetros de entrada de cada simulación realizada.

N° de simulación	Régimen [rpm]	Par motor [Nm]	$\dot{m}_{\text{aire}}$ [mg/ciclo]	$\dot{m}_{\text{combustible}}$ [mg/ciclo]
1	1500	2,0	0,1856	4,168
2	1500	4,0	0,1840	5,176
3	1500	6,0	0,1768	6,256
4	1500	8,0	0,1672	8,112

Tabla 6: Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 1500 rpm

N° de simulación	Régimen [rpm]	Par motor [Nm]	$\dot{m}_{\text{aire}}$ [mg/ciclo]	$\dot{m}_{\text{combustible}}$ [mg/ciclo]
1	2250	2,0	0,1659	3,392
2	2250	4,0	0,1637	4,448
3	2250	6,0	0,1600	5,883
4	2250	8,0	0,1600	7,696

Tabla 7: Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 2250 rpm

N° de simulación	Régimen [rpm]	Par motor [Nm]	$\dot{m}_{\text{aire}}$ [mg/ciclo]	$\dot{m}_{\text{combustible}}$ [mg/ciclo]
1	3000	2,0	0,1456	3,660
2	3000	4,0	0,1432	5,004
3	3000	6,0	0,1420	6,524
4	3000	8,0	0,1372	8,336

Tabla 8: Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 3000 rpm

Como se puede apreciar, se realizan cuatro simulaciones por cada intervalo de revoluciones de motor planteado, con un número total de 12 simulaciones del modelo para este estudio. En el siguiente gráfico se muestra el mapa de calibración del modelo planteado con los puntos de operación descritos, con los que se busca el objetivo de abarcar distintos grados de carga del motor en el rango de funcionamiento (régimen) habitual del motor.

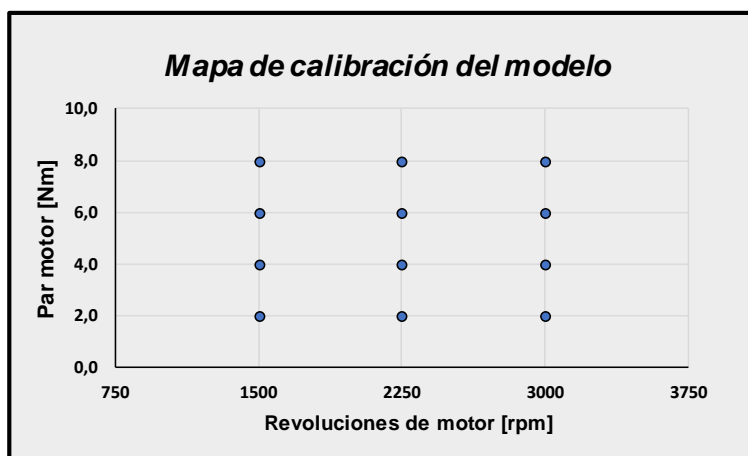


Figura 23: Representación gráfica del mapa de calibración del modelo

Además, se realizan 4 simulaciones adicionales del modelo para reproducir la curva característica de las pérdidas mecánicas obtenidas en el motor. Estos puntos de operación deben reproducir el comportamiento de la curva de pérdidas mecánicas obtenidas por el método de arrastre, por lo tanto, en el proceso de configuración de estos puntos de estudio, se deben introducir valores de masa de combustible consumido por ciclo nulos, ya que el par de arrastre se hace por medio de un accionador externo (el motor gira en vacío).

En el siguiente gráfico se muestran los puntos de operación definidos en el modelo para el cálculo de las pérdidas mecánicas en términos de potencia.

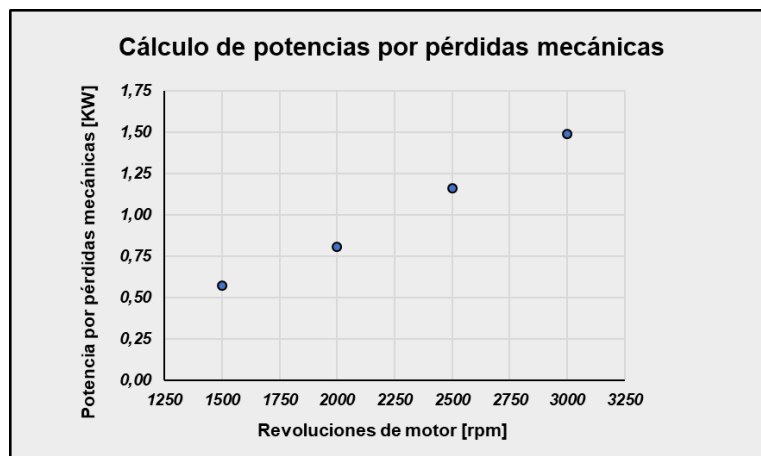


Figura 30: Representación gráfica de los puntos de operación para el cálculo de pérdidas de carga con el modelo

## Capítulo 6 – ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se realizará un análisis detallado de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas con el motor HATZ 1B20. El presente estudio tiene como objetivo principal, validar el modelo de motor virtual planteado con el software OpenWAM. Para ello, se evalúan los parámetros característicos del motor mediante el método de comparación modelo-ensayo, con el objetivo de validar el modelo y confirmar que los resultados obtenidos presentan un grado de precisión aceptable.

Para validar el modelo de motor virtual se ha determinado que los resultados del estudio modelo-ensayo deben representar un margen de error no superior a un 10 %. Este valor límite se fija por las siguientes condiciones:

- **Limitaciones del banco de ensayos utilizado:**

Para la obtención de información del ensayo experimental, el equipo no dispone de un sistema de monitorización y registro de datos completo que permita obtener resultados de forma precisa.

Un ejemplo es la lectura del consumo de combustible, el cual se emplea el método volumétrico que consiste en medir el tiempo necesario para consumir un volumen de combustible conocido. Para ello el banco dispone de una probeta graduada conectada en el sistema de alimentación de combustible. Este tipo de métodos no son precisos debido a que depende de la densidad y temperatura del combustible, por lo que se producen variaciones que deben controlarse durante los ensayos.

- **Disponibilidad de los datos técnicos del motor limitada:**

En el proceso de obtención de documentación o información relativa al motor HATZ 1B20 no fue posible disponer algunos datos técnicos del mismo, imposibilitando la configuración idónea de parámetros importantes como son los perfiles de liberación de calor para la combustión o el diagrama de sincronización de las válvulas. En este caso se utilizó información disponible de motores con especificaciones equivalentes o se realiza una estimación aproximada.

Se debe tener en cuenta que, para un estudio inicial del modelo de motor virtual, el margen de error fijado permite representar el comportamiento del motor en distintas condiciones de operación con un grado de precisión elevado, por lo que es posible estudiar posteriormente aspectos específicos del motor o realizar propuestas de optimización de sistemas en el motor.

## 2. RESULTADOS COMPARATIVOS DEL MODELO-ENSAYO EXPERIMENTAL

En este apartado se analizará el conjunto de resultados obtenidos en el proceso de ensayo experimental y posterior modelado del motor. A modo de recordatorio, para reproducir en el modelo las mismas condiciones de operación medidas en el ensayo experimental, se impone el régimen de giro y el consumo de combustible por ciclo obtenidos experimentalmente.

Posteriormente, en cada simulación planteada, se obtiene un importante número de variables de salida, como el par efectivo, la potencia efectiva, el rendimiento volumétrico, etc. En apartado 2 del documento Anexo de Cálculos se incluye el contenido extraído de resultados obtenidos durante todo el proceso de ensayo y modelado.

Para el análisis de resultados obtenidos, se muestran las siguientes tablas que contienen una comparación medido-modelado de los parámetros de motor más relevantes, en las que se puede observar que todos los parámetros se encuentran en un porcentaje  $\pm 10\%$ , cumpliendo el objetivo inicial propuesto para la validación del modelo.

	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			$\eta_v$ [%]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	2	2,13	6%	0,31	0,33	6%	70,74	72,84	3%
	4	4,07	2%	0,63	0,64	2%	70,16	72,65	4%
	6	5,96	-1%	0,94	0,94	-1%	67,86	72,56	7%
	8	8,10	1%	1,26	1,27	1%	66,71	72,52	9%
2250 rpm	2	2,04	2%	0,47	0,48	2%	63,26	60,02	-5%
	4	3,91	-2%	0,94	0,92	-2%	62,50	59,95	-4%
	6	6,20	3%	1,41	1,46	3%	60,96	59,83	-2%
	8	7,70	-4%	1,88	1,81	-4%	60,96	59,83	-2%
3000 rpm	2	2,03	1%	0,63	0,64	1%	54,92	50,17	-9%
	4	3,89	-3%	1,26	1,22	-3%	54,64	50,16	-8%
	6	5,67	-6%	1,88	1,78	-6%	54,06	50,08	-7%
	8	7,71	-4%	2,51	2,42	-4%	52,34	50,00	-4%

Tabla 9: Resultados comparativos principales (1) del ensayo - modelo



	Dosado [f]			SFC <sub>e</sub> [g/KWh]			T <sup>a</sup> <sub>ESC</sub> [°C]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	0,0207	0,0204	-2%	551,16	518,79	-6%	161	170,25	6%
	0,0281	0,0274	-2%	370,60	364,63	-2%	214	213,47	0%
	0,0366	0,0347	-5%	311,52	314,19	1%	278	264,38	-5%
	0,0463	0,0431	-7%	290,47	287,20	-1%	348	329,80	-5%
2250 rpm	0,0236	0,0256	8%	561,96	563,05	0%	206	204,71	-1%
	0,0321	0,0338	5%	377,11	386,11	2%	278	256,68	-8%
	0,0431	0,0444	3%	329,43	318,94	-3%	341	329,75	-3%
	0,0500	0,0515	3%	286,60	298,13	4%	400	395,04	-1%
3000 rpm	0,0298	0,0329	11%	614,15	607,51	-1%	254	243,05	-4%
	0,0388	0,0427	10%	398,06	409,50	3%	321	306,65	-4%
	0,0481	0,0525	9%	325,68	345,08	6%	397	378,81	-5%
	0,0607	0,0642	6%	298,54	309,98	4%	477	474,72	0%

Tabla 10: Resultados comparativos principales (2) del ensayo - modelo

A continuación, se describirá en los siguientes apartados los parámetros de motor incluidos en las tablas para los análisis individualizados de los mismos:

## 2.1. ANÁLISIS DEL PAR MOTOR EFECTIVO

Para el análisis del par de motor, en la tabla 11 se muestran los valores obtenidos en función de las revoluciones de motor. Adicionalmente se muestra la celda correspondiente del porcentaje de error del ensayo-modelo.

	Par efectivo [Nm]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	2	2,13	6%
	4	4,07	2%
	6	5,96	-1%
	8	8,10	1%
2250 rpm	2	2,04	2%
	4	3,91	-2%
	6	6,20	3%
	8	7,70	-4%
3000 rpm	2	2,03	1%
	4	3,89	-3%
	6	5,67	-6%
	8	7,71	-4%

Tabla 11: Resultados comparativos de ensayo-modelo del par efectivo

Como se puede ver, los resultados obtenidos en el modelo se aproximan considerablemente a los valores objetivos fijados en el ensayo experimental, por lo que se determina que el modelo reproduce el comportamiento planteado con un grado de fidelidad alto. No se refleja una tendencia de comportamiento gradual, debido a que los valores de par de motor obtenidos en el modelado tienen una importante dependencia de los gastos máxicos de los flujos de aire y combustible. En el siguiente gráfico se muestra una representación de la desviación de los puntos de operación calculados respecto a la línea de tendencia de par de motor inicial.

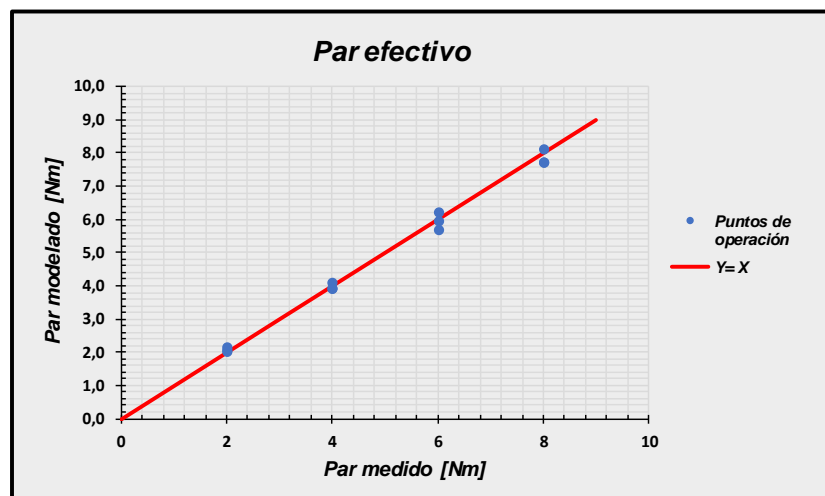


Figura 31: Representación gráfica del par efectivo medido-modelado

La gráfica muestra de forma muy representativa como los distintos puntos de operación del par motor obtenidos en el modelo se ajustan con mucha precisión en la línea representativa de los intervalos de par en el ensayo.

Para representar el comportamiento del motor desarrollado con el modelo respecto al intervalo de valores de ensayo se muestra en la siguiente gráfica la curva característica de par motor a 2250 rpm, en el que se aprecia un buen ajuste del modelo para cada punto de simulación.

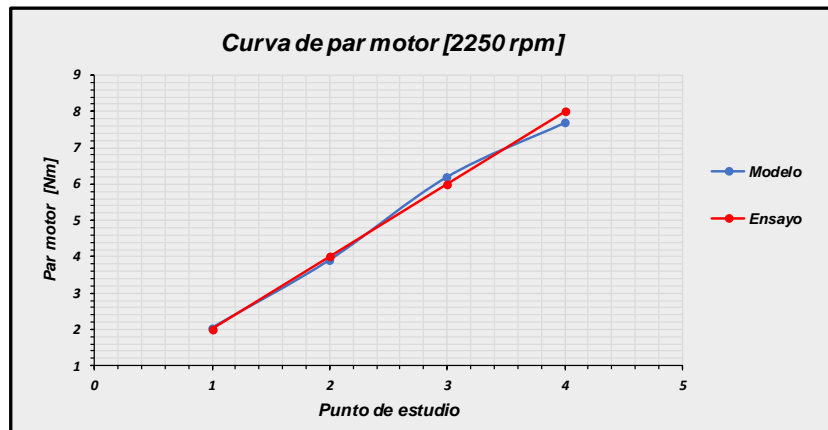


Figura 32: Representación gráfica de las curvas ensayo- modelo del par motor a 2250 rpm

Los resultados obtenidos en el término de par efectivo ( $M_e$ ) representan un comportamiento del modelo muy aproximado al comportamiento del motor real durante el ensayo experimental, por lo que se puede determinar que el modelo configurado tiene capacidad de predecir el par efectivo del motor con un alto grado de fidelidad.

## 2.2. ANÁLISIS DE LA POTENCIA EFECTIVA

Para el análisis de la potencia efectiva obtenida, se muestran los resultados obtenidos en la tabla 12.

	Potencia efectiva [KW]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	0,31	0,33	6%
	0,63	0,64	2%
	0,94	0,94	-1%
	1,26	1,27	1%
2250 rpm	0,47	0,48	2%
	0,94	0,92	-2%
	1,41	1,46	3%
	1,88	1,81	-4%
3000 rpm	0,63	0,64	1%
	1,26	1,22	-3%
	1,88	1,78	-6%
	2,51	2,42	-4%

Tabla 12: Resultados comparativos de ensayo-modelo de la potencia efectiva

El porcentaje de error obtenido en la comparación de resultados ensayo-modelo de la potencia efectiva en cada uno de los puntos de estudios es muy bajo, por lo que se puede interpretar que en estos resultados existe un grado de fidelidad alto. Como era de esperar, el margen de error de la comparación entre potencias es equivalente al margen de error obtenido en el par motor, debido a que sus términos están directamente relacionados en el cálculo al imponer el régimen de giro y el gasto másico de combustible por ciclo. En el siguiente gráfico podemos ver la aproximación de los puntos de operación frente a la línea 'modelo = ensayo' que representa los puntos de exactitud entre el modelo y el ensayo

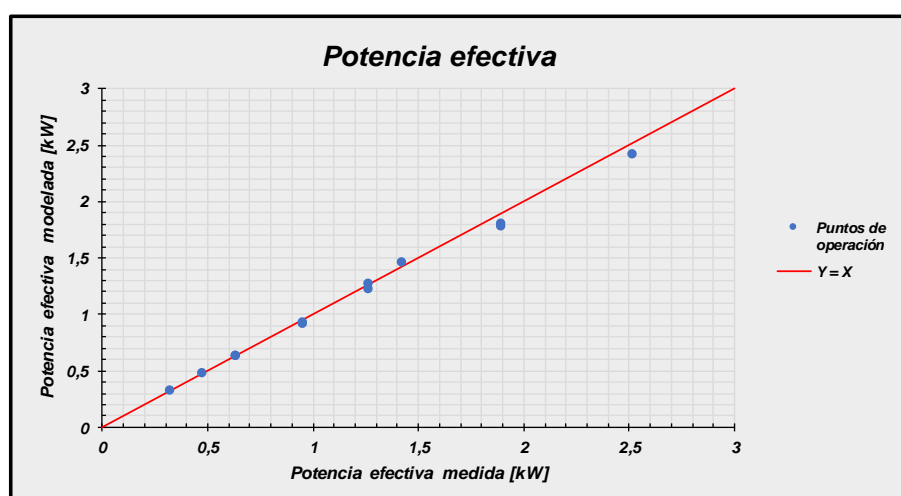


Figura 33: Representación gráfica de la potencia efectiva medido-modelado

En el gráfico siguiente se muestran los puntos de operación de las potencias obtenidas en el ensayo y el modelo para representar proximidad de los resultados en la comparativa de cada punto de estudio. Se puede apreciar que en los puntos de estudio de las pruebas realizadas existen variaciones mínimas en la comparativa de ensayo-modelo, existiendo un mayor alejamiento en los puntos de estudio N°4, que corresponden a el valor de par mayor (Nm).

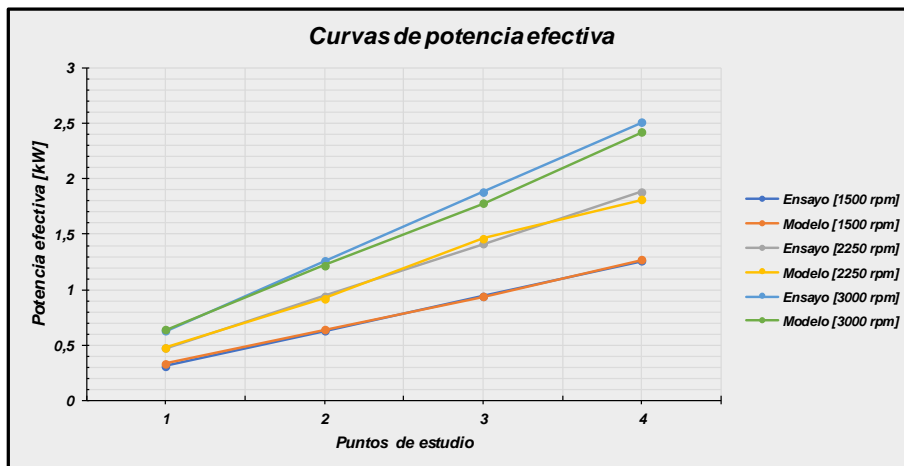


Figura 34: Representación gráfica de las curvas de potencia efectiva medido-modelado

De los resultados obtenidos en el término de potencia efectiva, se puede concluir que el modelo predice de forma muy precisa el comportamiento real del motor, ya que se dispone de unos porcentajes de error muy bajos en cada uno de los puntos de operación estudiados.

### 2.3. ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO

Para el análisis del rendimiento volumétrico, se dispone de la tabla 13 para evaluar el porcentaje de error obtenido en los resultados de ensayo-modelos obtenidos.

	$\eta_v$ [%]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	70,74	72,84	3%
	70,16	72,65	4%
	67,86	72,56	7%
	66,71	72,52	9%
2250 rpm	63,26	60,02	-5%
	62,50	59,95	-4%
	60,96	59,83	-2%
	60,96	59,83	-2%
3000 rpm	54,92	50,17	-9%
	54,64	50,16	-8%
	54,06	50,08	-7%
	52,34	50,00	-4%

Tabla 13: Resultados comparativos de ensayo-modelo del rendimiento volumétrico

En este caso, los resultados obtenidos proporcionan un margen de error cercanos al 10%. Si bien, la mayoría de los puntos de operación tienen una precisión entre el modelo y el ensayo elevada, nos encontramos con otros valores con un alejamiento mayor. En el gráfico de comparación de ensayo-modelo se puede apreciar el alejamiento de los puntos frente a la recta  $Y = X$  que indica el punto ideal entre el modelo y el ensayo.

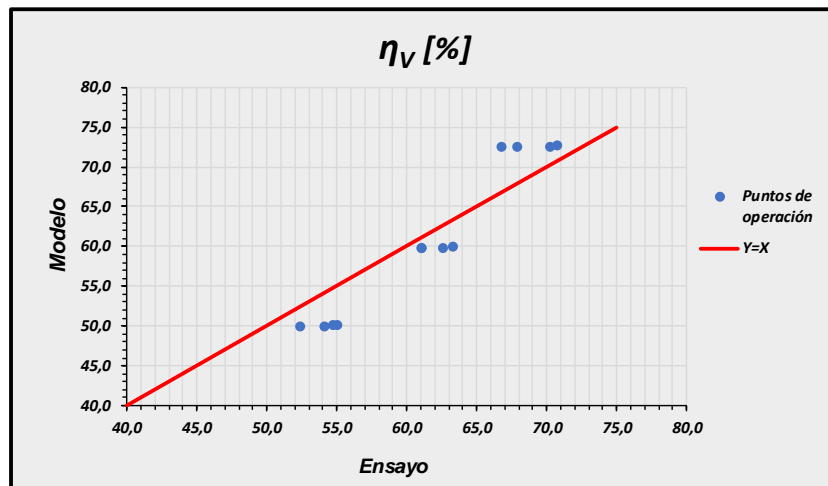


Figura 35: Representación gráfica del rendimiento volumétrico medido-modelado

Para tener una mejor interpretación del comportamiento del motor en lo que se refiere a rendimiento volumétrico, se adjunta el siguiente gráfico que permite apreciar el alejamiento de las curvas de ensayo (especialmente para los rangos de régimen de 1500 y 3000 rpm) con respecto a los resultados obtenidos en el modelo de motor virtual.

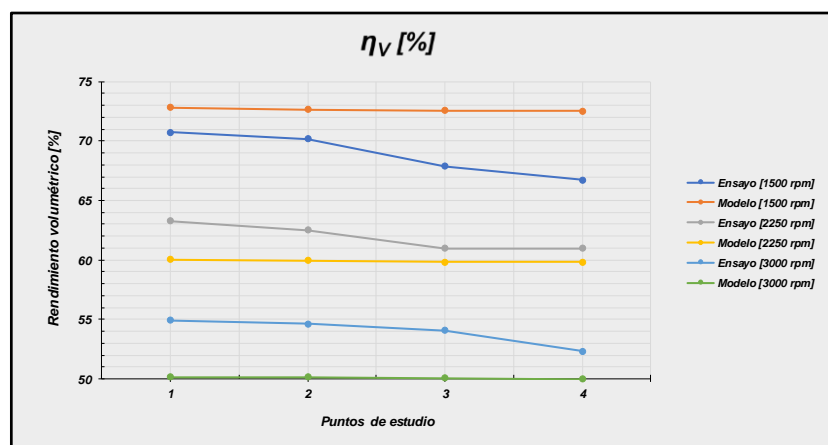


Figura 36: Representación gráfica de las curvas de rendimiento volumétrico medido-modelado

Estas diferencias no son especialmente sensibles, pero son producidas a que en el modelo no se pudo reproducir el descenso del rendimiento volumétrico a medida que se incrementa la carga del motor, tal como se pudo medir en el ensayo. Los errores que se encuentran en el rendimiento volumétrico se deben, principalmente, a dos factores:

- En el flujo del aire de admisión se produce una pérdida de presión debido a la resistencia producida en los diferentes elementos instalados en el sistema de admisión (conductos, filtros, depósitos).
- La transmisión de calor en las pipas de admisión. En este caso se puede comprobar que existe una menor sensibilidad del modelo cuando predice la caída del rendimiento volumétrico al incrementar la carga, y en consecuencia, la transmisión de calor.

Otra causa son las variaciones obtenidas (ensayo-modelo) en el gasto másico de aire de admisión ( $\dot{m}_a$ ), debido a que en el modelo se fija un valor inicial de este término, pero posteriormente predice el gasto necesario en los ciclos de funcionamiento de motor.

Teniendo en cuenta que en el modelo no se pudo implementar el diagrama de sincronización de las válvulas de admisión y escape específico del motor al no disponer de la información necesaria se optó por configurar un diagrama equivalente, por lo que no ha sido posible obtener un ajuste del rendimiento volumétrico optimizado.

Por los motivos descritos anteriormente, los resultados obtenidos en el término de rendimiento volumétrico ( $\eta_v$ ) muestran un grado de fidelidad del modelo frente al comportamiento del motor aceptable, por lo que se considera válido el modelo empleado.

## **2.4. ANÁLISIS DEL DOSADO**

En el análisis del dosado, se muestran los resultados obtenidos en la tabla 14 siguiente en función de las revoluciones de motor, en las que adicionalmente contiene la celda del porcentaje de error del ensayo-modelo con las que se evalúa la precisión obtenida en la comparación del modelo con el ensayo.

	Dosado [f]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	0,0207	0,0204	-2%
	0,0281	0,0274	-2%
	0,0366	0,0347	-5%
	0,0463	0,0431	-7%
2250 rpm	0,0236	0,0256	8%
	0,0321	0,0338	5%
	0,0431	0,0444	3%
	0,0500	0,0515	3%
3000 rpm	0,0298	0,0329	11%
	0,0388	0,0427	10%
	0,0481	0,0525	9%
	0,0607	0,0642	6%

Tabla 14: Resultados comparativos de ensayo-modelo del dosado

En este caso, el porcentaje de error de cada uno de los puntos de estudios es equivalente a los porcentajes obtenidos en el término del rendimiento volumétrico. Se debe a que, en este estudio, el gasto másico de combustible ( $\dot{m}_c$ ) se impone el valor medido del ensayo, por lo que esta función depende implícitamente del gasto másico de aire ( $\dot{m}_a$ ).

A continuación, se muestra el gráfico del dosado correspondiente para cada punto de operación y régimen del motor, en las que se puede apreciar la tendencia del dosado con una precisión aceptable, dados los resultados obtenidos.

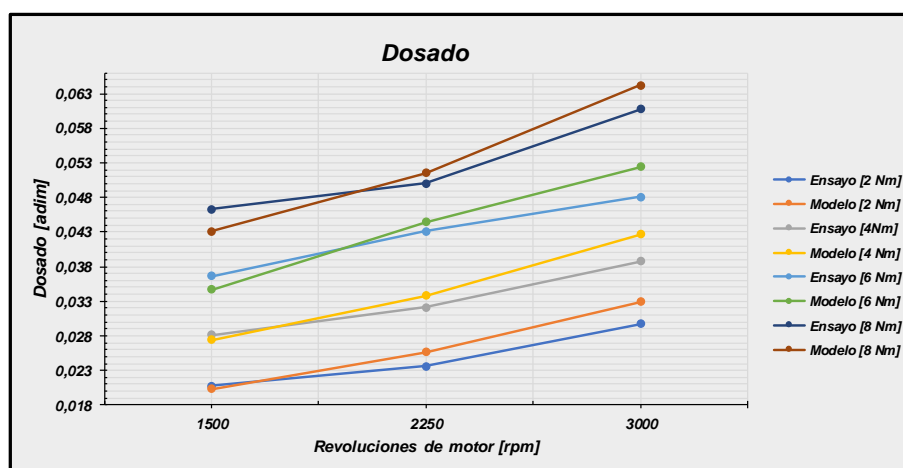


Figura 37: Representación gráfica de las curvas de dosado medido-modelado



De los resultados obtenidos en el término del dosado, se considera que el modelo puede simular adecuadamente el comportamiento del motor obtenido en el ensayo experimental.

## 2.5. ANÁLISIS DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE

Los resultados obtenidos del consumo específico de combustible se muestran en la tabla 15. Se puede apreciar que los resultados en la comparación de cada punto de operación muestran un buen grado de ajuste, por lo que el porcentaje de error del ensayo-modelo cumple el objetivo fijado ( $\leq 10\%$ ).

	<i>SFC<sub>e</sub> [g/KWh]</i>		
	<i>Ensayo</i>	<i>Modelo</i>	<i>Error [%]</i>
<b>1500 rpm</b>	551,16	518,79	-6%
	370,60	364,63	-2%
	311,52	314,19	1%
	290,47	287,20	-1%
<b>2250 rpm</b>	561,96	563,05	0%
	377,11	386,11	2%
	329,43	318,94	-3%
	286,60	298,13	4%
<b>3000 rpm</b>	614,15	607,51	-1%
	398,06	409,50	3%
	325,68	345,08	6%
	298,54	309,98	4%

Tabla 15: Resultados comparativos de ensayo-modelo del consumo específico de combustible

Para evaluar la desviación de los puntos de operación frente a la línea de división ideal ( $Y=X$ ) se muestra el gráfico de la figura 38. Los puntos de operación se sitúan muy próximos a dicha línea por lo que se refleja un buen acercamiento de los resultados obtenidos entre el modelo y el ensayo experimental.

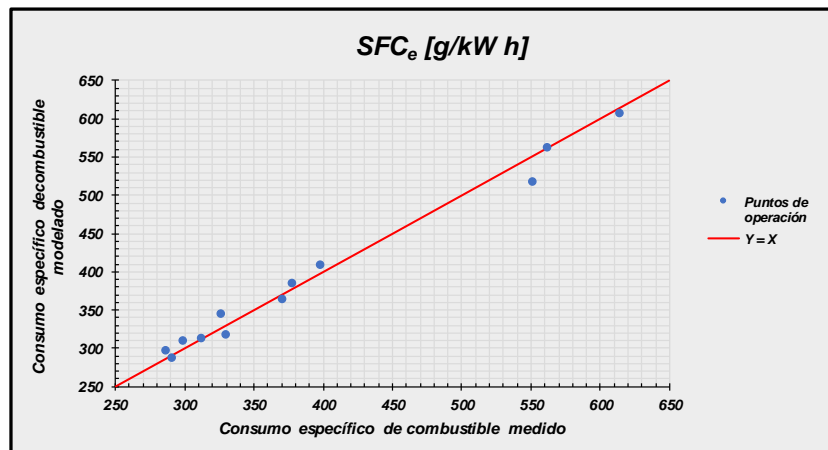


Figura 38: Representación gráfica del rendimiento volumétrico medido-modelado

En las figuras siguientes, se muestran los ejemplos de las curvas de características del consumo específico de combustible frente a los puntos de estudio realizados para cada régimen del motor, en las que se aprecia que la tendencia del en cada una de las representaciones del modelo es fiel a las curvas obtenidas en el ensayo experimental.

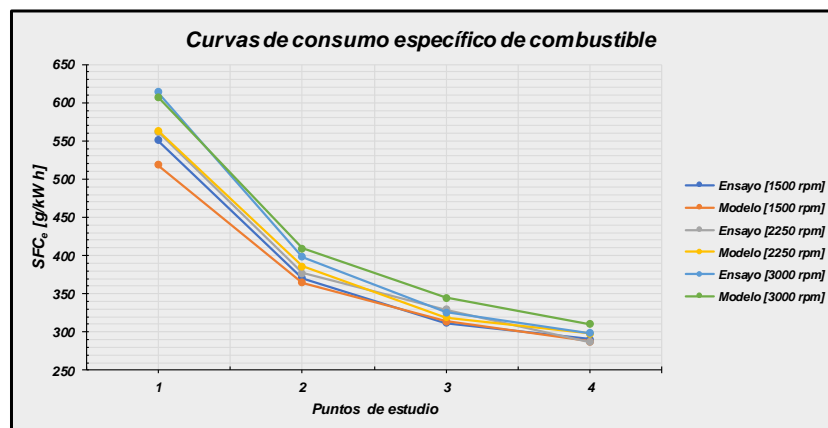


Figura 39: Representación gráfica de las curvas de consumo específico de combustible medido-modelado

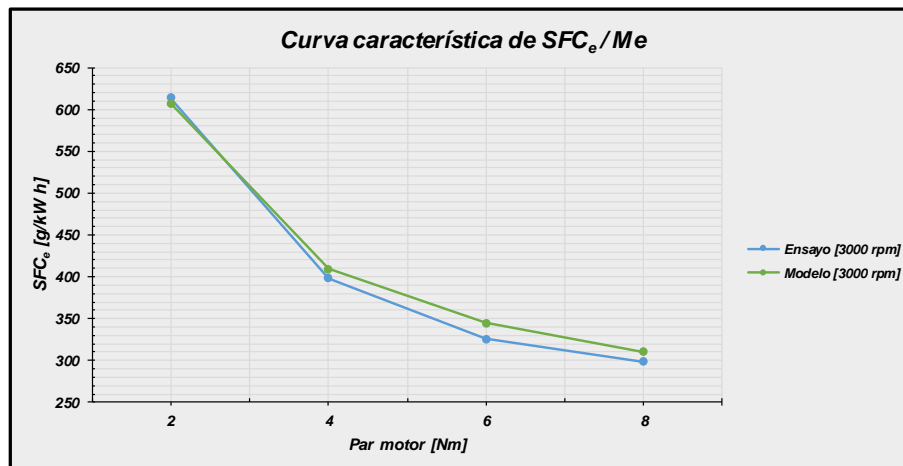


Figura 40: Representación gráfica de las curvas ensayo- modelo del consumo específico de combustible a 3000 rpm

De los resultados obtenidos en el término del consumo específico de combustible, podemos concluir que el modelo predice con un buen grado de precisión el comportamiento del gasto de combustible frente a unidades de potencia y tiempo del motor real.

## 2.6. ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE

Otro método adecuado para validar el modelo de motor virtual frente a un motor real es el análisis de los gases de combustión. El estudio no tiene como objeto la evaluación de las emisiones contaminantes al no utilizar un equipo de análisis de gases, por lo que se centrará únicamente en el comportamiento de la temperatura de los gases de escape en las diferentes condiciones de operación estudiadas.

Para el análisis de los gases de combustión ( $T_{esc}$ ), se muestran los resultados obtenidos en la tabla 16. Los resultados obtenidos en la comparación muestran un buen grado de ajuste, por lo que el porcentaje de error del ensayo-modelo cumple el objetivo fijado ( $\leq 10\%$ ).

	$T_{esc} [^{\circ}C]$		
	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	161	170,25	6%
	214	213,47	0%
	278	264,38	-5%
	348	329,80	-5%
2250 rpm	206	204,71	-1%
	278	256,68	-8%
	341	329,75	-3%
	400	395,04	-1%
3000 rpm	254	243,05	-4%
	321	306,65	-4%
	397	378,81	-5%
	477	474,72	0%

Tabla 16: Resultados comparativos de ensayo-modelo de los gases de escape.

Para evaluar la desviación de los puntos de temperatura frente a la línea de división ideal ( $Y=X$ ) se adjunta el gráfico siguiente. Los puntos de operación se sitúan muy próximos a dicha línea por lo que se refleja un buen acercamiento de los resultados obtenidos entre el modelo y el ensayo experimental.

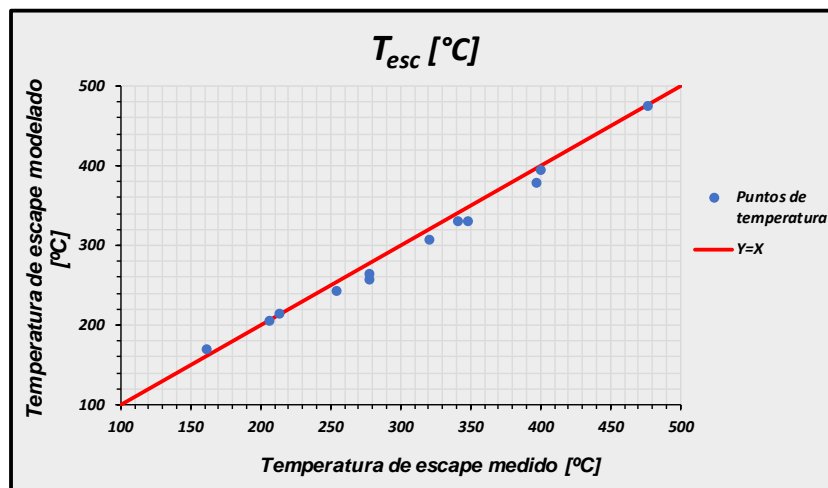


Figura 41: Representación gráfica de la temperatura de gases de escape medido-modelado

Para analizar el comportamiento de la temperatura de los gases de escape en cada uno de los puntos de estudio, se muestra el gráfico de la figura 42 en el que se puede apreciar la tendencia de la temperatura para cada intervalo de régimen de motor en el

rango de par motor estudiado. Las curvas de modelo-ensayo indican un buen ajuste del modelo con los resultados obtenidos experimental, lo que se traduce en que el modelo predice la temperatura de los gases de combustión correctamente.

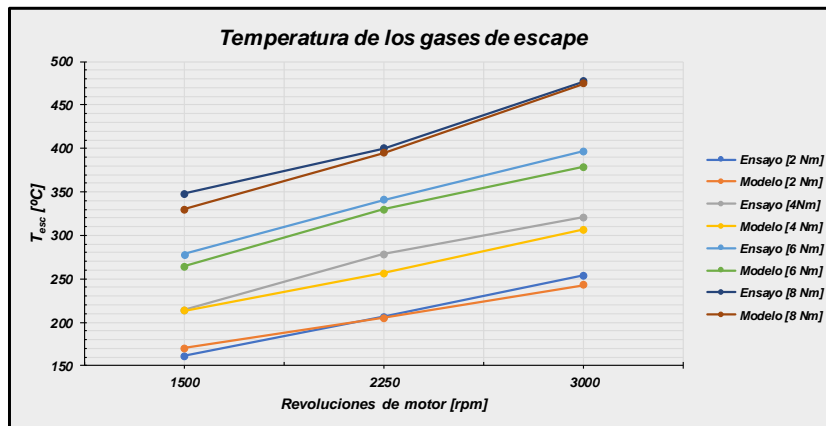


Figura 42: Representación gráfica de las curvas de temperatura de gases de escape medido-modelado

En la representación gráfica de la figura 43 se realiza el análisis comparativo del comportamiento de la temperatura de los gases de escape frente al valor de dosado obtenido en cada punto de ensayo para el régimen de 1500 rpm. Se puede comprobar que el modelo tiene una tendencia de comportamiento muy similar al obtenido en el ensayo con un pequeño alejamiento en los puntos de operación de carga alta, sin ser destacables en los resultados obtenidos. El gráfico demuestra que el aumento de temperatura de los gases de escape crece linealmente a medida que se aumenta el dosado.

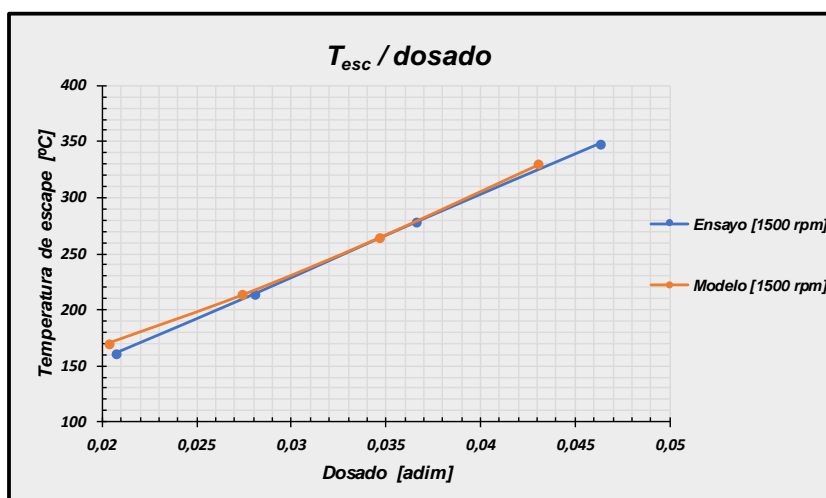


Figura 43: Representación gráfica de las curvas de la temperatura de los gases de escape frente al dosado

Los resultados obtenidos en la comparación modelo-ensayo muestra que el modelo realizado con OpenWAM puede calcular la temperatura de los gases de combustión de forma muy precisa, lo que refleja que tanto la combustión como la transmisión de calor en el escape son aceptables. Por lo tanto, se consideran satisfactorios los resultados obtenidos en el modelo.

## 2.7. ANÁLISIS DEL LAZO DE BOMBEO CON EL DIAGRAMA P-V

Para el análisis de funcionamiento del motor, unos de los apartados importantes en el proceso de operación es la evaluación del lazo de bombeo del cilindro en cada ciclo de motor. Para ello, el método de representación más utilizado es el diagrama de presión del flujo frente al volumen contenido en el interior del cilindro, conocido como diagrama indicador.

Para este estudio, solo fue posible realizar la representación del lazo de bombeo del motor HATZ con el modelo planteado con OpenWAM, el cual se mostrará posteriormente. En el caso del análisis del lazo de bombeo en un ensayo experimental, es estrictamente necesario instalar en el motor un sensor que permita medir la presión instantánea en la cámara de combustión. Para el ensayo experimental realizado no se disponía de dicho sensor, por lo que no es posible medir la presión en cámara en cada punto del ángulo de giro del motor.

En la figura 44 se muestra un ejemplo de diagrama P-V teórico de un motor de 4T que permitirá reconocer el gráfico de lazo de bombeo obtenido en el modelo [6]. En esta figura también se indican los puntos de apertura y cierre de las válvulas.

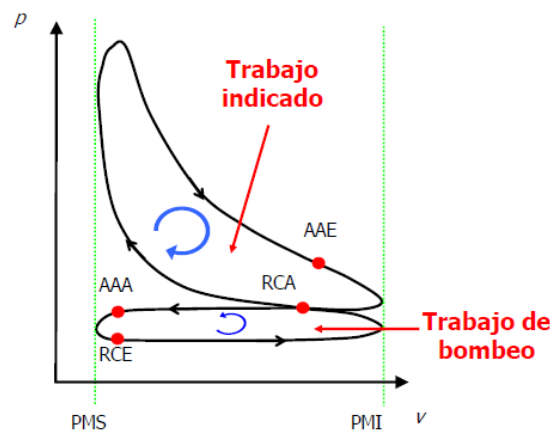


Figura 44: Ejemplo gráfico teórico del diagrama P-V

A continuación, se muestra en la figura 45 la representación del lazo de bombeo obtenido en el modelo. Debido a la escala que presenta el mismo, no es posible apreciar adecuadamente el ciclo de trabajo inferior, por lo que se dispone del gráfico en la figura 46 con una escala ampliada de este ciclo con los puntos de apertura y cierre de válvulas configurados.

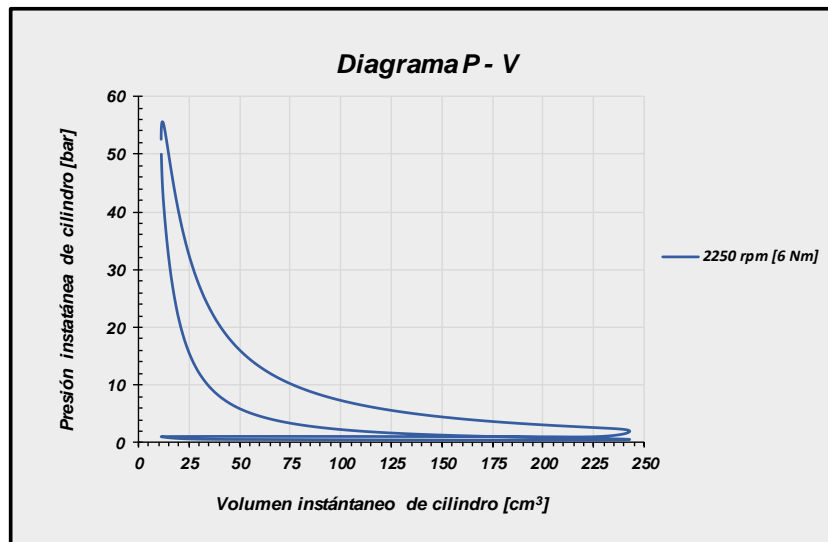


Figura 45: Representación gráfica del diagrama P-V obtenido en el modelo

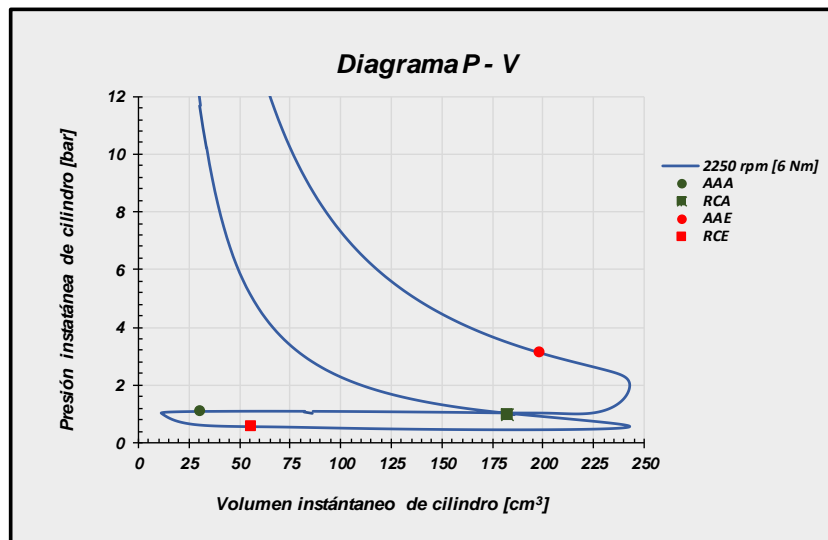


Figura 46: Representación gráfica del diagrama P-V ampliado obtenido en el modelo

Se puede comprobar que el lazo de bombeo obtenido por el modelo presenta una configuración específica, propia de las características desarrolladas por el motor empleado. No es posible determinar el alejamiento del modelo con respecto al motor real, ya que de haber dispuesto de esa información nos hubiese permitido analizar el comportamiento del bombeo y hubiese aportado datos relevantes como el comportamiento de la sincronización de las válvulas durante el ciclo.

## **2.8. CONCLUSIONES EN LOS RESULTADOS**

Para el estudio, se ha fijado un porcentaje de error  $\leq 10\%$ . Este valor se utiliza comúnmente en desarrollos iniciales de motores térmicos, por lo que el margen de error definido para el modelo propuesto es similar a cualquier modelo empleado en un desarrollo de un motor real.

Los resultados obtenidos en el modelo frente al ensayo para cada uno de los parámetros característicos del motor se sitúan por debajo del límite fijado, con unos valores coherentes entre ellos y reproduciendo el mismo comportamiento de operación del motor, por lo que con el análisis de todos los apartados de resultados descritos, donde el grado de precisión de los valores del ensayo experimental frente al modelo es muy alto, se puede determinar que la construcción y configuración planteado en el modelo del motor HATZ 1B20 con OpenWAM se ha realizado de forma muy satisfactoria.

Por lo descrito anteriormente, para el presente estudio, se concluye el que modelo computacional del motor HATZ 1B20 planteado con el software OpenWAM puede reproducir y exportar los resultados de los diferentes parámetros característicos del motor real con un grado de fidelidad alto, por lo que se determina que el modelo tiene argumentos suficientes para ser validado con éxito.



## Capítulo 7 – PROPUESTAS DE IMPLEMENTACIÓN AL MOTOR HATZ 1B20

### 1. INTRODUCCIÓN

En el modelado computacional de motores térmicos de combustión alternativa, se realizan actualmente diferentes estudios relacionadas con el desarrollo y optimización de los motores. En este capítulo, utilizando la base del motor estudiado, se realizarán dos propuestas de desarrollo para demostrar el potencial que puede tener este tipo de software en el sector de la Ingeniería, especialmente para los departamentos de estudios de máquinas térmicas. Las propuestas seleccionadas son las siguientes:

- Simulación y comparación de las curvas de plena carga del motor HATZ 1B20 aportados por el fabricante.
- Propuesta de sobrealimentación básica del modelo para el análisis de optimización respecto al modelo original.

Con estas propuestas se podrá demostrar que la utilización del modelado de motores mediante un software específico permite al desarrollador disponer de una herramienta de cálculo rápida y fiable para optimizar o implementar motores o sistemas, lo que se traduce finalmente en ahorro de costes económicos y tiempo empleado.

### 2. MODELADO DE LAS CONDICIONES DE PLENA CARGA EN EL MOTOR HATZ 1B20 Y COMPARACIÓN CON LAS CURVAS APORTADAS POR EL FABRICANTE.

Una acción que permite comprobar que el modelo desarrollado reproduce el comportamiento del motor HATZ correctamente, es simular las condiciones establecidas por el fabricante para sus gráficos de curvas de plena carga aportadas en el catálogo comercial [7]. En la figura 47 se muestra el gráfico de las curvas de plena carga correspondiente al manual del fabricante que servirá de referencia para este apartado.

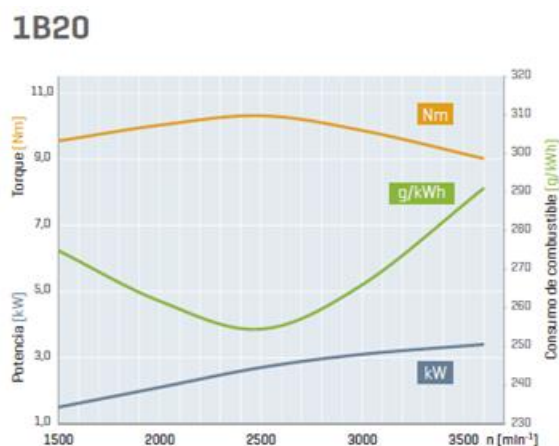


Figura 47: Representación gráfica de curvas de plena carga de parámetros de  $N_e$ ,  $M_e$  y  $SFC_e$

Cabe destacar que este procedimiento se realiza de forma independiente al modelado realizado en el capítulo 5, debido a que las condiciones de plena carga que genera el motor HATZ 1B20 no pueden medirse en los ensayos experimentales con el banco de pruebas GUNT CT-159 al disponer de un límite de potencia de ensayo de hasta 3 kW, por lo que si se compara con el gráfico aportado por el fabricante se superaría el límite de potencia del banco durante el desarrollo del ensayo.

Por este motivo, se utiliza como un buen ejemplo de posibilidad de aplicación realizar el modelado en estas condiciones y posteriormente contrastarlo con los datos aportados por el fabricante para validar el modelo.

A continuación, se describe el procedimiento de configuración de condiciones de plena carga en el modelo.

## 2.1. PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN PARA EL MODELO EN CONDICIONES DE PLENA CARGA

Para poder simular las condiciones de operación de plena carga del motor y reproducir el comportamiento de las curvas características de par efectivo, potencia efectiva y consumo específico de combustible aportados por el fabricante en el gráfico de la figura 46, debe tenerse en cuenta previamente estas consideraciones:

- Según el fabricante, los datos de potencia indicados se rigen por las condiciones de referencia de la norma de potencia ISO 3046-1 (IFN) con:
-

- $T_{(ref)}$ : 25°C
  - $P_{(ref)}$ : 100 kPa
  - 30% de humedad relativa del aire.
- La potencia expuesta se alcanza durante el tiempo de rodaje y en la entrega puede ser en torno a un 5% inferior.
  - Los valores de potencia en función del régimen aportados se obtienen de la tabla de potencia del motor máx. adjunto en el apartado 2.1.1. del capítulo 4 (Datos técnicos).
  - Los valores de par motor y consumo específico de combustible se obtienen directamente de las curvas características del gráfico aportado por el fabricante.

Posteriormente, se utiliza el modelo inicial del motor HATZ para realizar las simulaciones de los puntos de operación necesarios. Para configurar los puntos de operación previstos se introducen los datos necesarios, mostrados en la tabla 17.

<i>Régimen</i> [rpm]	<i>SFC<sub>e</sub></i> [g/kWh]	<i>W<sub>e</sub></i> [KW]	<i>m<sub>aire</sub></i> [g/ciclo]	<i>m<sub>comb</sub></i> [g/ciclo]
1500	274,7	1,5	0,15	9,17
1800	266,8	1,9	0,15	9,17
2000	261,8	2,1	0,15	9,17
2300	255,9	2,5	0,15	9,17
2600	255,3	2,8	0,15	9,17
3000	265,9	3,1	0,15	9,17
3600	290,9	3,4	0,15	9,17

Tabla 17: Datos de entrada para la simulación de los puntos de operación a plena carga

Para la configuración de los valores de gastos máscicos de aire de admisión y combustible se tienen las siguientes consideraciones:

- Se estima un valor inicial de consumo máscico de aire inicial de 0,15 g/ciclo para todos los puntos de estudio, ya que OpenWAM calcula el flujo consumido según las condiciones de operación.
- Se obtiene el consumo máscico de combustible tomando los valores del fabricante del consumo específico de combustible y la potencia efectiva, utilizando la siguiente ecuación [6]:

$$SFC_e = \frac{\dot{m}_c}{W_e} \rightarrow \dot{m}_c = SFC_e \cdot W_e \quad (\text{Ecuación 25})$$

Posteriormente se realiza el cambio de unidades para obtener el consumo de combustible por ciclo. En este punto se confirma que para el grado de carga máximo en todos los puntos de estudio se tiene un gasto másico de combustible por ciclo constante de 9,17 g /ciclo.

Con los datos de entrada introducidos, se realizan las simulaciones correspondientes, del que se obtienen los resultados que se describirán en el siguiente apartado.

## 2.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DEL MODELO EN CONDICIONES DE PLENA CARGA

Con las simulaciones del modelo en las condiciones de plena carga, se obtienen los resultados necesarios para comparar las curvas características aportadas por el fabricante con las curvas generadas por el modelo. En la tabla 18 se muestran los valores del fabricante y del modelo con sus respectivos porcentajes de error.

Régimen [rpm]	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			SFC <sub>e</sub> [g/KWh]		
	Fabricante	Modelo	Error [%]	Fabricante	Modelo	Error [%]	Fabricante	Modelo	Error [%]
1500	9,5	9,6	-1%	1,5	1,5	0%	274,7	273,8	0%
1800	9,8	9,9	-1%	1,9	1,9	2%	266,8	271,9	-2%
2000	10,1	9,8	2%	2,1	2,1	2%	261,8	273,7	-4%
2300	10,2	9,8	5%	2,5	2,4	6%	255,88	269,5	-5%
2600	10,2	9,6	6%	2,8	2,6	7%	255,3	273,0	-6%
3000	9,8	9,4	5%	3,1	2,9	5%	265,9	281,0	-5%
3600	9,0	8,7	4%	3,4	3,3	4%	290,9	304,0	-4%

Tabla 18: Resultados comparativos de parámetros de plena carga fabricante-modelo

Si se comparan los resultados obtenidos por el modelo con los aportados por el fabricante, se aprecia que se mantienen con un porcentaje de error menor de 10%, por lo que se puede determinar que el modelo predice de forma muy aproximada el comportamiento del motor en condiciones de operación a plena carga. También se puede comprobar que el modelo puede predecir variables de interés fuera del rango de calibración utilizado, lo que considera una gran ventaja en otras aplicaciones de interés.

Para analizar las curvas características aportadas por el fabricante, se ha decidido realizar un planteamiento independiente para una mejor interpretación de los gráficos disponibles.

### 2.2.1. Análisis de la curva característica del par efectivo.

Para el análisis de la curva característica del par efectivo del modelo frente a la curva del fabricante, se adjunta el gráfico de la figura 48 en el que se muestra una representación a escala ampliada para una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

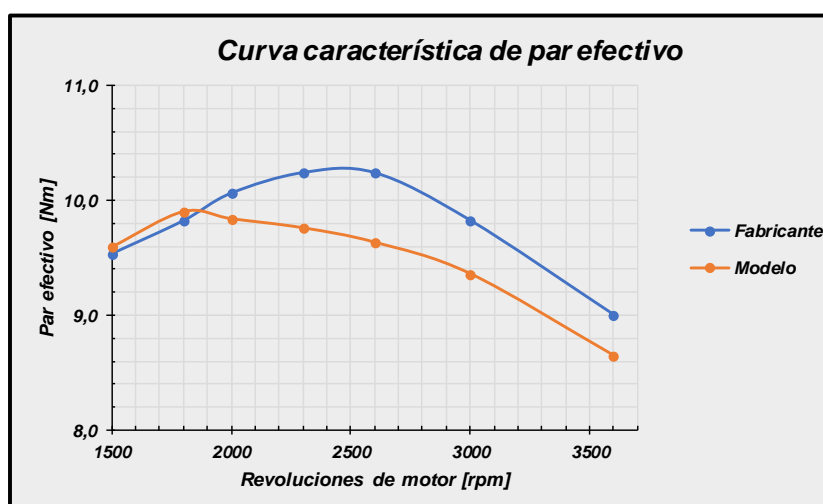


Figura 48: Representación gráfica de la curva de par efectivo a plena carga

La curva característica de par del modelo tiene una moderada desviación respecto a la curva expuesta por el fabricante. Aunque en un primer momento puede parecer una diferencia de valores notable, el margen de error es pequeño, exponiendo su mayor alejamiento para el rango de 2600 rpm con una diferencia de 0,6 Nm (6%).

Del resultado obtenido en la curva de par efectivo, se saca la conclusión que el modelo inicial presenta un ligero error cuando predice el par máximo a 2250 rpm. Si se consultan los resultados de la validación del modelo en el capítulo 6, es posible comprobar que la subestimación del modelo en estas condiciones queda patente en los puntos de mayor carga y régimen, lo que justifica el comportamiento obtenido en la curva de par efectivo a plena carga.

Por este motivo, se consideran válidos los resultados obtenidos por el modelo en términos de par efectivo.

### 2.2.2. Análisis de la curva característica de la potencia efectiva.

Para el análisis de la curva característica de la potencia efectiva del modelo frente a la curva del fabricante, la figura 49 muestra una representación a escala ampliada para una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

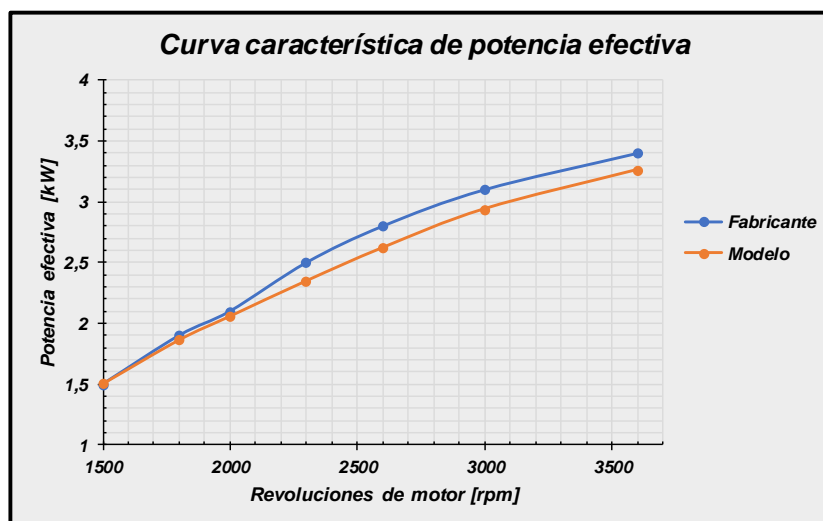


Figura 49: Representación gráfica de la curva de potencia efectiva a plena carga

En este caso, la curva característica obtenida con el modelo representa muy poca desviación respecto a la curva aportada por el fabricante, lo que indica que la tendencia del comportamiento del motor en el modelo es fiel al comportamiento real indicado por el fabricante.

Este ejemplo justifica que la configuración del modelo ha sido muy aproximada a las características reales del motor, ya que predice los resultados de forma muy precisa.

### 2.2.3. Análisis de la curva característica del consumo específico de combustible.

Para el análisis de la curva característica del consumo específico de combustible del modelo frente a la curva del fabricante, la figura 50 muestra una representación a escala ampliada para una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

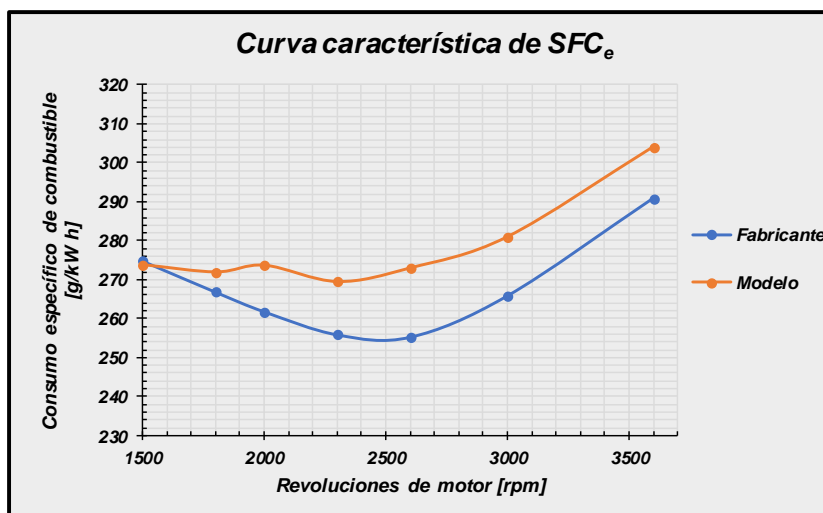


Figura 50: Representación gráfica de la curva del consumo específico de combustible a plena carga

En el caso del consumo específico de combustible, se obtiene una curva característica del modelo que predice de forma muy aproximada la tendencia al compararla con la curva aportada por el fabricante. El alejamiento que se puede apreciar en el gráfico representa un porcentaje muy bajo, estando su valor máximo en el régimen de 2600rpm con un 6% de desviación.

Por lo tanto, en lo que se refiere al término del consumo específico del combustible, los resultados obtenidos por el modelo se consideran aceptables, al disponer de una baja desviación y poder predecir el comportamiento real del motor con relativa precisión.

## 2.3. CONCLUSIONES

Con la realización de la simulación del comportamiento del motor modelado en condiciones de plena carga y el análisis de los resultados obtenidos, se tienen las siguientes conclusiones:

- Se ha realizado un análisis comparativo del modelo planteado en el estudio y los datos técnicos aportados por el fabricante como medida de evaluación adicional, en el que se han obtenido unos resultados finales muy precisos, con unos porcentajes de desviación muy bajos (en la mayoría de los casos con valores inferiores al 5%) y prediciendo la tendencia de cada curva característica con mucha fidelidad.
- El modelo inicial ha podido predecir el comportamiento del motor en condiciones de potencia efectiva superiores a las que se realizaron en el ensayo experimental, lo que demuestra que el modelado de motores con OpenWAM permite estudiar o desarrollar un motor de forma rápida y económica para reducir considerablemente el número y costes económicos de los ensayos experimentales.
- Este tipo de análisis puede servir como un ejemplo de formación educativa para introducir a futuros estudiantes de Ingeniería en el campo del modelado de los MCIA.



### 3. ANÁLISIS DE PROPUESTA DE SOBREALIMENTACIÓN TEÓRICA

Esta propuesta, con el modelo de motor realizado con OpenWAM, tiene como objetivo demostrar las posibilidades de desarrollo que puede disponer un modelo inicial de un motor, en las que se puede modificar parámetros característicos del motor para evaluar las variaciones en el comportamiento del mismo, o implementar elementos o sistemas que permitan optimizar el rendimiento del motor.

La configuración de un modelo sobrealimentado tomando como referencia el modelo inicial desarrollado del motor HATZ 1B20 permitirá predecir el aumento de prestaciones y analizar consecuencias que puede producir el nuevo comportamiento del motor en lo que se refiere al aumento de las tensiones térmicas y mecánicas. De esta forma, el lector podrá asimilar las dificultades existentes en la implementación de la sobrealimentación de forma eficiente.

#### 3.1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

La sobrealimentación de motores consiste en obtener un aumento de la densidad de aire de admisión provocando un aumento de la presión, utilizando para ello un compresor. Con el aumento de densidad del aire de admisión es posible aumentar el gasto másico de aire ( $\dot{m}_a$ ) para un motor con cilindrada y un rendimiento volumétrico determinados, tal como se expresa en la ecuación siguiente [1]:

$$\dot{m}_a = \eta_V \cdot V_T \cdot \rho_a \cdot n/2 \quad \text{(Ecuación 26)}$$

Con el aumento del gasto másico del aire es posible aumentar proporcionalmente el gasto másico de combustible ( $\dot{m}_c$ ), manteniendo el dosado. Si se formula adicionalmente la hipótesis de que el rendimiento no se ve afectado (lo que se cumple en una primera aproximación) se puede concluir que la potencia del motor aumenta linealmente con el gasto de aire, tal como se muestra en la ecuación siguiente:

$$N_e = PCI \cdot \eta_e \cdot \dot{m}_c = PCI \cdot \eta_e \cdot f \cdot \dot{m}_a \quad (\text{Ecuación 27})$$

El aumento de presión del aire de admisión en el sistema de sobrealimentación tiene como consecuencia directa el aumento de la temperatura, debido a que el proceso no es isotérmico, alcanzando temperaturas entre 100 y 200 °C, dependiendo de la temperatura ambiental y de la relación de compresión del compresor utilizado. Este aumento de temperatura produce una disminución de la densidad de aire de admisión con respecto al proceso isoterma.

Por este motivo, con el objetivo de minimizar este efecto, es común emplear un refrigerador del aire de admisión (intercooler) entre el compresor y el motor para que el flujo de aire de admisión pueda enfriarse antes de entrar al cilindro [1].

El comportamiento del intercooler se controla por su eficiencia, que se define por la relación entre el enfriamiento producido en el flujo de aire de sobrealimentación y el enfriamiento máximo posible, considerando la temperatura ambiental. La ecuación siguiente expresa la eficiencia de un intercooler aire-aire.

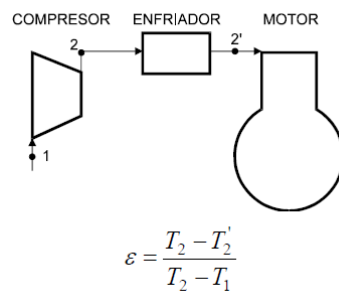


Figura 51: Esquema conceptual para el estudio de eficiencia del enfriador del aire de admisión

Una característica del intercooler es que su eficiencia aumenta cuanto mayor sea la temperatura del aire de sobrealimentación en la salida del compresor, o lo que es lo mismo, cuanto mayor sea la relación de compresión. En la figura 52 se muestra el efecto del enfriamiento posterior a la compresión del aire dependiendo de la relación de compresión del compresor y de la eficiencia del intercooler.

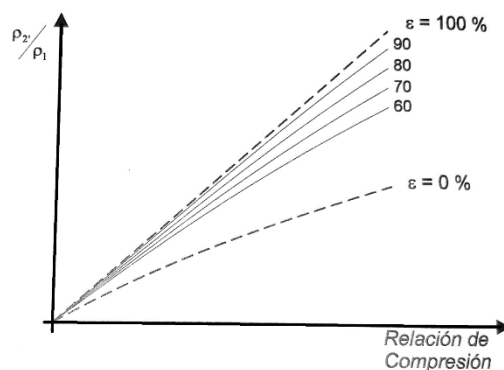


Figura 52: Efecto del enfriamiento sobre la densidad del aire tras su compresión

Se puede apreciar en el gráfico que, al aumentar el grado de sobrealimentación, se hace más adecuado el enfriamiento, ya que puede, incluso multiplicarse la densidad por dos.

### 3.1.1. Consecuencias sobre el comportamiento de un motor sobrealimentado.

En un motor sobrealimentado, la ventaja principal es el aumento de potencia sin tener que modificar la cilindrada, produciendo a su vez un aumento de potencia específica y de la presión media efectiva, pero esta ganancia se obtiene a cambio se sacrificar otros aspectos relacionados con la fiabilidad o durabilidad del motor, ya que está sometido a una mayor exigencia. Los inconvenientes más destacables son el aumento de las tensiones térmicas y mecánicas del motor, que se describirán a continuación.

#### ▪ **Aumento de las tensiones térmicas.**

En un motor sobrealimentado, al aumentar el gasto de combustible quemado se produce en consecuencia un aumento de la potencia calorífica que se liberará en la cámara de combustión, provocando a su vez un aumento de las cargas térmicas sobre el motor (calor cedido).

La carga térmica se define por la relación entre la potencia del motor y la superficie del pistón ( $N_e / A_p$ ), lo que significa un aumento considerable de estas cargas en un motor sobrealimentado, siendo generalmente más importantes que las tensiones mecánicas.

- **Aumento de las tensiones mecánicas.**

En un motor sobrealimentado, si se eleva la presión de admisión en un motor, la presión en el cilindro máxima del ciclo también aumenta, lo que produce un aumento de los esfuerzos en la biela, el cigüeñal y sus apoyos.

En los casos en los que se requiere aumentar mucho la presión de admisión es necesario reforzar convenientemente el motor y el sistema de lubricación para que este pueda soportar mayores esfuerzos. Existen otras acciones que permiten aumentar la presión de admisión de forma considerable, como es el caso de bajar la relación de compresión volumétrica de los cilindros o intensificar la refrigeración en el intercooler para no aumentar la temperatura del aire de admisión significativamente.

### **3.2. PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN DE SOBREALIMENTACIÓN DESDE EL MODELO INICIAL**

Para realizar el procedimiento de configuración en el que se desarrollará un modelo sobrealimentado partiendo del modelo inicial descrito en el capítulo 5 se tendrán las consideraciones que a continuación se describirán.

Se utilizará un modelo de motor sobrealimentado simplificado en el que no se instalará un elemento compresor ni un refrigerador de aire de admisión, ya que para simular su comportamiento requieren un estudio previo, no siendo objeto de este apartado.

Debido a que no existen elementos mecánicos en el modelo que generen el aumento de presión de aire de admisión, el procedimiento de configuración de la presión de sobrealimentación se realizará asignando en el cuadro de ajustes de la presión de admisión el valor de presión de sobrealimentación correspondiente. De esta forma se garantiza obtener la presión solicitada en la entrada del motor en el punto de operación.

Para simplificar el estudio, se utilizará una temperatura de aire de sobrealimentación idéntica a la temperatura atmosférica ( $T_{SOB} = T_{atm}$ ), siendo de 25 °C. Este efecto simularía unas condiciones de eficiencia del intercooler del 100% ( $\mathcal{E} = 1$ ).

Los parámetros de entrada iniciales seleccionados para el estudio del sistema sobrealimentado son los siguientes:

- Revoluciones de motor (rpm): 1500, 3000.
- Presión de sobrealimentación (bar): 0.955, 1.05, 1.10, 1.15
- Par de motor inicial (Nm): 4, 6 (cargas parciales).

**Nota:** Estos valores iniciales se toman como referencia del ensayo experimental, lo que permite un análisis comparativo de las condiciones de operaciones reales del motor HATZ con el incremento teórico de prestaciones al implementar un modelo de sobrealimentación idealizada.

Para obtener los gastos máscopicos de aire y combustible para cada uno de los puntos de operación planteados en el estudio de sobrealimentación se realizaron las siguientes acciones:

- Partiendo del modelo inicial validado, se introducen los valores de entrada correspondientes para cada punto de operación para realizar una primera simulación con OpenWAM para predecir el gasto máscopico de aire de admisión en las nuevas condiciones.
- Con el gasto máscopico de aire de admisión y el dosado inicial tomado del ensayo experimental se calcula el gasto máscopico de combustible, utilizando la ecuación siguiente:

$$\dot{m}_c = f \cdot \dot{m}_a \quad \text{(Ecuación 28)}$$

En las siguientes tablas se muestran los valores calculados de los gastos máscopicos de combustible y aire de admisión para cada punto de operación.

<b>N °1 [4 Nm] [1500 rpm]</b>	<b><math>P_{SOB}</math> [bar]</b>	<b>0,955</b>	<b>1,05</b>	<b>1,10</b>	<b>1,15</b>
	<b><math>f</math></b>	0,028	0,028	0,028	0,028
	<b><math>\dot{m}_a</math></b>	0,192	0,211	0,221	0,231
	<b><math>\dot{m}_c</math></b>	5,395	5,930	6,210	6,491
<b>N °2 [6 Nm] [1500 rpm]</b>	<b><math>P_{SOB}</math> [bar]</b>	<b>0,955</b>	<b>1,05</b>	<b>1,10</b>	<b>1,15</b>
	<b><math>f</math></b>	0,0366	0,0366	0,0366	0,0366
	<b><math>\dot{m}_a</math></b>	0,192	0,211	0,221	0,231
	<b><math>\dot{m}_c</math></b>	7,027	7,722	8,089	8,455

Tabla 19: Valores entrada de gastos máscopicos de aire y combustible para 1500 rpm

N°1 [4 Nm] [3000 rpm]	$P_{SOB}$ [bar]	0,955	1,05	1,10	1,15
	$f$	0,0388	0,0388	0,0388	0,0388
	$\dot{m}_a$	0,132	0,146	0,152	0,159
	$\dot{m}_c$	5,121	5,626	5,898	6,169
N°2 [6 Nm] [3000 rpm]	$P_{SOB}$ [bar]	0,955	1,05	1,10	1,15
	$f$	0,048	0,048	0,048	0,048
	$\dot{m}_a$	0,132	0,145	0,151	0,158
	$\dot{m}_c$	6,349	7,023	7,263	7,600

Tabla 20: Valores entrada de gastos máxicos de aire y combustible para 3000 rpm

- Se realiza la segunda simulación con los gastos máxicos de aire de admisión y combustible para obtener los resultados finales manteniendo el dosado inicial.

### 3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DEL MODELO EN CONDICIONES DE SOBREALIMENTACIÓN TEÓRICA

En el apartado de análisis de resultados se mostrarán los datos obtenidos en las diferentes simulaciones realizadas con OpenWAM para los puntos de operación seleccionados.

Cada uno de los resultados obtenidos por el modelo del motor HATZ 1B20 sobrealimentado será comparado con el valor medido en el ensayo experimental, lo que permitirá analizar en términos numéricos el aumento de las prestaciones obtenidas después de haber aplicado un sistema de sobrealimentación teórico.

#### 3.3.1. Resultados obtenidos en las simulaciones del modelo sobrealimentado.

A continuación, se muestran las tablas de resultados globales más relevantes obtenidos para cada uno de los puntos de estudio.

▪ **Resultados para Presión de sobrealimentación = 0,955 bar**

0,955 bar	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			$\eta_v$ [%]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm									
	4	4,41	-9%	0,63	0,69	-9%	70,16	74,30	-6%
	6	6,68	-10%	0,94	1,05	-10%	67,86	74,19	-9%
3000 rpm									
	4	3,28	22%	1,26	1,03	22%	54,64	51,54	6%
	6	5,03	19%	1,88	1,58	19%	54,06	51,48	5%

Tabla 21: Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo a presión atmosférica

0,955 bar	Dosado [f]			SFC <sub>e</sub> [g/kWh]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm						
	0,0281	0,0281	0%	370,60	351,18	6%
	0,0366	0,0366	0%	311,52	301,63	3%
3000 rpm						
	0,0388	0,0384	1%	398,06	448,68	-11%
	0,0481	0,0477	1%	325,68	361,67	-10%

Tabla 22: Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo a presión atmosférica

▪ **Resultados para Presión de sobrealimentación = 1,05 bar**

1,05 bar	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			$\eta_v$ [%]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm									
	4	5,17	-23%	0,63	0,81	-23%	70,16	74,27	-6%
	6	7,68	-22%	0,94	1,21	-22%	67,86	74,17	-8%
3000 rpm									
	4	4,04	-1%	1,26	1,27	-1%	54,64	51,53	6%
	6	5,99	0%	1,88	1,88	0%	54,06	51,48	5%

Tabla 23: Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,05 bar)

1,05 bar	Dosado [f]			SFC <sub>e</sub> [g/kWh]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm						
	0,0281	0,0281	0%	370,60	328,57	13%
	0,0366	0,0366	0%	311,52	288,36	8%
3000 rpm						
	0,0388	0,0386	0%	398,06	401,95	-1%
	0,0481	0,0480	0%	325,68	336,19	-3%

Tabla 24: Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,05 bar)

▪ **Resultados para Presión de sobrealimentación = 1,10 bar**

1,10 bar	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			$\eta_v$ [%]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm									
	4	5,58	-28%	0,63	0,88	-28%	70,16	74,29	-6%
	6	8,21	-27%	0,94	1,29	-27%	67,86	74,16	-8%
3000 rpm									
	4	4,37	-8%	1,26	1,37	-8%	54,64	51,51	6%
	6	6,33	-5%	1,88	1,99	-5%	54,06	51,47	5%

Tabla 25: Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,10 bar)

1,10 bar	Dosado [f]			SFC <sub>e</sub> [g/kWh]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm						
	0,0281	0,0280	0%	370,60	319,19	16%
	0,0366	0,0366	0%	311,52	282,47	10%
3000 rpm						
	0,0388	0,0384	1%	398,06	387,41	3%
	0,0481	0,0473	2%	325,68	329,36	-1%

Tabla 26: Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,10 bar)

▪ **Resultados para Presión de sobrealimentación = 1,15 bar**

1,15 bar	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			$\eta_v$ [%]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm									
	4	5,98	-33%	0,63	0,94	-33%	70,16	74,27	-6%
	6	8,74	-31%	0,94	1,37	-31%	67,86	74,17	-8%
3000 rpm									
	4	4,74	-16%	1,26	1,49	-16%	54,64	51,53	6%
	6	6,80	-12%	1,88	2,14	-12%	54,06	51,48	5%

Tabla 27: Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,15 bar)

1,15 bar	Dosado [f]			SFC <sub>e</sub> [g/kWh]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm						
	0,0281	0,0281	0%	370,60	311,07	19%
	0,0366	0,0366	0%	311,52	277,34	12%
3000 rpm						
	0,0388	0,0384	1%	398,06	373,17	7%
	0,0481	0,0474	1%	325,68	320,38	2%

Tabla 28: Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,15 bar)



En general, las diferentes tablas muestran una importante mejora de sus prestaciones, debido a que se obtiene un aumento del par motor y la potencia efectiva al disponer de mayor capacidad para aumentar el gasto másico del aire de admisión y el combustible sin modificar el dosado.

En los siguientes apartados se realizará un análisis de la influencia que tiene la sobrealimentación en términos de potencia específica, las variaciones de la presión máxima que opera en la cámara de combustión y las cargas térmicas.

### **3.3.2. Análisis de la curva de potencia específica frente a la presión de sobrealimentación.**

En este apartado se estudiará el comportamiento de las curvas de potencia específica obtenidas para cada intervalo de presión de sobrealimentación establecido. En la tabla 29 se muestran los resultados teóricos calculados por OpenWAM

<i>[1500 rpm]</i>			<i>[3000 rpm]</i>		
<i>PSOB</i>	<i>Wespecífica [kW/l]</i>		<i>PSOB</i>	<i>Wespecífica [kW/l]</i>	
	<i>Nº1</i>	<i>Nº2</i>		<i>Nº1</i>	<i>Nº2</i>
0,955	2,85	4,32	0,955	4,23	6,51
1,05	3,35	4,96	1,05	5,23	7,75
1,1	3,61	5,31	1,1	5,65	8,18
1,15	3,87	5,65	1,15	6,13	8,80

*Tabla 29: Valores de potencia específica de los puntos de operación*

Para una mejor interpretación del crecimiento de la potencia específica a medida que se aumenta la presión de admisión, se muestran las figuras 53 y 54 de las representaciones correspondientes a cada intervalo de revoluciones estudiado.

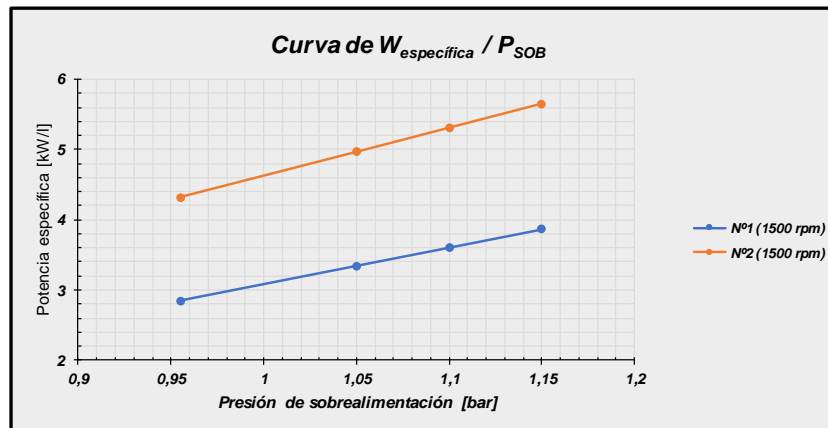


Figura 53: Representación gráfica de las curvas de potencia específica a 1500 rpm

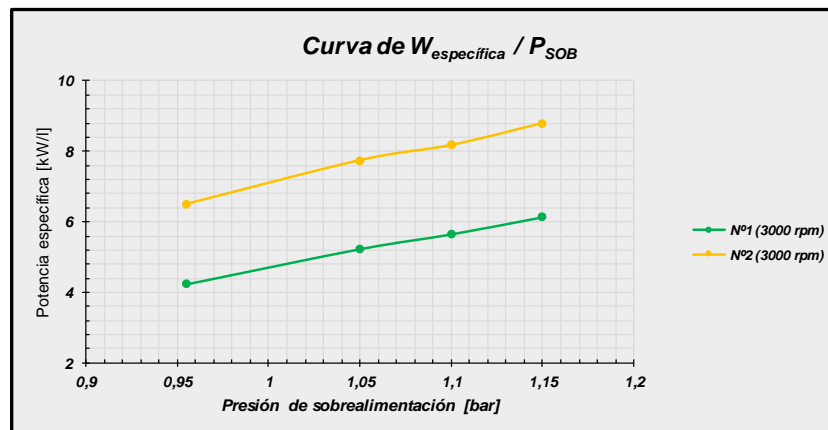


Figura 54: Representación gráfica de las curvas de potencia específica a 3000 rpm

Se puede apreciar en las tablas y gráficas que para la curva de estudio se produce un aumento lineal de la potencia específica, siendo además proporcional para cada grado de carga inicial, lo que demuestra que la potencia del motor crece linealmente con el gasto de aire de admisión. En estas condiciones también se aumenta el gasto másico de combustible en la misma proporción, lo que produce que el dosado no se vea alterado en todos los puntos de crecimiento lineal.

Por lo tanto, para el desarrollo de un motor en el que se requiere un aumento de potencia determinado, es posible predecir qué grado de sobrealimentación se requiere para alcanzar el objetivo fijado y seleccionar posteriormente el compresor que aporte la relación de compresión del aire de admisión necesaria.

### 3.3.3. Análisis de la curva de la presión máxima en cámara frente a la presión de sobrealimentación.

El análisis de la presión máxima que se produce en un ciclo permite calcular el esfuerzo a las que se someten las piezas internas móviles del motor (cigüeñal, bielas y apoyos) por la presión ejercida en el proceso de combustión. Por ello, es importante estudiar cual es el intervalo de presión máxima aceptable para las características constructivas del motor.

En este apartado se analizará el comportamiento de la presión máxima en cámara en los puntos de presión de sobrealimentación fijados. Para ello, se muestran los resultados teóricos calculados por OpenWAM en la tabla 30.

[1500 rpm]			[3000 rpm]		
PSOB	P <sub>MAX</sub> [bar]		PSOB	P <sub>MAX</sub> [bar]	
	Nº1	Nº2		Nº1	Nº2
0,955	60,89	63,99	0,955	46,32	48,91
1,05	66,96	70,39	1,05	51,07	53,92
1,1	70,24	73,79	1,1	53,46	56,26
1,15	73,46	77,15	1,15	55,89	58,86

Tabla 30: Valores de presión máxima en cámara de los puntos de operación

Para una mejor interpretación del aumento de la presión máxima en cámara a medida frente al aumento la presión de sobrealimentación, se muestran las siguientes representaciones correspondientes a cada intervalo de revoluciones estudiado.

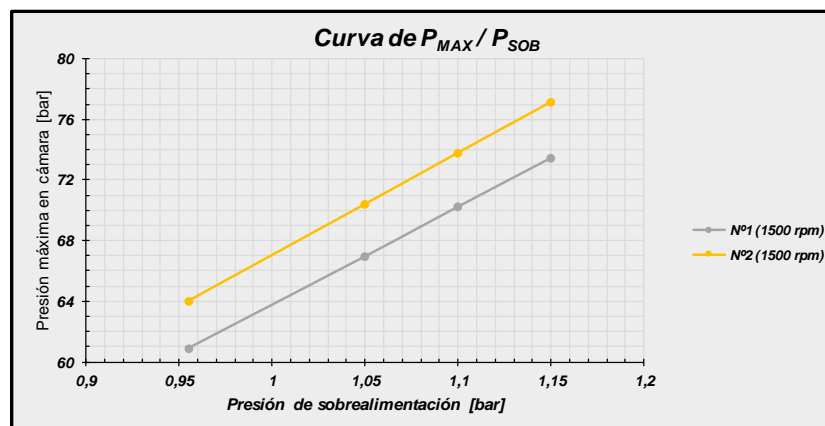


Figura 55: Representación gráfica de las curvas de presión máxima en cámara a 1500 rpm

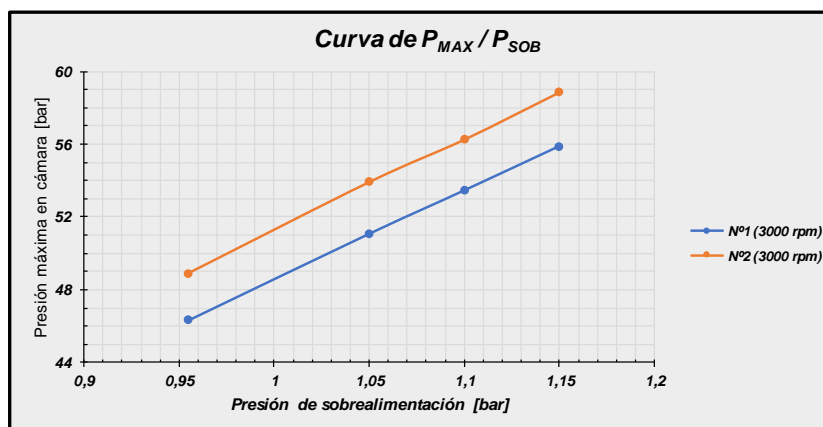


Figura 56: Representación gráfica de las curvas de presión máxima en cámara a 3000 rpm

Se puede apreciar en las tablas y gráficas que la presión máxima en la cámara de combustión tiene una clara tendencia de crecimiento lineal a medida que se aumenta la presión de alimentación. Esta tendencia se debe a que la presión máxima crece proporcionalmente con el aumento del gasto másico del aire de sobrealimentación.

Por lo tanto, con este tipo de análisis es posible predecir el impacto que tiene la sobrealimentación sobre la presión máxima en la cámara de combustión para establecer un límite de presión de sobrealimentación y a su vez no someter a las piezas móviles del motor a esfuerzos excesivos.

También permite analizar la implantación de medidas correctoras como pueden ser la introducción de componentes del motor reforzados (por ejemplo, pistones o bielas forjadas), la optimización del sistema de refrigeración del aire de sobrealimentación (intercooler) o reducir la compresión volumétrica del motor.

### 3.3.3. Análisis de la curva de cargas térmicas potencia frente a la presión de sobrealimentación.

Un factor relevante en el análisis del comportamiento de un motor sobrealimentado es el análisis de la influencia de las tensiones térmicas, por lo que en este apartado se mostrarán los resultados obtenidos en el modelo realizado con OpenWAM para comprobar el impacto de la potencia calorífica liberada en la cámara en el proceso de combustión.

A continuación, se muestran los resultados teóricos de la potencia calorífica calculados por OpenWAM en la tabla 31.

[1500 rpm]			[3000 rpm]		
PSOB	Carga térmica [Kw/m <sup>2</sup> ]		PSOB	Carga térmica [Kw/m <sup>2</sup> ]	
	Nº1	Nº2		Nº1	Nº2
0,955	229,21	347,50	0,955	340,81	523,92
1,05	269,25	399,40	1,05	420,83	623,51
1,1	290,23	427,10	1,1	454,56	658,17
1,15	311,28	454,70	1,15	493,57	708,01

Tabla 31: Valores de carga térmica de los puntos de operación

En las tablas se puede apreciar que existe un aumento gradual de cada carga térmica a medida que se aumenta la presión de sobrealimentación, siendo mayor en los puntos de operación en los que hay mayor grado de carga.

Para una mejor interpretación de la tendencia de las cargas térmicas frente a la presión de sobrealimentación, se muestran los gráficos correspondientes a cada intervalo de revoluciones estudiado.

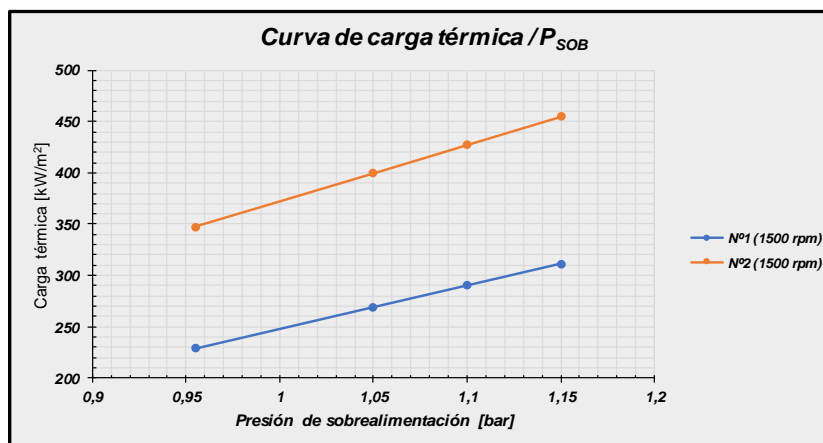


Figura 57: Representación gráfica de las curvas de carga térmica a 1500 rpm

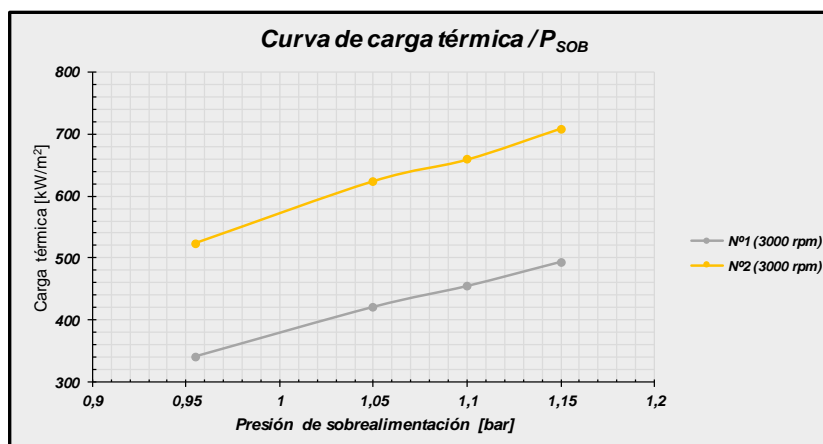


Figura 58: Representación gráfica de las curvas de presión máxima en cámara a 3000 rpm

En las gráficas se puede apreciar un comportamiento completamente lineal de las cargas térmicas a medida que la presión de sobrealimentación de aire aumenta. Además, si se comparan con las gráficas de la potencia específica descritas anteriormente, se puede comprobar que disponen de la misma proporcionalidad, por lo que se puede determinar que las cargas térmicas aumentarán linealmente con el aumento del gasto másico del aire de admisión.

Del estudio de las tensiones térmicas en los motores sobrealimentados, para reducir el efecto de los mismos, en la práctica se suelen buscar soluciones que permitan refrigerar los pistones internamente. Adicionalmente se emplean lubricantes específicos (buena tolerancia a las temperaturas) en los motores sobrealimentados que ayuden a controlar la temperatura en las camisas y las ranuras de ubicación de segmentos del pistón, además de evitar la formación de depósitos.

### **3.4. CONCLUSIONES**

En este apartado, se ha realizado una propuesta teórica de sobrealimentación empleando OpenWAM, en el que se toman consideraciones a los aspectos más importantes en el estudio de estos sistemas. Se han descrito las necesidades de la sobrealimentación, la metodología aplicada y los efectos que produce la sobrealimentación en un motor

Este tipo de análisis puede servir como base educativa para otros estudiantes en el campo de la sobrealimentación de motores de combustión interna alternativa. Pueden estudiarse casos como el comportamiento de un intercooler o la calibración de un turbocompresor en un motor comercial, utilizando como herramienta un software de modelado.

Aunque en el análisis no se ha realizado una mención directa sobre el grado de predicción de los resultados, después de haber configurado el modelo de motor sobrealimentado teórico sobre la base inicial modelada del motor HATZ 1B20, se puede concluir que los resultados han mostrado una gran coherencia al ser comparados con los valores expuesto del ensayo experimental, representando un aumento proporcional de las prestaciones del motor en los diferentes puntos de operación estudiados.

Para finalizar, se puede concluir que la propuesta de estudio de implementar un sistema de sobrealimentación simplificado sobre la base del modelo de motor HATZ ha podido predecir los efectos de la sobrealimentación con resultados buenos, por lo que se considera muy satisfactoria esta parte del estudio.

## Capítulo 8 – CONCLUSIONES

### 1. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

La realización de este Trabajo Final de Grado ha tenido como objetivo abordar el campo del modelado teórico de los motores de combustión interna alternativo desde un punto de vista práctico, utilizando un software informático que integra numerosos métodos matemáticos para poder simular los parámetros característicos del motor con un grado de fidelidad muy cercano a las condiciones reales de funcionamiento de un motor.

El método de trabajo elegido para el desarrollo del estudio ha sido la realización de un modelo teórico de un motor industrial y poder contrastar los resultados extraídos por el modelo con la información medida en un ensayo experimental del motor disponible en un banco de pruebas destinado a fines educativos.

En el desarrollo del estudio y posterior análisis de resultados se han obtenido las siguientes acciones:

- Se ha diseñado un modelo teórico simplificado del motor a evaluar (HATZ 1B20), en el que se han configurado los datos técnicos aportados por el fabricante.
- Se ha realizado un ensayo experimental del motor disponible, obteniendo un mapa de puntos de operación del motor y una curva experimental de las pérdidas mecánicas que se producen internamente en el motor.
- Se configuran las variables de entrada en el modelo teórico para simular las condiciones de operación realizadas en el ensayo experimental, obteniendo los resultados teóricos del modelo.
- Se realiza una evaluación de los resultados modelo-ensayo para determinar el grado de fidelidad que presenta el modelo teórico frente al comportamiento real del motor estudiado. De las conclusiones obtenidas en el análisis de resultados es posible validar el modelo teórico bajo unas condiciones límite previamente establecidas.

- Se realiza un análisis comparativo de las curvas de plena carga del modelo teórico desarrollado con los datos aportados por el fabricante para evaluar como predice el modelo condiciones de operación fuera el intervalo en el que fue comparado y ajustado con los ensayos experimentales.
- Se propone un modelo sobrealimentado desarrollado desde el modelo inicial del motor HATZ para estudiar el comportamiento del motor, el aumento de prestaciones y las consecuencias derivadas en la sobrealimentación.

Para todo este proceso se ha requerido un nivel de conocimiento muy alto sobre el software utilizado de modelado unidimensional denominado OpenWAM, ya que requiere una gran cantidad de consideraciones sobre los parámetros característicos del motor y la aplicación de métodos matemáticos para distintos apartados, como ha podido ser el estudio de las leyes de liberación de calor en el proceso de la combustión.

Del presente estudio se han podido realizar las siguientes aportaciones:

- Se introduce en el Grado de Ingeniería Mecánica un precedente relacionado con el modelado de motores de combustión internos alternativos utilizando un software específico.
- El Área de Máquinas y Motores Térmicos del Departamento de Ingeniería Industrial dispone de un modelo de motor virtual capaz de predecir resultados experimentales con una muy buena aproximación, que le permitirá en el futuro un uso educativo en el campo de técnicas experimentales.
- Se han detectado puntos de mejora en el sistema del banco de ensayos que permita la obtención de datos no disponibles o que requieran una mayor precisión. Los componentes más destacados son los siguientes:
  - Sensor para la medición de la presión instantánea en la cámara de combustión.
  - Instalación de sondas de presión y temperatura en las conducciones de admisión y escape para poder medir con mayor precisión las variaciones.
  - Sustituir el sistema de medición del consumo de combustible actual por un sistema que incorpore una balanza de alta precisión



## 2. TRABAJOS FUTUROS

Las conclusiones obtenidas en el presente estudio abren un importante abanico de propuestas de investigación docente en el campo del modelado de motores, lo que permitiría ampliar a su vez el conocimiento de las técnicas experimentales.

En este apartado se realizarán diferentes propuestas de estudio para aquellos alumnos del Grado de Ingeniería Mecánica que estén interesados en ampliar conceptos del presente estudio, siendo los siguientes:

- Estudio del impacto de la eficiencia de un enfriador del flujo del aire de admisión (intercooler) en diferentes condiciones de operación.
- Estudio de modelado de mapa de operación de para un compresor de aire de admisión o turbomáquina.
- Desarrollo de mapas característicos Iso-consumo a partir de un modelo de motor industrial.
- Estudio del modelado de la Ley de Liberación de Calor (HRL) para la optimización de la combustión en un motor.
- Propuesta de mejora del banco de ensayos de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna, para el estudio de emisiones de gases contaminantes de un motor.





**Universidad  
de La Laguna**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

*Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica*

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

Análisis y modelado de motor de combustión interna alternativo mediante software específico y validación experimental en banco de ensayos.

**ANEXOS**

Diego Jesús Galván Febles



# ÍNDICE

ANEXO DE CÁLCULOS .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. RESULTADOS GLOBALES DEL ENSAYO EXPERIMENTAL.....	1
2.1. Tabla de valores teóricos de entrada para el ensayo experimental .....	1
2.2. Tablas de resultados calculados en el ensayo experimental a 1500 rpm.....	2
2.3. Tablas de resultados calculados en el ensayo experimental a 2250 rpm.....	3
2.4. Tablas de resultados calculados en el ensayo experimental a 3000 rpm.....	4
2.5. Tablas de resultados de las pérdidas mecánicas calculadas en el ensayo experimental y el modelo.....	5
3. RESULTADOS GLOBALES CALCULADO EN EL MODELO .....	5
3.1. Tablas de resultados de parámetros característicos del motor exportados por el modelo realizado en OpenWAM.....	5
4. RESULTADOS GLOBALES DEL ESTUDIO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE PLENA CARGA CON EL MODELO.....	6
4.1. Tabla de valores para la configuración de puntos de operación de las simulaciones con OpenWAM.....	6
4.2. Tabla de resultados comparativos de parámetros característicos de las curvas de plena carga.....	7
5. RESULTADOS GLOBALES DE LA PROPUESTA DE ESTUDIO DE SOBREALIMENTACIÓN .....	7
5.1. Tabla de datos de gastos máxicos calculados para los puntos de operación.....	7
5.2. Tablas de resultados comparativos de parámetros de operación para los intervalos de presión de sobrealimentación definidos.....	8
5.3. Tabla de resultados comparativos del parámetro de potencia específica.....	10
5.4. Tabla de resultados comparativos del parámetro de presión máxima en cámara.....	11
5.5. Tabla de resultados comparativos del parámetro de carga térmica.....	11
ANEXO DE PROCEDIMIENTOS PARA EL MODELO.....	13
1. PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE MOTOR HATZ 1B20 .....	13
1.2. Construcción del esquema del motor con WAMer .....	13
1.3. Configuración del modelo del motor HATZ 1B20 en WAMer .....	14
1.3.1. Configuración del cuadro de ejecución.....	15
1.3.2. Calibración del cuadro de ajustes generales del motor.....	17
1.3.3. Configuración del cilindro N°1 .....	22
1.3.4. Configuración de la válvula de admisión de aire.....	23
1.3.5. Configuración de la válvula de escape para los gases de combustión.....	26

1.3.6. Configuración del depósito de estabilización del aire de admisión (Nº1) .....	28
1.3.7. Configuración de la caja de filtro de aire de admisión del motor (Nº2) .....	28
1.3.8. Configuración del silenciador de escape para los gases de combustión (Nº3).....	29
1.3.9. Configuración del conducto de entrada al sistema del aire de admisión (nodo Nº1) .....	29
1.3.10. Configuración del conducto de aspiración entre los depósitos del sistema del aire de admisión (nodo Nº2) .....	34
1.3.11. Configuración del conducto de entrada del aire de admisión al motor (nodo Nº3) .....	36
1.3.12. Configuración del conducto de salida de los gases de combustión del motor (nodo Nº4) .....	38
1.3.13. Configuración del conducto de evacuación de los gases de combustión (nodo Nº5) .....	40
1.3.14. Configuración de la tobera de entrada del aire atmosférico .....	42
1.3.15. Configuración de la tobera de salida del aire atmosférico .....	42
1.4. Simulación del modelo en OpenWAM .....	43
1.5. Tratamiento de los resultados obtenidos en la simulación .....	46
1.5.1. Documentos de registro del proceso de cálculo con OpenWAM .....	47
1.5.2. Documentos para el tratamiento de datos extraídos en la simulación .....	48
<b>ANEXO DE DOCUMENTACIÓN TÉCNICA .....</b>	<b>51</b>
1. DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DE EQUIPOS UTILIZADOS .....	51
1.1. Ficha técnica de motor HATZ 1B20 .....	53
1.2. Catálogo del banco de pruebas modular para motores GUNT CT-159.....	61
1.3. Catálogo de la unidad de accionamiento y frenado GUNT HM 365 .....	64

## ÍNDICES DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Esquema representativo del modelo de motor HATZ 1B20 planteado.....	13
<b>Figura 2:</b> Cuadro de configuración de ejecución del modelo .....	16
<b>Figura 3:</b> Cuadro de configuración de datos generales del motor en el modelo.....	17
<b>Figura 4:</b> Cuadro de solicitud de registro de resultados medios de parámetros de funcionamiento del motor .....	22
<b>Figura 5:</b> Cuadro de solicitud de registro de resultados medios de parámetros del cilindro del motor .....	23
<b>Figura 6:</b> Cuadro de solicitud de registro de resultados instantáneos de parámetros del cilindro del motor .....	23
<b>Figura 7:</b> Cuadro de configuración de coeficientes de descarga en el conducto de la válvula de admisión del modelo .....	24
<b>Figura 8:</b> Cuadro de configuración del perfil de alzamiento de la válvula de admisión del modelo.....	25
<b>Figura 9:</b> Cuadro de solicitud de registro de resultados medios de los coeficientes de descarga de la válvula.....	26
<b>Figura 10:</b> Cuadro de configuración del perfil de alzamiento de la válvula de escape del modelo.....	27
<b>Figura 11:</b> Cuadro de configuración de un depósito en el modelo.....	28
<b>Figura 12:</b> Cuadro de configuración de un conducto del sistema de admisión del modelo.....	29
<b>Figura 13:</b> Cuadro de configuración de los parámetros geométricos del conducto en el modelo .....	31
<b>Figura 14:</b> Cuadro de configuración de las capas de paredes de un conducto en el modelo .....	32
<b>Figura 15:</b> Cuadro de configuración del método de cálculo numérico para el análisis del flujo en el conducto .....	32
<b>Figura 16:</b> Cuadro de solicitud de resultados medios para parámetros del flujo en el conducto .....	33
<b>Figura 17:</b> Cuadro de configuración de la tobera de salida de admisión en el modelo.....	42
<b>Figura 18:</b> Captura del icono de acceso a la interfaz de simulación de WAMer.....	43
<b>Figura 19:</b> Captura de pantalla de la interfaz de simulación en WAMer .....	44
<b>Figura 20:</b> Captura del icono de acceso al panel de selección de archivos de ejecución para la simulación.....	44
<b>Figura 21:</b> Cuadro de selección de archivos de ejecución para la simulación .....	45
<b>Figura 22:</b> Captura de imagen de la interfaz de ejecución de simulación .....	45

<b>Figura 23:</b> Captura de imagen de mensaje de finalización de la simulación en la ventana de información de procesamiento .....	46
<b>Figura 24:</b> Captura de imagen del documento de registro de información del proceso de simulación en OpenWAM.....	47
<b>Figura 25:</b> Captura de imagen de Excel para indicar el acceso al archivo de simulación .....	48
<b>Figura 26:</b> Cuadro de configuración del asistente de importación de texto (paso 1) .....	49
<b>Figura 27:</b> Cuadro de configuración del asistente de importación de texto (paso 3) .....	49
<b>Figura 28:</b> Captura de imagen de la hoja de cálculo con los datos extraídos en la simulación .....	50



## ÍNDICES DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Datos de entrada para el cálculo de parámetros de operación del motor .....	1
<b>Tabla 2:</b> Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 1500 rpm .....	2
<b>Tabla 3:</b> Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 1500 rpm (1) .....	2
<b>Tabla 4:</b> Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 1500 rpm (2) .....	2
<b>Tabla 5:</b> Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 2250 rpm .....	3
<b>Tabla 6:</b> Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 2250 rpm (1) .....	3
<b>Tabla 7:</b> Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 2250 rpm (2) .....	3
<b>Tabla 8:</b> Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 3000 rpm .....	4
<b>Tabla 9:</b> Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 3000 rpm (1) .....	4
<b>Tabla 10:</b> Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 3000 rpm (2) .....	4
<b>Tabla 11:</b> Valores del parámetro de pérdidas mecánicas obtenidos en el ensayo experimental .....	5
<b>Tabla 12:</b> Valores del parámetro de pérdidas mecánicas obtenidos en el modelo .....	5
<b>Tabla 13:</b> Resultados de los parámetros principales del motor para en análisis comparativo de ensayo-modelo (1) .....	5
<b>Tabla 14:</b> Resultados de los parámetros principales del motor para en análisis comparativo de ensayo-modelo (2) .....	6
<b>Tabla 15:</b> Resultados de los parámetros principales del motor para en análisis comparativo de ensayo-modelo (3) .....	6
<b>Tabla 16:</b> Datos de entrada para la simulación de los puntos de operación a plena carga .....	6
<b>Tabla 17:</b> Resultados comparativos de parámetros de plena carga fabricante-modelo .....	7
<b>Tabla 18:</b> Valores entrada de gastos máxicos de aire y combustible para 1500 rpm .....	7
<b>Tabla 19:</b> Valores entrada de gastos máxicos de aire y combustible para 3000 rpm .....	7
<b>Tabla 20:</b> Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo a presión atmosférica .....	8
<b>Tabla 21:</b> Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo a presión atmosférica .....	8

<b>Tabla 22:</b> Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,05bar) .....	8
<b>Tabla 23:</b> Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,05bar) .....	9
<b>Tabla 24:</b> Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,10bar) .....	9
<b>Tabla 25:</b> Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,10bar) .....	9
<b>Tabla 26:</b> Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,15bar) .....	10
<b>Tabla 27:</b> Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,15bar) .....	10
<b>Tabla 28:</b> Valores de potencia específica de los puntos de operación.....	10
<b>Tabla 29:</b> Valores de presión máxima en cámara de los puntos de operación .....	11
<b>Tabla 30:</b> Valores de carga térmica de los puntos de operación.....	11
<b>Tabla 31:</b> Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 1500 .....	18
<b>Tabla 32:</b> Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 2250 .....	18
<b>Tabla 33:</b> Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 3000 .....	19

# ANEXO DE CÁLCULOS

## 1. INTRODUCCIÓN

En este documento se hace una recopilación de las tablas realizadas con los resultados obtenidos en el estudio de modelado del motor HATZ 1B20 con OpenWAM. El anexo se dividirá en tres bloques diferenciados:

- En el primer bloque se muestran las tablas que contienen los resultados obtenidos en el ensayo experimental
- En el segundo bloque se muestran las tablas de resultados exportados por el modelo teórico del motor realizado con OpenWAM.
- El tercer bloque muestra las tablas con los resultados obtenidos en la propuesta de análisis de curva de plena carga.

## 2. RESULTADOS GLOBALES DEL ENSAYO EXPERIMENTAL

### 2.1. Tabla de valores teóricos de entrada para el ensayo experimental

$T_{amb}$	21	[°C]
$P_{amb}$	0,955	[bar]
Densidad aire ( $\rho_a$ )	1,132	[Kg/m <sup>3</sup> ]
Densidad comb. ( $\rho_c$ )	830	[Kg/m <sup>3</sup> ]
PCI	42470	[KJ/Kg]
Vol. comb. consumido	4,52	[cm <sup>3</sup> ]
Diámetro pistón ( $D_p$ )	69	[mm]
Carrera pistón ( $S_p$ )	62	[mm]

Tabla 32: Datos de entrada para el cálculo de parámetros de operación del motor

## 2.2. Tablas de resultados calculados en el ensayo experimental a 1500 rpm.

	Par efectivo [N·m]	Régimen [rpm]	Caudal volumétrico de aire de admisión [l/min]	Temperatura del de admisión [°C]	Tiempo [s]	Temperatura del combustible [°C]	Temperatura gases de escape [°C]	Dosado
Nº 1	2,0	1500	123	24,5	78	35,3	161	0,021
Nº 2	4,0	1500	122	24,7	58	37,7	214	0,028
Nº 3	6,0	1500	117	24,7	46	39,7	278	0,037
Nº 4	8,0	1500	111	25	38	40,1	348	0,046

Tabla 33: Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 1500 rpm

	Consumo del combustible (mc) [kg/h]	Cilindrada (VT) [l]	Velocidad lineal media [m/s]	Caudal másico de aire (maire)[kg/s]	Caudal másico del combustible (mc) [kg/s]	Caudal volumétrico de aire [m <sup>3</sup> /s]	Potencia efectiva (We)[kW]	Potencia indicada (Wi)[kW]
Nº 1	0,173	0,232	3,10	0,00232	0,0000481	0,00205	0,314	0,889
Nº 2	0,233	0,232	3,10	0,00230	0,0000647	0,00203	0,628	1,203
Nº 3	0,294	0,232	3,10	0,00223	0,0000816	0,00197	0,942	1,517
Nº 4	0,365	0,232	3,10	0,00219	0,0001014	0,00193	1,257	1,832

Tabla 34: Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 1500 rpm (1)

	Consumo específico efectivo (SFCe) [g/kWh]	Consumo específico indicado (SFCi) [g/kWh]	pme [bar]	pmi [bar]	Potencia absorbida por pérdidas mecánica (Wm) [kW]	rendimiento o volumétrico ( $\eta_v$ ) [%]	rendimiento o efectivo ( $\eta_e$ ) [%]	rendimiento o indicado ( $\eta_i$ ) [%]	rendimiento o mecánico ( $\eta_m$ ) [%]
Nº 1	551,156	194,755	1,070	3,068	0,575	70,74	15,380	43,524	35,336
Nº 2	370,605	193,527	2,140	4,152	0,575	70,16	22,872	43,800	52,219
Nº 3	311,523	193,493	3,210	5,236	0,575	67,86	27,210	43,808	62,112
Nº 4	290,474	199,296	4,280	6,320	0,575	66,71	29,182	42,533	68,611

Tabla 35: Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 1500 rpm (2)

### 2.3. Tablas de resultados calculados en el ensayo experimental a 2250 rpm.

	Par efectivo [N·m]	Régimen [rpm]	Caudal volumétrico de aire de admisión [l/min]	Temperatura del de admisión [°C]	Tiempo [s]	Temperatura del combustible [°C]	Temperatura gases de escape [°C]	Dosado
Nº 1	2,0	2250	165	25,7	50	45,3	206	0,024
Nº 2	4,0	2250	163	25,6	38	43	278	0,032
Nº 3	6,0	2250	159	25,5	29	36,1	341	0,043
Nº 4	8,0	2250	159	25,3	25	40,8	400	0,050

Tabla 36: Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 2250 rpm

	Consumo del combustible (mc) [kg/h]	Cilindrada (VT) [l]	Velocidad lineal media [m/s]	Caudal másico de aire (maire)[kg/s]	Caudal másico del combustible (mc) [kg/s]	Caudal volumétrico de aire [m <sup>3</sup> /s]	Potencia efectiva (We)[kW]	Potencia indicada (Wi)[kW]
Nº 1	0,265	0,232	4,65	0,00311	0,0000736	0,00275	0,471	1,456
Nº 2	0,355	0,232	4,65	0,00307	0,0000987	0,00272	0,942	1,927
Nº 3	0,466	0,232	4,65	0,00300	0,0001294	0,00265	1,414	2,398
Nº 4	0,540	0,232	4,65	0,00300	0,0001501	0,00265	1,885	2,869

Tabla 37: Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 2250 rpm (1)

	Consumo específico efectivo (SFCe) [g/kWh]	Consumo específico indicado (SFCi) [g/kWh]	pme [bar]	pmi [bar]	Potencia absorbida por pérdidas mecánicas (Wm) [kW]	rendimiento volumétrico ( $\eta_v$ ) [%]	rendimiento efectivo ( $\eta_e$ ) [%]	rendimiento indicado ( $\eta_i$ ) [%]	rendimiento mecánico ( $\eta_m$ ) [%]
Nº 1	561,963	181,930	1,070	3,349	0,984	63,26	15,084	46,592	32,374
Nº 2	377,107	184,454	2,140	4,433	0,984	62,50	22,478	45,955	48,913
Nº 3	329,427	194,203	3,210	5,517	0,984	60,96	25,731	43,648	58,952
Nº 4	286,601	188,278	4,280	6,601	0,984	60,96	29,576	45,022	65,693

Tabla 38: Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 2250 rpm (2)

## 2.4. Tablas de resultados calculados en el ensayo experimental a 3000 rpm.

	Par efectivo [N·m]	Régimen [rpm]	Caudal volumétrico de aire de admisión [l/min]	Temperatura del de admisión [°C]	Tiempo [s]	Temperatura del combustible [°C]	Temperatura gases de escape [°C]	Dosado
Nº 1	2,0	3000	193	25,9	35	51,2	254	0,030
Nº 2	4,0	3000	190	26,3	27	51,1	321	0,039
Nº 3	6,0	3000	188	26,4	22	51,1	397	0,048
Nº 4	8,0	3000	182	26,8	18	53	477	0,061

Tabla 39: Valores medidos en el ensayo experimental para los puntos de operación a 3000 rpm

	Consumo del combustible (mc) [kg/h]	Cilindrada (VT) [l]	Velocidad lineal media [m/s]	Caudal másico de aire (maire)[kg/s]	Caudal másico del combustible (mc) [kg/s]	Caudal volumétrico de aire [m <sup>3</sup> /s]	Potencia efectiva (We)[kW]	Potencia indicada (Wi)[kW]
Nº 1	0,386	0,232	6,20	0,00360	0,0001072	0,00318	0,628	2,117
Nº 2	0,500	0,232	6,20	0,00358	0,0001389	0,00317	1,257	2,746
Nº 3	0,614	0,232	6,20	0,00355	0,0001705	0,00313	1,885	3,374
Nº 4	0,750	0,232	6,20	0,00343	0,0002084	0,00303	2,513	4,002

Tabla 40: Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 3000 rpm (1)

	Consumo específico efectivo (SFCe) [g/kWh]	Consumo específico indicado (SFCi) [g/kWh]	pme [bar]	pmi [bar]	Potencia absorbida por pérdidas mecánicas (Wm) [kW]	rendimiento volumétrico ( $\eta_v$ ) [%]	rendimiento efectivo ( $\eta_e$ ) [%]	rendimiento indicado ( $\eta_i$ ) [%]	rendimiento mecánico ( $\eta_m$ ) [%]
Nº 1	614,145	182,239	1,070	3,653	1,489	54,92	13,802	46,514	29,674
Nº 2	398,057	182,177	2,140	4,737	1,489	54,64	21,295	46,529	45,767
Nº 3	325,683	181,946	3,210	5,821	1,489	54,06	26,027	46,588	55,866
Nº 4	298,543	187,468	4,280	6,906	1,489	52,34	28,393	45,216	62,794

Tabla 41: Parámetros calculados con los valores medidos en el ensayo experimental a 3000 rpm (2)

## 2.5. Tablas de resultados de las pérdidas mecánicas calculadas en el ensayo experimental y el modelo.

ARRASTRE ENSAYO				
1500	2000	2500	3000	[rpm]
3,66	3,85	4,44	4,74	[Nm]
0,57	0,81	1,16	1,49	[KW]
1,72	1,73	1,96	2,04	[bar]

Tabla 42: Valores del parámetro de pérdidas mecánicas obtenidos en el ensayo experimental

ARRASTRE MODELO				
1500	2000	2500	3000	[rpm]
3,68	3,99	4,34	4,71	[Nm]
0,58	0,84	1,14	1,48	[KW]
1,74	1,80	1,90	2,02	[bar]

Tabla 43: Valores del parámetro de pérdidas mecánicas obtenidos en el modelo

## 3. RESULTADOS GLOBALES CALCULADO EN EL MODELO

### 3.1. Tablas de resultados de parámetros característicos del motor exportados por el modelo realizado en OpenWAM.

	Par efectivo [Nm]		Potencia efectiva [KW]		$p_{me}$ [bar]		$p_{mi}$ [bar]		$p_{mpm}$ [bar]	
	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo
1500 rpm	2	2,13	0,31	0,33	1,07	1,15	3,07	3,21	1,72	1,74
	4	4,07	0,63	0,64	2,14	2,21	4,15	4,28	1,72	1,74
	6	5,96	0,94	0,94	3,21	3,23	5,24	5,32	1,72	1,74
	8	8,10	1,26	1,27	4,28	4,39	6,32	6,48	1,72	1,74
2250 rpm	2	2,04	0,47	0,48	1,07	1,10	3,35	3,43	1,84	1,85
	4	3,91	0,94	0,92	2,14	2,12	4,43	4,47	1,84	1,85
	6	6,20	1,41	1,46	3,21	3,36	5,52	5,74	1,84	1,85
	8	7,70	1,88	1,81	4,28	4,17	6,60	6,56	1,84	1,85
3000 rpm	2	2,03	0,63	0,64	1,07	1,10	3,65	3,72	2,04	2,02
	4	3,89	1,26	1,22	2,14	2,11	4,74	4,74	2,04	2,02
	6	5,67	1,88	1,78	3,21	3,07	5,82	5,71	2,04	2,02
	8	7,71	2,51	2,42	4,28	4,18	6,91	6,83	2,04	2,02

Tabla 44: Resultados de los parámetros principales del motor para en análisis comparativo de ensayo-modelo (1)

	$\eta_v$ [%]		$\eta_e$ [%]		Dosado [f]		$m_{a/cc}$ [g/cc]		$m_{c/cc}$ [mg/cc]	
	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo
1500 rpm	70,7	72,8	15,38	16,37	0,0207	0,0204	0,186	0,187	3,848	3,848
	70,2	72,7	22,87	23,25	0,0281	0,0274	0,184	0,187	5,175	5,176
	67,9	72,6	27,21	26,98	0,0366	0,0347	0,178	0,187	6,525	6,528
	66,7	72,5	29,18	29,51	0,0463	0,0431	0,175	0,187	8,112	8,112
2250 rpm	63,3	60,0	15,08	15,05	0,0236	0,0256	0,166	0,155	3,9232	3,9920
	62,5	60,0	22,48	21,95	0,0321	0,0338	0,164	0,155	5,2654	5,2640
	61,0	59,8	25,73	26,58	0,0431	0,0444	0,160	0,154	6,8995	6,9010
	61,0	59,8	29,58	28,43	0,0500	0,0515	0,160	0,154	8,0034	8,0053
3000 rpm	54,9	50,2	13,80	13,95	0,0298	0,0329	0,144	0,129	4,29	4,29
	54,6	50,2	21,29	20,70	0,0388	0,0427	0,143	0,129	5,56	5,56
	54,1	50,1	26,03	24,56	0,0481	0,0525	0,142	0,128	6,82	6,82
	52,3	50,0	28,39	27,35	0,0607	0,0642	0,137	0,128	8,34	8,34

Tabla 45: Resultados de los parámetros principales del motor para en análisis comparativo de ensayo-modelo (2)

	$T_{ADM}^a$ [°C]		$T_{ESC}^b$ [°C]		$\eta_i$ [%]		$SFC_e$ [g/KWh]	
	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo	Ensayo	Modelo
1500 rpm	24,5	24,2	161,0	170,3	43,5	45,6	551,2	518,8
	24,7	24,2	214,0	213,5	43,8	45,1	370,6	364,6
	24,7	23,8	278,0	264,4	43,8	44,5	311,5	314,2
	25,0	23,8	348,0	329,8	42,5	43,6	290,5	287,2
2250 rpm	25,7	24,2	206,0	204,7	46,6	47,0	562,0	563,0
	25,6	24,2	278,0	256,7	46,0	46,3	377,1	386,1
	25,5	24,2	341,0	329,7	43,6	45,4	329,4	318,9
	25,3	24,2	400,0	395,0	45,0	44,7	286,6	298,1
3000 rpm	25,9	24,2	254,0	243,0	46,5	47,4	614,1	607,5
	26,3	24,2	321,0	306,7	46,5	46,5	398,1	409,5
	26,4	24,2	397,0	378,8	46,6	45,7	325,7	345,1
	26,8	24,2	477,0	474,7	45,2	44,7	298,5	310,0

Tabla 46: Resultados de los parámetros principales del motor para en análisis comparativo de ensayo-modelo (3)

## 4. RESULTADOS GLOBALES DEL ESTUDIO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE PLENA CARGA CON EL MODELO

### 4.1. Tabla de valores para la configuración de puntos de operación de las simulaciones con OpenWAM.

Régimen [rpm]	$SFC_e$ [g/KWh]	$w_e$ [KW]	$\dot{m}_{aire}$ [g/ciclo]	$\dot{m}_{comb}$ [g/ciclo]
1500	274,7	1,5	0,15	9,17
1800	266,8	1,9	0,15	9,17
2000	261,8	2,1	0,15	9,17
2300	255,9	2,5	0,15	9,17
2600	255,3	2,8	0,15	9,17
3000	265,9	3,1	0,15	9,17
3600	290,9	3,4	0,15	9,17

Tabla 47: Datos de entrada para la simulación de los puntos de operación a plena carga



## 4.2. Tabla de resultados comparativos de parámetros característicos de las curvas de plena carga.

Régimen [rpm]	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			SFC <sub>e</sub> [g/KWh]		
	Fabricante	Modelo	Error [%]	Fabricante	Modelo	Error [%]	Fabricante	Modelo	Error [%]
1500	9,5	9,6	-1%	1,5	1,5	0%	274,7	273,8	0%
1800	9,8	9,9	-1%	1,9	1,9	2%	266,8	271,9	-2%
2000	10,1	9,8	2%	2,1	2,1	2%	261,8	273,7	-4%
2300	10,2	9,8	5%	2,5	2,4	6%	255,88	269,5	-5%
2600	10,2	9,6	6%	2,8	2,6	7%	255,3	273,0	-6%
3000	9,8	9,4	5%	3,1	2,9	5%	265,9	281,0	-5%
3600	9,0	8,7	4%	3,4	3,3	4%	290,9	304,0	-4%

Tabla 48: Resultados comparativos de parámetros de plena carga fabricante-modelo

## 5. RESULTADOS GLOBALES DE LA PROPUESTA DE ESTUDIO DE SOBREALIMENTACIÓN

### 5.1. Tabla de datos de gastos máxicos calculados para los puntos de operación.

N °1 [4 Nm] [1500 rpm]	$P_{SOB}$ [bar]	0,955	1,05	1,10	1,15
	$f$	0,028	0,028	0,028	0,028
	$\dot{m}_a$	0,192	0,211	0,221	0,231
	$\dot{m}_c$	5,395	5,930	6,210	6,491
N °2 [6 Nm] [1500 rpm]	$P_{SOB}$ [bar]	0,955	1,05	1,10	1,15
	$f$	0,0366	0,0366	0,0366	0,0366
	$\dot{m}_a$	0,192	0,211	0,221	0,231
	$\dot{m}_c$	7,027	7,722	8,089	8,455

Tabla 49: Valores entrada de gastos máxicos de aire y combustible para 1500 rpm

N °1 [4 Nm] [3000 rpm]	$P_{SOB}$ [bar]	0,955	1,05	1,10	1,15
	$f$	0,0388	0,0388	0,0388	0,0388
	$\dot{m}_a$	0,132	0,146	0,152	0,159
	$\dot{m}_c$	5,121	5,626	5,898	6,169
N °2 [6 Nm] [3000 rpm]	$P_{SOB}$ [bar]	0,955	1,05	1,10	1,15
	$f$	0,048	0,048	0,048	0,048
	$\dot{m}_a$	0,132	0,145	0,151	0,158
	$\dot{m}_c$	6,349	7,023	7,263	7,600

Tabla 50: Valores entrada de gastos máxicos de aire y combustible para 3000 rpm

## 5.2. Tablas de resultados comparativos de parámetros de operación para los intervalos de presión de sobrealimentación definidos.

### ▪ Resultados para $P_{SOB} = 0,955 \text{ bar}$

0,955 bar	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			$\eta_v$ [%]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	4	4,41	-9%	0,63	0,69	-9%	70,16	74,30	-6%
	6	6,68	-10%	0,94	1,05	-10%	67,86	74,19	-9%
3000 rpm	4	3,28	22%	1,26	1,03	22%	54,64	51,54	6%
	6	5,03	19%	1,88	1,58	19%	54,06	51,48	5%

Tabla 51: Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo a presión atmosférica

0,955 bar	Dosado [f]			$SFC_e$ [g/KWh]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	0,0281	0,0281	0%	370,60	351,18	6%
	0,0366	0,0366	0%	311,52	301,63	3%
3000 rpm	0,0388	0,0384	1%	398,06	448,68	-11%
	0,0481	0,0477	1%	325,68	361,67	-10%

Tabla 52: Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo a presión atmosférica

### ▪ Resultados para $P_{SOB} = 1,05 \text{ bar}$

1,05 bar	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			$\eta_v$ [%]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	4	5,17	-23%	0,63	0,81	-23%	70,16	74,27	-6%
	6	7,68	-22%	0,94	1,21	-22%	67,86	74,17	-8%
3000 rpm	4	4,04	-1%	1,26	1,27	-1%	54,64	51,53	6%
	6	5,99	0%	1,88	1,88	0%	54,06	51,48	5%

Tabla 53: Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,05 bar)

1,05 bar	Dosado [f]			SFC <sub>e</sub> [g/KWh]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm						
	0,0281	0,0281	0%	370,60	328,57	13%
	0,0366	0,0366	0%	311,52	288,36	8%
3000 rpm						
	0,0388	0,0386	0%	398,06	401,95	-1%
	0,0481	0,0480	0%	325,68	336,19	-3%

Tabla 54: Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,05 bar)

▪ **Resultados para  $P_{SOB} = 1,10$  bar**

1,10 bar	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			$\eta_v$ [%]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm									
	4	5,58	-28%	0,63	0,88	-28%	70,16	74,29	-6%
	6	8,21	-27%	0,94	1,29	-27%	67,86	74,16	-8%
3000 rpm									
	4	4,37	-8%	1,26	1,37	-8%	54,64	51,51	6%
	6	6,33	-5%	1,88	1,99	-5%	54,06	51,47	5%

Tabla 55: Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,10 bar)

1,10 bar	Dosado [f]			SFC <sub>e</sub> [g/KWh]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm						
	0,0281	0,0280	0%	370,60	319,19	16%
	0,0366	0,0366	0%	311,52	282,47	10%
3000 rpm						
	0,0388	0,0384	1%	398,06	387,41	3%
	0,0481	0,0473	2%	325,68	329,36	-1%

Tabla 56: Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,10 bar)

▪ **Resultados para  $P_{SOB} = 1,15 \text{ bar}$**

1,15 bar	Par efectivo [Nm]			Potencia efectiva [KW]			$\eta_v$ [%]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	4	5,98	-33%	0,63	0,94	-33%	70,16	74,27	-6%
	6	8,74	-31%	0,94	1,37	-31%	67,86	74,17	-8%
3000 rpm	4	4,74	-16%	1,26	1,49	-16%	54,64	51,53	6%
	6	6,80	-12%	1,88	2,14	-12%	54,06	51,48	5%

Tabla 57: Resultados comparativos principales (1) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,15 bar)

1,15 bar	Dosado [f]			SFC <sub>e</sub> [g/kWh]		
	Ensayo	Modelo	Error [%]	Ensayo	Modelo	Error [%]
1500 rpm	0,0281	0,0281	0%	370,60	311,07	19%
	0,0366	0,0366	0%	311,52	277,34	12%
3000 rpm	0,0388	0,0384	1%	398,06	373,17	7%
	0,0481	0,0474	1%	325,68	320,38	2%

Tabla 58: Resultados comparativos principales (2) del ensayo-modelo sobrealimentado (1,15 bar)

**5.3. Tabla de resultados comparativos del parámetro de potencia específica.**

PSOB	[1500 rpm]		[3000 rpm]		
	Wespecífica [kW/l]		Wespecífica [kW/l]		
	Nº1	Nº2	Nº1	Nº2	
0,955	2,85	4,32	0,955	4,23	6,51
1,05	3,35	4,96	1,05	5,23	7,75
1,1	3,61	5,31	1,1	5,65	8,18
1,15	3,87	5,65	1,15	6,13	8,80

Tabla 59: Valores de potencia específica de los puntos de operación

#### 5.4. Tabla de resultados comparativos del parámetro de presión máxima en cámara.

[1500 rpm]			[3000 rpm]		
PSOB	P <sub>MAX</sub> [bar]		PSOB	P <sub>MAX</sub> [bar]	
	Nº1	Nº2		Nº1	Nº2
0,955	60,89	63,99	0,955	46,32	48,91
1,05	66,96	70,39	1,05	51,07	53,92
1,1	70,24	73,79	1,1	53,46	56,26
1,15	73,46	77,15	1,15	55,89	58,86

Tabla 60: Valores de presión máxima en cámara de los puntos de operación

#### 5.5. Tabla de resultados comparativos del parámetro de carga térmica.

[1500 rpm]			[3000 rpm]		
PSOB	Carga térmica [Kw/m <sup>2</sup> ]		PSOB	Carga térmica [Kw/m <sup>2</sup> ]	
	Nº1	Nº2		Nº1	Nº2
0,955	229,21	347,50	0,955	340,81	523,92
1,05	269,25	399,40	1,05	420,83	623,51
1,1	290,23	427,10	1,1	454,56	658,17
1,15	311,28	454,70	1,15	493,57	708,01

Tabla 61: Valores de carga térmica de los puntos de operación



## ANEXO DE PROCEDIMIENTOS PARA EL MODELO

### 1. PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE MOTOR HATZ 1B20

#### 1.2. Construcción del esquema del motor con WAMer

Desde la interfaz gráfica de WAMer se ha construido el esquema del modelo del motor HATZ 1B20, representado en la siguiente figura.

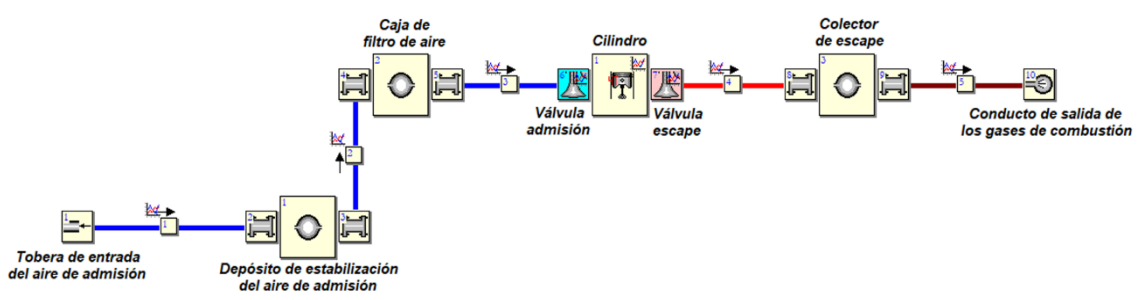


Figura 59: Esquema representativo del modelo de motor HATZ 1B20 planteado

En el modelo se puede apreciar que dispone una estructura sencilla debido que se trata de un motor monocilíndrico de cuatro tiempos con una válvula de admisión de aire y una válvula de escape para los gases de combustión. El modelo incorpora adicionalmente tres depósitos utilizados para:

- Depósito N°1: Depósito estabilizador de aire de admisión ubicado en la parte inferior del bastidor móvil del banco de pruebas.
- Depósito N°2: Caja de filtro de aire de admisión ubicado en la parte superior del motor (lado admisión).

- Depósito N°3: Silenciador para la línea de evacuación de los gases de combustión situado en la parte superior del motor (lado escape)

El modelo incorpora varios conductos para la circulación controlada de los flujos y el análisis de los mismos. En el esquema, se puede apreciar que los conductos se pueden diferenciar por el color representado en el nodo, debido a que en el modelo podemos diferenciar el conducto en pipas o puertos, como es el ejemplo del sistema de flujos de los gases de combustión, donde se tiene la siguiente configuración:

- El nodo N°4 representa un conducto tipo puerto de los gases de escape (color rojo intenso) al disponer el motor HATZ de un silenciador de escape acoplado en la misma culata.
- El nodo N°5 representa un conducto tipo pipa de los gases de escape (color marrón) al disponer el motor HATZ de una tubería corrugada con capa externa de malla reforzada de acero inoxidable para aportar flexibilidad y evacuar los gases de combustión a una zona exterior controlada.

### **1.3. Configuración del modelo del motor HATZ 1B20 en WAMer**

Para describir el proceso de configuración del modelo construido para el motor seleccionado en el estudio se clasificará cada elemento en apartados diferenciados con el objetivo de exponer detalladamente cada ajuste realizado para una mejor interpretación del modelo final, con el que se han realizado las simulaciones posteriores. El orden de prioridad establecido para describir cada uno de los elementos implementados en el modelo será el siguiente:

#### **Cuadros auxiliares de parámetros generales del motor**

- Cuadro de ejecución.
- Cuadro de ajustes generales del motor.

#### **Elementos instalados en el esquema de construcción del motor**

- Cilindro N°1
- Válvula de admisión de aire



- Válvula de escape para los gases de combustión
- Depósito de estabilización del aire de admisión (Nº1)
- Caja de filtro de aire de admisión del motor (Nº2)
- Silenciador de escape para los gases de combustión (Nº3)
- Conducto de entrada al sistema del aire de admisión (nodo Nº1)
- Conducto de aspiración entre los depósitos del sistema del aire de admisión (nodo Nº2)
- Conducto de entrada del aire de admisión al motor (nodo Nº3)
- Conducto de salida de los gases de combustión del motor (nodo Nº4)
- Conducto de evacuación de los gases de combustión (nodo Nº5)
- Sonda de entrada del aire atmosférico
- Sonda de salida del aire atmosférico

### 1.3.1. Configuración del cuadro de ejecución

Al seleccionar el menú de datos (Data) del cuadro de ejecución en el modelo, se deben introducir datos relacionados con la metodología de cálculo, condiciones ambientales o del combustible. Para el modelado del motor HATZ 1B20, se han realizado las configuraciones mostradas en la figura 2. El criterio tomado ha sido el siguiente:

- En la simulación se va a utilizar una metodología de cálculo independiente, siguiendo las directrices establecidas en los diferentes modelos de ejemplos que se estudiaron previamente.
- Para el proceso de simulación del modelo en las condiciones de funcionamiento programadas, se determinó fijar el número de ciclos a 100, con el objetivo de tomar un valor medio de los parámetros de funcionamiento relativamente estabilizado, teniendo en cuenta que en los primeros ciclos de motor suelen existir variaciones importantes.

- Se configura una relación del calor específico de tipo constante, para simplificar el análisis de cálculo.
- Los valores de temperatura y presión ambiental introducidos se toman en el momento y ubicación en el que fueron realizados los ensayos experimentales, debido a que el estudio tiene como objetivo la realización de un análisis comparativo con los resultados modelo-ensayo.
- Se configura un modelo de cálculo de especies extendido y se desactiva la función de permisos para cálculos externos.
- En la configuración no se activa el modo de consideración de las especies del combustible, por lo que el modelo no solicita el tipo de combustible utilizado.
- En el cuadro de ejecución se imponen en el apartado de métodos numéricos del modelo de Lax Wendroff, siendo el más apropiado para el estudio.

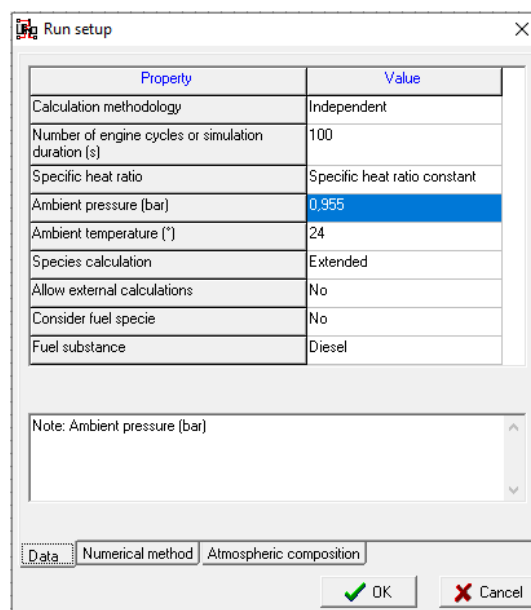


Figura 60: Cuadro de configuración de ejecución del modelo

### 1.3.2. Calibración del cuadro de ajustes generales del motor

En el modelo, se ha seleccionado un cuadro de motor de cuatro tiempos, siguiendo las especificaciones del motor seleccionado. La figura 3 muestra un ejemplo del cuadro de datos (Data), que debido a que el volumen de ajustes en este apartado es muy importante, es necesario dividir las configuraciones según los subapartados siguientes:

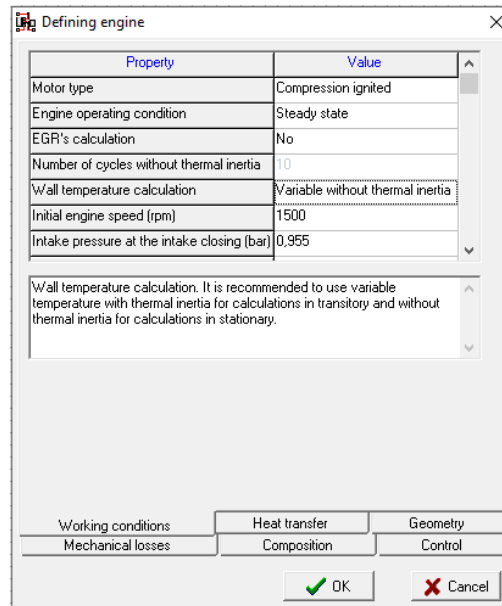


Figura 61: Cuadro de configuración de datos generales del motor en el modelo

#### ❖ Condiciones de trabajo (Working conditions):

- **Tipo de motor:** Ignición por compresión
- **Condiciones de operación del motor:** Estado constante (Esta función permite el cálculo de operación del motor en estado transitorio a velocidad constante o variable)
- **Cálculo de sistema de recirculación de gases 'EGR':** No activado
- **Número de ciclos sin inercia térmica:** 10 ciclos
- **Método de cálculo de la temperatura de pared:** Cálculo variable con inercia térmica (permite el cálculo de temperatura constante o variable sin inercia térmica)
- **Presión en el sistema de admisión en el cierre:** 0.955 (bar)
- **Presión en el cilindro al abrir la válvula de escape:** Calculado (puede seleccionarse una presión impuesta)

- **Eficiencia de la combustión:** 0.975
- **Poder calorífico del combustible (PCI):** 42470 (KJ/Kg)
- **Densidad del combustible:** 830 (Kg/m<sup>3</sup>)
- **Número del nodo del conducto seleccionado para el cálculo de la Eficiencia Volumétrica:** 1
- **Modelo de combustión:** Imposición de la ley de liberación de calor (puede seleccionarse el modelo ACT, no aplicado en este estudio)
- **Datos de inyección:** Sin datos (el programa permite asignar datos adicionales como el ángulo y duración, o aplicar una tasa de inyección) al no disponer de información complementaria para este motor.
- **Datos de entrada relevantes para las condiciones de trabajo:** Adicionalmente, en este apartado se deben introducir los datos de entrada de régimen de motor (rpm), masa de aire consumida por ciclo de motor (g/ciclo) y masa de combustible inyectado por ciclo de motor (g/ciclo). Estos datos se configuran para distintas condiciones de operación. En las distintas simulaciones planteadas, se toman los valores de entrada tomados en los ensayos experimentales para poder contrastar los resultados obtenidos en el modelo con los resultados de los ensayos con las mismas condiciones de operación. A continuación, se adjuntan las tablas en las que se muestran los parámetros de entrada de cada simulación realizada.

N° de simulación	Régimen [rpm]	Par motor [Nm]	$\dot{m}_{\text{aire}}$ [mg/ciclo]	$\dot{m}_{\text{combustible}}$ [mg/ciclo]
1	1500	2,0	0,1856	4,168
2	1500	4,0	0,1840	5,176
3	1500	6,0	0,1768	6,256
4	1500	8,0	0,1672	8,112

Tabla 62: Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 1500

N° de simulación	Régimen [rpm]	Par motor [Nm]	$\dot{m}_{\text{aire}}$ [mg/ciclo]	$\dot{m}_{\text{combustible}}$ [mg/ciclo]
1	2250	2,0	0,1659	3,392
2	2250	4,0	0,1637	4,448
3	2250	6,0	0,1600	5,883
4	2250	8,0	0,1600	7,696

Tabla 63: Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 2250

<i>N° de simulación</i>	<i>Régimen [rpm]</i>	<i>Par motor [Nm]</i>	<i><math>\dot{m}_{\text{aire}}</math> [mg/ciclo]</i>	<i><math>\dot{m}_{\text{combustible}}</math> [mg/ciclo]</i>
1	3000	2,0	0,1456	3,660
2	3000	4,0	0,1432	5,004
3	3000	6,0	0,1420	6,524
4	3000	8,0	0,1372	8,336

Tabla 64: Valores de entrada para la configuración de los puntos de operación de las simulaciones para 3000

**NOTA:** En las simulaciones realizadas para la obtención de las pérdidas mecánicas del motor utilizando el método de arrastre, los valores de masa de combustible consumido por ciclo son nulos, ya que el par de arrastre se hace por medio de un accionador externo (el motor gira en vacío).

❖ **Transferencia de Calor (Heat transfer):**

- **Espesor de pared del cilindro (mm): 4**
- **Conductividad del material del cilindro (W K/m): 82.5**
- **Densidad del material del cilindro (Kg/m<sup>3</sup>): 6750**
- **Calor específico del material del cilindro (J K/ Kg): 405**
- **Espesor de pared del pistón (mm): 17.25**
- **Conductividad del material del pistón (W K/m): 204**
- **Densidad del material del pistón (Kg/m<sup>3</sup>): 2700**
- **Calor específico del material del pistón (J K/ Kg): 900**
- **Espesor de pared de la cabeza del cilindro (mm): 6.5**
- **Conductividad del material de la cabeza del cilindro (W K/m): 204**
- **Densidad del material de la cabeza del cilindro (Kg/m<sup>3</sup>): 2700**
- **Calor específico del material de la cabeza del cilindro (J K/ Kg): 900**

**NOTA:** Los valores indicados anteriormente son estimaciones tomadas de manuales técnicos de motores con características similares debido a que no se dispone del dato real por parte del fabricante.

- **Área del pistón (cm<sup>2</sup>): 130**
- **Temperatura media del pistón (°C): 260**
- **Área de la cabeza del cilindro (cm<sup>2</sup>): 37.39**
- **Temperatura media del cilindro: 240**
- **Ajuste de transferencia de calor del coeficiente de admisión: 1**
- **Ajuste de transferencia de calor del coeficiente de escape: 1**

- **Coefficiente de transferencia de calor por Woschni (CW1):** 0,45
- **Coefficiente de transferencia de calor por Woschni (CW2):** 0,265
- **Coefficiente de transferencia de calor por Woschni (Xpe):** 1
- **Par de motor a potencia máxima (Nm):** 10.5 (Valor máximo para el motor seleccionado)

❖ **Parámetros de geometría del motor (Geometry):**

- **Longitud de biela (mm):** 103
- **Carrera del pistón (mm):** 62
- **Diámetro del cilindro (mm):** 69
- **Relación de compresión:** 22
- **Diámetro de la cámara de combustión (mm):** 32
- **Altura de la cámara de combustión (mm):** 4.22
- **Distancia entre válvulas (mm):** 37.8
- **Sección efectiva del Blowby (m<sup>2</sup>):** 0
- **Coefficiente del Blowby:** 0
- **Excentricidad (mm):** 0
- **Diámetro del bulón de pistón (m):** 0.02
- **Altura del pistón (m):** 0.049
- **Masa de la biela (Kg):** 0.873
- **Masa del conjunto pistón + segmentos + bulón (Kg):** 0.743
- **Módulo de elasticidad (N/m<sup>2</sup>):** 199999995904
- **Coefficiente de deformación:** 0

**NOTA:** Los valores de masa introducidos son estimaciones tomadas de manuales técnicos de motores con características similares debido a que no se dispone del dato real por parte del fabricante.

❖ **Parámetros de pérdidas mecánicas (Mechanical losses):**

OpenWAM utiliza un método de cálculo que consiste en aplicar una ecuación en la que intervienen unos coeficientes de pérdidas y los parámetros de revoluciones de motor y la presión media indicada en el cilindro. El cuadro de ajustes para las pérdidas mecánicas muestra las ecuaciones que permiten el cálculo, siendo:

$$\text{Pérdidas mecánicas } (Me_{\text{closs}}) = K1 \cdot \frac{n}{60} - K2 \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 + K3 \cdot bmip + K0$$

Donde:

- $n$  = revoluciones del motor (rpm)
- $bmip$  = presión media indicada

$$\text{Par de pérdidas mecánicas} = \frac{Me_{\text{closs}} \cdot R_{\text{cyl}}^2 \cdot S}{40000}$$

Donde:

- $R_{\text{CYL}}$  = radio del cilindro
- $S$  = carrera del pistón

$$\text{Par efectivo } (Me_{\text{efec}}) = \text{Par neto} - \text{Par de pérdidas mecánicas}$$

Para el cálculo de los coeficientes de pérdidas mecánicas que reproduzca el modelo del motor HATZ 1B20, se ha optado por tomar los datos obtenidos en el ensayo experimental de las pérdidas mecánicas por el método de arrastre y posteriormente obtener una ecuación polinómica de grado 2 dependiente de las revoluciones de motor y anulando el término dependiente de la presión media indicada, con el que es posible obtener los coeficientes de pérdidas mecánicas con un margen de error relativamente pequeñas.

Los valores de los resultados obtenidos de los coeficientes de pérdidas mecánicas y que posteriormente se introducen en el cuadro de configuración es:

- **Coefficiente de pérdidas K0:** 1.6827
- **Coefficiente de pérdidas K1:**  $-6 \times 10^{-3}$
- **Coefficiente de pérdidas K2:**  $-2.5 \times 10^{-4}$
- **Coefficiente de pérdidas K3:** 0

## ❖ Parámetros de composición y control:

En estos apartados no se realizan ajustes al no necesitar cambios, por lo que no hay descripción adicional sobre ellos.

Adicionalmente, en el cuadro de datos del motor, se solicita el registro de resultados medios de los parámetros de funcionamiento del motor señalados en la captura de imagen de la figura 4.

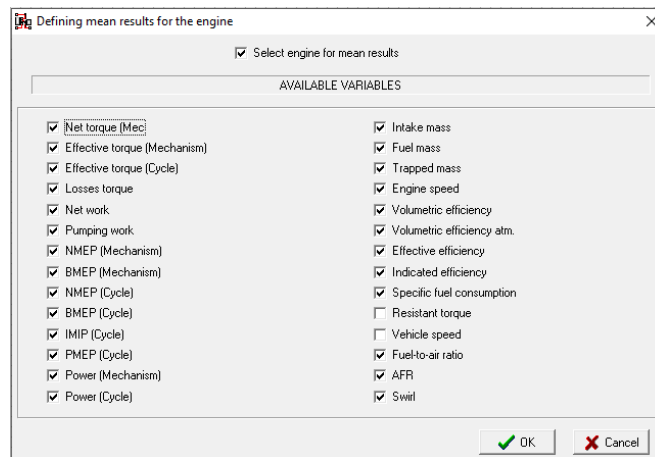


Figura 62: Cuadro de solicitud de registro de resultados medios de parámetros de funcionamiento del motor

En este punto, se da por finalizado el procedimiento de calibración del cuadro de ajustes generales del motor.

### 1.3.3. Configuración del cilindro N°1

El modelo del motor HATZ 1B20 dispone una estructura monocilíndrica, por lo que el proceso de configuración es simplificado. Este cuadro no requiere realizar ajustes importantes, debido a que todos los parámetros relacionados con el cilindro son previamente configurados en el cuadro de ajustes generales del motor. Los únicos apartados reseñables son los apartados de solicitud de resultados medios e instantáneos. Los parámetros seleccionados se muestran en las capturas de imágenes de las figuras 5 y 6.



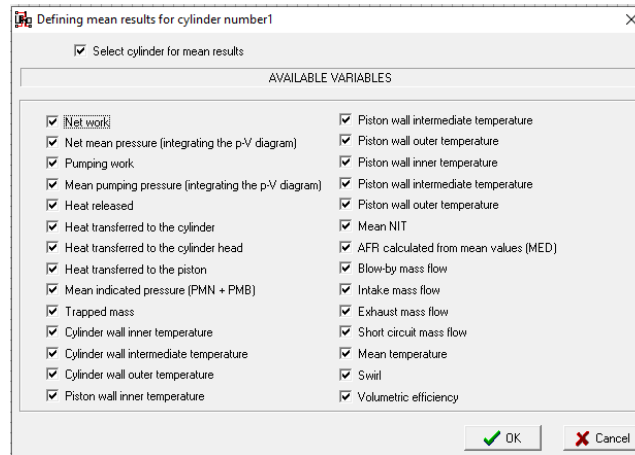


Figura 63: Cuadro de solicitud de registro de resultados medios de parámetros del cilindro del motor

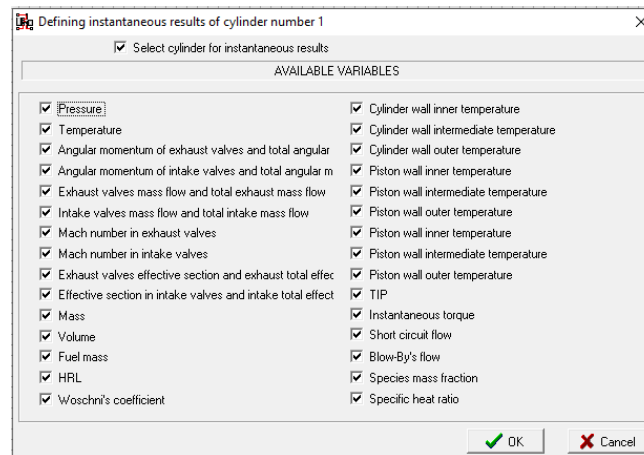


Figura 64: Cuadro de solicitud de registro de resultados instantáneos de parámetros del cilindro del motor

### 1.3.4. Configuración de la válvula de admisión de aire

El motor HATZ 1B20 dispone de una sola válvula de admisión al ser un motor monocilíndrico y no requerir de una válvula adicional. Es necesario indicar en el modelo cual es el diagrama de distribución de la válvula de admisión y que coeficiente de descarga posee, por lo que a continuación se describe el procedimiento de configuración en el cuadro de datos (Data) en la válvula.

❖ **Parámetros de cuadro de datos de la válvula de admisión (Data):**

Los datos requeridos en este apartado son los siguientes:

- **Diámetro de la cabeza de la válvula (mm):** 27
- **Ángulo de apertura de la válvula (°):** 330
- **Control de velocidad de la válvula:** Engine (es posible seleccionar un control automatizado, en este caso el motor dispone una leva que actúa sobre la válvula mecánicamente por medio de una varilla empujadora)
- **Relación de velocidad de la válvula:** 1 (por defecto)

❖ **Parámetros de coeficientes del flujo (Flow coefficients):**

Los datos requeridos en el apartado de propiedades son los siguientes:

- **Intervalo de alzamiento de la válvula (mm):** 1 (por defecto, entiendo un valor aceptable)
- **Diámetro de referencia del cálculo de coeficiente de descarga (mm):** 22.7

En el apartado inferior del cuadro de datos se introducen los valores de los coeficientes de descarga del flujo en la entrada y salida de la válvula. Para nuestro modelo, no es posible implementar los valores del fabricante debido a que no fue posible disponer de esta información. Por este motivo, se optó por implementar un modelo de un motor con características similares asumiendo que se pierde precisión en el cálculo. En la figura 7 se muestra una captura de imagen del cuadro de ajustes de los coeficientes de los flujos en la válvula.

The screenshot shows a dialog box titled "Defining valve number 6". It has a "Property" table and a "Flow coefficients" table.

Property	Value
Lift interval (mm)	1
Reference calculation diameter Cd (mm)	22.7

Note: Reference calculation diameter Cd (mm)

Number	Outlet flow coefficient	Inlet flow coefficient	Swirl coefficient
2	0,13623	0,13559	0
3	0,28234	0,27167	0
4	0,42458	0,39559	0

At the bottom, there are tabs for "Data", "Flow coefficients", "Lift", and "Control". The "Flow coefficients" tab is active. There are "OK" and "Cancel" buttons at the bottom right.

Figura 65: Cuadro de configuración de coeficientes de descarga en el conducto de la válvula de admisión del modelo

### ❖ Parámetros de alzamiento de la válvula (Lift):

En este apartado de configuración se introducen los valores de alzamiento de la válvula de admisión para el intervalo del ángulo fijado en el cuadro de propiedades. Para nuestro modelo, el valor de intervalo para registrar los valores de alzamiento es de 1°.

Los valores de alzamiento implementados han sido tomados de un modelo de otro motor con especificaciones similares debido a que no se conocen los datos del fabricante relacionados con este apartado. En la figura 8 se muestra una captura de imagen de este apartado para la válvula de admisión, en la que se puede ver que dispone de un gráfico representando la curva característica de alzamiento de la válvula configurada.

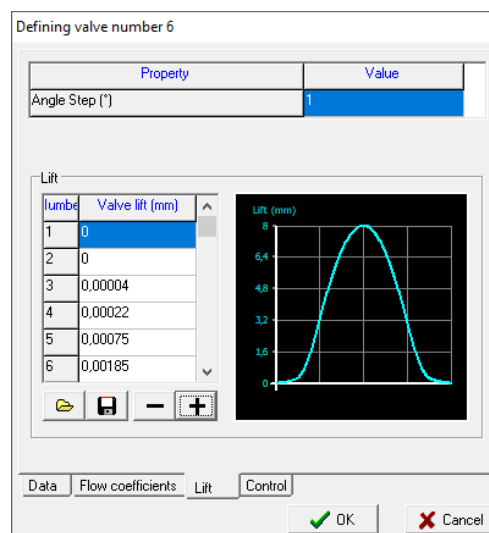


Figura 66: Cuadro de configuración del perfil de alzamiento de la válvula de admisión del modelo

Con el cuadro de datos calibrado, el siguiente paso es solicitar los resultados medios de la válvula de admisión en la simulación, seleccionando los coeficientes de descarga de entrada y salida, tal como se muestra en la figura 9.

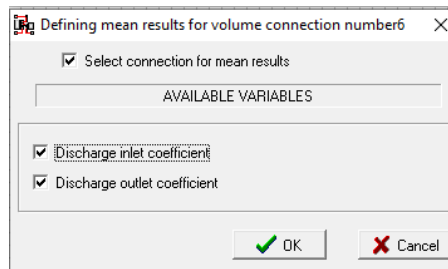


Figura 67: Cuadro de solicitud de registro de resultados medios de los coeficientes de descarga de la válvula

### 1.3.5. Configuración de la válvula de escape para los gases de combustión

El motor HATZ 1B20 dispone de una sola válvula de escape y para el procedimiento de configuración se realizan las acciones siguientes:

#### ❖ Parámetros de cuadro de datos de la válvula de escape (Data):

Los datos requeridos en este apartado son los siguientes:

- **Diámetro de la cabeza de la válvula (mm):** 24
- **Ángulo de apertura de la válvula (°):** 120
- **Control de velocidad de la válvula:** Engine (es posible seleccionar un control automatizado, en este caso el motor dispone una leva que actúa sobre la válvula mecánicamente por medio de una varilla empujadora)
- **Relación de velocidad de la válvula:** 1 (por defecto)

#### ❖ Parámetros de coeficientes del flujo (Flow coefficients):

Los datos requeridos en el apartado de propiedades son los siguientes:

- **Intervalo de alzamiento de la válvula (mm):** 1 (por defecto, entiendo un valor aceptable)
- **Diámetro de referencia del cálculo de coeficiente de descarga (mm):** 22

En el apartado inferior del cuadro de datos se introducen los valores de los coeficientes de descarga del flujo en la entrada y salida de la válvula. Para nuestro modelo, no es posible implementar los valores del fabricante debido a que no fue posible

disponer de esta información. Por este motivo, se utiliza el mismo criterio que el optado en la válvula de admisión.

❖ **Parámetros de alzamiento de la válvula (Lift):**

En este apartado de configuración se introducen los valores de alzamiento de la válvula de escape para el intervalo del ángulo fijado en el cuadro de propiedades. Para nuestro modelo, el valor de intervalo para registrar los valores de alzamiento es de  $0.95^\circ$ .

Los valores de alzamiento implementados han sido tomados de un modelo de otro motor con especificaciones similares debido a que no se conocen los datos del fabricante relacionados con este apartado. En la figura 10 se muestra una captura de imagen de este apartado para la válvula de escape, en la que se puede ver que dispone de un gráfico representando la curva característica de alzamiento de la válvula configurada.

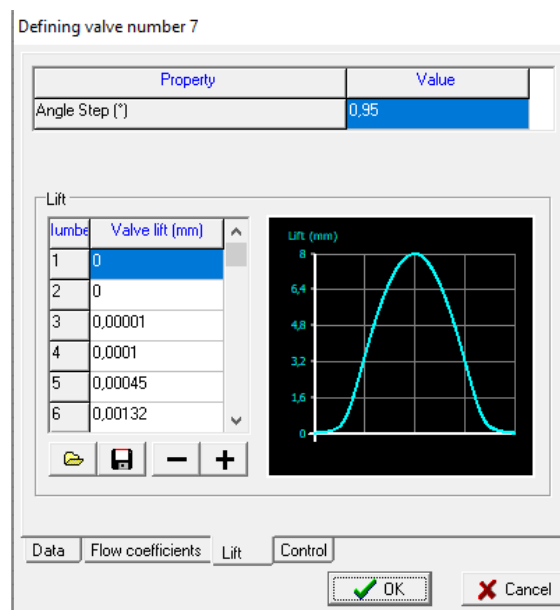


Figura 68: Cuadro de configuración del perfil de alzamiento de la válvula de escape del modelo

Con el cuadro de datos calibrado, el siguiente paso es solicitar los resultados medios de la válvula de escape realizando el mismo procedimiento que en la válvula de admisión.

### 1.3.6. Configuración del depósito de estabilización del aire de admisión (Nº1)

Para configurar el depósito de estabilización del aire de admisión solo realizamos ajustes en el cuadro de datos (Data). En la figura 11 se muestra el cuadro de datos en los que se introducen las siguientes variables:

- **Volumen del depósito (cm<sup>3</sup>):** 31500 (Medido previamente)
- **Temperatura inicial (°C):** 24.5
- **Presión inicial (bar):** 0.955

Property	Value
Plenum volume (cm3)	31500.001
Initial temperature (°C)	24.5
Initial pressure (bar)	0.955

Note: Initial temperature (°C)

Data Composition

OK Cancel

Figura 69: Cuadro de configuración de un depósito en el modelo

### 1.3.7. Configuración de la caja de filtro de aire de admisión del motor (Nº2)

Los datos introducidos para la configuración de la caja del filtro de aire de admisión son los siguientes:

- **Volumen del depósito (cm<sup>3</sup>):** 950 (Medido previamente)
- **Temperatura inicial (°C):** 25
- **Presión inicial (bar):** 0.955

### 1.3.8. Configuración del silenciador de escape para los gases de combustión (Nº3)

Los datos introducidos para la configuración de la caja del filtro de aire de admisión son los siguientes:

- **Volumen del depósito (cm<sup>3</sup>):** 1775 (Medido previamente)
- **Temperatura inicial (°C):** 161
- **Presión inicial (bar):** 0.955

### 1.3.9. Configuración del conducto de entrada al sistema del aire de admisión (nodo Nº1)

El conducto de entrada al sistema de admisión de aire se encuentra en el interior del depósito de estabilización, el cual fue medido previamente para poder configurar este nodo en el modelo. En la figura 12 se muestra el cuadro de configuración de datos para el conducto Nº1, en el que se describirá el proceso de calibrado a continuación.

Property	Value
Spatial mesh (mm)	10
Duct type	Intake pipes
Wall temperature calculation	Variable without thermal inertia
Duct roughness (mm)	0.15
Initial wall temperature (°C)	24
Initial gas temperature (°C)	24
Initial gas pressure (bar)	0.955
Initial gas velocity (m/s)	0.01
Heat transfer correction coefficient	1
Friction correction coefficient	1
Nº of intercooler ducts	1

Note: Duct roughness (mm)

Data | Geometry | Heat transfer | Layers | Numerical method | Composition

OK Cancel

Figura 70: Cuadro de configuración de un conducto del sistema de admisión del modelo

❖ **Parámetros de cuadro de datos del conducto N°1 (Data):**

Los datos solicitados en este apartado son los siguientes:

- **Mallado espacial (mm):** 10
- **Tipo de conducto:** pipa de admisión
- **Método de cálculo de la temperatura de pared:** Cálculo variable sin inercia térmica (permite el cálculo de temperatura constante o variable con inercia térmica)
- **Rugosidad en la pared del conducto (mm):** 0.15
- **Temperatura inicial de la pared del conducto (°C):** 24
- **Temperatura inicial del flujo (°C):** 24
- **Presión inicial del flujo (bar):** 0.955
- **Velocidad inicial del flujo (m/s):** 0.01
- **Coefficiente de corrección de transferencia de calor:** 1
- **Coefficiente de corrección de fricción:** 1

❖ **Parámetros geométricos del conducto N°1 (Geometry):**

En este apartado se introducen los valores de geometría constructiva del conducto, en el que se introduce el valor de diámetro de entrada en el cuadro superior de propiedades y posteriormente se añaden las dimensiones (longitud y diámetro de salida) de los tramos que pueda contener el conducto, debido a que por necesidades en el diseño el conducto puede contener variaciones. En la figura 13 se muestra la captura de imagen del apartado de parámetros geométricos en el que se puede ver que el cuadro de datos de salida permite añadir tramos adicionales para las distintas configuraciones.

Los valores configurados para el conducto N°1 son los siguientes:

- **Diámetro de entrada (mm):** 86.3
- **Longitud de tramo 1 (mm):** 80
- **Diámetro de salida (mm):** 86.3



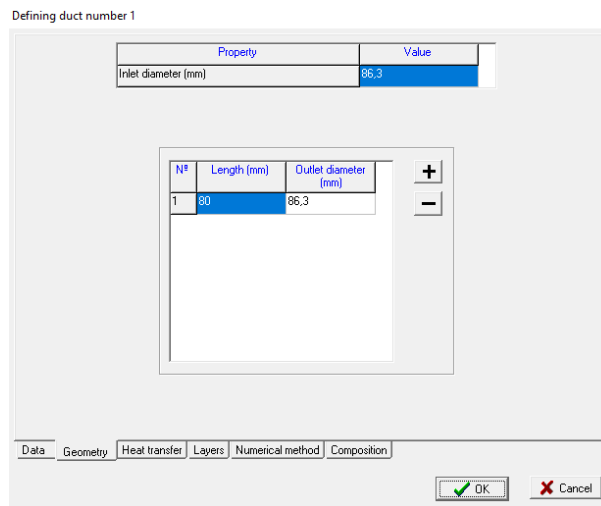


Figura 71: Cuadro de configuración de los parámetros geométricos del conducto en el modelo

#### ❖ **Parámetros de la transferencia de calor del conducto N°1 (Heat transfer):**

Los datos solicitados en este apartado son los siguientes:

- **Tipo de refrigerante:** aire (permite seleccionar que el conducto esté refrigerado por agua, en ese caso se activa una función adicional para introducir la temperatura del agua de refrigeración)
- **Coefficiente de corrección de convección externa:** 1
- **Emisividad externa:** 0.5

#### ❖ **Parámetros de configuración de capas del conducto N°1 (Layers):**

En este apartado pueden introducirse los valores característicos de las capas existentes en la pared del conducto, incluyendo la posibilidad de añadir una capa de un fluido destinado a refrigerar la pared. En la figura 14 se muestra el ejemplo de la tabla donde se introducen los datos correspondientes. Para el conducto N°1 los parámetros son los siguientes:

- **Capa principal:** SI (indica si la capa seleccionada es la capa principal de la pared del conducto)
- **Capa de fluido:** No (indica se la capa seleccionada es de un fluido)
- **Espesor de pared (mm):** 0.015
- **Densidad del material (Kg/m<sup>3</sup>):** 2707
- **Calor específico del material (J K/Kg):** 896
- **Conductividad del material (W K/m):** 204

Defining duct number 1

Nº	Main layer	Fluid layer	Wall thickness (mm)	Material density (kg/m <sup>3</sup> )	Material specific heat (J/kg/K)	Material conductivity (W/m/K)	Internal emissivity	External emissivity
1	Yes	No	0.015	2707	896	204	0	0

NOTE: The layers must be created from inner to outer.

Data Geometry Heat transfer Layers Numerical method Composition

OK Cancel

Figura 72: Cuadro de configuración de las capas de paredes de un conducto en el modelo

❖ **Configuración del método numérico para el cálculo del conducto N<sup>o</sup>1 (Numerical method):**

En este apartado se configura el método de cálculo numérico empleado para el análisis del flujo en el conducto. Para el conducto N<sup>o</sup>1 se realizaron los ajustes siguientes:

- **Método numérico:** Lax Wendroff
- **Submodelo:** Sin corrector

Defining duct number 1

Property	Value
Method	Lax Wendroff
Courant number	Lax Wendroff
	CE-SE
	TVD

Property	Value
Submodel	Without correction

Data Geometry Heat transfer Layers Numerical method Composition

OK Cancel

Figura 73: Cuadro de configuración del método de cálculo numérico para el análisis del flujo en el conducto

Finalizado el proceso de configuración del cuadro de datos, el siguiente paso es solicitar los resultados medios del conducto N°1 para la realización de las simulaciones. En este caso, para el análisis en la simulación es necesario registrar la distancia de los puntos de estudios desde la entrada del conducto. En la figura 16 se muestra una captura de pantalla de la configuración realizada para el conducto N°1, en el cual se asigna las distancias de los puntos de análisis y los parámetros de estudio:

- **Distancia el punto de estudio N°1: 10**
- **Distancia el punto de estudio N°2: 40**
- **Distancia el punto de estudio N°3: 70**
  
- **Variables de estudio seleccionadas:**
  - Temperatura del flujo
  - Presión del flujo
  - Velocidad del flujo
  - Masa del flujo
  - Temperatura interna de pared

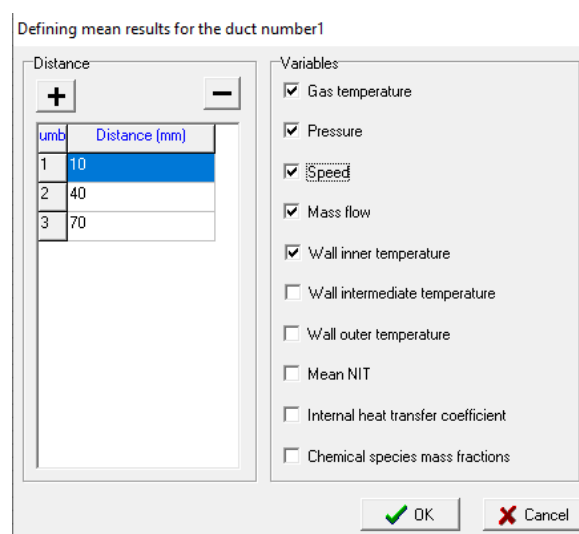


Figura 74: Cuadro de solicitud de resultados medios para parámetros del flujo en el conducto

### 1.3.10. Configuración del conducto de aspiración entre los depósitos del sistema del aire de admisión (nodo N°2)

En el conducto N°2 fluye el aire de admisión desde el depósito de estabilización hasta la caja del filtro de aire principal del motor, situado en la parte superior (junto al puerto de admisión de la culata). Es un tubo flexible de conexión rápida, con una longitud aproximada de 1.5m y 34 mm de diámetro interno. A continuación, se describe el proceso de configuración del conducto.

#### ❖ Parámetros de cuadro de datos del conducto N°2 (Data):

Los datos solicitados en este apartado son los siguientes:

- **Mallado espacial (mm):** 10
- **Tipo de conducto:** pipa de admisión
- **Método de cálculo de la temperatura de pared:** Cálculo variable sin inercia térmica (permite el cálculo de temperatura constante o variable con inercia térmica)
- **Rugosidad en la pared del conducto (mm):** 0.15
- **Temperatura inicial de la pared del conducto (°C):** 24.5
- **Temperatura inicial del flujo (°C):** 24.5
- **Presión inicial del flujo (bar):** 0.955
- **Velocidad inicial del flujo (m/s):** 0.01
- **Coefficiente de corrección de transferencia de calor:** 1
- **Coefficiente de corrección de fricción:** 1

#### ❖ Parámetros geométricos del conducto N°2 (Geometry):

Los valores configurados para el conducto N°2 son los siguientes:

- **Diámetro de entrada (mm):** 34.2
- **Longitud de tramo 1 (mm):** 1550
- **Diámetro de salida (mm):** 34.2

❖ **Parámetros de la transferencia de calor del conducto N°2 (Heat transfer):**

Los datos solicitados en este apartado son los siguientes:

- **Tipo de refrigerante:** aire
- **Coefficiente de corrección de convección externa:** 1
- **Emisividad externa:** 0.5

❖ **Parámetros de configuración de capas del conducto N°2 (Layers):**

Para el conducto N°2 los parámetros son los siguientes:

- **Capa principal:** SI (indica si la capa seleccionada es la capa principal de la pared del conducto)
- **Capa de fluido:** No (indica se la capa seleccionada es de un fluido)
- **Espesor de pared (mm):** 0.015
- **Densidad del material (Kg/m<sup>3</sup>):** 2707
- **Calor específico del material (J K/Kg):** 896
- **Conductividad del material (W K/m):** 204

❖ **Configuración del método numérico para el cálculo del conducto N°2 (Numerical method):**

Para el conducto N°2 se realizaron los ajustes siguientes:

- **Método numérico:** Lax Wendroff
- **Submodelo:** Sin corrector

❖ **Configuración de la solicitud de resultados medios del conducto N°2 (Mean results):**

Para el conducto N°2 se asignan las distancias de los puntos de análisis y los parámetros de estudio:

- **Distancia el punto de estudio N°1:** 20
- **Distancia el punto de estudio N°2:** 750
- **Distancia el punto de estudio N°3:** 1480

- **Variables de estudio seleccionadas:**
  - Temperatura del flujo
  - Presión del flujo
  - Masa del flujo
  - Temperatura interna de pared

### **1.3.11. Configuración del conducto de entrada del aire de admisión al motor (nodo N°3)**

Se considera como el conducto N°3 al puerto de admisión en la culata del motor. A continuación, se describe el proceso de configuración del conducto.

#### **❖ Parámetros de cuadro de datos del conducto N°3 (Data):**

Los datos solicitados en este apartado son los siguientes:

- **Mallado espacial (mm):** 10
- **Tipo de conducto:** pipa de admisión
- **Método de cálculo de la temperatura de pared:** Cálculo variable sin inercia térmica (permite el cálculo de temperatura constante o variable con inercia térmica)
- **Rugosidad en la pared del conducto (mm):** 0.15
- **Temperatura inicial de la pared del conducto (°C):** 25
- **Temperatura inicial del flujo (°C):** 25
- **Presión inicial del flujo (bar):** 0.955
- **Velocidad inicial del flujo (m/s):** 0.01
- **Coeficiente de corrección de transferencia de calor:** 1
- **Coeficiente de corrección de fricción:** 1

#### **❖ Parámetros geométricos del conducto N°3 (Geometry):**

Los valores configurados para el conducto N°3 son los siguientes:

- **Diámetro de entrada (mm):** 28
- **Longitud de tramo 1 (mm):** 70
- **Diámetro de salida (mm):** 28

❖ **Parámetros de la transferencia de calor del conducto N°3 (Heat transfer):**

Los datos solicitados en este apartado son los siguientes:

- **Tipo de refrigerante:** aire
- **Coeficiente de corrección de convección externa:** 1
- **Emisividad externa:** 0.5

❖ **Parámetros de configuración de capas del conducto N°3 (Layers):**

Para el conducto N°3 los parámetros son los siguientes:

- **Capa principal:** SI (indica si la capa seleccionada es la capa principal de la pared del conducto)
- **Capa de fluido:** No (indica se la capa seleccionada es de un fluido)
- **Espesor de pared (mm):** 0.015
- **Densidad del material (Kg/m<sup>3</sup>):** 2707
- **Calor específico del material (J K/Kg):** 896
- **Conductividad del material (W K/m):** 204

❖ **Configuración del método numérico para el cálculo del conducto N°3 (Numerical method):**

Para el conducto N°3 se realizaron los ajustes siguientes:

- **Método numérico:** Lax Wendroff
- **Submodelo:** Sin corrector

❖ **Configuración de la solicitud de resultados medios del conducto N°3 (Mean results):**

Para el conducto N°3 se asignan las distancias de los puntos de análisis y los parámetros de estudio:

- **Distancia el punto de estudio N°1:** 5
- **Distancia el punto de estudio N°2:** 35
- **Distancia el punto de estudio N°3:** 65

- **Variables de estudio seleccionadas:**
  - Temperatura del flujo
  - Presión del flujo
  - Masa del flujo
  - Temperatura interna de pared

### 1.3.12. Configuración del conducto de salida de los gases de combustión del motor (nodo N°4)

Se considera como el conducto N°4 al puerto de escape en la culata del motor. A continuación, se describe el proceso de configuración del conducto.

#### ❖ **Parámetros de cuadro de datos del conducto N°4 (Data):**

Los datos solicitados en este apartado son los siguientes:

- **Mallado espacial (mm):** 11
- **Tipo de conducto:** puerto de gases de escape
- **Método de cálculo de la temperatura de pared:** Cálculo variable sin inercia térmica (permite el cálculo de temperatura constante o variable con inercia térmica)
- **Rugosidad en la pared del conducto (mm):** 0.15
- **Temperatura inicial de la pared del conducto (°C):** 380
- **Temperatura inicial del flujo (°C):** 400
- **Presión inicial del flujo (bar):** 0.955
- **Velocidad inicial del flujo (m/s):** 0.01
- **Coefficiente de corrección de transferencia de calor:** 1
- **Coefficiente de corrección de fricción:** 1

#### ❖ **Parámetros geométricos del conducto N°4 (Geometry):**

Los valores configurados para el conducto N°4 son los siguientes:

- **Diámetro de entrada (mm):** 25
- **Longitud de tramo 1 (mm):** 70
- **Diámetro de salida (mm):** 25



❖ **Parámetros de configuración de capas del conducto N°4 (Layers):**

Para el conducto N°4 los parámetros son los siguientes:

- **Capa principal:** SI (indica si la capa seleccionada es la capa principal de la pared del conducto)
- **Capa de fluido:** No (indica se la capa seleccionada es de un fluido)
- **Espesor de pared (mm):** 0.01
- **Densidad del material (Kg/m<sup>3</sup>):** 2700
- **Calor específico del material (J K/Kg):** 900
- **Conductividad del material (W K/m):** 204

❖ **Configuración del método numérico para el cálculo del conducto N°4 (Numerical method):**

Para el conducto N°4 se realizaron los ajustes siguientes:

- **Método numérico:** TVD

❖ **Configuración de la solicitud de resultados medios del conducto N°4 (Mean results):**

Para el conducto N°4 se asignan las distancias de los puntos de análisis y los parámetros de estudio:

- **Distancia el punto de estudio N°1:** 2
- **Distancia el punto de estudio N°2:** 45
- **Distancia el punto de estudio N°3:** 68
- **Variables de estudio seleccionadas:**
  - Temperatura del flujo
  - Presión del flujo
  - Masa del flujo
  - Temperatura interna de pared

### 1.3.13. Configuración del conducto de evacuación de los gases de combustión (nodo N°5)

En el conducto N°5 se evacuan los gases de combustión desde el silenciador situado en el motor hasta la boca de salida a la atmósfera. Es una tubería corrugada con capa externa de malla reforzada de acero inoxidable, con una longitud aproximada de 2.2m y 32 mm de diámetro interno. A continuación, se describe el proceso de configuración del conducto.

#### ❖ Parámetros de cuadro de datos del conducto N°5 (Data):

Los datos solicitados en este apartado son los siguientes:

- **Mallado espacial (mm):** 10
- **Tipo de conducto:** pipa de escape
- **Método de cálculo de la temperatura de pared:** Cálculo variable sin inercia térmica (permite el cálculo de temperatura constante o variable con inercia térmica)
- **Rugosidad en la pared del conducto (mm):** 0.15
- **Temperatura inicial de la pared del conducto (°C):** 145
- **Temperatura inicial del flujo (°C):** 150
- **Presión inicial del flujo (bar):** 0.955
- **Velocidad inicial del flujo (m/s):** 0.01
- **Coefficiente de corrección de transferencia de calor:** 1
- **Coefficiente de corrección de fricción:** 1

#### ❖ Parámetros geométricos del conducto N°5 (Geometry):

Los valores configurados para el conducto N°5 son los siguientes:

- **Diámetro de entrada (mm):** 31.7
- **Longitud de tramo 1 (mm):** 2200
- **Diámetro de salida (mm):** 31.7

#### ❖ Parámetros de la transferencia de calor del conducto N°5 (Heat transfer):

Los datos solicitados en este apartado son los siguientes:

- **Tipo de refrigerante:** aire
- **Coeficiente de corrección de convección externa:** 1
- **Emisividad externa:** 0.5

❖ **Parámetros de configuración de capas del conducto N°5 (Layers):**

Para el conducto N°5 los parámetros son los siguientes:

- **Capa principal:** SI (indica si la capa seleccionada es la capa principal de la pared del conducto)
- **Capa de fluido:** No (indica se la capa seleccionada es de un fluido)
- **Espesor de pared (mm):** 0.005
- **Densidad del material (Kg/m<sup>3</sup>):** 7849
- **Calor específico del material (J K/Kg):** 460
- **Conductividad del material (W K/m):** 59

❖ **Configuración del método numérico para el cálculo del conducto N°5 (Numerical method):**

Para el conducto N°5 se realizaron los ajustes siguientes:

- **Método numérico:** Lax Wendroff
- **Submodelo:** Sin corrector

❖ **Configuración de la solicitud de resultados medios del conducto N°5 (Mean results):**

Para el conducto N°5 se asignan las distancias de los puntos de análisis y los parámetros de estudio:

- **Distancia el punto de estudio N°1:** 50
- **Variables de estudio seleccionadas:**
  - Temperatura del flujo
  - Presión del flujo
  - Masa del flujo
  - Temperatura interna de pared

### 1.3.14. Configuración de la tobera de entrada del aire atmosférico

La tobera de entrada del aire de admisión únicamente permite aplicar un porcentaje de restricción para el flujo. No dispone de otros ajustes, por lo que para el modelo de motor del estudio se ha aplicado un coeficiente de pérdidas de 0.99, asumiendo una restricción baja por la simplicidad de instalación del sistema de admisión y porque esta función es útil para realizar pruebas adicionales ajenas a este modelo.

### 1.3.15. Configuración de la tobera de salida del aire atmosférico

La tobera de salida de los gases de combustión hacia la atmósfera permite al modelo imponer un valor de temperatura y presión constante, con la finalidad de simplificar el estudio. En la figura se muestra el cuadro de ajustes de los valores configurados para la sonda, siendo los siguientes:

- **Coefficiente de pérdidas (restricción):** 0.99
- **Presión (bar):** 0.955
- **Temperatura (°C):** 24
- **Modelo de los gases de escape:** NO

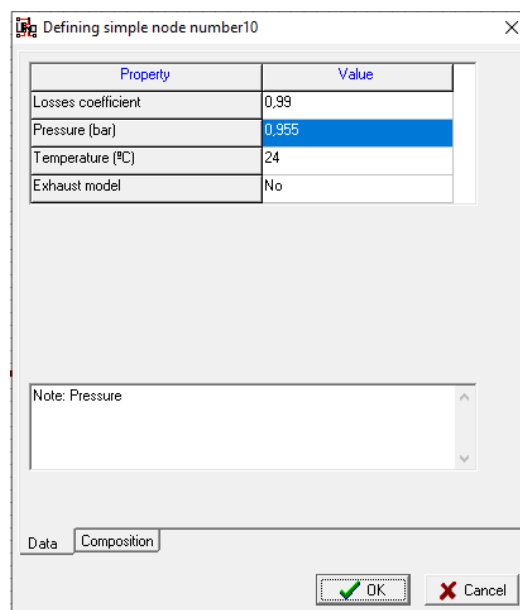


Figura 75: Cuadro de configuración de la tobera de salida de admisión en el modelo

En este punto, se da por finalizado todo el procedimiento de configuración del modelo del motor HATZ 1B20, con lo que se puede iniciar la fase de simulación del modelo en las condiciones de operación programadas para el estudio.

#### 1.4. Simulación del modelo en OpenWAM

Cuando se ha completado el modelo unidimensional del motor, es posible realizar la simulación del modelo, teniendo en cuenta que previamente deben fijarse las variables de entrada que reproduzca el funcionamiento del motor en condiciones estacionarias sobre el número de ciclos programados para la evaluación posterior. Las variables de deben ser manejadas en cada simulación son:

- Revoluciones de motor (rpm).
- Presión del aire en el sistema de admisión (bar)
- Masa de aire consumida por ciclo de motor (g/ciclo)
- Masa de combustible inyectado por ciclo de motor (g/ciclo)

Para ejecutar una simulación del modelo, es necesario el programa OpenWAM, pero dicho programa no se puede ejecutar directamente, sino que se utiliza sobre el soporte de WAMer. Esto quiere decir que todo el proceso de simulación se realiza en la interfaz gráfica de WAMer, para definir posteriormente la ejecución desde el archivo de OpenWAM. A continuación, se describirá el procedimiento de ejecución de simulación utilizando un modelo de ejemplo.

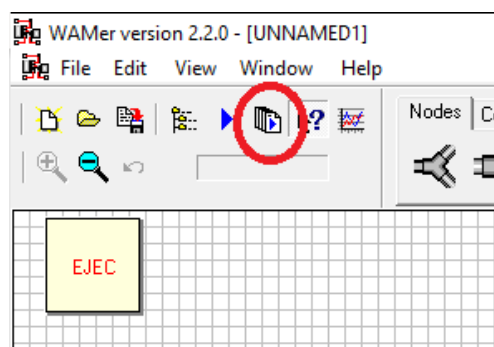
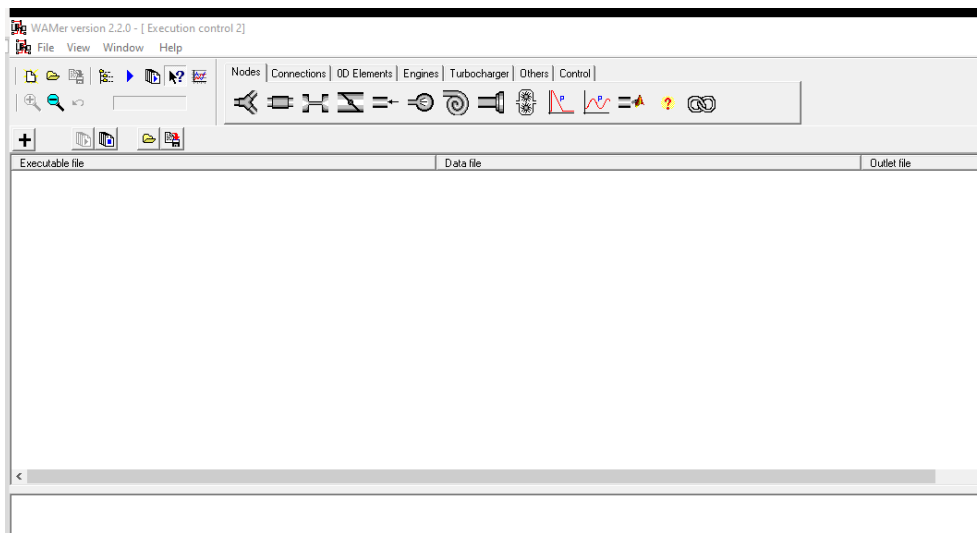


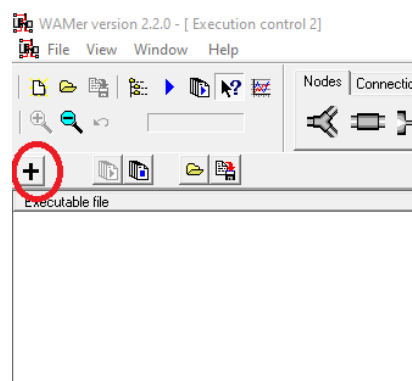
Figura 76: Captura del icono de acceso a la interfaz de simulación de WAMer

Desde WAMer, hay que clicar en el icono de inicio ubicado en el panel de herramientas, representado en la figura 18, para abrir la interfaz gráfica de ejecución de los archivos de ejecución para la simulación del modelo. En la figura 19 se muestra una captura de pantalla de la interfaz de simulación donde se reflejarán las siguientes acciones.



*Figura 77: Captura de pantalla de la interfaz de simulación en WAMer*

El siguiente paso es agregar el archivo de ejecución 'OpenWAM' ubicado en la carpeta del software con su icono correspondiente, el archivo del modelo para la simulación en formato (.WAM) y un archivo para el registro de resultados de la simulación en formato (.TXT). Para ello, se debe clicar en el icono de agregación mostrado en la figura en la que se abrirá un cuadro para seleccionar los archivos indicados.



*Figura 78: Captura del icono de acceso al panel de selección de archivos de ejecución para la simulación*

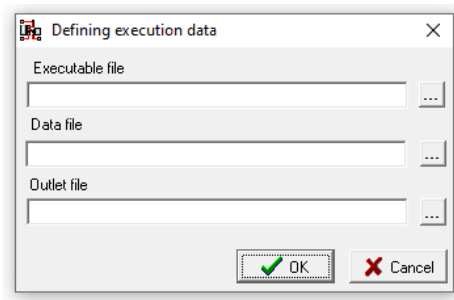


Figura 79: Cuadro de selección de archivos de ejecución para la simulación

En el momento que se seleccionan los archivos correspondientes y se valida el cuadro, la interfaz de simulación refleja los directorios de los archivos asignados en su celda correspondiente, tal como se muestra en la captura de ejemplo de la figura 22. La interfaz posibilita agregar varios archivos de ejecución de simulación, ya que permite la ejecución simultánea de los mismos. Esta función es muy útil cuando se desea analizar un modelo con diferentes condiciones de funcionamiento, y en las que se ha generados sus archivos de simulación (.WAM) previamente.

En este momento la interfaz ya está en condiciones de iniciar la ejecución de las simulaciones planteadas. Los iconos de inicio y parada de las simulaciones se indican en la figura 22. En este ejemplo se muestra adicionalmente el proceso de simulación de un modelo en tres condiciones de funcionamiento determinadas, donde se refleja el proceso de carga en el primer directorio y los iconos de modo de espera en el resto. En el proceso de simulación se podrán reflejar algunos datos del procesamiento de cálculo en la ventana gráfica inferior, incluyendo los mensajes de advertencia cuando ha finalizado la simulación o cuando se ha producido una detención no forzada al detectar un error.

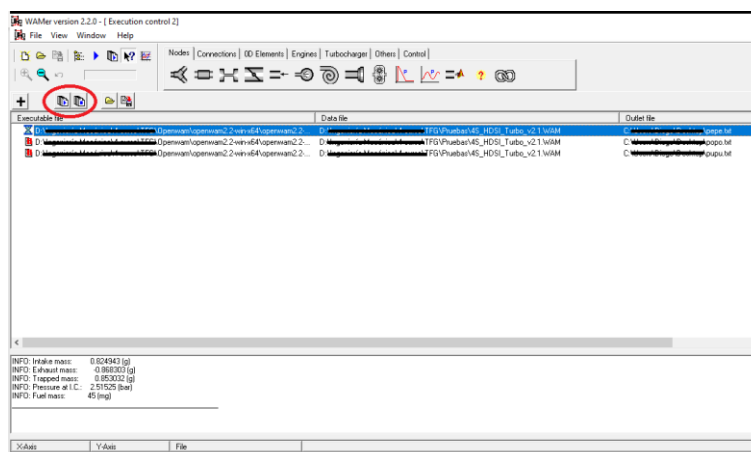
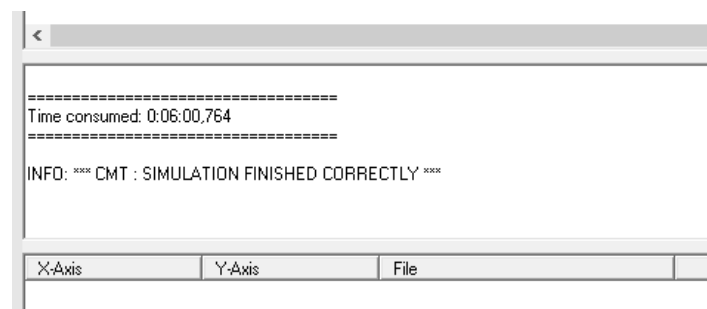


Figura 80: Captura de imagen de la interfaz de ejecución de simulación

En el caso de que se haya producido un error durante la ejecución, es necesario revisar el modelo, ya que se ha detectado una incoherencia. La ventana de procesamiento de cálculo no indica explícitamente la causa, por lo que se debe analizar los resultados registrados en la propia ventana o en el archivo de datos de salida (.TXT) asignado.

En el caso de que la simulación haya finalizado correctamente, la ventana de procesamiento de cálculo mostrará un mensaje como el de la figura 23, indicando adicionalmente el tiempo consumido durante la simulación.



*Figura 81: Captura de imagen de mensaje de finalización de la simulación en la ventana de información de procesamiento*

## 1.5. Tratamiento de los resultados obtenidos en la simulación

En la actualidad, por las necesidades del mercado o la legislación, los desarrolladores dedican mucho esfuerzo en introducir nuevos sistemas destinados al aumento de la eficiencia de un motor, la reducción de consumo de combustible o la reducción de emisiones de gases contaminantes, por lo que se requiere la obtención de datos inequívocos y fiables. Por ello, este apartado tiene gran relevancia en el estudio, debido a que es estrictamente necesario el correcto tratamiento de la información extraída para validar el modelo planteado con los datos obtenidos en los ensayos experimentales.

Cuando se ha ejecutado el proceso de simulación de un modelo desarrollado, WAMer exporta los resultados obtenidos en los archivos siguientes:

- Documento con formato (.TXT) con el registro de las informaciones del procesamiento de cálculo,
- Archivo con formato (.DAT) para el tratamiento de datos con una hoja de cálculo tipo Excel o similar.



A continuación, se describen las características de los archivos obtenidos en el proceso de simulación.

### 1.5.1. Documentos de registro del proceso de cálculo con OpenWAM

En el proceso de ejecución de una simulación del modelo con OpenWAM, el programa solicita la asignación de un documento con formato (.TXT) para el registro de la información extraída en el proceso de cálculo. Este documento registra toda la información relativa a los estados de progreso de cálculo y los parámetros de salida calculados en cada uno de los ciclos definidos por el desarrollador.

El documento de registro del proceso de cálculo aporta al desarrollador la información de un ciclo de motor, con el que puede analizar el comportamiento del modelo en detalle para la detección de posibles anomalías o validar los resultados. Es un documento que aporta información para un análisis inicial, por lo que habitualmente no se extrae el contenido del mismo para el tratamiento de los resultados, en la figura 24 se muestran capturas de imagen de un ejemplo de este documento.

```

ESTUDIO Nº2: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
-----
OpenWAM v2.2 build 0
-----

THE MODEL IS READING THE INPUT DATA

Number of pipes: 5
INFO: Pipe n. 1 - N. of cells 9 - Mesh size = 0.01 m.
INFO: Pipe n. 2 - N. of cells 156 - Mesh size = 0.01 m.
INFO: Pipe n. 3 - N. of cells 8 - Mesh size = 0.01 m.
INFO: Pipe n. 4 - N. of cells 7 - Mesh size = 0.011 m.
INFO: Pipe n. 5 - N. of cells 221 - Mesh size = 0.01 m.
Number of boundary condition: 10
INFO: The input file data has been readed correctly

INFO: File successfully deleted

Seconds since 1 / 1 / 1970 GMT : 1564660152
Thousandths of a second : 207
INFO: End of Gas-exchange process in cylinder 1

INFO: Intake mass:      0 (g)
INFO: Exhaust mass:    0 (g)
INFO: Trapped mass:    0.188724 (g)
INFO: Pressure at I.C.: 0.955 (bar)
INFO: Fuel mass:       5.176 (mg)

INFO: Begin gas-exchange process in cylinder 1

```

Figura 82: Captura de imagen del documento de registro de información del proceso de simulación en OpenWAM

## 1.5.2. Documentos para el tratamiento de datos extraídos en la simulación

OpenWAM registra todos los resultados de los parámetros solicitados por ciclo obtenidos en el proceso de simulación en una tabla de datos. En cada simulación del modelo, OpenWAM puede generar dos archivos con formato (.DAT), un archivo para los resultados de valores medios y un segundo archivo para los resultados de valores instantáneos, teniendo en cuenta que deben ser configurados previamente por el desarrollador en los elementos del motor que tienen esta función disponible (cilindros válvulas, conductos, etc.).

En el estudio, Excel es el software utilizado para manipular estos archivos, pero es necesario realizar un ajuste previo cuando se abre un archivo con esta aplicación debido a que no reconoce de forma automática el formato de datos registrado en los archivos de resultados exportados por OpenWAM. A continuación, se describe el procedimiento de ajuste al abrir un archivo con Excel.

- Iniciar el programa Excel y acceder a la pestaña 'Archivo' de la barra de herramientas superior.

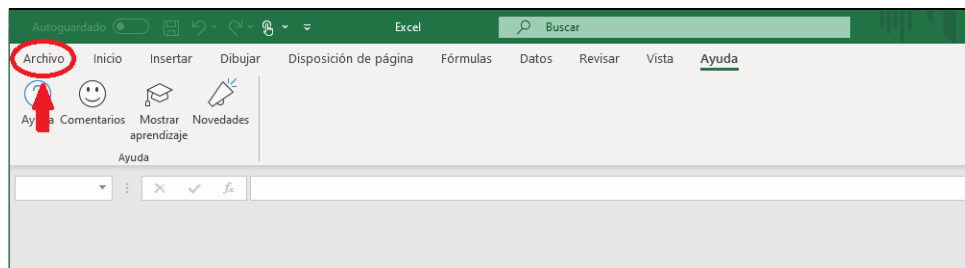


Figura 83: Captura de imagen de Excel para indicar el acceso al archivo de simulación

- Clicar en el apartado de abrir archivo, para acceder el directorio donde debemos seleccionar el archivo correspondiente. Es necesario seleccionar en la pestaña de tipo de archivo 'Todos los archivos' para que reconozca los documentos con formato (.DAT). Seleccionar el archivo requerido y aceptar.
- Se abre un cuadro de asistencia para importación de datos con 3 pasos, en el cual se deben verificar los ajustes disponibles. Es recomendable verificar el apartado 'Origen del archivo' en el que se debe seleccionar el formato de texto (figura 26). En nuestro caso, el formato predeterminado es compatible.

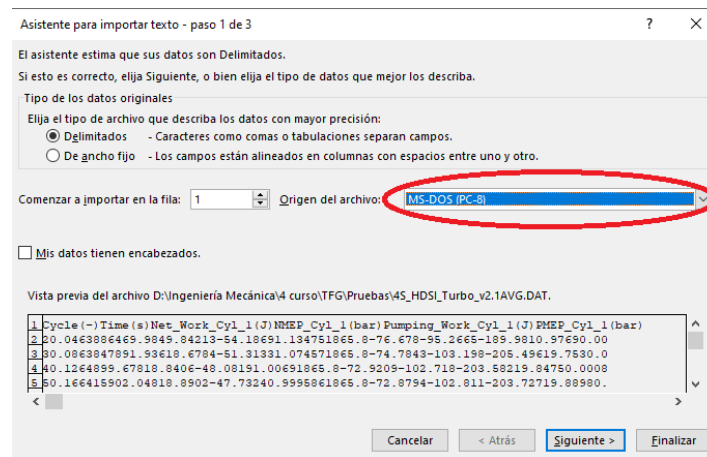


Figura 84: Cuadro de configuración del asistente de importación de texto (paso 1)

- Otro ajuste relevante para el correcto reconocimiento del formato numérico de datos se encuentra en el paso 3, en el cual se debe acceder a la pestaña 'Avanzadas' y abrir el cuadro correspondiente para configurar los valores predeterminados para el reconocimiento de datos numéricos (figura 27), asignando en el separador decimal un punto (.) y en el separador de miles una coma (,). Aceptar el ajuste y finalizar.

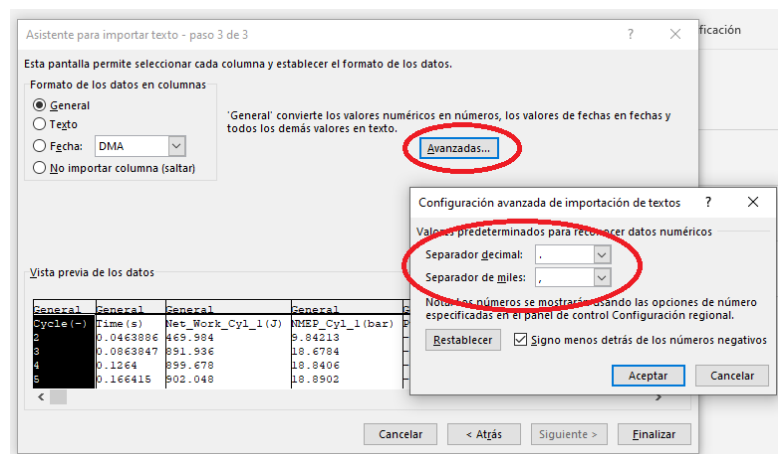


Figura 85: Cuadro de configuración del asistente de importación de texto (paso 3)

Realizado el ajuste importación del formato de texto, se cargan los datos en la hoja de cálculo, en el que tendremos una tabla con todos los valores registrados en la simulación, tal como se muestra en el ejemplo de la figura 28. Todos los resultados de los parámetros disponibles están ordenados en columnas, de tal manera que las filas indican el número de ciclo de motor correspondiente.

Cycle(-)	Time(s)	Net_Work_C	NMEP_Cyl_1	Pumping_W	PMEP_Cyl_1	Combustion	Heat_Throug	Heat_Throug	Heat_Throug	IMEP_Cyl_1	Trapped_Ma	Temp_Liner	Temp_Liner	Temp_Liner	Temp_Pistor
2	0,0463886	469,984	9,84213	-54,1869	1,13475	1865,8	-76,678	-95,2665	-189,98	10,9769	0,00082403	142,753	140,202	139,103	260,416
3	0,0863847	891,936	18,6784	-51,3133	1,07457	1865,8	-74,7843	-103,198	-205,496	19,753	0,00082408	195,033	186,899	179,313	203,399
4	0,1264	899,678	18,8406	-48,0819	1,0069	1865,8	-72,9209	-102,718	-203,582	19,8475	0,00082547	209,883	200,963	192,312	219,897
5	0,166415	902,048	18,8902	-47,7324	0,999586	1865,8	-72,8794	-102,811	-203,727	19,8898	0,00082583	210,713	201,768	193,069	220,784
6	0,206454	903,417	18,9188	-47,6793	0,998472	1865,8	-72,671	-103,312	-204,709	19,9173	0,0008329	210,863	201,929	193,231	220,934
7	0,246391	899,666	18,8403	-48,1227	1,00776	1865,8	-72,0288	-100,35	-198,73	19,848	0,0008401	211,203	202,329	193,648	221,264
8	0,286335	903,121	18,9126	-48,5476	1,01666	1865,8	-71,7311	-100,262	-198,62	19,9293	0,00084591	208,54	199,697	191,127	218,477
9	0,326402	905,344	18,9592	-48,9039	1,02412	1865,8	-71,3749	-102,274	-202,643	19,9833	0,00084937	208,081	199,284	190,785	217,876
10	0,366346	902,896	18,9079	-49,0631	1,02745	1865,8	-70,9414	-99,5056	-197,073	19,9354	0,00085111	209,563	200,836	192,335	219,318
11	0,406408	905,811	18,969	-49,1995	1,03031	1865,8	-71,1601	-101,927	-201,978	19,9993	0,00085292	207,31	198,587	190,165	216,993
12	0,446344	903,011	18,9104	-49,2589	1,03155	1865,8	-70,8202	-99,1897	-196,455	19,9419	0,00085397	209,088	200,406	191,951	218,78
13	0,486396	905,619	18,965	-49,2077	1,03048	1865,8	-71,05	-101,634	-201,396	19,9954	0,00085554	206,941	198,239	189,844	216,59
14	0,526445	906,965	18,9931	-49,5107	1,03682	1865,8	-70,7649	-101,511	-201,091	20,03	0,00085648	208,772	200,102	191,668	218,428
15	0,56635	897,907	18,594	-62,7115	1,13127	1865,8	-72,28	-99,4838	-197,022	19,9073	0,00085668	208,813	200,155	191,728	218,475
16	0,606344	896,084	18,7653	-55,1175	1,15424	1865,8	-71,6249	-100,992	-200,01	19,9195	0,00086258	207,471	198,674	190,18	217,315
17	0,646452	902,803	18,906	-53,3043	1,11627	1865,8	-71,0493	-102,888	-203,768	20,0223	0,00086606	208,457	199,718	191,248	218,188
18	0,686424	899,589	18,8387	-53,3304	1,11681	1865,8	-70,6901	-99,6719	-197,304	19,9555	0,00086853	209,929	201,296	192,837	219,623
19	0,72638	899,641	18,8398	-53,7484	1,12557	1865,8	-71,0548	-99,6902	-197,42	19,9653	0,00087151	207,309	198,672	190,286	216,968
20	0,766443	903,312	18,9167	-54,1862	1,13474	1865,8	-70,9396	-101,83	-201,687	20,0514	0,00087416	207,116	198,471	190,101	216,732
21	0,806369	897,741	18,8	-54,667	1,14481	1865,8	-70,6863	-98,7571	-195,49	19,9448	0,0008766	208,812	200,219	191,83	218,424
22	0,846401	900,986	18,8679	-55,1241	1,15438	1865,8	-70,9739	-101,152	-200,335	20,0223	0,00087972	206,395	197,766	189,43	215,975

Figura 86: Captura de imagen de la hoja de cálculo con los datos extraídos en la simulación

Para una mejor comprensión de las tablas cargadas en la hoja de cálculo, es recomendable realizar un ajuste del formato de tablas para representar de forma adecuada toda la información disponible, como son los títulos, el número de ciclos, etc.

La ventaja de utilizar Excel para el tratamiento de los datos de resultados de la simulación es que permite clasificar las simulaciones de diferentes condiciones de funcionamiento en hojas de cálculo independientes, y permite generar las tablas o gráficas necesarias para los análisis necesarios posteriormente.

## ***ANEXO DE DOCUMENTACIÓN TÉCNICA***

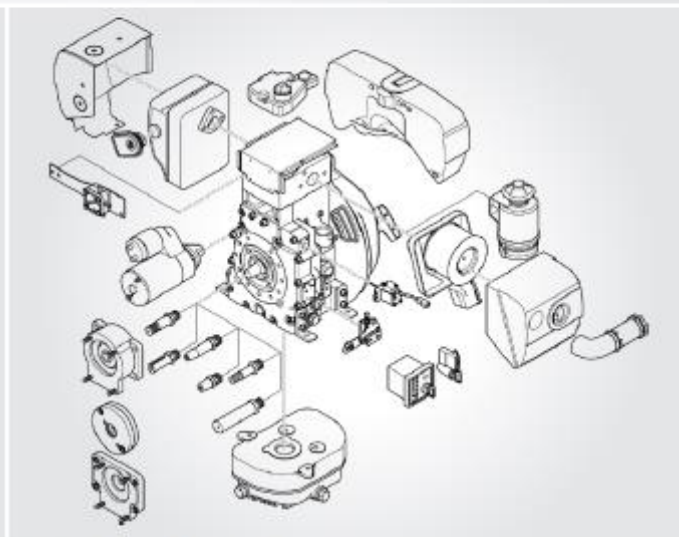
### **1. DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DE EQUIPOS UTILIZADOS**



## 1.1. Ficha técnica de motor HATZ 1B20

CREATING POWER SOLUTIONS.





**1830, 1840, 1850 Silent**

Los ya de por sí bajos niveles de ruido pueden reducirse considerablemente con el paquete de reducción acústica opcional, el Silent Pack, esto es, entre 2 y 4 decibelios [A] dependiendo del tipo de motor, la potencia transferida y el número de revoluciones. Esto es posible gracias a las optimizaciones en el ámbito de los componentes de aspiración y de gases de escape.

**Flexibilidad gracias a un equipamiento opcional**

La serie B de Hatz se puede individualizar con una lista casi interminable de accesorios enteramente según las necesidades del cliente. Entre otros elementos, hay seis árboles de salida diferentes según el modelo, una partida eléctrica con 12 o 24 V y diversas posibilidades para tanques y filtros, por nombrar sólo los más importantes.



## Serie B de Hatz: Solución flexible para todas las áreas

La serie B de Hatz destaca en aplicaciones móviles y fijas por sus dimensiones para instalación compactas y por un peso reducido para todas las aplicaciones con unas necesidades de potencia hasta 8 kilovatios. También con vistas a la robustez y la durabilidad, esta serie establece los estándares del mercado. Ya sea en plataformas vibratorias o en el inhóspito entorno de la Antártida, la serie B de Hatz ha sido probada en condiciones adversas en cientos de miles de ocasiones.

### Aspectos medioambientales

En Hatz la protección del medio ambiente es un componente importante de los objetivos de la empresa. Por ejemplo, los motores de la serie B se producen y comercializan desde hace años conforme a la norma sobre emisión de gases de escape de la EPA Tier IV, incluso en aquellos países en los que no hay vigente ningún límite de emisión de gases de escape. Por eso los motores también cumplen los requisitos de la norma europea de gases de escape UE fase V.

### Un mecanismo propulsor, muchas variantes

Gracias al inteligente diseño de los motores, es posible ofrecer diferentes cilindradas basadas en el mismo mecanismo propulsor. Esto brinda a los clientes muchas posibilidades para aprovechar lo mejor posible el espacio disponible en una máquina. Además, esto permite ahorrar tiempo y dinero en el desarrollo y construcción de toda la serie.

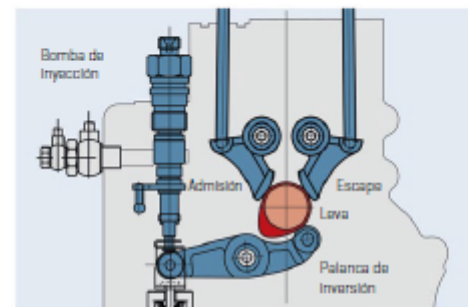
### Reducción de ruido opcional

Según el tipo de motor, el nivel de ruido ya de por sí reducido se puede disminuir aún más y de manera significativa mediante un paquete de amortiguación de ruido, hasta alcanzar un mínimo de 4 decibelios (A). Esto es posible gracias a las optimizaciones en el ámbito de los componentes de aspiración y de gases de escape.

### SCS (Single Cam System)

Una de las numerosas innovaciones de la serie B es el Single Cam System, en el que el accionamiento de la bomba de inyección y de ambas válvulas tiene lugar con una sola leva y el balancín.

Este detalle constructivo (cuya patente Hatz ya tiene registrada y en curso) determina de manera fundamental la reducida longitud constructiva del motor. Además, el accionamiento del árbol de levas se efectúa a través de un engranaje que es al mismo tiempo un componente y el accionamiento de la bomba de aceite.



### Distinción

La serie B de Hatz ha sido galardonada con el premio a la innovación de EUROMOT por la óptima formación de mezcla y la calidad de los gases de escape.

Zona de ventas (certificado de gases de escape)		Potencia IFN Potencia ICFN Potencia F/IFN/ICFN			
		1B20	1B30	1B40	1B50
EE. UU. (EPA/CARB constante)	[min <sup>-1</sup> ]	2250-3000	1800, 2500-3600	2250-3300	2600-3600
EE. UU. (EPA 2 velocidades)	[min <sup>-1</sup> ]	2250-3600	2500-3600	2250-3600	2500-3000
EE. UU. (EPA variable)	[min <sup>-1</sup> ]	2500-3000	2500-3000	—	2500-3600
Todas las demás (no EPA)	[min <sup>-1</sup> ]	1500-3600	1500-3600	1500-3600	1500-3600

## Datos técnicos, potencia del motor

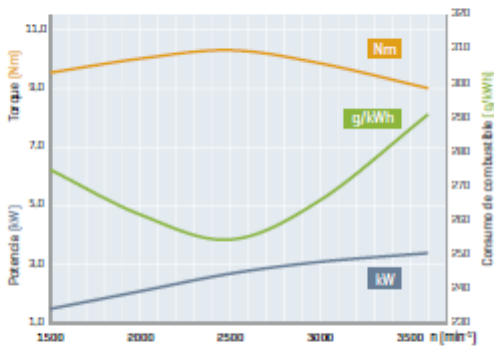
Datos técnicos		1820	1830	1840	1850	
Tipo de construcción		Motor diésel de 4 tiempos refrigerado por aire				
Cilindros		1				
Sistema de inyección		inyección directa				
Posición del cigüeñal		horizontal	horizontal	horizontal	horizontal	
Sistema de posttratamiento de gases de escape según EPA Tier IV final de EE. UU.		—	DOC	DOC	DOC	
Perforación x carrera [mm]		69 x 65	80 x 69	88 x 76	93 x 76	
Motor	Cilindrada [l]	0,243	0,347	0,462	0,517	
	Velocidad media del pistón @ 3000 min <sup>-1</sup> [m/s]	6,5	6,9	7,6	7,6	
	Relación de compresión	22:1	21,5:1	20,5:1	20,5:1	
	Consumo de aceite lubricante en relación con la plena carga		máx. 1 % del consumo de combustible			
	Llenado de aceite lubricante		máx. [l]	0,9	1,1	1,5
		mín. [l]	0,4	0,6	0,7	0,7
Regulador de revoluciones	Régimen de ralentí más bajo [min <sup>-1</sup> ]	aprox. 1000			aprox. 800	
	Variación de rotación estática @ 3000 min <sup>-1</sup>	aprox. 5%				
Datos de combustible	Cantidad de aire de combustión @ 3000 min <sup>-1</sup> aprox. [kg/h] <sup>1</sup>	25,2	37,8	49,8	56,4	
	Cantidad de aire de refrigeración @ 3000 min <sup>-1</sup> aprox. [kg/h] <sup>1</sup>	306	432	528	552	
	Motor de arranque [V]	12 (1,0 kW)   24 (1,6 kW)				
	Corriente de carga del alternador @ 3000 / 1500 rpm [A]	14 / 7 (14 V)   7 / 4 (28 V)				
Capacidad de la batería mín. / máx. [Ah]		36 / 55 (12 V)   24 / 44 (24 V)				
Dimensiones	Peso del motor con partida por cuerda retráctil [kg]	28,0	35,0	48,0	51,2	
	Peso del motor con partida eléctrica 12 V o 24 V [kg]	32,8	39,8	53,3	56,5	
	L x A x H [mm]	304 x 361 x 401	331 x 370 x 430	348,5 x 392 x 480	347 x 392 x 480	

Potencia del motor máx. [kW/hp] <sup>2</sup>	[min <sup>-1</sup> ]	1820	1830	1840	1850	
Potencia vehicular según DIN ISO 1585.	3600	3,5 / 4,7	5,4 / 7,3	7,5 / 10,2	8,5 / 11,6	
	3000	3,1 / 4,2	5,0 / 6,8	7,1 / 9,7	8,0 / 10,9	
	2600	2,8 / 3,8	4,6 / 6,3	6,6 / 9,0	7,4 / 10,1	
	2300	2,5 / 3,4	4,1 / 5,6	6,0 / 8,2	6,6 / 9,0	
	2000	2,2 / 3,0	3,6 / 4,9	5,2 / 7,2	5,7 / 7,8	
	1800	1,9 / 2,6	3,3 / 4,5	4,6 / 6,3	5,1 / 6,9	
	1500	1,6 / 2,2	2,6 / 3,5	3,8 / 5,2	4,2 / 5,7	
Potencia útil ISO (IFN) bloqueada para carga discontinua según ISO 3046-1. EPA 2 velocidades	3600	3,4 / 4,6	5,0 / 6,8	7,3 / 9,9	7,9 / 10,7	
	3000	3,1 / 4,2	4,6 / 6,3	6,8 / 9,2	7,6 / 10,3	
	2600	2,8 / 3,8	4,2 / 5,7	6,3 / 8,6	6,9 / 9,4	
	2300	2,5 / 3,4	3,9 / 5,3	5,7 / 7,8	6,2 / 8,4	
	2000	2,1 / 2,9	3,4 / 4,6	4,9 / 6,7	5,3 / 7,2	
	1800	1,9 / 2,6	3,0 / 4,1	4,4 / 6,0	4,7 / 6,4	
	1500	1,5 / 2,0	2,3 / 3,1	3,5 / 4,8	3,9 / 5,3	
Potencia standard ISO (ICN) (10% sobrecargable). EPA variable: EPA constantes	3600	3,1 / 4,2	4,5 / 6,1	6,5 / 8,8	7,1 / 9,7	
	3000	2,8 / 3,8	4,2 / 5,7	6,1 / 8,8	6,8 / 9,2	
	2600	2,5 / 3,4	3,8 / 5,2	5,6 / 7,6	6,2 / 8,4	
	Potencia standard ISO bloqueada (no sobrecargable) según ISO 3046-1. Válida para la rotación constante y la carga constante (ICFN).	2300	2,2 / 3,0	3,5 / 4,8	5,1 / 6,9	5,5 / 7,5
		2000	1,9 / 2,6	3,1 / 4,2	4,4 / 6,0	4,8 / 6,5
		1800	1,7 / 2,3	2,7 / 3,7	3,9 / 5,3	4,2 / 5,7
		1500	1,4 / 1,9	2,1 / 2,9	3,2 / 4,4	3,5 / 4,8

<sup>1</sup> Para otras rotaciones la cantidad de aire indicada se debe calcular de manera lineal como corresponda. <sup>2</sup> Datos de potencia para EPA Tier IV final y CARB previa solicitud.

## Potencia, torque y consumo de combustible

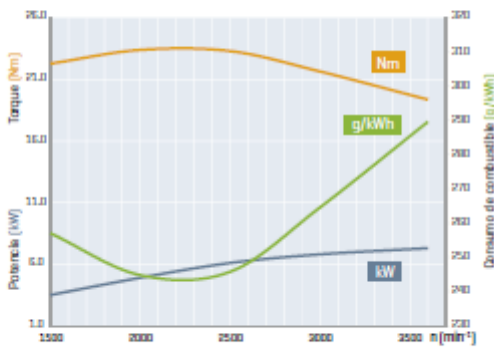
### 1B20



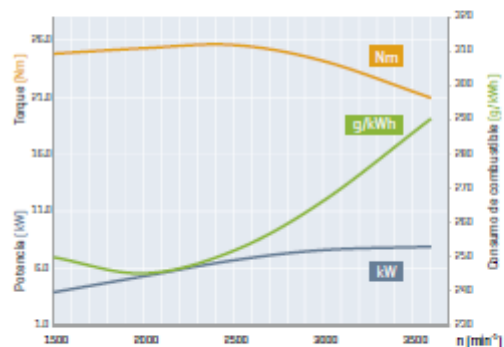
### 1B30



### 1B40



### 1B50

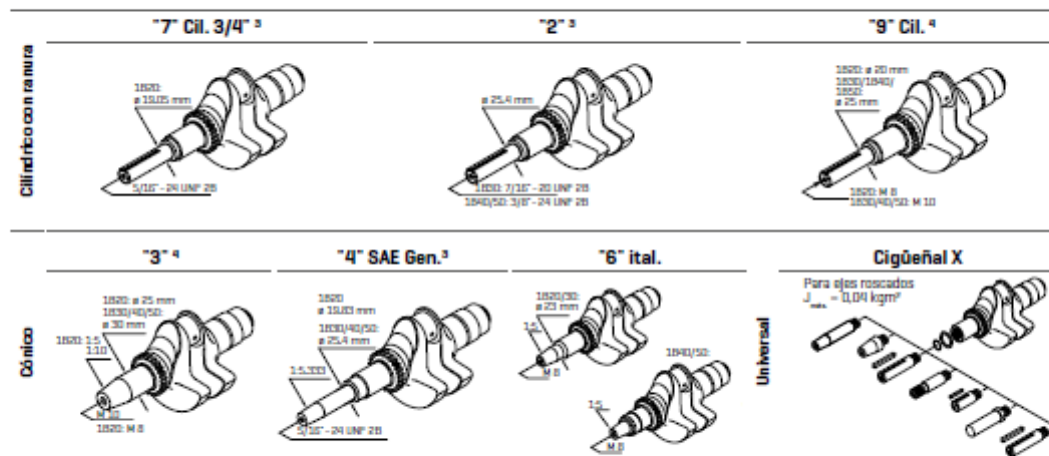


#### Datos de potencia

Los datos de potencia se refieren a las condiciones de referencia de la norma de potencia ISO 3046-1 (FN): +25°C, 100 kPa, 30% de humedad relativa del aire. La potencia indicada se alcanza durante el tiempo de rodaje y en la entrega pueda ser en torno a un 5% inferior. Reducción de potencia según ISO 3046-1. Valores de referencia: por encima de 100 msnm aprox. 1% por cada 100 m, por encima de 25°C aprox. 4% por cada 10°C. La potencia tomada por el alternador debe incorporarse al cálculo de la potencia.

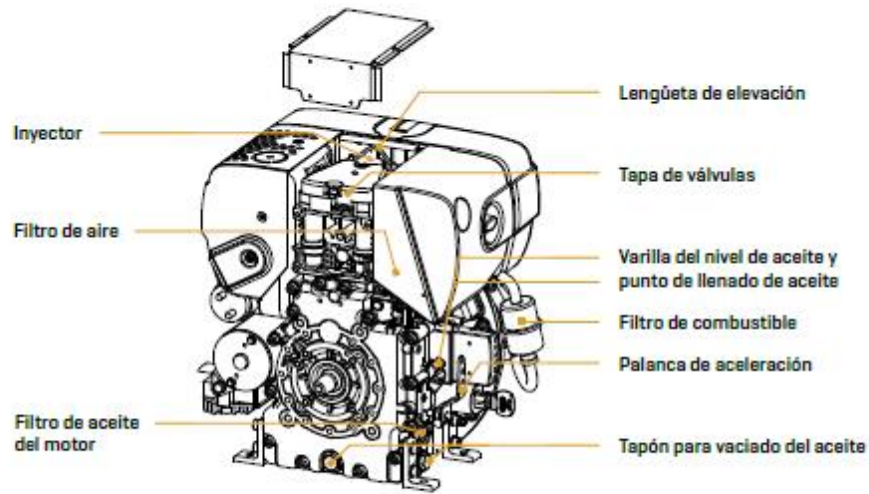
## Formas de los ejes

Selección de las formas de los ejes disponibles

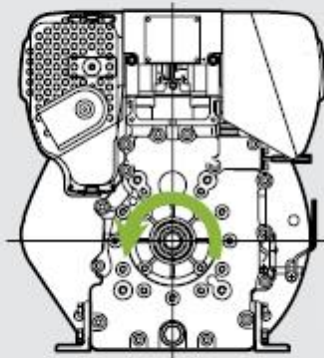


<sup>3</sup>según SAE J 609 <sup>4</sup>según LEMA LES 1203-1991

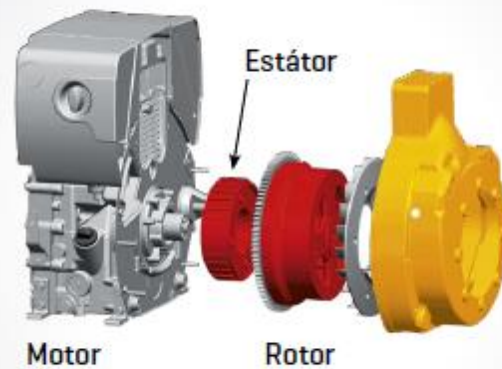
## Puntos de mantenimiento y operación



## Toma de fuerza



Toma de fuerza en el cigüeñal del lado de la distribución con revoluciones del motor, sentido de giro izquierdo.



Motor

Rotor

Es posible incorporar un alternador de imanes permanentes de entre 2 y 7 kW en el lado del volante.

## Capacidad de carga de las posiciones de la toma de fuerza

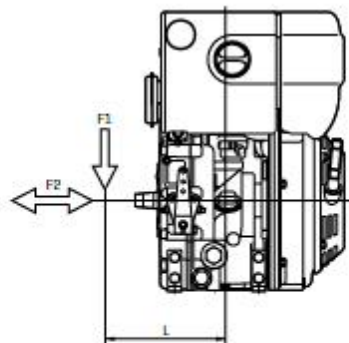
1820 / 1830

Fuerza radial máx. permitida

$$F1 = \frac{50\,000}{L \text{ [mm]} - 70} \text{ N}$$

Fuerza axial máx. permitida

$$F2 = 800 \text{ N}$$



1840 / 1850

Fuerza radial máx. permitida

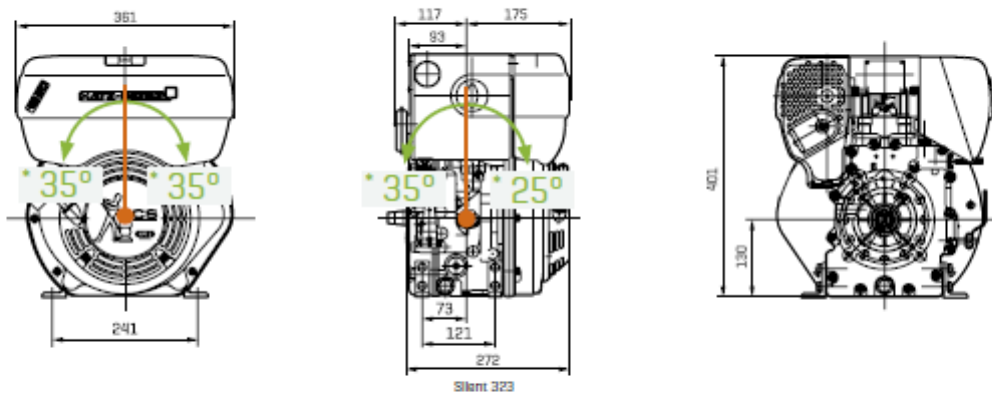
$$F1 = \frac{62\,600}{L \text{ [mm]} - 84} \text{ N}$$

Fuerza axial máx. permitida

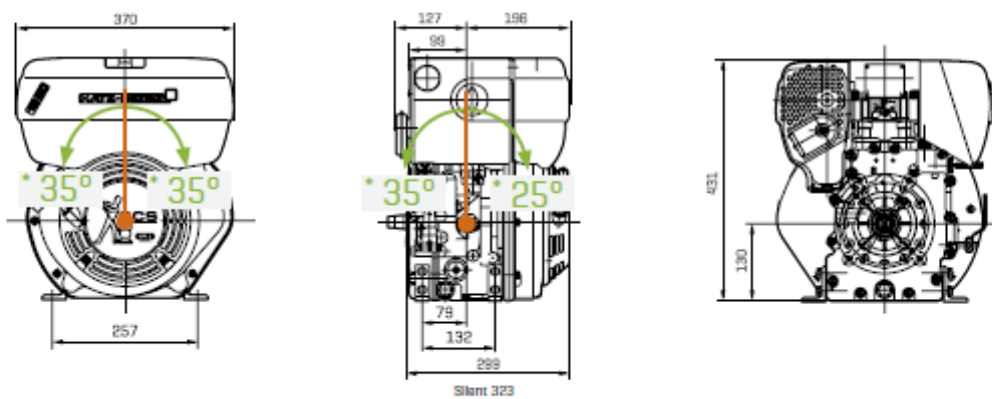
$$F2 = 1200 \text{ N}$$

## Dimensiones [mm]

### 1B20

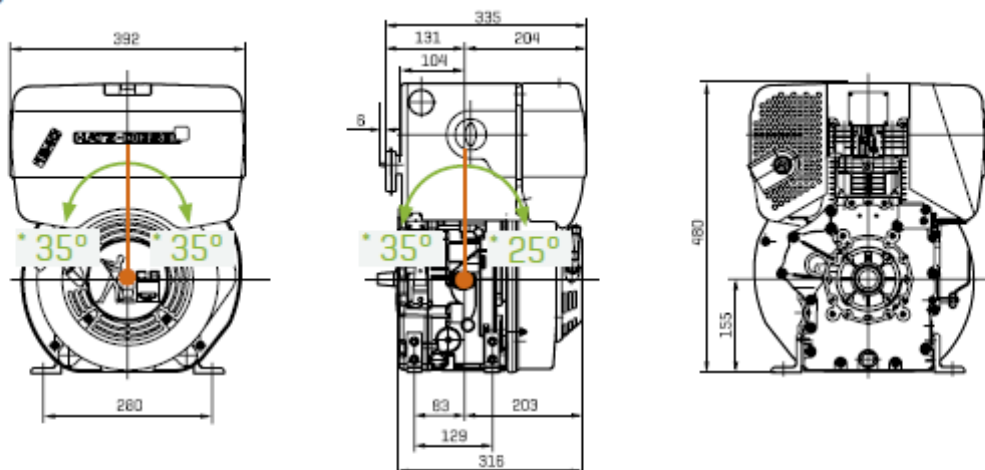


### 1B30



### 1B40

### 1B50



Ancho de dispersión condicionado por la tolerancia en el caso de unas dimensiones máximas  $\pm 3$  mm.

Encontrará los planos con detalles y medidas en formato PDF y DXF en [www.hatz-diesel.com](http://www.hatz-diesel.com).

\* Inclinación continua máx. permitida

Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG  
Ernst-Hatz-Str. 16  
94099 Ruhstorf a. d. Rott  
Alemania  
Tel. +49 8531 319-0  
marketing@hatz-diesel.de  
www.hatz-diesel.com



**CREATING POWER SOLUTIONS.**

70038378 ES 09.18 Impreso en Alemania  
Nos reservamos el derecho a introducir modificaciones relacionadas con el avance técnico.

## 1.2. Catálogo del banco de pruebas modular para motores GUNT CT-159



### CT 159

Banco de pruebas modular para motores de un cilindro, 3kW



#### Contenido didáctico/ensayos

- junto con la unidad de carga HM 365 y un motor (CT 150 a CT 153)
  - ▶ registrar curvas de par y potencia
  - ▶ determinar el consumo específico de combustible
  - ▶ determinar el rendimiento y el valor lambda (relación aire-combustible)
  - ▶ determinar la pérdida por fricción del motor (en funcionamiento de remolque)

#### Descripción

- instalación de un banco de pruebas completo junto con la unidad universal de accionamiento y frenado HM 365 y un motor
- banco de pruebas para motores de combustión interna de un cilindro hasta 3kW
- unidad universal de accionamiento y frenado HM 365 como unidad de carga, utilizable también como motor de arranque
- componente de la GUNT-FEMLine

Con este banco de pruebas se mide la potencia de motores de combustión interna de hasta 3kW. El banco de pruebas completo consta de tres elementos principales: CT 159 para el alojamiento del motor y para el mando, la unidad universal de accionamiento y frenado HM 365 como unidad de carga y un motor opcional: motor diésel de cuatro tiempos (CT 151), motor de gasolina de dos tiempos (CT 153), así como dos

motores de gasolina de cuatro tiempos (CT 150, CT 152, motor con compresión variable).

La función principal de CT 159 es el alojamiento del motor, su abastecimiento de combustible y aire y la adquisición y la indicación de datos de medición relevantes. El motor se monta sobre un fundamento aislado contra las vibraciones y se conecta a la unidad HM 365 a través de una transmisión por correa.

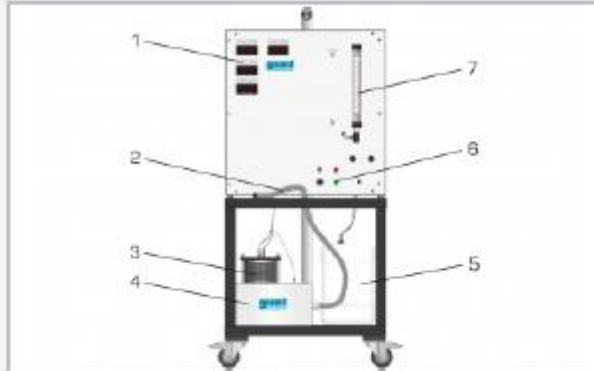
La unidad HM 365 se utiliza en un principio para el arranque del motor. En cuanto empieza a funcionar el motor, la unidad HM 365 funciona como freno para la aplicación de carga al motor de combustión interna.

En la parte inferior del bastidor móvil hay depósitos de combustible y un depósito para estabilización del aire de admisión.

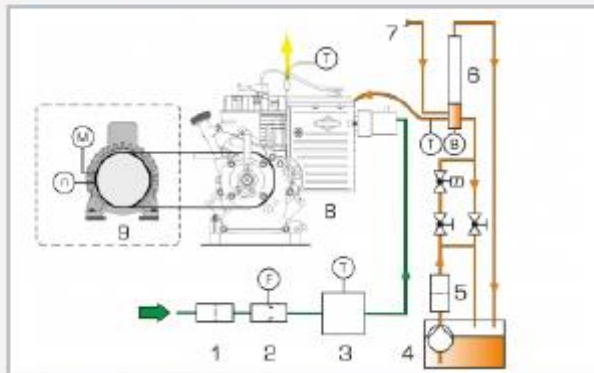
El armario de distribución amortiguado contra vibraciones contiene indicaciones digitales para las temperaturas (una pantalla para gas de escape, combustible y aire de aspiración, respectivamente) y el consumo de aire. El número de revoluciones y el par se ajustan y visualizan en el HM 365. Todas las señales de medición están disponibles en forma eléctrica y se pueden transferir a un PC conectado con el HM 365. En el PC se almacenan y procesan mediante el software para la adquisición de datos. La transferencia al PC se realiza a través de una interfaz USB.

## CT 159

### Banco de pruebas modular para motores de un cilindro, 3kW



1 elementos de indicación, 2 manguera de aire, 3 filtro de aire, 4 depósito de estabilización, 5 depósito de combustible con bomba, 6 conexiones y elementos de mando, 7 tubo de medición para consumo de combustible



1 filtro de aire, 2 placa orificio, 3 depósito de estabilización, 4 depósito de combustible con bomba, 5 filtro de combustible, 6 tubo de medición para consumo de combustible, 7 retorno diésel, B motor (CT 150 o CT 153), B HM 365, B consumo de combustible, T temperatura, F caudal volumétrico, n número de revoluciones, M par, nerenje combustible, verde: aire de aspiración, amarillo: gas de escape



Montaje experimental completo con el HM 365, el CT 159 y el CT 151

#### Especificación

- [1] banco de pruebas para montaje de motores de un cilindro preparados (dos tiempos y cuatro tiempos) con una potencia máxima de 3kW
- [2] arranque del motor mediante HM 365
- [3] HM 365 como freno para generación de la carga del motor
- [4] transmisión de fuerza del motor a la unidad de carga a través de transmisión por correa trapezoidal
- [5] ajuste continuo del número de revoluciones y del par a través del HM 365
- [6] armario de distribución aislado contra vibraciones para indicación y mando
- [7] tubo de medición con escala y sensor de presión para la medición manual y electrónica del consumo de combustible
- [8] medición e indicación de consumo de aire, temperatura ambiente y temperatura del combustible
- [9] indicación de los valores de medición del motor para la temperatura del gas de escape
- [10] depósito de estabilización para el aire de aspiración
- [11] 3 depósitos de reserva para combustibles diversos
- [12] software GUNT para la adquisición de datos a través de USB en Windows 7, 8.1, 10

#### Datos técnicos

3 depósitos de combustible: cada uno de 5L

Rangos de medición

- temperatura:
  - ▶ 0...100°C (ambiente)
  - ▶ 0...100°C (combustible)
  - ▶ 0...1000°C (gas de escape)
- consumo de aire: 30...333L/min
- consumo de combustible: 0...50cm<sup>3</sup>/min

230V, 50Hz, 1 fase

230V, 60Hz, 1 fase; 120V, 60Hz, 1 fase

UL/CSA opcional

LxAnxA: 900x900x1900mm

Peso: aprox. 135kg

#### Necesario para el funcionamiento

evacuación de gas de escape, ventilación

PC con Windows recomendado

#### Volumen de suministro

- 1 banco de pruebas (sin motor y unidad de carga)
- 1 juego de herramientas
- 1 juego de accesorios
- 1 CD con software GUNT + cable USB
- 1 material didáctico





## CT 159

### Banco de pruebas modular para motores de un cilindro, 3kW

#### Accesorios necesarios

Unidad de carga		
070.36500	HM 365	Unidad universal de accionamiento y frenado
Motores		
063.15000	CT 150	Motor de gasolina de cuatro tiempos para CT 159
o		
063.15100	CT 151	Motor diésel de cuatro tiempos para CT 159
o		
063.15200	CT 152	Motor de gasolina de cuatro tiempos con compresión variable para CT 159
o		
063.15300	CT 153	Motor de gasolina de dos tiempos para CT 159

#### Accesorios opcionales

Sistema de indicación		
063.15901	CT 159.01	Sistema de indicación electrónica para CT 159
con		
063.15903	CT 159.03	Sensor de presión y transmisor de PMS para CT 150 / CT 152
o		
063.15904	CT 159.04	Sensor de presión y transmisor de PMS para CT 151
o		
063.15905	CT 159.05	Sensor de presión y transmisor de PMS para CT 153
Análisis de gases de escape		
063.15902	CT 159.02	Analizador de gases de escape

### 1.3. Catálogo de la unidad de accionamiento y frenado GUNT HM 365



## HM 365 Unidad universal de accionamiento y frenado



#### Contenido didáctico/ensayos

- motor asíncrono como accionamiento o freno en combinación con uno de los accesorios
  - ▶ medición del par
  - ▶ medición del número de revoluciones

#### Descripción

- módulo básico de la GUNT- FEM-Line
- motor asíncrono con convertidor de frecuencia y ajusta preciso del par motor o par de frenado
- conexión de la unidad HM 365 a la máquina motriz o generatriz a través de transmisión por correa trapezoidal
- montaje de un banco de pruebas completo con gran variedad de accesorios

La HM 365 es el módulo básico de la serie de equipos FEMLine que permite realizar estudios y experimentos en las máquinas fluidomecánicas. Esta serie de equipos abarca cinco cursos sobre bombas de agua y de aceite, turbinas y tecnología de motores e instalaciones.

Un montaje experimental completo incluye el módulo básico HM 365, la máquina fluidomecánica que se va a estudiar

y, en caso necesario, una unidad de alimentación o un banco de pruebas. Para el montaje, la máquina fluidomecánica del estudio se conecta al módulo básico HM 365 a través de transmisión por correa. La HM 365 y el banco de ensayos se unen mecánicamente a los accesorios mediante cerrojos.

La función principal de la unidad HM 365 consiste en facilitar la potencia de accionamiento o de frenado necesaria para el estudio de la máquina motriz o generatriz seleccionada. Esta potencia se genera a través de un motor asíncrono refrigerado por aire con convertidor de frecuencia. El motor asíncrono funciona como generador o como motor según sea necesario. Cuando actúa como generador, frena la máquina fluidomecánica, en este caso motores o turbinas, y desvía la energía. Cuando actúa como motor, acciona la máquina fluidomecánica que se va a estudiar, como es

el caso de las bombas o compresores.

La energía generada durante el frenado en el modo de generador se convierte en calor en una resistencia de carga. El par motor o el par de frenado se puede ajustar de manera precisa y se mide a través de un sensor de fuerza. Para ello, el motor asíncrono está suspendido de manera pendular. Para tensar la correa trapezoidal, el motor puede desplazarse.

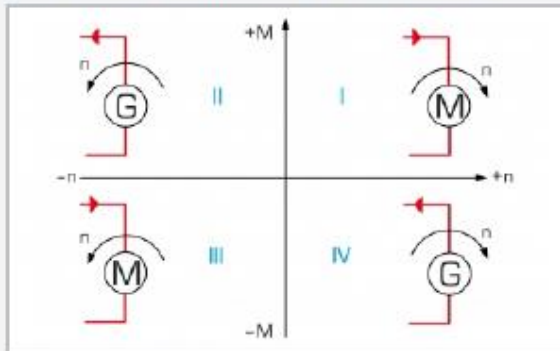
La unidad HM 365 muestra el número de revoluciones y el par en los indicadores digitales. El intercambio de datos entre el módulo básico y los accesorios se realiza a través de un cable de datos. Los valores de medición pueden transmitirse directamente a un ordenador mediante la conexión USB. El software de evaluación se ha diseñado específicamente para el accesorio correspondiente y se suministra con él.



## HM 365 Unidad universal de accionamiento y frenado



1 elementos de indicación y mando, 2 husillo de elemento sensor para la correa trapezoidal, 3 resistencia de carga, 4 tornillo, 5 palanca de bloqueo del elemento sensor, 6 sepe de mantenimiento transparente, 7 cubierta protectora para correas trapezoidales



Representación del modo de 4 cuadrantes en el diagrama de per-número de rev:  
I modo de motor, marcha a la derecha (propulsar), II modo de generador, marcha a la izquierda (frenar), III modo de motor, marcha a la izquierda (propulsar), IV modo de generador, marcha a la derecha (frenar); líneas rojas: flujo de energía, M por, n número de rev.



Ejemplo de montaje experimental completo: bomba axial HM 365.45 conectada a la HM 365 Unidad Universal de Accionamiento y Frenado

### Especificación

- [1] unidad universal de accionamiento y frenado para estudiar distintas máquinas motrices y generatrices
- [2] el motor asincrónico con convertidor de frecuencia permite el funcionamiento de 4 cuadrantes: modo de generador o de motor
- [3] motor asincrónico suspendido de manera pendular, medición del par a través de brazo de palanca y sensor de fuerza
- [4] sensor óptico para registrar el número de revoluciones
- [5] intercambio de datos entre el módulo básico y los accesorios a través de un cable de datos
- [6] valores de medición del número de revoluciones y el par en el indicador digital del equipo

### Datos técnicos

Motor asincrónico con convertidor de frecuencia

- potencia: 2200W
- número de revoluciones máx.: aprox. 3000min<sup>-1</sup>
- par máx.: aprox. 12Nm

Transmisión por correa trapezoidal

- longitud de la correa trapezoidal: 1157mm, 1180mm, 1250mm
- tipo de correa trapezoidal: SPA
- diámetro de la polea de correa: 125mm

Resistencia de carga: 72Ω, 2400W

Rangos de medición

- par: ±15Nm
- número de revoluciones: 0...5000min<sup>-1</sup>

400V, 50Hz, 3 fases

400V, 60Hz, 3 fases

230V, 60Hz, 3 fases

UL/CSA opcional

LxAnxAI: 1000x800x1250mm

Peso: aprox. 125kg

### Volumen de suministro

- 1 módulo básico
- 1 juego de accesorios
- 1 manual



## HM 365

### Unidad universal de accionamiento y frenado

#### Accesorios opcionales

##### Curso sobre bombas de agua

070.36545	HM 365.45	Bomba axial
070.36510	HM 365.10	Unidad de alimentación para bombas de agua
070.36511	HM 365.11	Bomba centrífuga, diseño estándar
070.36512	HM 365.12	Bomba centrífuga, autocebante
070.36513	HM 365.13	Bomba centrífuga, multietapa
070.36514	HM 365.14	Bombas centrífugas, conexión en serie y en paralelo
070.36515	HM 365.15	Bomba periférica
070.36516	HM 365.16	Bomba de émbolo rotativo
070.36517	HM 365.17	Bomba de émbolo alternativo
070.36518	HM 365.18	Bomba de engranajes
070.36519	HM 365.19	Bomba de paletas

##### Curso sobre bombas de aceite

070.36520	HM 365.20	Unidad de alimentación para bombas de aceite
070.36521	HM 365.21	Bomba de husillo
070.36522	HM 365.22	Bomba de engranajes externos
070.36523	HM 365.23	Bomba de paletas
070.36524	HM 365.24	Bomba de engranajes internos

##### Curso sobre turbinas

070.36532	HM 365.32	Unidad de alimentación para turbinas
070.36531	HM 365.31	Turbina Pelton y turbina Francis

##### Curso sobre motores de combustión interna

063.15900	CT 159	Banco de pruebas modular para motores de un cilindro, 2,2kW
063.15000	CT 150	Motor de gasolina de cuatro tiempos para CT 159
063.15100	CT 151	Motor diésel de cuatro tiempos para CT 159
063.15200	CT 152	Motor de gasolina de cuatro tiempos con compresión variable para CT 159
063.15300	CT 153	Motor de gasolina de dos tiempos para CT 159

##### Curso sobre ingeniería de instalaciones

061.16500	ET 165	Instalación frigorífica con compresor abierto
061.51300	ET 513	Compresor de émbolo de una etapa
061.81300	ET 813	Máquina de vapor de dos cilindros



**Universidad  
de La Laguna**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

*Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica*

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

Análisis y modelado de motor de combustión interna alternativo mediante software específico y validación experimental en banco de ensayos.

**PRESUPUESTO**

Diego Jesús Galván Febles



# ÍNDICE

PRESUPUESTO.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. COSTE DE LA MANO DE OBRA.....	1
3. COSTE DE LA MAQUINARIA UTILIZADA.....	2
4. COSTE DEL EQUIPAMIENTO INFORMÁTICO Y SOFTWARE.....	2
5. PRESUPUESTO TOTAL DEL ESTUDIO.....	3





# PRESUPUESTO

## 1. INTRODUCCIÓN

En el documento de presupuesto se pretende cuantificar el coste económico de los recursos utilizados para la realización del Trabajo de Fin de Grado. En la elaboración del presupuesto se computarán las horas de mano de obra empleadas, los recursos materiales y recursos informáticos requeridos. Por otra parte, no se incluye el precio de la instalación en el que se realizó el ensayo experimental, debido a que estos costes son amortizados en múltiples proyectos del Área de Máquinas y Motores Térmicos del Departamento de Ingeniería Industrial.

## 2. COSTE DE LA MANO DE OBRA

En la confección del presupuesto se considerado que el trabajo es realizado por un Ingeniero Mecánico recién graduado, el cual se estima que actualmente tiene unos honorarios en el mercado laboral de 20 €/h.

La estimación del tiempo empleado para la realización del estudio es de 300 horas siguiendo el criterio descrito en la guía docente para el Trabajo Final de Grado, equivalente a 12 créditos ECTS.

Adicionalmente se han involucrado en este trabajo dos profesores de la Universidad de La Laguna, que intervienen como tutores del proyecto. El tiempo total empleado por el apoyo y asesoramiento de los dos tutores es de 60 horas, el cual tienen un coste por honorarios de Ingenieros Doctorados de 50 €/h.

En la siguiente tabla se realiza el cálculo del coste económico relacionado con la mano de obra:

Recurso	Unidades [h]	Precio unitario [€/h]	Importe [€]
Ingeniero doctor	60	50	3000
Ingeniero técnico	300	20	6000
		<b>Total</b>	<b>9000</b>

Tabla 65: Presupuesto de los costes por mano de obra

### 3. COSTE DE LA MAQUINARIA UTILIZADA

Para la estimación del presupuesto relacionado al uso del motor y los equipos de accionamiento y medición en el ensayo experimental se realizará del cálculo de los costes en función de la amortización total de la maquinaria utilizada en el Trabajo Final de Grado.

En la siguiente tabla se realiza el cálculo del coste económico relacionado con la maquinaria utilizada:

Artículo	Concepto	Coste de equipo [€]	Periodo de amortización	Periodo amortizado [días]	Coste diario amortización [€]	Importe [€]
CT 100.22	Motor de gasoil de 4 tiempos	4001,55	2 años	3	5,5	16,5
CT 159	Módulo básico para ensayos de MCIA	11795,00	2 años	3	16,8	50,4
HM 365	Unidad universal de accionamiento y frenado	17094,00	2 años	3	23,4	70,2
					<b>Total</b>	<b>137,1</b>

Tabla 66: Presupuesto por los costes de la maquinaria utilizada

### 4. COSTE DEL EQUIPAMIENTO INFORMÁTICO Y SOFTWARE

Para la realización del trabajo, fue necesario disponer de un ordenador portátil, además de utilizar software específico para la realización del modelado y el posterior tratamiento de datos y redacción de los documentos del estudio.

En la siguiente tabla se realiza el cálculo del coste económico generado por el equipo informático y el software.

Concepto	Coste de equipo [€]	Periodo de amortización	Periodo amortizado [meses]	Coste mensual amortización [€]	Importe [€]
Ordenador portátil ASUS F550C	571,00	1 año	5	47,6	237,9
Licencia de software OpenWAM	0,00	1 año	5	0,0	0,0
Licencia de software Excel	80,00	1 año	5	6,7	33,3
				<b>Total</b>	<b>271,25</b>

Tabla 67: Presupuesto por el equipamiento informático y el software utilizado

## 5. PRESUPUESTO TOTAL DEL ESTUDIO

En este apartado se muestra la tabla que contiene el resumen del presupuesto total del trabajo realizado, en el que se añade adicionalmente los gastos generales, el beneficio industrial y el IGIC.

Descripción	Importe [€]
Coste de la mano de obra	9000
Coste de la maquinaria utilizada	137
Coste del equipamiento informático y software	271
	9408
Gastos generales (13%)	1223
Beneficio Industrial (6%)	565
	11196
IGIC (7%)	784
<b>TOTAL</b>	<b>11980</b>

*Tabla 68: Presupuesto total del estudio realizado*

Por lo tanto, el coste total de este Trabajo Final de Grado es de **ONCE MIL NOVECIENTOS OCHENTA EUROS**.

